

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2014-228362

(P2014-228362A)

(43) 公開日 平成26年12月8日(2014.12.8)

(51) Int.Cl.
G21C 17/06 (2006.01)F1
G21C 17/06テーマコード (参考)
2G075

審査請求 未請求 請求項の数 6 O L (全 19 頁)

(21) 出願番号 特願2013-107482 (P2013-107482)
(22) 出願日 平成25年5月21日 (2013.5.21)(71) 出願人 000165697
原子燃料工業株式会社
東京都品川区東品川二丁目2番4号 天王
洲ファーストタワー13階
(74) 代理人 100079108
弁理士 稲葉 良幸
(74) 代理人 100109346
弁理士 大貫 敏史
(74) 代理人 100117189
弁理士 江口 昭彦
(74) 代理人 100134120
弁理士 内藤 和彦
(72) 発明者 渡嘉敷 幹郎
茨城県那珂郡東海村村松3135-41
原子燃料工業株式会社東海事業所内
最終頁に続く

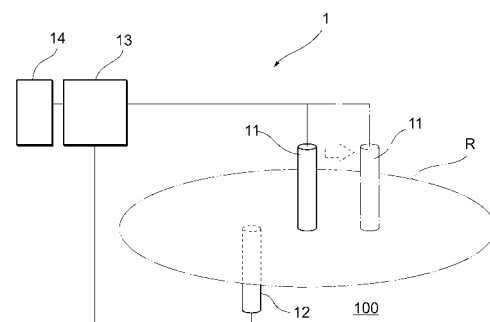
(54) 【発明の名称】 核燃料の未臨界度測定監視システム及び方法

(57) 【要約】

【課題】核燃料を含む体系における状態パラメータに関する詳細な情報が不明であっても、その体系の未臨界度をリアルタイムで且つ精度よく計測監視することが可能なシステム等を提供する。

【解決手段】本発明による核燃料の未臨界度測定監視システムは、中性子源を有しない中性子検出器、及び、中性子源を有する中性子検出器を含む中性子検出部と、中性子検出部による測定値の演算を行う演算処理部を備える。そして、演算処理部により、中性子検出器の相対的な位置、及び、その周辺の中性子スペクトルを変化させたときの複数の状態における複数の測定値から、複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数を算出し、さらに、それらの算出値に基づいて、中性子実効増倍率、即発中性子寿命、及び、未臨界度換算係数を算出する。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

核燃料を含む体系に配置され、且つ、中性子源を有しない第 1 の中性子検出器、及び、中性子源を有する第 2 の中性子検出器を含む中性子検出部と、

前記中性子検出部による中性子計数又は中性子計数率の測定値の演算を行う演算処理部と、
を備え、

前記演算処理部は、前記第 1 の中性子検出器及び前記第 2 の中性子検出器の相対的な位置、並びに、前記中性子検出部の周辺の中性子スペクトルを変化させたときの複数の状態における複数の前記測定値から、複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数を算出し、該複数の分散計数比及び該複数の即発中性子減衰係数の算出値に基づいて、中性子実効増倍率、即発中性子寿命、及び、未臨界度換算係数を算出する、
核燃料の未臨界度測定監視システム。

10

【請求項 2】

前記演算処理部は、下記式 (1) 及び式 (2) ；

$$C R_{i,j} = \chi_j \cdot (1 - k_i) \quad \cdots (1)、$$

$$\alpha_i = 1 / l_i \cdot (1 - k_i) \quad \cdots (2)、$$

(ここで；

添字 j：前記第 1 の中性子検出器及び前記第 2 の中性子検出器の相対的な位置関係の状態を示す 1 以上の自然数であり、状態の個数の総数が 2 以上、

20

添字 i：前記中性子検出部の周辺の中性子スペクトルの状態を示す 1 以上の自然数であり、状態の個数の総数が 2 以上、

C R：前記複数の分散計数比の算出値、

α ：前記複数の即発中性子減衰係数の算出値、

k：前記中性子実効増倍率、

l：前記即発中性子寿命、

χ ：前記未臨界度換算係数)

で表される関係に基づいて、前記中性子実効増倍率、前記即発中性子寿命、及び、前記未臨界度換算係数を算出する、

請求項 1 記載の核燃料の未臨界度測定監視システム。

30

【請求項 3】

前記中性子検出部は、前記核燃料全体を覆うように配置され、

前記演算処理部は、前記中性子実効増倍率及び前記即発中性子寿命の算出値に基づいて、修正 1 群拡散方程式を解くために必要な核的特性を推定し、前記第 1 の中性子検出器及び前記第 2 の中性子検出器の位置を有限要素法における節点として計算メッシュを設定し、該計算メッシュへ前記核的特性を割り当て、該計算メッシュに対して前記修正 1 群拡散方程式を解くことにより、前記核燃料全体の中性子実効増倍率を算出する、

請求項 1 又は 2 記載の核燃料の未臨界度測定監視システム。

【請求項 4】

前記修正 1 群拡散方程式は、下記式 (3) 及び式 (4) ；

40

$$\nabla D \nabla \phi + D \cdot B^2 \cdot \phi = 0 \quad \cdots (3)、$$

$$B^2 = (k_{\infty} / k_t - 1) / M^2 \quad \cdots (4)、$$

(ここで；

D：拡散係数、

ϕ ：中性子束、

B^2 ：材料バックリング、

M^2 ：移動面積、

k_{∞} ：無限増倍率、

k_t ：前記核燃料全体の中性子実効増倍率)

で表される、

50

請求項 3 記載の核燃料の未臨界度測定監視システム。

【請求項 5】

核燃料を含む体系に、中性子源を有しない第 1 の中性子検出器、及び、中性子源を有する第 2 の中性子検出器を含む中性子検出部を配置し、且つ、中性子計数又は中性子計数率を測定する中性子測定工程と、

前記中性子測定工程で測定された測定値の演算を行う演算処理工程と、
を有し、

前記中性子測定工程においては、前記第 1 の中性子検出器及び前記第 2 の中性子検出器の相対的な位置、並びに、前記中性子検出部の周辺の中性子スペクトルを変化させたときの複数の状態における複数の中性子計数又は中性子計数率を測定し、

前記演算処理工程においては、前記複数の中性子計数又は中性子計数率の測定値から、複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数を算出し、該複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数の算出値に基づいて、中性子実効増倍率、即発中性子寿命、及び、未臨界度換算係数を算出する、
核燃料の未臨界度測定監視方法。

【請求項 6】

前記中性子測定工程においては、前記核燃料全体を覆うように前記中性子検出部を配置し、

前記演算処理工程においては、前記中性子実効増倍率及び前記即発中性子寿命の算出値に基づいて、修正 1 群拡散方程式を解くために必要な核的特性を推定し、前記第 1 の中性子検出器及び前記第 2 の中性子検出器の位置を有限要素法における節点として計算メッシュを設定し、該計算メッシュへ前記核的特性を割り当て、該計算メッシュに対して前記修正 1 群拡散方程式を解くことにより、前記核燃料全体の中性子実効増倍率を算出する、
請求項 5 記載の核燃料の未臨界度測定監視方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、核燃料（損傷核燃料等）の未臨界度を測定及び監視するためのシステム及び方法に関する。

【背景技術】

【0002】

核燃料物質の臨界安全管理において、管理対象である核燃料、特に、原子炉における過酷事象等により著しく損傷した核燃料（損傷核燃料）の未臨界度（臨界までの余裕度）をリアルタイムで安全且つ正確に測定及び監視することは極めて重要である。核燃料の未臨界度の測定手法としては、例えば、負のペリオド法、制御棒落下法、補償法、中性子源増倍法、パルス中性子源法、逆動特性法、及び中性子雑音解析法等が提案されている。これらのなかで中性子雑音解析法を除く手法においては、核燃料を含む体系の詳細な状態が既知であること、その体系の臨界操作（例えば未臨界度を左右する因子を変化させ、臨界状態に近接させること）及びそのための制御棒等の制御手段やその他複雑な設備等が必要であることといった制限がある。一方、中性子雑音解析法には、そのような制限はなく、また、中性子雑音解析法は、原子炉炉心に装荷された核燃料以外の物質にも適用し得ることから、特に損傷核燃料の未臨界度を測定するための手法として実用上有用であると考えられる。

【0003】

このような中性子雑音解析法の応用例として、特許文献 1 には、中性子増倍体系における未臨界度が異なる複数の状態に対して、周波数解析法やファインマン・アルファ法を適用した未臨界度判定装置及び未臨界度判定プログラムが提案されている。この装置及びプログラムでは、得られた実測データと理論曲線との間のフィッティング誤差が最小となるように、検出器効率や即発中性子寿命を推定することにより、その体系の未臨界度が評価される。また、非特許文献 1 には、測定条件が厳しい高速炉燃料再処理施設にも適用可能

な未臨界度測定技術として、データ処理に階差フィルタを適用したファインマン・アルファ法や、ミハルゾ法の改良方法を適用した事例が記載されている。この事例では、重水臨界実験施設の未臨界度測定において、未臨界度が変化する体系に対するリアルタイム計測の実現性、及び、高中性子束場への適用性が評価されている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0004】

【特許文献1】特開2010-210613号公報

【非特許文献】

【0005】

【非特許文献1】羽様平他、「未臨界度判定技術の開発」、サイクル機構技報No. 14, 2002.

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

しかし、本発明者の詳細な検討によれば、上記特許文献1及び非特許文献1に記載された従来の中性子雑音解析法を用いた未臨界度測定方法においては、上述したような制限事項は少ないものの、未臨界度の評価演算において、評価対象である体系における即発中性子寿命又は空間補正因子等を既知の状態パラメータとして事前に与える必要がある。これに対し、損傷核燃料は、通常、その正確な組成（含有物質割合）、形状、性状等は不明であるから、かかる損傷核燃料を含む体系における即発中性子寿命や空間補正因子といった状態パラメータに関する詳細な情報を正確に把握又は推定したり、また、それらの状態パラメータを実測したりすることはほぼ不可能であると言わざるを得ない。したがって、上記従来の中性子雑音解析法を、実際の核燃料、特に損傷核燃料を含む体系の未臨界度測定に適用したとしても、その未臨界度をリアルタイムで且つ正確に測定評価することは極めて困難である。

【0007】

そこで、本発明はかかる事情に鑑みてなされたものであり、核燃料を含む体系における状態パラメータに関する詳細な情報が不明であっても、かかる情報を推定することなく、その体系の未臨界度を実測値に基づいてリアルタイムで且つ精度よく測定評価することが可能な核燃料の未臨界度計測監視システム及び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】

【0008】

上記課題を解決するために、本発明による核燃料の未臨界度測定監視システムは、まず、核燃料を含む体系に配置され、且つ、中性子源を有しない第1の中性子検出器、及び、中性子源を有する第2の中性子検出器を含む中性子検出部と、その中性子検出部による中性子計数又は中性子計数率の測定値の演算を行う演算処理部を備えている。

【0009】

そして、演算処理部は、第1の中性子検出器及び第2の中性子検出器の相対的な位置、並びに、中性子検出部の周辺の中性子スペクトルを変化させたときの複数の状態における複数の測定値から、複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数を算出し、それらの複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数の算出値に基づいて、中性子実効増倍率、即発中性子寿命、及び、未臨界度換算係数を算出するように構成されている。

【0010】

すなわち、このように構成された未臨界度測定監視システムにおいては、即発中性子寿命や空間補正因子である未臨界度換算係数を事前に推定又は評価することなく、第1の中性子検出器及び第2の中性子検出器で計測された中性子計数又は中性子計数率の測定値（実測値）に基づいて、未臨界度と等価である中性子実効増倍率を算出することができる（詳細について後述する）。

【0011】

10

20

30

40

50

より具体的には、演算処理部が、以下に示す式（１）及び式（２）で表される関係に基づいて、中性子実効増倍率、即発中性子寿命、及び、未臨界度換算係数を算出するように構成しても好適である。

【００１２】

$$C R_{i,j} = \chi_j \cdot (1 - k_i) \quad \cdots (1)$$

$$\alpha_i = 1 / l_i \cdot (1 - k_i) \quad \cdots (2)$$

【００１３】

ここで、添字 j は、第１の中性子検出器及び第２の中性子検出器の相対的な位置関係の状態を示す１以上の自然数であり、添字 i は、中性子検出部の周辺の中性子スペクトルの状態を示す１以上の自然数であり、 CR は、複数の分散計数比の算出値を示し、 α は、複数の即発中性子減衰係数の算出値を示し、 k は、中性子実効増倍率を示し、 l は、即発中性子寿命を示し、 χ は、未臨界度換算係数を示す。なお、中性子検出器の相対的な位置関係の状態 j の個数の総数を n 、中性子スペクトルの状態 i の個数の総数を m とすると、式（１）及び式（２）で実際に得られる式の数は、式（１）に対して $m \times n$ 個、式（２）に対して m 個であることから、計 $m \times n + m$ 個の式が得られる。

【００１４】

かかる構成によれば、未知数である k_i 、 l_i 及び χ_j に対して、それらの未知数の総数は、 k_i に対して m 個、 l_i に対して m 個、 χ_j に対して n 個であることから、計 $2 \times m + n$ 個となる。そして、 m 及び n がそれぞれ２以上の場合には、式（１）及び式（２）で得られる式の個数が、未知数の総数以上となることから、それらを連立方程式として、或いは、最小２乗法等を適用して解くことにより、何れの未知数に対しても推定値や評価値を与えることなく、特に中性子実効増倍率 k を算出することが可能となる。

【００１５】

さらに、中性子検出部が、核燃料全体を覆うように配置され、演算処理部が、中性子実効増倍率及び即発中性子寿命の算出値に基づいて、修正１群拡散方程式を解くために必要な核的特性を推定し、第１の中性子検出器及び第２の中性子検出器の位置を有限要素法における節点として計算メッシュを設定し、その計算メッシュへ核的特性を割り当て、その計算メッシュに対して上記の修正１群拡散方程式を解くことにより、核燃料全体の中性子実効増倍率を算出するようにしても有用である。

【００１６】

このようにすれば、核燃料（核燃料物質）が局所的に偏在している場合だけでなく、空間的に（３次元的に）分布又は散在している体系に対しても、その全体の中性子実効増倍率ひいては未臨界度を的確に把握することが可能となる。

【００１７】

この場合、修正１群拡散方程式は、例えば、以下の式（３）及び式（４）で表される関係で示される。

【００１８】

$$\nabla D \nabla \phi + D \cdot B^2 \cdot \phi = 0 \quad \cdots (3)、$$

$$B^2 = (k_{\infty} / k_t - 1) / M^2 \quad \cdots (4)、$$

【００１９】

ここで、 D は、拡散係数を示し、 ϕ は、中性子束を示し、 B^2 は、材料バックリングを示し、 M^2 は、移動面積を示し、 k_{∞} は、無限増倍率を示し、 k_t は、核燃料全体の中性子実効増倍率を示す。

【００２０】

また、本発明による未臨界度測定監視方法は、上記本発明による未臨界度測定監視システムに対して、又は、上記本発明による未臨界度測定監視システムを用いて有効に実施される方法であり、核燃料を含む体系に、中性子源を有しない第１の中性子検出器、及び、中性子源を有する第２の中性子検出器を含む中性子検出部を配置し、且つ、中性子計数又は中性子計数率を測定する中性子測定工程と、その中性子測定工程で測定された測定値の演算を行う演算処理工程を有する。

【0021】

そして、中性子測定工程においては、第1の中性子検出器及び第2の中性子検出器の相対的な位置、並びに、中性子検出部の周辺の中性子スペクトルを変化させたときの複数の状態における複数の中性子計数又は中性子計数率を測定し、演算処理工程においては、複数の中性子計数又は中性子計数率の測定値から、複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数を算出し、それらの複数の分散計数比及び複数の即発中性子減衰係数の算出値に基づいて、中性子実効増倍率、即発中性子寿命、及び、未臨界度換算係数を算出する。

【0022】

さらに、中性子測定工程においては、核燃料全体を覆うように前記中性子検出部を配置し、演算処理工程においては、中性子実効増倍率及び即発中性子寿命の算出値に基づいて、修正1群拡散方程式を解くために必要な核的特性を推定し、第1の中性子検出器及び第2の中性子検出器の位置を有限要素法における節点として計算メッシュを設定し、その計算メッシュへ核的特性を割り当て、その計算メッシュに対して上記の修正1群拡散方程式を解くことにより、核燃料全体の中性子実効増倍率を算出するようにしても好ましい。

【発明の効果】

【0023】

本発明によれば、第1の中性子検出器及び第2の中性子検出器の相対的な位置、並びに、中性子検出部の周辺の中性子スペクトルを変化させたときの複数の状態における複数の測定値に基づいて、中性子実効増倍率、即発中性子寿命、及び、未臨界度換算係数を同時に算出することにより、核燃料を含む体系に関する組成、形状、性状等の情報が不明であっても、それらに対して事前の推定値等を用いることなく、その核燃料を含む体系の未臨界度をリアルタイムで且つ正確に精度よく把握及び監視することができる。

【図面の簡単な説明】

【0024】

【図1】本発明による未臨界度測定監視システムの第1実施形態の概略構成を示す模式図である。

【図2】本発明による未臨界度測定監視システムの第1実施形態の概略構成を示す模式図であって、図1に示す状態にブロック状部材を配置した構成を示す。

【図3】本発明による未臨界度測定監視システムの第2実施形態の概略構成を示す模式図である。

【図4】本発明による未臨界度測定監視システムの第3実施形態の概略構成を示す模式図である。

【図5】図4に示す未臨界度測定監視システムの第3実施形態における領域区分を示す概念図である。

【図6】本発明による未臨界度測定監視システムの第4実施形態における領域区分を示す概念図である。

【図7】本発明による未臨界度測定監視システムの第5実施形態における領域区分を示す概念図である。

【発明を実施するための形態】

【0025】

以下、本発明の実施の形態について、従来技術との対比を含めて詳細に説明する。そのため、以下においては、本発明の実施の形態に係る説明のみならず、従来技術の説明についても言及するので、留意されたい。なお、上下左右等の位置関係は、特に断らない限り、図面に示す位置関係に基づくものとする。また、図面の寸法比率は、図示の比率に限定されるものではない。さらに、以下の実施の形態は、本発明を説明するための例示であり、本発明をその実施の形態のみに限定する趣旨ではない。またさらに、本発明は、その要旨を逸脱しない限り、さまざまな変形が可能である。

【0026】

[従来技術の説明]

本発明の実施の形態の理解を容易にするべく、その説明に先立ち、ここではまず従来技

10

20

30

40

50

術の内容及びその問題点について改めて詳述する。

【0027】

(特許文献1)

上記特許文献1に記載された未臨界度判定装置及び未臨界度判定プログラムでは、核燃料物質を含む中性子増倍体系における未臨界度が異なる複数の状態に対し、先述の如く、中性子雑音解析法である周波数解析法やファインマン・アルファ法を適用し、中性子計測における実測データと理論曲線との間のフィッティング誤差が最小となるように、検出器効率や即発中性子寿命を推定することが行われる。これにより、中性子計測における検出器効率や即発中性子寿命を計算によって事前に推定することなく、未臨界度を測定評価することが企図されている。換言すれば、特許文献1によれば、ミハルゾ法を除く中性子雑音解析法による未臨界度測定に対して支配的な影響を及ぼす即発中性子寿命が、未臨界度とともに実測結果に基づいて求められる。

10

【0028】

より具体的には、特許文献1に記載された測定評価手順と厳密に同一ではないものの、それに準ずる（実質的に等価である）以下の手順により、測定評価対象である中性子増倍体系の未臨界度とともに、中性子計測における検出器効率と即発中性子寿命が推定される。すなわち、特許文献1における第2実施形態（特許文献1の段落0058～0096参照）を例にとると、まず、特許文献1に記載された式(8)と等価な「分散対平均比の1からの偏差Y（ゲート幅つまり中性子パルス相互間の時間間隔 Δt の関数）」は、下記式(1-1)で表される。この式(1-1)において、中性子計測で得られる実測値は、 C_n である。

20

【0029】

【数1】

$$Y_n(\Delta t) = C_n \cdot \left(1 - \frac{1 - e^{-\alpha_n \cdot \Delta t}}{\alpha_n \cdot \Delta t} \right) \quad \dots(1-1)$$

ここで、

Y : 分散対平均比の偏差（ファインマン・アルファ法による計測データ）

n : ある未臨界度状態を表す下添字

Δt : 中性子パルス相互間の時間間隔（ゲート幅）

$$C_n : \varepsilon \cdot \frac{\overline{\nu(\nu-1)}}{\overline{\nu}^2} \cdot \left(\frac{1}{\ell \cdot \alpha_n} - 1 \right)^2$$

ε : 中性子検出効率

$$\frac{\overline{\nu(\nu-1)}}{\overline{\nu}^2} : \text{Diven 数}$$

ℓ : 即発中性子寿命

α : 即発中性子減衰定数

30

40

【0030】

一方、未臨界度を算出するための中性子実効増倍率 k と即発中性子減衰定数 α との間には、下記式(1-2)で表される関係が成り立ち、実測値から算出される即発中性子減衰定数 α と、式(1-2)の右辺における即発中性子寿命 ℓ 及び遅発中性子割合 β が既知であれば、中性子実効増倍率 k を得ることができる。

【0031】

【数 2】

$$\alpha = \frac{1 - (1 - \beta) \cdot k}{\ell} \quad \dots(1-2)$$

ここで、

 β : 遅発中性子割合 k : 実効増倍率

【0032】

10

また、未臨界度は、中性子実効増倍率を用いて、下記式（1-3）で表される関係によって定義される。このように、未臨界度 ρ を求めることは、中性子実効増倍率 k を求めることと等価である。

【0033】

【数 3】

$$\rho = \frac{k - 1}{k} \quad \dots(1-3)$$

 ρ : 未臨界度

20

【0034】

ところで、特許文献 1 の図 7 より、上記式（1-1）の左辺 $Y_n(\Delta t)$ は、中性子パルス相互間の時間間隔 Δt 毎に実際の計測データ（測定値）として得られる。一方、上記式（1-1）の右辺の値は、一般に、即発中性子減衰定数 α と中性子パルス相互間の時間間隔 Δt の関係として理論的に成立する曲線である。したがって、上記式（1-1）の右辺におけるパラメータである中性子計数 C_n 及び即発中性子減衰定数 α_n は、左辺の測定値を最小 2 乗法等により右辺の理論曲線へフィッティングする際のフィッティング係数として得られる。

【0035】

30

ここで、特許文献 1 の第 2 実施形態における実証試験（特許文献 1 の段落 0089～段落 0096）に倣い、測定評価対象である中性子増倍体系について 2 つの未臨界状態 n （ $n = 1$ 及び 2）を想定すると、上記式（1-1）中の中性子計測で得られる実測値である中性子計数 C_n （つまり C_1 、 C_2 ）に関する等式として、下記式（1-4）で表される 2 つの関係式が得られる。

【0036】

【数 4】

$$C_1 = \varepsilon \cdot \frac{\overline{\nu(\nu-1)}}{\overline{\nu}^2} \cdot \left(\frac{1}{\ell \cdot \alpha_1} - 1 \right)^2 \quad \dots(1-4)$$

40

$$C_2 = \varepsilon \cdot \frac{\overline{\nu(\nu-1)}}{\overline{\nu}^2} \cdot \left(\frac{1}{\ell \cdot \alpha_2} - 1 \right)^2$$

【0037】

式（1-4）において、Diven 数として適宜の値を初期設定値として事前に与えることにより、 C_1 、 C_2 、 α_1 、及び α_2 が、計測データのフィッティング係数として求まる。よって、式（1-4）における未知数は、中性子検出効率 ε 及び即発中性子寿命 ℓ の 2 つのみとなる。そして、それらの 2 つの未知数に対して、式（1-4）に示す 2 つの関係

50

式が与えられることになるから、その式（１－４）の２つの関係式を中性子検出効率 ε 及び即発中性子寿命 l に対する連立方程式と看做して解くことにより、それらの中性子増倍系の中性子検出効率 ε 及び即発中性子寿命 l が求められる。

【００３８】

なお、上記においては、２つの未臨界状態を想定したが、３つ以上の状態を想定してもよく、その場合には、最小２乗法等を用いて、中性子検出効率 ε 及び即発中性子寿命 l を決定するようにすればよい。

【００３９】

ところで、このような特許文献１に記載された手法では、式（１－４）に示す如く、即発中性子寿命 l が複数の未臨界状態で同一であると仮定した条件において解析が行われる。しかし、中性子増倍体系の未臨界度が異なる場合、即発中性子寿命 l が同一となることは極めて稀と考えられ、即発中性子寿命 l の差異が無視できないケースが多いものと推定される。そうすると、特許文献１にも記載されているとおり、中性子実効増倍率 k とともに即発中性子寿命 l も併せて何らかの方法によって推定評価する必要が生じる。ところが、特許文献１には、そのための具体的な手法や手順について、開示も示唆もされていない。

【００４０】

しかし、特許文献１に記載された手法において、未臨界度の相違に応じて異なる即発中性子寿命 l を、中性子実効増倍率 k とともに同時に求めることは、そもそも、原理的に不可能であって、工学的に有意な解を求めることは極めて困難である。すなわち、上記式（１－４）で表される２つの状態における即発中性子寿命が互いに異なり、それらを即発中性子寿命 l_1 、 l_2 とすると、上記式（１－４）は下記式（１－５）に示すように書き換えることができる。

【００４１】

【数５】

$$C_1 = \varepsilon \cdot \frac{\overline{v(v-1)}}{\overline{v}^2} \cdot \left(\frac{1}{\ell_1 \cdot \alpha_1} - 1 \right)^2 \quad \dots(1-5)$$

$$C_2 = \varepsilon \cdot \frac{\overline{v(v-1)}}{\overline{v}^2} \cdot \left(\frac{1}{\ell_2 \cdot \alpha_2} - 1 \right)^2$$

【００４２】

この場合、未知数は、中性子検出効率 ε 及び即発中性子寿命 l_1 、 l_2 の３つとなるが、それらの３つの未知数に対して、与えられる関係式は上記式（１－５）に示す２つのみであるから、それらの中性子検出効率 ε 及び即発中性子寿命 l_1 、 l_2 を一意に求めることは不可能である。仮に、複数の未臨界状態として、 n 個（ $n \geq 3$ ）の状態を用意したとしても、 n 個の関係式に対し、未知数は、中性子検出効率 ε 及び即発中性子寿命 l_1 、 l_2 、 $\dots$ 、 l_n であり、つまり未知数の数が $n+1$ 個になってしまうため、この場合においても解を一意に求めることは不可能である。これは、特許文献１の第２実施形態に記載された例における問題点であるが、特許文献１のその他の実施形態も即発中性子減衰定数 α と即発中性子寿命 l を介して未臨界度を算出する点において相違ないから、それらの各実施形態においても同様の問題点が内在していると言える。

【００４３】

したがって、特許文献１に記載された未臨界度測定方法では、例えば何らかの手段を用いて中性子検出効率 ε を事前に求めることにより未知数を１つ減らすことができれば、中性子計測で得られる実測値である中性子計数 C_1 、 C_2 （式（１－５）の左辺）に対し、その右辺における未知数は即発中性子寿命 l_1 、 l_2 の２つとなり、それらを一意に求めることが可能となる。そのためには、即発中性子寿命 l が同値であると看做することができる複

10

20

30

40

50

数の未臨界状態を準備した上で、それらの複数の状態における中性子検出効率 ε を予め求める必要がある。

【0044】

しかし、即発中性子寿命 l は、中性子スペクトルの影響を受け易いことから、中性子スペクトルが変化しないように未臨界状態を変化させる必要がある。そのための方法の1つとして、例えば、その体系に含まれる核分裂性物質の量を変化させることが想起されるものの、未臨界度が未知の体系（例えば損傷核燃料が含まれる体系）に適用することは、非現実的であると考えられる。すなわち、核分裂性物質の量を変化させるには、その体系に核分裂性物質を付加したり、その体系から核分裂性物質を除去したりすればよいが、前者は、体系内の核分裂性物質の増加に起因して臨界に達するおそれがある一方、後者は、損傷核燃料の除去部分又はその周辺に生じた亀裂へ水が流入した場合、中性子減速が高まって臨界に達するおそれがある。このように、未臨界度の把握及びその監視が為されていない状態で、その体系中の核分裂性物質の量を変化させることは、避けるべき操作であると考えられる。

10

【0045】

他方、核分裂性物質の量を変化させずに未臨界度を変化させる方法としては、中性子吸収物質を付加したり、核燃料周辺の水を排除したりする方法が想定される。しかし、このような操作を行えば、中性子スペクトルの変化が不可避免的に生じるため、即発中性子寿命 l を同値と看做し得る状態に保持することはできない。或いは、即発中性子寿命 l を同値と看做し得る範囲内で、中性子吸収物質の付加、又は、損傷核燃料周辺の水の排除を行う方法も考えられなくはないが、その場合には、未臨界状態の変化度合いが小さく、目的とする有意な結果が得られないといった懸念がある。

20

【0046】

（非特許文献1）

一方、非特許文献1に記載された未臨界度測定方法は、前述の如く、階差フィルタを用いたファインマン・アルファ法やミハルゾ法の改良方法（以下「改良ミハルゾ法」と記す）の一手法であり、非特許文献1によれば、未臨界度が変動する体系である重水臨界実験施設においてリアルタイムで且つ高い精度で未臨界度を計測することに成功している。ここで、改良ミハルゾ法は、中性子検出器として、一般にCf-252中性子線源といった中性子源が内蔵された中性子源付き検出器と、ファインマン・アルファ法でも用いることができる中性子源を内蔵しない中性子源なし検出器の両方を用いる方法である。つまり、改良ミハルゾ法によれば、そのために使用する計測データとともに、ファインマン・アルファ法で使用する計測データも同時に得ることができる。

30

【0047】

そして、非特許文献1には、特に改良ミハルゾ法では、未臨界度が変化する体系において、1分程度の応答時間で未臨界度の測定結果が得られる旨が報告されている（ただし、応答時間は、評価対象中の固有中性子源に対する検出器内蔵中性子源の相対強度に近似的に比例するため、検出器内蔵中性子源の強度が大きいほど、応答時間はより短縮される）。加えて、非特許文献1には、高中性子束場に対しても、検出器の不感時間の影響は問題なく、かかる手法が適用可能であり、また、評価対象に含まれる固有中性子源の強度が高い場合であっても、現実的な強度レベルの中性子源（Cf-252中性子線源）を用意することが可能であることが記載されている。

40

【0048】

このような非特許文献1の記載内容を参酌すれば、非特許文献1に記載された未臨界度測定方法は、損傷核燃料を含む体系の未臨界度をリアルタイムで測定監視するための手法として好適であると推察される。そこで、この非特許文献1に記載された手法について、以下に説明する。すなわち、まず、非特許文献1の図1に記載されているファインマン・アルファ法に関する数式及び表記方法とは若干異なるものの、それと等価な式を、下記式（2-1）に示す。

【0049】

50

【数 6】

$$\alpha = \frac{1 - (1 - \beta) \cdot k}{\ell} \quad \dots(2-1)$$

$$\approx \frac{1 - k}{\ell}$$

【0050】

ここで、遅発中性子割合 β は、核分裂性核種によっても異なるが、U 核種及び Pu 核種の場合、およそ 0.01 程度未満である。よって、それらの核種による遅発中性子割合 β は、非特許文献 1 で目標とする未臨界度測定精度 ($0.95 > \text{中性子実効増倍率 } k \geq 0.8$ の領域で ± 0.04 以内、また、 $0.8 > \text{中性子実効増倍率 } k \geq 0.4$ の領域で ± 0.10 以内) に比して十分に小さい。よって、上記式 (2-1) における近似式 (右辺の第 2 式) は、実用上、差し支えないものと推察される。

10

【0051】

また、非特許文献 1 の図 6 に記載されている改良ミハルゾ法に関する数式及び表記方法とは若干異なるものの、それと等価な式を、下記式 (2-2) に示す。

【0052】

【数 7】

$$CR(\Delta t) = \chi \cdot (1 - k) \quad \dots(2-2)$$

20

ここで、

CR : 2 系統の信号の「分散対平均比の偏差 Y」を組み合わせた計測データ

χ : 未臨界度換算係数 (空間補正因子等)

【0053】

この式 (2-2) における左辺の「 $CR(\Delta t)$ 」は、計測された中性子パルス相互間の時間間隔 Δt 毎に実測値として得られるものである。ただし、先の特許文献 1 の説明において述べたファインマン・アルファ法とは異なり、理論的に、時間間隔 Δt に対する依存性はない。なお、本明細書においては、「 CR 」のパラメータ名として、非特許文献 1 の図 6 における矩形枠内に記載された「分散 - 計数比 (CR)」からハイフン「-」を削除して、分散計数比 CR と記す。

30

【0054】

そして、このような改良ミハルゾ法とファインマン・アルファ法を同時に適用する手法は、非特許文献 1 に記載されているように、一見して、ファインマン・アルファ法の欠点である即発中性子寿命が中性子スペクトルの影響を受け易い点と、ミハルゾ法の欠点である未臨界度換算係数が検出器配置の影響を受け易い点を、相互に補完し得る手法であると言えなくもない。しかし、非特許文献 1 には、そのように互いの欠点を相補的に解消するための具体的な手法や手段について、何ら示されていない。したがって、非特許文献 1 に記載された手法においても、式 (2-1) における即発中性子寿命 l 、又は、式 (2-2) における未臨界度換算係数 χ を、未臨界度測定に先立って、例えば事前解析によって推定又は仮定した上で、それらを実測値と組み合わせて用いる必要がある。

40

【0055】

以上のことから、「発明が解決しようとする課題」として前述したとおり、特許文献 1 及び非特許文献 1 に記載された何れの従来手法においても、核燃料を含む体系の未臨界度を測定評価するには、その体系における即発中性子寿命又は未臨界度換算係数といった空間補正因子等を既知の状態パラメータとして事前に与える必要がある。しかし、先述の如

50

く、特に損傷核燃料を含む体系では、そのような状態パラメータに関する詳細な情報を、正確に把握又は推定したり実測したりすることはほぼ不可能であるから、特許文献1及び非特許文献1に記載された従来方法を実際の核燃料、特に損傷核燃料に対して適用して未臨界度をリアルタイムで且つ正確に測定評価することは極めて困難と言わざるを得ない。

【0056】

(第1実施形態)

これらに対し、本発明による未臨界度測定監視システム及び方法は、そのような従来技術の欠点を補う有効な手法を提供する。ここで、図1は、本発明による未臨界度測定監視システムの第1実施形態の概略構成を示す模式図である。未臨界度測定監視システム1は、核燃料を含む体系100の未臨界度を計測監視するためのものであり、核燃料を含む体系100としては、例えば、原子炉炉心等に装荷された核燃料が損傷してしまい、その損傷核燃料と周辺部材が混在した状態で存在する系が挙げられる。なお、核燃料を含む体系100は、通常、その周囲が水等の中性子減速材で囲まれた状態（水中に埋没した状態等）で保持管理される。

【0057】

この未臨界度測定監視システム1は、核燃料を含む体系100の上面領域R（図示二点鎖線で囲んだ領域）の上方に移動可能に配置される中性子源を有しない中性子検出器11（第1の中性子検出器）、及び、中性子源を有する中性子検出器12（第2の中性子検出器）を備えている。なお、中性子検出器12は、未臨界度の測定評価精度を十分に高める観点から、核燃料を含む体系100の内部領域に挿入配置される（後述する他の実施形態において同様とする）。また、中性子源としては、例えばCf-252中性子線源が挙げられ、中性子検出器11、12としては、例えば、フィッシュンカウンター、He-3検出器、GEM等が挙げられる。さらに、中性子検出器11、12は、中性子検出器11、12で検出された中性子の検出信号を処理するための測定回路系13に接続されており、その測定回路系13は、例えば、パラレル伝送路（BUS）を介して、コンピューター等の演算装置14に接続されている。

【0058】

また、測定回路系13は、例えば、中性子検出信号の波形整形等を行うプリアンプ（カレントアンプ、チャージアンプ等）、整形信号を増幅するためのリニアアンプ、必要に応じて中性子検出器11、12からの各信号の同期・非同期をとるためのコインシデンス／アンチコインシデンス回路、増幅信号のAD変換を行うためのADコンバータ、変換信号の計数を行うためのカウンターや多チャンネル（マルチチャンネル）アナライザー等を有しており、各機器はモジュール化されていてもいなくてもよい。このように、中性子検出器11、12及び測定回路系13から、中性子検出部が構成されている。かかる中性子検出部による中性子計数又は中性子計数率の測定値を用い、演算処理部たる演算装置14によって、核燃料を含む体系100の未臨界度を測定監視するための種々の演算が行われる。

【0059】

このように構成された未臨界度測定監視システム1における未臨界度の測定監視手順の一例について、以下に説明する。ここでは、まず、中性子検出器11、12の相対的な位置を変化させた状態、すなわち、中性子検出器12を固定し、且つ、中性子検出器11を図示実線で示す位置と図示一点鎖線で示す位置に配置した状態において、2通りの中性子計測を行う（中性子測定工程）。次に、図2に示す構成において、上記と同様に中性子検出器11、12の相対的な位置を変化させた2通りの測定を行う（中性子測定工程）。ここで、図2は、図1と同じく、本発明による未臨界度測定監視システムの第1実施形態の概略構成を示す模式図であり、図1に示す状態（核燃料が水没した状態）の中性子検出器11を挟むように、適宜のブロック状部材B、Bを配置した構成を示す。

【0060】

このような図1及び図2に示す構成において、中性子検出器11が図示実線で示す位置に存置された状態を「状態j=1」とし、中性子検出器11が図示一点鎖線で示す位置に存置された状態を「状態j=2」とする。また、図2に示す系においては、ブロック状部

材 B, Bによって、それらを配置する前に存在した周囲の水が排除されるため、図 1 及び図 2 に示す構成では、中性子検出部の周辺の中性子スペクトルに有意な相違が生じる。そこで、図 1 に示す状態の中性子スペクトルを「状態 $i = 1$ 」とし、図 2 に示す状態の中性子スペクトルを「状態 $i = 2$ 」とする。

【0061】

そうすると、図 1 に示す状態における中性子計測により、上記式 (2-2) に示す改良ミハルゾ法における計測結果として、下記一般式 (1) で表される関係が得られる。また、中性子検出器 11 の配置が図 1 及び図 2 に示す如く変化したとしても、核燃料を含む体系 100 における中性子実効増倍率 k の変動は無視できる程度と推察されることから、上記式 (2-1) の第 2 式 (近似式) に示すファインマン・アルファ法における計測結果として、下記一般式 (2) で表される関係が得られる。

$$C R_{i,j} = \chi_j \cdot (1 - k_i) \quad \cdots (1)$$

$$\alpha_i = 1 / l_i \cdot (1 - k_i) \quad \cdots (2)$$

【0062】

これらの式において、 $C R$ は、先述した式 (2-2) における $C R (\Delta t)$ と同様に、分散計数比の算出値を示し、また、上述したとおり、 α は、即発中性子減衰係数の算出値を示し、 k は、中性子実効増倍率を示し、 l は、即発中性子寿命を示し、 χ は、未臨界度換算係数を示す。

【0063】

図 1 においては、上述の如く、 $i = 1$ 及び $j = 1, 2$ であるので、それらを上記式 (1) 及び式 (2) に代入して、下記式 (11) ~ 式 (13) で表される関係が得られる。

$$C R_{1,1} = \chi_1 \cdot (1 - k_1) \quad \cdots (11)$$

$$C R_{1,2} = \chi_2 \cdot (1 - k_1) \quad \cdots (12)$$

$$\alpha_1 = 1 / l_1 \cdot (1 - k_1) \quad \cdots (13)$$

【0064】

一方、図 2 においては、上述の如く、 $i = 2$ 及び $j = 1, 2$ であるので、それらを上記式 (1) 及び式 (2) に代入して、下記式 (14) ~ 式 (16) で表される関係が得られる。

$$C R_{2,1} = \chi_1 \cdot (1 - k_2) \quad \cdots (14)$$

$$C R_{2,2} = \chi_2 \cdot (1 - k_2) \quad \cdots (15)$$

$$\alpha_2 = 1 / l_2 \cdot (1 - k_2) \quad \cdots (16)$$

【0065】

なお、未臨界度換算係数 χ は、中性子スペクトルの変化や中性子実効増倍率 k の変化に対する依存性が小さいことから、中性子スペクトルの状態 i に依存しないと看做せる。一方、中性子検出器の配置に対しては、その影響を受け易いことから、中性子検出器の相対的な位置関係の状態 j に依存する。したがって、未臨界度換算係数 χ は、 χ_j として示すことができる。

【0066】

以上のとおり、図 1 及び図 2 に示す構成を用いて未臨界度測定監視システム 1 による中性子計測を行うことにより、6 つの未知数 (中性子実効増倍率 k_1, k_2 、即発中性子寿命 l_1, l_2 、及び、未臨界度換算係数 χ_1, χ_2) に対し、上記式 (11) ~ 式 (16) で表される 6 つの関係式が得られる。よって、上記式 (11) ~ 式 (16) を連立方程式として、演算装置 14 によりそれを解くことにより、中性子実効増倍率 k_1, k_2 、即発中性子寿命 l_1, l_2 、及び、未臨界度換算係数 χ_1, χ_2 を同時に算出することができる (演算処理工程)。したがって、核燃料を含む体系 100 の正確な組成 (含有物質割合)、形状、性状等は不明であっても、即発中性子寿命又は未臨界度換算係数といった空間補正因子等を既知の状態パラメータとして事前に与えることなく、核燃料を含む体系 100 の中性子実効増倍率、ひいては、それと等価である未臨界度を把握し且つ監視することが可能となる。

【0067】

なお、上記の実施形態では、中性子スペクトルの状態 i の個数 m と中性子検出器の相対的な位置関係の状態 j の個数 n として、 $m = 2$ 及び $n = 2$ の場合について例示したが、 $m > 2$ 又は $n > 2$ (ただし、 m 及び n は 2 以上とする) の場合には、未知数の総数よりも与えられる式の方が多くなることから、最小 2 乗法等の適用により、より精度高く、未知数を求めることが可能である。

【0068】

(第 2 実施形態)

図 3 は、本発明による未臨界度測定監視システムの第 2 実施形態の概略構成を示す模式図である。未臨界度測定監視システム 2 は、中性子源を有しない中性子検出器 11 が、核燃料を含む体系 100 の上面領域 R の所定位置に固定され、且つ、中性子源を有する中性子検出器 12 が内部を挿通可能な中空案内管 21 を備えること以外は、図 1 及び図 2 に示す未臨界度測定監視システム 1 と同等の構成を有するものである。その中空案内管 21 は、例えば直管部材で形成されており、また、その一方端部 21a が、核燃料を含む体系 100 の上面領域 R の外方に突出し、且つ、他方端部 21b が、核燃料を含む体系 100 の内部の所定位置まで達するように延在している。

【0069】

このように構成された未臨界度測定監視システム 2 によれば、中性子検出器 12 を中空案内管 21 で移動させることにより、中性子検出器 11、12 の相対的な位置を変化させることができる。例えば、中性子検出器 12 を図示実線で示す位置と一点鎖線で示す位置に配置したそれぞれの状態において中性子計測を実施することにより、前述した未臨界度測定監視システム 1 と同様に、上記式 (11) ~ 式 (16) で表される関係に基づいて、核燃料を含む体系 100 の中性子実効増倍率 k_1 、 k_2 、即発中性子寿命 l_1 、 l_2 、及び、未臨界度換算係数 χ_1 、 χ_2 を同時に算出し、ひいてはその未臨界度をリアルタイムで且つ正確に測定監視することができる。

【0070】

また、中性子検出器 12 を移動させたときに、もし仮に核燃料を含む体系 100 の内部で水の移動が生じてしまうと、中性子実効増倍率、中性子検出部の周囲における中性子スペクトル及び即発中性子寿命が有意に変化するおそれがある。これに対し、未臨界度測定監視システム 2 では、中性子検出器 12 が中空案内管 21 の内部を移動するように構成されているので、その中性子検出器 12 の移動に際して水の移動が生じてしまうことを有効に防止することができ、中性子実効増倍率ひいては未臨界度をより正確に且つ精度よく測定評価することが可能となる。

【0071】

(第 3 実施形態)

ところで、損傷核燃料を含む体系では、損傷核燃料が数メートル程度の空間領域に分布することが想定されるが、そのような体系に上記特許文献 1 や非特許文献 1 に記載されたファインマン・アルファ法及び改良ミハルゾ法を適用して得られる未臨界度は、中性子検出器周辺に存在する損傷核燃料の特性を局所的に反映した見かけ上のものと考えられる。特に、従来のミハルゾ法によって測定された未臨界度は、中性子源付き検出器とそれ以外の検出器との間に存在する損傷核燃料の特性に強く影響を受けるものと推察される。したがって、特許文献 1 や非特許文献 1 に記載された従来の未臨界度測定方法では、数メートル程度の空間領域に広く存在する核燃料全体の未臨界度の測定を行うことは、非常に困難である。

【0072】

そこで、かかる従来技術の更なる問題点を解消するべく、本発明による未臨界度測定監視システムの第 3 実施形態の概略構成を、図 4 に模式的に示す。なお、図 4 は、核燃料を含む体系 100 を鉛直上方から視認したときの一平面を示す概念図である。同図において、未臨界度測定監視システム 3 は、中性子源を有する中性子検出器 12 の周囲に、中性子源を有しない中性子検出器 11 が複数配置された構成を有する。この例では、平面視 (上面視) において、1 つの中性子検出器 12 の周囲を 6 つの中性子検出器 11 が 60° 毎の

等間隔で囲むように配置構成されている。

【0073】

そして、その1つの中性子検出器12と周囲の6つの中性子検出器11を含む図示一点鎖線で囲んで示す六角形の平面領域を検出器群単位Nとし、核燃料を含む体系100全体を覆うように、複数の検出器群単位Nが配置されている。なお、図4においては、複数の中性子検出器11, 12のそれぞれが、前述した測定回路系13及び演算装置14に接続されているが、図示の都合上、それらの記載を省略した。

【0074】

このように構成された未臨界度測定監視システム3においては、複数の中性子検出器11, 12のそれぞれの頂点を結んでなる領域区分を設定する。図5は、未臨界度測定監視システム3におけるかかる領域区分を示す概念図である。図5に示す如く、複数の中性子検出器11, 12のそれぞれの頂点を結ぶ仮想線Sは、それらが互いに交差しないように設定される。そして、仮想線Sで閉じられた最小領域を、数値解析手法である有限要素法における有限要素Y1（例えば図5において斜線を付した三角形の領域）と看做し、各有限要素Y1に属する中性子検出器11, 12から得られた計測データ（中性子計数又は中性子計数率）に基づいて、有限要素法を用いて中性子拡散方程式を解くことにより、核燃料を含む体系100全体の実効増倍率ひいては未臨界度を評価する。

【0075】

すなわち、未臨界度測定監視システム3においては、有限要素Y1毎に、中性子検出器11, 12による中性子計数又は中性子計数率から、例えば上記第1実施形態で説明したのと同様にして、該検出器周辺の局所的な（見かけ上の）中性子実効増倍率 k 及び即発中性子寿命 l を算出し、その算出値に基づいて、修正1群拡散方程式を解くために必要な核的特性を推定する。このとき、有限要素Y1は、中性子検出器11, 12の位置を節点とする計算メッシュとして設定され、その各計算メッシュへ核的特性を割り当てることにより、全計算メッシュを対象とした修正1群拡散方程式を解き、核燃料を含む体系100全体の中性子実効増倍率が算出される。

【0076】

ここで、修正1群拡散方程式としては、例えば、下記式(3)及び式(4)で表される関係が挙げられる。なお、式中、 D は、拡散係数を示し、 ϕ は、中性子束を示し、 B^2 は、材料バックリングを示し、 M^2 は、移動面積を示し、 k_∞ は、無限増倍率を示し、 k_t は、核燃料全体の中性子実効増倍率を示す。

$$\nabla D \nabla \phi + D \cdot B^2 \cdot \phi = 0 \quad \cdots (3)、$$

$$B^2 = (k_\infty / k_t - 1) / M^2 \quad \cdots (4)、$$

【0077】

これらの式(3)及び式(4)において、解くべき特性は中性子束 ϕ 及び核燃料全体の中性子実効増倍率 k_t である。したがって、各有限要素Y1へ与えるべき核的特性は、拡散係数 D 、移動面積 M^2 、及び無限増倍率 k_∞ となる。それらのうち、無限増倍率 k_∞ は、上記第1実施形態で説明した手法によって実測値から算出した（見かけ上の）中性子実効増倍率 k から推定する。なお、各有限要素Y1における（見かけ上の）中性子実効増倍率 k には、中性子検出器11, 12の周辺に存在する核燃料の高さ方向の特性が反映され、高さ方向の上下からの中性子の漏れによる影響を受けていると推量されるため、かかる（見かけ上の）中性子実効増倍率 k を基に推定された値は、本来の無限増倍率の定義と厳密には一致しないものと想定される。

【0078】

したがって、中性子検出器11, 12から得られた有限要素Y1単位の（見かけ上の）中性子実効増倍率 k から無限増倍率 k_∞ を換算する際に、核燃料のおおよその高さに関する情報による補正を行うことが望ましい。かかる情報は、例えば損傷核燃料の場合であっても、その核燃料が健全な状態（原子炉炉心に正常に装荷された状態等）にあったときの構造及び位置に関する設計データ等から推定することが可能である場合が多い。或いは、損傷核燃料のボーリング等の事前調査により、損傷核燃料の高さ方向の構造についての知

見が得られていれば、その情報を活用することができる。

【0079】

また、拡散係数 D 及び移動面積 M^2 は、上記第 1 実施形態で説明した手法によって実測値から算出した中性子検出器 11, 12 周辺の局所的な即発中性子寿命 λ 及び（見かけ上の）中性子実効増倍率 k から推定することができる。より具体的には、即発中性子寿命 λ が中性子スペクトルと相関が高いこと、並びに、（見かけ上の）中性子実効増倍率 k が中性子スペクトル及び核分裂性物質の含有量との相関が高いことを利用し得る。すなわち、該検出器周辺の局所的な即発中性子寿命 λ 及び（見かけ上の）中性子実効増倍率 k と、該検出器周辺の核燃料における減速材対燃料体積比（水と核燃料の体積比）及び核燃料における核分裂性物質の含有量との関係、さらには、減速材対燃料体積比及び核分裂性物質含有量と、拡散係数 D 及び移動面積 M^2 との関係を、例えばシミュレーション等によるサーベイ計算によって予め求めておき、かかる事前計算結果及び測定結果に基づいて拡散係数 D 及び移動面積 M^2 を推定することができる。

【0080】

このように構成された未臨界度測定監視システム 3 を用いて中性子計測を行うことにより、上述した未臨界度測定監視システム 1, 2 と同様に、核燃料を含む体系 100 の正確な組成（含有物質割合）、形状、性状等が不明であっても、即発中性子寿命又は未臨界度換算係数といった空間補正因子等を既知の状態パラメータとして事前に与えることなく、核燃料を含む体系 100 の未臨界度を把握し且つ監視することができる。また、核燃料を含む体系 100 において、損傷した核燃料が立体的に広く存在していても、その空間的な 3 次元分布を有限要素法に反映して解析することにより、例えば原子炉等の過酷事象等によって損傷した核燃料を含む体系全体の未臨界度をリアルタイムで計測監視することが可能となり、その結果をかかる損傷核燃料の管理及び処理に有効に資することができる。

【0081】

（第 4 実施形態）

さらに、図 6 は、本発明による未臨界度測定監視システムの第 4 実施形態における複数の中性子検出器のそれぞれの頂点を結んでなる領域区分を示す概念図である。未臨界度測定監視システム 4 は、図 5 に破線丸印で囲んで示す中性子源を有しない中性子検出器 11' が配置されていないこと以外は、図 5 に示す未臨界度測定監視システム 3 と同様に構成されたものである。かかる構成は、損傷核燃料を回収する際、回収作業スペースを確保する等の観点から中性子検出器 11, 12 の一部を撤去する必要性が生じた場合に採用し得る構成の一例である。

【0082】

この未臨界度測定監視システム 4 においては、図 6 に示す如く、図 5 における中性子検出器 11' が撤去された部位の周辺の中性子検出器 11, 12 を有限要素法における計算メッシュの節点と看做した有限要素 Y_2 （例えば図 6 において斜線を付した多角形の領域）を画定することにより、上述した未臨界度測定監視システム 3 を用いた測定解析と同様の演算処理が可能となる。

【0083】

（第 5 実施形態）

またさらに、図 7 は、本発明による未臨界度測定監視システムの第 5 実施形態における複数の中性子検出器のそれぞれの頂点を結んでなる領域区分を示す概念図である。未臨界度測定監視システム 5 は、複数の中性子検出器 11, 12 等の配置が、図 5 に示す未臨界度測定監視システム 3 と同等に構成されたものであるが、核燃料を含む体系 100' の全体をそれらの中性子検出器 11, 12 で覆うことができない状況に対応可能な構成の一例である。

【0084】

この未臨界度測定監視システム 5 では、核燃料が存在するものの中性子検出器 11, 12 を配設することができない領域（例えば図 7 において斜線を付した多角形の領域）を有限要素法における有限要素 Y_3 として画定し、その有限要素 Y_3 に隣接する周囲の中性子

検出器 1 1 による計測データに基づいて、その有限要素 Y 3 に核的特性の情報を付与することにより、上述した未臨界度測定監視システム 3 を用いた測定解析と同様の演算処理が可能となる。

【0085】

なお、上述したとおり、本発明は上記の各実施形態に限定されるものではなく、その要旨を変更しない限度において様々な変形が可能である。例えば、図 1 及び図 2 に示す未臨界度測定監視システム 1、並びに、図 3 に示す未臨界度測定監視システム 2 においては、中性子検出器 1 1、1 2 をそれぞれ複数設けてもよい。また、図 4～図 7 においては、中性子検出器 1 1、1 2 の水平方向における配置状態を模式的に示したが、それらの中性子検出器 1 1、1 2 の高さ方向の配置位置（鉛直レベル）は互いに異なっている場合も構わない。

10

【0086】

さらに、図 4～図 7 に示す未臨界度測定監視システム 3、4、5 を用いた未臨界度測定監視方法において、有限要素法の数値解析の精度を更に高めるべく、有限要素 Y 1、Y 2、Y 3 を更に細分化した有限要素として設定してもよいし、また、それらの 1 次要素に代えて、水平方向及び／又は高さ方向に対して 2 次要素を設定した解析を行ってもよい。またさらに、図 2 に示す例においては、中性子検出器 1 1 を移動可能に設けてもよい。加えて、図 2 においては、ブロック状部材 B、B によって周囲の水を排除することにより中性子スペクトルを変化させたが、体系によっては、損傷核燃料等が水中に埋没していない可能性もあり得る。よって、そのような場合には、ブロック状部材 B、B として中性子吸収物質を含むものを用いること、換言すれば、水排除用のブロック状部材 B、B に代えて、中性子吸収部材として機能するブロック状部材 B、B を用いることが望ましい。

20

【産業上の利用可能性】

【0087】

以上説明したとおり、本発明による未臨界度測定監視システム及び方法は、核燃料を含む体系に関する組成、形状、性状等の情報が不明であっても、即発中性子寿命や未臨界度換算係数といった空間補正因子等を既知の状態パラメータとして事前に与えることなく、その核燃料を含む体系の未臨界度をリアルタイムで正確に把握して監視することができるので、核燃料物質を含む臨界管理が必要な対象、特に損傷した核燃料を含む体系の臨界管理、そのような体系が生起されることが想定される施設、発電所、及び、それらに係る電機及び電力産業等の技術分野に広く且つ有効に利用することができる。

30

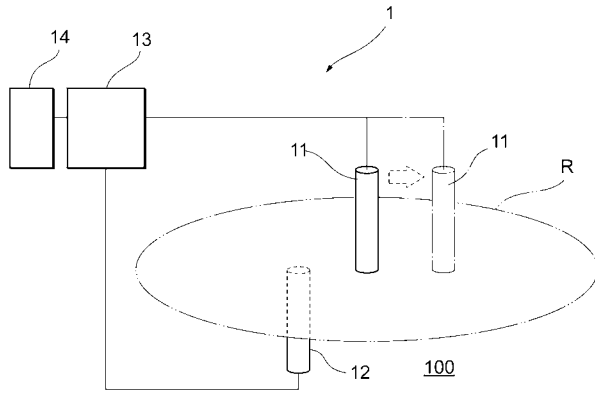
【符号の説明】

【0088】

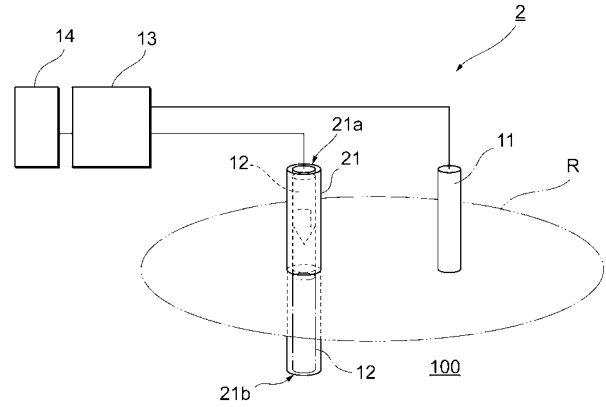
- 1, 2, 3, 4, 5 : 未臨界度測定監視システム
- 1 1 : 中性子源を有しない中性子検出器 1 1 (第 1 の中性子検出器)
- 1 2 : 中性子源を有する中性子検出器 1 2 (第 2 の中性子検出器)
- 1 3 : 測定回路系
- 1 4 : 演算装置 (演算処理部)
- 2 1 : 中空案内管
- 2 1 a : 中空案内管の一方端部
- 2 1 b : 中空案内管の他方端部
- 1 0 0, 1 0 0' : 核燃料を含む体系
- B : ブロック状部材
- N : 検出器群単位
- R : 上面領域
- S : 仮想線
- Y 1, Y 2, Y 3 : 有限要素

40

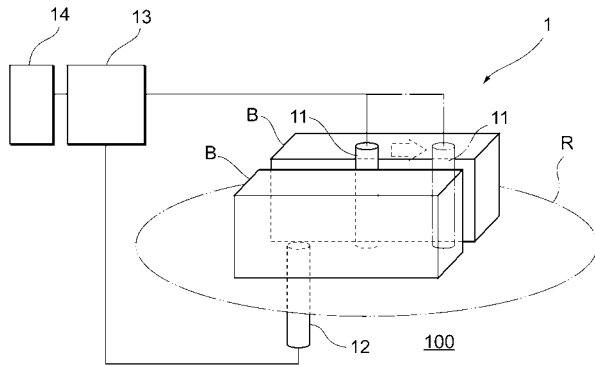
【図 1】



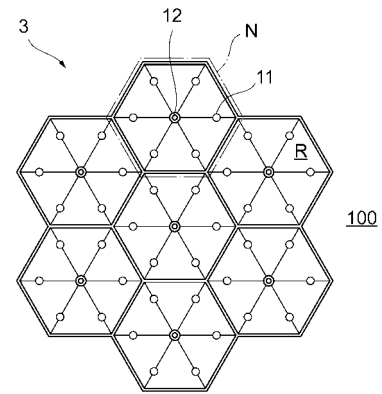
【図 3】



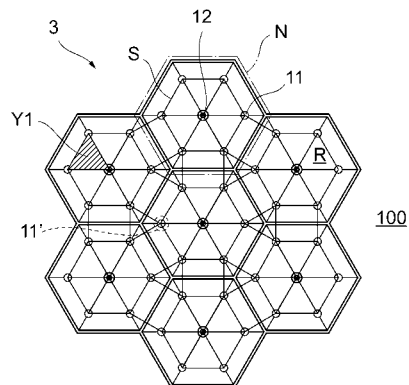
【図 2】



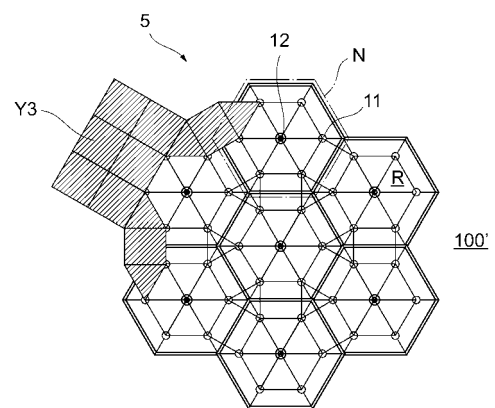
【図 4】



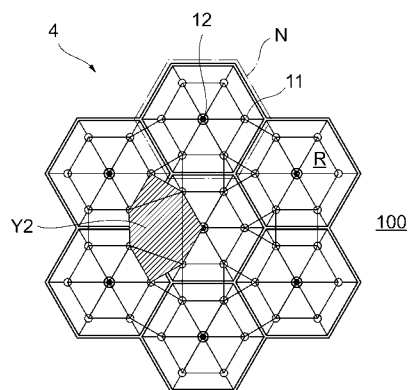
【図 5】



【図 7】



【図 6】



フロントページの続き

Fターム(参考) 2G075 CA38 DA08 FA06 FA19 FB07 FC19