(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7614979号
(P7614979)

(45)発行日　令和7年1月16日(2025.1.16)

(24)登録日　令和7年1月7日(2025.1.7)

(51)国際特許分類		FI		
G21C 17/06 (2006.01)		G21C	17/06	070
G21C 19/40 (2006.01)		G21C	19/40	100
G21C 17/12 (2006.01)		G21C	17/12	100
G01T 3/00 (2006.01)		G01T	3/00	D

請求項の数　12　（全14頁）

(21)出願番号　特願2021-136299(P2021-136299)
(22)出願日　令和3年8月24日(2021.8.24)
(65)公開番号　特開2023-30895(P2023-30895A)
(43)公開日　令和5年3月8日(2023.3.8)
審査請求日　令和6年3月5日(2024.3.5)

(73)特許権者　000003078
株式会社東芝
東京都港区芝浦一丁目１番１号
(73)特許権者　317015294
東芝エネルギーシステムズ株式会社
神奈川県川崎市幸区堀川町７２番地３４
(74)代理人　110001092
弁理士法人サクラ国際特許事務所
(72)発明者　吉岡 研一
神奈川県川崎市幸区堀川町７２番地３４
東芝エネルギーシステムズ株式会社内
(72)発明者　杉田 宰
神奈川県川崎市幸区堀川町７２番地３４
東芝エネルギーシステムズ株式会社内
(72)発明者　小田 直敬
最終頁に続く

(54)【発明の名称】　中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法

(57)【特許請求の範囲】
【請求項１】
再処理施設における再処理工程においてプルトニウムからの中性子計数率を測定する中性子計数率測定手段と、
　前記中性子計数率からプルトニウム濃度を算出し、当該プルトニウム濃度が設定値を超えた場合に警報を発生するプルトニウム濃度監視手段と、
このプルトニウム濃度監視手段において発生した前記警報の発生後、前記中性子計数率の時系列データからペリオドを算出し、当該ペリオドが設定値より短い場合に異常ありと判断して工程を停止するペリオド監視手段と、
前記ペリオド監視手段において前記ペリオドが設定値以下の場合において、前記中性子計数率の時系列データから、ある測定時間幅に対する複数の前記中性子計数率のデータの分散と平均の比である分散対平均比を算出し、当該分散対平均比が設定値を超えた場合に異常ありと判断して工程を停止する分散対平均比監視手段と、
前記分散対平均比監視手段によって算出された前記分散対平均比が設定値以下の場合は、原子炉雑音法に基づき、即発中性子減衰定数αを算出し、当該即発中性子減衰定数αと、予め解析で求めておいた遅発中性子割合βと、即発中性子寿命Ｌとを用いて中性子増倍率を算出して未臨界度を求め、異常を検知する手段と、
　を具備することを特徴とする中性子モニタ装置。
【請求項２】
　前記時系列データにおいて、時間間隔ｔｉ～ｔｉ＋Δｔの中性子カウントＭ（ｉ）の、

ｉｍａｘ個のデータから、
【数１】

$$\overline{\mathrm{M}} = \frac{\sum_{i=1}^{imax} M(i)}{imax}$$

により前記平均を算出し、
【数２】

$$\sigma_M^2 = \overline{M^2} - (\overline{M})^2 = \frac{\sum_{i=1}^{imax} M(i)^2}{imax} - (\overline{M})^2$$

により前記分散を算出し、
【数３】

$$\frac{\sigma_M^2}{\overline{M}} = \frac{\overline{M^2} - (\overline{M})^2}{\overline{M}} \equiv 1 + \mathrm{Y}$$

により前記分散対平均比を算出し、
　前記Δｔを変化させた時のＹをプロットし、定数ＹｓａｔとＹ＝Ｙｓａｔ[１－{１－ｅｘｐ（－αΔｔ）}／αΔｔ]により、フィッティングによって前記即発中性子減衰定数αを算出する
　ことを特徴とする請求項１に記載の中性子モニタ装置。
【請求項３】
　前記時系列データから逆動特性法により、前記中性子増倍率を算出する手段をさらに具備することを特徴とする請求項１又は２に記載の中性子モニタ装置。
【請求項４】
　前記ペリオドの算出時に、過去の前記中性子計数率を用いたフィルター処理を行うことを特徴とする請求項１乃至３の何れか１項に記載の中性子モニタ装置。
【請求項５】
　前記分散として、２つの中性子検出器の共分散をとることを特徴とする請求項１に記載の中性子モニタ装置。
【請求項６】
　前記分散の算出に、ＭＳＶ（ｍｅａｎ　ｓｑｕａｒｅ　ｖｏｌｔａｇｅ）モードを用いることを特徴とする請求項１に記載の中性子モニタ装置。
【請求項７】
再処理施設における再処理工程においてプルトニウムからの中性子計数率を測定する中性子計数率測定ステップと、
　前記中性子計数率からプルトニウム濃度を算出し、当該プルトニウム濃度が設定値を超えた場合に警報を発生するプルトニウム濃度監視ステップと、
このプルトニウム濃度監視ステップにおいて発生した前記警報の発生後、前記中性子計数率の時系列データからペリオドを算出し、当該ペリオドが設定値を超えた場合に異常ありと判断して工程を停止するペリオド監視ステップと、
前記ペリオド監視ステップにおいて前記ペリオドが設定値以下の場合において、前記中性子計数率の時系列データからある測定時間幅に対する複数の前記中性子計数率のデータから分散と平均の比である分散対平均比を算出し、当該分散対平均比が設定値を超えた場合に異常ありと判断して工程を停止する分散対平均比監視ステップと、
前記分散対平均比監視ステップによって算出された前記分散対平均比が設定値以下の場合

は、原子炉雑音法に基づき、即発中性子減衰定数αを算出し、当該即発中性子減衰定数αと、予め解析で求めておいた遅発中性子割合βと、即発中性子寿命Ｌとを用いて中性子増倍率を算出して未臨界度を求め、異常を検知するステップと、
を具備することを特徴とする使用済み核燃料の臨界管理方法。
【請求項８】
前記時系列データにおいて、時間間隔ｔｉ～ｔｉ＋Δｔの中性子カウントＭ（ｉ）の、ｉｍａｘ個のデータから、
【数４】

$$\overline{\mathrm{M}} = \frac{\sum_{i=1}^{imax} M(i)}{imax}$$

により前記平均を算出し、
【数５】

$$\sigma_M^2 = \overline{M^2} - (\overline{M})^2 = \frac{\sum_{i=1}^{imax} M(i)^2}{imax} - (\overline{M})^2$$

により前記分散を算出し、
【数６】

$$\frac{\sigma_M^2}{\overline{M}} = \frac{\overline{M^2} - (\overline{M})^2}{\overline{M}} \equiv 1 + \mathrm{Y}$$

により前記分散対平均比を算出し、
前記Δｔを変化させた時のＹをプロットし、定数ＹｓａｔとＹ＝Ｙｓａｔ[１－{１－ｅｘｐ（－αΔｔ）}／αΔｔ]により、フィッティングによって前記即発中性子減衰定数αを算出する
ことを特徴とする請求項７に記載の使用済み核燃料の臨界管理方法。
【請求項９】
前記時系列データから逆動特性法により、前記中性子増倍率を算出するステップをさらに具備することを特徴とする請求項７又は８に記載の使用済み核燃料の臨界管理方法。
【請求項１０】
前記ペリオドの算出時に、過去の前記中性子計数率を用いたフィルター処理を行うことを特徴とする請求項７乃至９の何れか１項に記載の使用済み核燃料の臨界管理方法。
【請求項１１】
前記分散として、２つの中性子検出器の共分散をとることを特徴とする請求項７に記載の使用済み核燃料の臨界管理方法。
【請求項１２】
前記分散の算出に、ＭＳＶ（ｍｅａｎ　ｓｑｕａｒｅ　ｖｏｌｔａｇｅ）モードを用いることを特徴とする請求項７に記載の使用済み核燃料の臨界管理方法。
【発明の詳細な説明】
【技術分野】
【０００１】
本発明の実施形態は、中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法に関する。
【背景技術】
【０００２】

一般に原子力発電プラントで使用された使用済み核燃料は、所定期間冷却された後に輸送容器に収納されて、中間貯蔵施設または再処理施設へ運ばれる。この中間貯蔵施設に送られた使用済み核燃料は、数１０年の間さらに冷却された後に永久処分されるか再処理施設へ送られる。

【０００３】

再処理施設では、輸送容器から使用済み核燃料を取り出して、発電プラントからの輸送データと実物との照合、あるいは燃焼度などの非破壊検査により、使用済み核燃料が正しく輸送されたことを確認する。そして、この使用済み核燃料は、適当な期間貯蔵された後に、所定のスケジュールに従って再処理される。

【０００４】

再処理施設における再処理工程については、先ず、被覆管の内部に核燃料ペレットを充填した棒状の使用済燃料棒は、３～５ｃｍ程度の長さに剪断され、沸騰硝酸にて溶解されて燃料溶液（水相）となる。しかし、被覆管は溶解されずに溶解残査（ハル）として処理される。

【０００５】

燃料溶液は、臨界安全性確保の基準に沿って濃度調節が行われ、その後に核分裂生成物や、超プルトニウム元素の除去が行われる。次いで残留したウラン（Ｕ）及びプルトニウム（Ｐｕ）がＴＢＰ（リン酸トリブチル）有機相で互いに分離精製される。これらの工程は、多段のプロセスに亘って行われるが、各段においても多くの処理槽や処理搭が存在する。

【０００６】

ところで、上記再処理施設の再処理工程において、プルトニウムやウランなどの核燃料物質を常時取り扱う装置においては、中性子実効増倍率が１未満となるようにして、臨界にならないように臨界安全設計を行っている。すなわち、これらの各装置においては、供給される溶液の酸性度、その中のプルトニウム及びウランなどの核燃料物質濃度、さらに硝酸水溶液、有機溶媒中のプルトニウム、ウラン成分濃度の異常時も考慮し、変動し得る変化に対しても常に未臨界になるように形状寸法や、容積などを制限した設計をしている。

【０００７】

一方、上記各機器に附属するプルトニウム濃度による臨界管理を行う機器は、通常の運転時にはプルトニウム量は少量であるか、または、ほとんど流れ込まないために、処理効率を考慮して機器の形状寸法、容積の制限を緩めた設計としている。

【０００８】

しかし、万一何らかの原因によってプルトニウムが漏洩して、臨界となる可能性も考えられることから、中性子検出器やγ線検出器を各所に設置することにより、放射線レベルの上昇を検出すると共に警報を発して、運転員や各所要員に危険を知らせたり、運転員の判断によって再処理工程の一部を停止するなどの措置が採られている。

【０００９】

再処理工程における臨界管理上で、特に重要な核種はプルトニウムであり、上記のように従来は、プルトニウムからの中性子発生数のレベルを測定して未臨界となるように管理をしているが、プルトニウムからの中性子発生数とプルトニウムの濃度は必ずしも比例するものではない。これはプルトニウムからの中性子発生数が、プルトニウム同位体組成比によって大きく変化し、また、プルトニウムの同位体組成比は、再処理燃料の初期ウラン濃縮度や照射履歴によっても大きく異なるためである。

【００１０】

また、使用済み混合酸化物（ＭＯＸ）燃料の再処理を行う場合は、プルトニウム取扱量が増え、さらに、プルトニウム同位体組成の幅が大きくなる可能性もある。ＭＯＸ燃料の場合は、ウランではなくプルトニウムが核分裂性物質である。プルトニウムには、核分裂性の同位体であるＰｕ２３９やＰｕ２４１の他に核分裂を起こしにくいＰｕ２４０やＰｕ２４２も含まれる。ＭＯＸ燃料の新燃料中のプルトニウム同位体組成にはある程度ばらつきがある。これは、使用済みウラン燃料の運転履歴により、生成されるプルトニウム同位

体組成がばらつくことによる。例えば、より高燃焼度のウラン燃料は、低燃焼度のウラン燃料より全Ｐｕ同位体中のＰｕ２４０やＰｕ２４２の割合が大きいことが知られている。また、ＭＯＸ燃料の製造時は、反応度のばらつきを抑えるために、Ｐｕ中の核分裂性同位体（Ｐｕ２３９とＰｕ２４１）を保存するように燃料中に全プルトニウム同位体が含まれる量（プルトニウム初期富化度）が調整される。これは「反応度補償設計」と呼ばれる。この結果、Ｐｕ２４０やＰｕ２４２の核分裂性でないＰｕの割合のばらつきはさらに増加する。

【００１１】

また、使用済み燃料中にはキュリウム等のプルトニウムより多くの中性子を発生する元素が少量であるが存在し、通常、これらの元素は前工程で取り除かれるが、何らかの工程の異常により本工程に混入した場合、中性子計数率の上昇が生じ、誤警報を発生する可能性がある。上記キュリウム等の混入も、ＭＯＸ燃料においては含有率が高く、誤警報のリスクが増加する可能性がある。

【００１２】

このために、中性子発生数より未臨界の程度（未臨界度）を一意に決定することはできず、一般に臨界安全管理を行う上では最も保守的な値を採用するため、最も大きなマージンをとらざるを得ない。

【００１３】

その結果、臨界警報設定値に相当する中性子発生率のレベルは、最も安全側となるレベル、すなわち、考え得る中性子発生率の最低値に設定しなければならなかった。この設定によると、場合によっては十分未臨界である状態でも、中性子発生率が警報レベルに達してしまうことから、その都度再処理施設の運転を停止するということになり、再処理施設の稼動効率が低下する可能性があった。

【００１４】

従来の方法は、プルトニウム同位体組成を何らかの方法で推定し、プルトニウム濃度と中性子数の関係の精度を向上させるものであったが、追加設備としての計測装置や分析装置が必要であることや、キュリウム等の混入に対する中性子計数率の変動には、対応が困難等の課題があった。

【００１５】

未臨界度の指標としては、中性子実効増倍率ｋが用いられる。ｋは中性子生成と中性子消滅の比であり、ｋ＝１で臨界、ｋ＜１の時、未臨界である。未臨界度を表す際に、ドル単位が用いられることがある。遅発中性子生成割合βを用いて、ｋ／β　がドルと呼ばれる。実際に燃料が臨界となった場合でも、即時に爆発的なエネルギーが放出されるわけではない。ｋがβを超えたときに、“即発臨界”と呼ばれる制御不能の状態になる。この時に1ドルの反応度が投入されたとされる。1ドルの１／１００としてセントが使われるときもある。未臨界の際はｋ＜１であるが、ｋが１から離れて小さい時に未臨界度が“深い”、ｋが１に近い時、未臨界度が“浅い”ともいう。

【００１６】

現在知られている未臨界度測定技術としては、
（１）負のペリオド法、（２）制御棒落下法、（３）補償法、（４）中性子源増倍法、（５）逆動特性法、（６）炉雑音解析法、（７）パルス中性子源法、
が挙げられる。これらの方法の内、（１）、（２）、（３）の方法は臨界となる原子炉に使用されるものであり、常に未臨界である再処理工程には適さない。また（７）の方法は、原子炉を臨界状態にすることなく、未臨界度の絶対測定が可能であるが、原子炉内に中性子パルスを入射する加速器を必要とする点で、新たな大型の追加設備が必要となり、既存の再処理工程への適用は困難である。このため、（４）～（６）の方法が適している。

【００１７】

（４）の中性子源増倍法は、数十ドル程度の深い未臨界度まで測定可能であるが、既知の未臨界状態での校正が必要である。従来技術で示したプルトニウムからの中性子を測定し、未臨界を監視する技術は、（４）の中性子源増倍法に相当し、通常、校正用中性子源

を用いた校正が定期的に行われる。一方、上述のように、プルトニウム組成変動やキュリウムの混入といった中性子強度の変動による誤警報という課題がある。

【００１８】

また、（５）の逆動特性法、あるいは、（６）の炉雑音解析法がその校正値を与える手段となり得ること、が例えば非特許文献１に報告されている。

【００１９】

（５）の逆動特性法は、未臨界の状態が変動した時に、その時間変化から未臨界度を推定するものであり、例えば特許文献２では、時系列データから中性子源強度を推定し、未臨界度を推定する手法が述べられている。また、臨界に近づくほど感度が高くなるため、急激に臨界に近づいた場合の警報に適している。

【００２０】

また、逆動特性法よりシンプルな方法として、ペリオド監視も同様に臨界に近づいた際の警報に適している。ペリオドは中性子計数率がｅ倍になる時間として定義される。ペリオドから直接未臨界度を算出することは困難であるが、例えばペリオドが１００秒程度より短くなったら警報を出すなどで臨界近接を検知することは可能である。ペリオド監視は原子炉の運転においても適用されているため、実績のある方法である。逆動特性法のような、複雑な時系列データの処理が不要であるため、シンプルな回路構成とすることができる。また、逆動特性法と併用することも可能である。一方、逆動特性法もペリオド法も臨界に近づいた場合や、未臨界度が時間的に変化する場合には適しているが、深い未臨界度や、未臨界度の時間的変化が小さい場合には適用が難しい。

【００２１】

（６）の炉雑音解析法には、（８）ロッシα法、（９）ファインマンα法、（１０）折れ点周波数法、（１１）ミハルゾ法があり、非特許文献１で用いられている炉雑音解析法は（１０）の折れ点周波数法である。

【００２２】

（８）のロッシα法は、原子炉で観測される中性子パルス相互間の時間間隔τの分布がポアソン分布からずれて$e^{-\alpha\tau}$に比例する成分を持つことから即発中性子減衰定数αを得て、即発中性子減衰定数αと中性子増倍率ｋの関係

$$\alpha = \{1-(1-\beta)k\} / L \quad \cdots\cdots (1)$$

より、遅発中性子生成割合β、即発中性子寿命Ｌを与えて中性子増倍率を得るものである（例えば「原子炉物理実験」　コロナ社　参照。）。

【００２３】

（９）のファインマンα法は、一定時間幅内の中性子パルスの計数値Ｍの分散対平均比がポアソン分布の場合の「１」からずれることを利用して、（８）のロッシα法と同様に即発中性子減衰定数αを得るものである（例えば非特許文献２参照。）。

【００２４】

（１０）の折れ点周波数法は、中性子計数率の周波数特性が未臨界状態における原子炉伝達関数で定まり、その折点角周波数が即発中性子減衰定数αに一致することを利用するものである。

【００２５】

このように（８）～（１０）の方法はいずれも即発中性子減衰定数αを求め、式（１）に遅発中性子生成割合β、即発中性子寿命Ｌを与えて中性子増倍率を得るものである。これらに対して、（１１）のミハルゾ法は、中性子増倍率の絶対測定が可能であるが、中性子源Ｃｆ－２５２を内蔵した特殊な中性子検出器を原子炉の炉心や対象とする体系に設置する必要があり、既存の再処理工程に新たな設備導入が必要であり、適用は難しい。

【００２６】

以上の技術はいずれも原子炉の中性子増倍率を測定する目的で開発されたものであるが、特許文献１では原子炉から取り出した使用済み燃料集合体を収納ラック、輸送・貯蔵容器に収納する場合に、（８）のロッシα法あるいは（９）のファインマンα法を適用して臨界安全性を監視する技術が開示されている。

【００２７】
遅発中性子割合βや即発中性子寿命Ｌは、解析で事前に与える。再処理工程の場合、溶解槽などの形状は固定されており、また、溶液と核分裂物質の割合もほぼ一定であることから、βやＬの変化は小さく、解析で与えることによる誤差の影響は小さいと考えられる。
【００２８】
上述した（８）～（１０）の方法は、既存の中性子検出器からの時系列データを処理することで未臨界度を推定できることから、新たな設備導入が不要である。（８）～（１０）の方法の内、深い未臨界度でも適用可能と考えられるのは、（９）のファインマンα法のみであり、再処理工程に適した方法である。
【００２９】
一方、特許文献１にも記載の通り、ファインマンα法は、減衰定数αの導出に、分散と平均から得られる係数Ｙの測定時間に関する分布からフィッティングによる操作が必要であり、フィッティングを行うためには統計精度を向上させるため、数分から数十分の時間が必要であり、時間遅れが生じる。このため、アラームが出た際に即時に異常の判断を行うことが難しい。
【先行技術文献】
【特許文献】
【００３０】
【文献】特開２００５－１０６６１１号公報
【文献】特開２０１４－１３７２５９号公報
【文献】特開平３－２３７３９２号公報
【文献】特許登録第３５２４２０３号公報
【非特許文献】
【００３１】
【文献】米国ＯＲＮＬレポート、ＯＲＮＬ－ＴＭ－３７１６、１９７３．
【文献】京大炉ＫＵＣＡ実験テキスト「中性子相関実験　Ｆｅｙｎｍａｎ－α法」、ｗｗｗ．ｒｒｉ．ｋｙｏｔｏ－ｕ．ａｃ．ｊｐ/ＣＡＤ/Ｉｎｓｅｉ／２００３Ｔｅｘｔ/Ｃｈａｐ４＿７‐２＿ｒ０．ｐｄｆ．
【文献】日本原子力研究所レポート、ＪＡＥＲＩ　１１８７、７５～７８ページ、１９７０．
【発明の概要】
【発明が解決しようとする課題】
【００３２】
本発明は、このような従来の事情を考慮してなされたもので、中性子計数率の変動があった場合に、その原因が未臨界度の変動か、プルトニウムの同位体組成の変動やキュリウム等の妨害核種による中性子発生数の変動かを、時間遅れなく判定することができ、再処理施設の稼動率を向上することのできる中性子モニタ装置及び臨界管理方法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】
【００３３】
実施形態の中性子モニタ装置は、再処理施設における再処理工程においてプルトニウムからの中性子計数率を測定する中性子計数率測定手段と、前記中性子計数率からプルトニウム濃度を算出し、当該プルトニウム濃度が設定値を超えた場合警報を発生するプルトニウム濃度監視手段と、このプルトニウム濃度監視手段において発生した前記警報の発生後、前記中性子計数率の時系列データからペリオドを算出し、当該ペリオドが設定値より短い場合に異常ありと判断して工程を停止するペリオド監視手段と、前記ペリオド監視手段において前記ペリオドが設定値以下の場合において、前記中性子計数率の時系列データから、ある測定時間幅に対する複数の前記中性子計数率のデータの分散と平均の比である分散対平均比を算出し、当該分散対平均比が設定値を超えた場合に異常ありと判断して工程を停止する分散対平均比監視手段と、前記分散対平均比監視手段によって算出された前記

分散対平均比が設定値以下の場合は、原子炉雑音法に基づき、即発中性子減衰定数αを算出し、当該即発中性子減衰定数αと、予め解析で求めておいた遅発中性子割合βと、即発中性子寿命Ｌとを用いて中性子増倍率を算出して未臨界度を求め、異常を検知する手段と、を具備することを特徴とする。

【発明の効果】

【００３４】

実施形態によれば、中性子計数率の変動があった場合に、その原因が未臨界度の変動か、プルトニウムの同位体組成の変動やキュリウム等の妨害核種による中性子発生数の変動かを、時間遅れなく判定することができ、再処理施設の稼動率を向上させることのできる中性子モニタ装置及び臨界管理方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【００３５】

【図１】第１実施形態に係る中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法の構成を模式的に示すブロック図。

【図２】第１実施形態に係る中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法の手順を示すフロー図。

【図３】第２実施形態に係る中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法の構成を模式的に示すブロック図。

【図４】第２実施形態に係る中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法の手順を示すフロー図。

【図５】臨界実験装置で得られた実験結果の一例を示すグラフ。

【発明を実施するための形態】

【００３６】

以下、実施形態に係る中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法を、図面を参照して説明する。

【００３７】

図１、図２は、実施形態に係る中性子モニタ装置及び使用済み核燃料の臨界管理方法を、再処理施設における溶解槽のプルトニウム濃度監視に適用した例の構成を示しており、図１はブロック図、図２はフロー図である。

【００３８】

図１に示すように、溶解槽３には、中性子検出器１と、中性子検出器２の２つの検出器が設けられている。また、実施形態に係る中性子モニタ装置は、中性子計数率測定部１０１、プルトニウム濃度監視部１０２、時系列データ分析部１０３、ペリオド監視部１０４、分散対平均比監視部１０５、ファインマンα監視部１０６、未臨界度算出部１０７を備えている。

【００３９】

通常の工程では、中性子はプルトニウムから発生し、また、プルトニウム組成も一定の範囲に収まっているため、プルトニウム濃度と中性子計数率は比例する。このため、制限したいプルトニウム濃度に対応する中性子計数率を予め設定し、中性子検出器１、中性子検出器２から得られた検出信号から中性子計数率測定部１０１にて中性子計数率を求め（図２のステップ２０１）、プルトニウム濃度監視部１０２にて中性子計数率を設定値と比較して監視する（図２のステップ２０２）。

【００４０】

そして、中性子計数率が設定値以下の場合は異常なしと判断して監視を継続する（図２のステップ２０２のＹｅｓ）。一方、中性子計数率が設定値を超えた場合は（図２のステップ２０２のＮｏ）、警報を発生する（図２のステップ２０３）。

【００４１】

警報発生後、時系列データ分析部１０３にて中性子計数率の時系列データを分析し（図２のステップ２０４）、ペリオド監視部１０４にてペリオド監視を行う。そして、ペリオドを設定値と比較してペリオドが設定値より早い場合は（図２のステップ２０５のＹｅｓ

）、異常ありと判断して工程を停止する（図２のステップ２０６）。

【００４２】

一方、ペリオドが設定値以下の場合は（図２のステップ２０５のＮｏ）、分散対平均比監視部１０５にて分散対平均比を算出し（図２のステップ２０７）、その監視を行う。そして、分散対平均比の値を設定値と比較して分散対平均比が設定値より高い場合は（図２のステップ２０８のＹｅｓ）、異常ありと判断して工程を停止する（図２のステップ２０９）。

【００４３】

一方、分散対平均比が設定値以下の場合は（図２のステップ２０８のＮｏ）、異常がなく、未臨界度の変動がないと判断するが、工程を停止することなく、念のため、測定時間をかけてファインマンα監視部１０６により、ファインマンα法による分析を開始し（図２のステップ２１０）、未臨界度算出部１０７にて未臨界度を算出する（図２のステップ２１１）。

【００４４】

ファインマンαの監視では、後述の図５に示されるように、α値の導出にはＹ値と測定時間間隔（ゲート幅）の精度良い分布が必要であるが、ゲート幅が大きくなった時にＹ値が飽和するＹsatそのものも大きく変化する。Ｙsatは分散対平均比から１を引いたものであり、分散対平均比もまた同様の動きをする。したがって、本実施形態のように、あるゲート幅、例えば０．１秒での、分散対平均比のみを監視しているだけでも異常を検知することができる。この場合、例えば、数十秒程度の計測でも判断が可能であり、時間遅れなく異常を検知できる。

【００４５】

以下に、ファインマンα法の具体的な処理方法を述べる。

放射性崩壊の頻度はポアソン分布に基づいているが、中性子が同時に複数個発生する場合や、核分裂性物質による連鎖反応が生じる場合は、ポアソン分布からずれることが知られている（例えば、非特許文献２参照。）。ポアソン分布からのずれの指標として、分散と平均の比（分散対平均比）が用いられる。ある時間間隔ｔ$_i$～ｔ$_i$＋Δｔの中性子カウントをＭ（ｉ）とし、ｉｍａｘ個のデータがあるとすると、平均、分散、分散／平均比は以下のように表せる。

【００４６】

平均

【数１】

$$\bar{\mathrm{M}} = \frac{\sum_{i=1}^{imax} M(i)}{imax}$$

【００４７】

分散

【数２】

$$\sigma_M^2 = \overline{M^2} - (\bar{M})^2 = \frac{\sum_{i=1}^{imax} M(i)^2}{imax} - (\bar{M})^2$$

【００４８】

分散／平均比

【数３】

$$\frac{\sigma_M^2}{\bar{M}} = \frac{\overline{M^2} - (\bar{M})^2}{\bar{M}} \equiv 1 + \mathrm{Y}$$

【００４９】

Ｙ＝Ｙｓａｔ[１－{１－ｅｘｐ（－αΔｔ）}／αΔｔ]
ここでＹｓａｔは定数である。
【００５０】
Δｔと得られたＹをプロットし、上記の関数でフィッティングすることで即発中性子減衰定数α値を得る。図５のグラフは、臨界実験装置（Ｔｏｓｈｉｂａ Ｃｒｉｔｉｃａｌ Ａｓｓｅｍｂｌｙ：ＮＣＡ）で得られた実験の一例の結果を示しているが、ゲート幅（Δｔ）とＹの関係から即発中性子減衰定数αを得ることができていることがわかる。なお、図中に示される水位は、臨界実験装置の炉心タンクの水位（ｍｍ）を示している。高い水位の方が中性子増倍率が高く、水位１０００は９００より臨界に近い状態である。ゲート幅が上述のΔｔに相当する。なお、定数Ｃもフィッティングにより同時に求めることができる。
【００５１】
予め中性子輸送解析で求めておいた遅発中性子割合βと即発中性子寿命Ｌと、以下に示す前述した関係式（１）を用いて中性子増倍率ｋを得る。
α＝{1－（1－β）ｋ}／Ｌ　（１）
【００５２】
この方法は、中性子計数率の絶対値に依存しないので、キュリウム等の妨害核種の影響やプルトニウム組成変動による中性子計数率の変動に影響されず、中性子増倍率ｋを推定できるという利点がある。
【００５３】
なお、図１では、ファインマンα法による時系列データの分析を行っているが、ロッシα法や折れ点周波数法を用いてもよい。Ｃｆ－２５２中性子源という特殊な中性子検出器が準備できるなら、ミハルゾ法を用いてもよい。
【００５４】
予め通常時に行っておいた未臨界度の推定値と比較し、未臨界度が変動している場合は、プルトニウム濃度そのものの上昇が考えられる。未臨界度に変動がない場合は、妨害核種や想定外のプルトニウム組成の原因が考えられる。
【００５５】
複数の情報を元に分析することで、原因を早期に突き止め、工程中止の判断を行った場合でも、早期の復旧につなげることができる。
【００５６】
なお、時系列データの分析は常時、バックアップとして実行しておき、通常時は工程の異常の有無には使用せず、中性子計数率が異常に上昇した時のみに使用してもよい。
【００５７】
図３、図４は、図１、図２に示した実施形態の変形例（第２実施形態）を示しており、図１、図２に対応する部分には同一の符号が付してある。図３、図４に示す実施形態では、図１、図２に示した実施形態の構成に加えて、逆動特性監視を行う逆動特性監視部１０８と、逆動特性監視の結果に基づいて未臨界度を算出する未臨界度算出部１０９を設けたものである（図４のステップ２１２、ステップ２１３）。逆動特性法によっても未臨界度を算出できるが、未臨界度が深い場合は感度が低い。未臨界度が浅い場合、すなわち中性子増倍率ｋが１に近い場合は、感度が高く、応答も早い。一方、原子炉雑音解析は、計数を蓄積させる必要があるため、数分から数十分の時間が必要となる。したがって、中性子増倍率ｋが１に近いような場合に逆動特性監視による未臨界度算出を行うことが有効である。
【００５８】
また、ペリオドを算出する場合、計数率の変動が大きく、正しい値を算出できない場合がある。その場合は、1次遅れフィルターや移動平均等のフィルター処理を行うことで、時間変動を緩和することができる。
例えば、一次遅れフィルターの場合、以下のような処理を行う。
Ｎ（ｉ）＝（１－ｗ）・ｎ（ｉ）＋ｗ・Ｎ（ｉ－１）

Ｎ（ｉ）：ｉ番目のフィルター処理後の係数率
ｎ（ｉ）：ｉ番目のフィルター処理前の係数率
ｗ：一次遅れのウェイト（０～１）

【００５９】

また、ファインマンα法において、分散の代わりに中性子検出器１と中性子検出器２の共分散を用いてもよい。共分散を用いる原子炉雑音解析は、例えば、「日本原子力学会誌ｖｏｌ．３７，Ｎｏ.６　（１９９５）　共分散法に基づく実効遅発中性子割合の測定」等の文献にも示されている。

【００６０】

原子力発電所の核計装では、γ線バックグラウンドの低減のため、しばしば検出器からの信号の２乗平均をとることがあり、これはＭＳＶ（Ｍｅａｎ　Ｓｑｕｒｅ　Ｖｏｌｔａｇｅ）モードと呼ばれる。この２乗平均は上述の分散と同じ意味である。十分な信号強度がある場合は、分散の代わりにＭＳＶモード信号を用いて、ＭＳＶモード信号の強度と平均信号強度の比をとることで分散対平均比を算出してもよい。

【００６１】

以上、本発明のいくつかの実施形態を説明したが、これらの実施形態は例として掲示したものであり、発明の範囲を限定することは意図していない。これら新規な実施形態は、その他の様々な形態で実施されることが可能であり、発明の要旨を逸脱しない範囲で、種々の省略、置き換え、変更を行うことができる。これら実施形態やその変形は、発明の範囲や要旨に含まれるとともに、特許請求の範囲に記載された発明とその均等の範囲に含まれる。

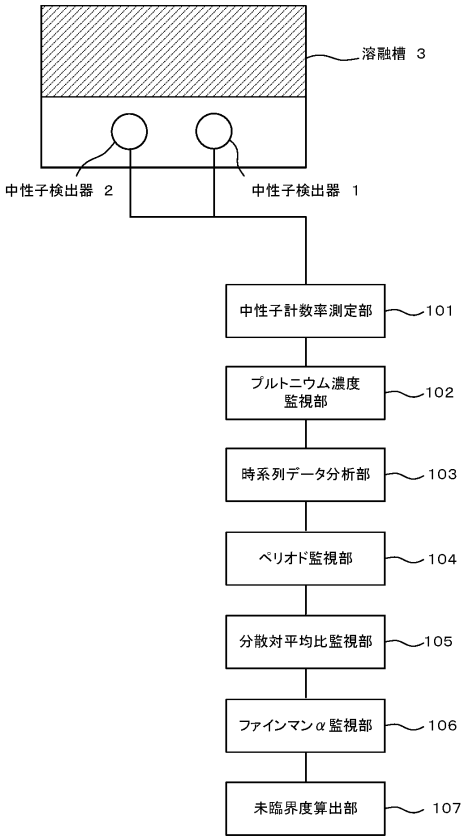
【符号の説明】

【００６２】

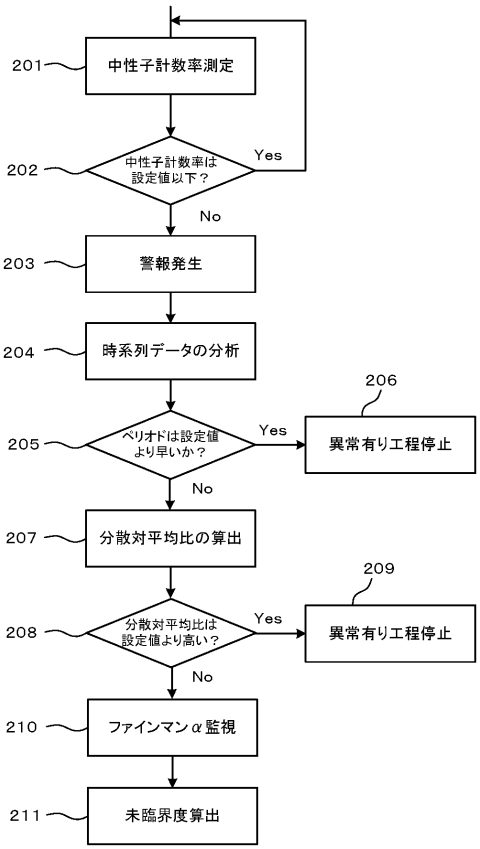
１……中性子検出器、２……中性子検出器、３……溶融槽、１０１……中性子計数率測定部、１０２……プルトニウム濃度監視部、１０３……時系列データ分析部、１０４……ペリオド監視部、１０５……分散対平均比監視部、１０６……ファインマンα監視部、１０７……未臨界度算出部。

【図面】

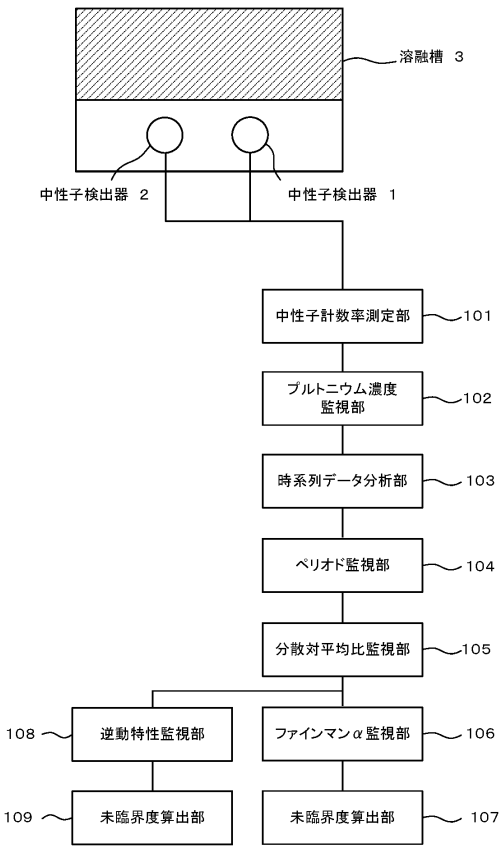
【図１】


溶融槽 3
中性子検出器 2
中性子検出器 1
中性子計数率測定部
101
プルトニウム濃度監視部
102
時系列データ分析部
103
ペリオド監視部
104
分散対平均比監視部
105
ファインマンα監視部
106
未臨界度算出部
107

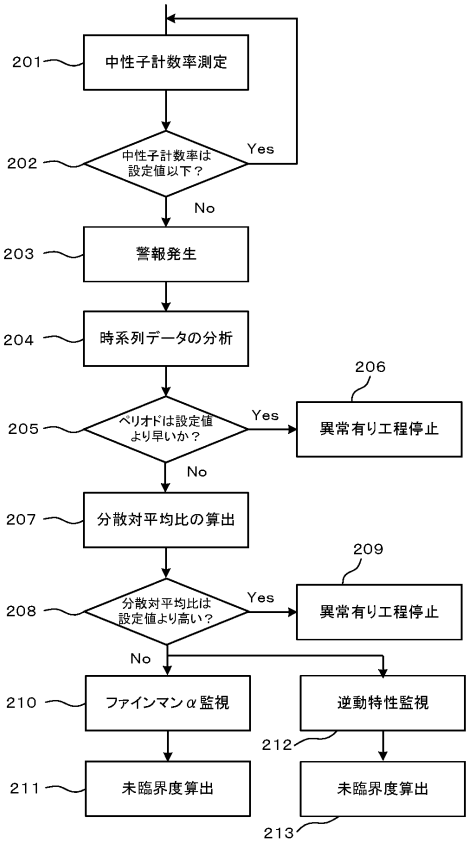
【図２】


201
中性子計数率測定
202
中性子計数率は設定値以下？
Yes
No
203
警報発生
204
時系列データの分析
205
ペリオドは設定値より早いか？
Yes
206
異常有り工程停止
No
207
分散対平均比の算出
208
分散対平均比は設定値より高い？
Yes
209
異常有り工程停止
No
210
ファインマンα監視
211
未臨界度算出

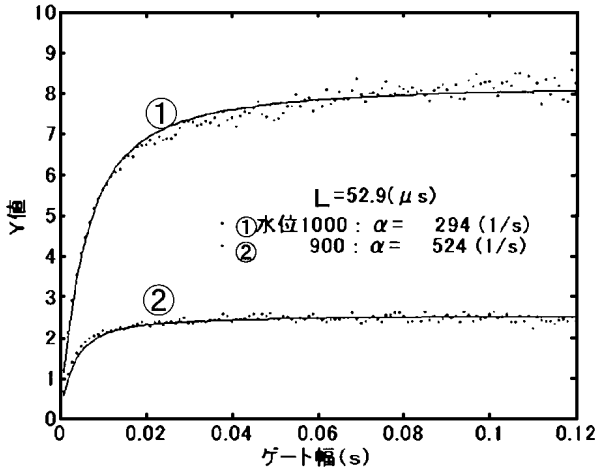
【図３】


溶融槽 3
中性子検出器 2
中性子検出器 1
中性子計数率測定部
101
プルトニウム濃度監視部
102
時系列データ分析部
103
ペリオド監視部
104
分散対平均比監視部
105
108
逆動特性監視部
ファインマンα監視部
106
109
未臨界度算出部
未臨界度算出部
107

【図４】


201
中性子計数率測定
202
中性子計数率は設定値以下？
Yes
No
203
警報発生
204
時系列データの分析
205
ペリオドは設定値より早いか？
Yes
206
異常有り工程停止
No
207
分散対平均比の算出
208
分散対平均比は設定値より高い？
Yes
209
異常有り工程停止
No
210
ファインマンα監視
逆動特性監視
212
211
未臨界度算出
未臨界度算出
213

【図５】



フロントページの続き

神奈川県川崎市幸区堀川町７２番地３４　東芝エネルギーシステムズ株式会社内
(72)発明者　小田中　滋
神奈川県川崎市幸区堀川町７２番地３４　東芝エネルギーシステムズ株式会社内
審査官　藤本　加代子
(56)参考文献　特開２００１－０９１６８６（ＪＰ，Ａ）
特開昭６２－１９８７９３（ＪＰ，Ａ）
特開平０４－１８４１９７（ＪＰ，Ａ）
特開２００５－１０６６１１（ＪＰ，Ａ）
特開２０１８－１５９６６９（ＪＰ，Ａ）
特開平０７－３０６２９２（ＪＰ，Ａ）
特開２００４－０７７２９１（ＪＰ，Ａ）
特開２０１８－１１２５２６（ＪＰ，Ａ）
特開平０８－０８２６９３（ＪＰ，Ａ）
米国特許第０４３０５７８６（ＵＳ，Ａ）
特開２０１５－０４０７２０（ＪＰ，Ａ）
(58)調査した分野　(Int.Cl.，ＤＢ名)
Ｇ２１Ｃ　１７／００－１７／１４
Ｇ２１Ｃ　１９／００－１９／５０
Ｇ２１Ｃ　２３／００
Ｇ０１Ｔ　１／００－１／１６
Ｇ０１Ｔ　１／１６７－７／１２