

(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2023-75550
(P2023-75550A)

(43)公開日

令和5年5月31日(2023.5.31)

(51)Int. Cl.	F I	テーマコード (参考)
G 2 1 C 17/00 (2006.01)	G 2 1 C 17/00 2 1 0	2 G 0 7 5
G 2 1 C 17/108 (2006.01)	G 2 1 C 17/108 1 0 0	
	G 2 1 C 17/108 1 1 0	
	G 2 1 C 17/108 3 0 0	

審査請求 未請求 請求項の数 9 O L (全 16 頁)

(21)出願番号 特願2021-188522(P2021-188522)
(22)出願日 令和3年11月19日(2021.11.19)

(出願人による申告) 令和3年度、文部科学省、国家課題対応型研究開発推進事業「原子力システム研究開発事業、産業技術力強化法第17条の適用を受ける特許出願

(71)出願人 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 110001922
弁理士法人日峯国際特許事務所

(72)発明者 深谷 裕司
茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番地
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター内

(72)発明者 中川 繁昭
茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番地
国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
大洗研究開発センター内

最終頁に続く

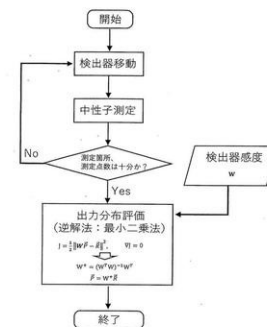
(54)【発明の名称】 原子炉内出力分布の測定方法及びその装置

(57)【要約】

【課題】 高温ガス炉、高速炉などのように中性子検出器の挿入場所が限られた原子炉の炉内出力分布の測定を可能とすること。

【解決手段】 原子炉の压力容器内の複数燃料要素の出力密度と、压力容器内外の複数中性子検出器の位置における中性子検出器からの出力信号と、燃料要素及び中性子検出器の位置に関する検出器感度との関係を表す中性子輸送方程式に基づいて炉心の出力分布を測定する方法であって、検出器感度に関する疑似逆行列と中性子検出器からの出力信号行列との積から原子炉の炉心の出力分布を算出する。

【選択図】 図3



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

原子炉の压力容器内の複数燃料要素の出力密度と、压力容器外の複数中性子検出器の位置における中性子検出器からの出力信号と、前記燃料要素及び前記中性子検出器の位置に関する検出器感度との関係を表す中性子輸送方程式に基づいて炉心の出力分布を測定する方法であって、

前記中性子検出器からの出力信号の行列と前記検出器感度に関する疑似逆行列との積から前記原子炉の炉心の出力分布を算出することを特徴とする原子炉内出力分布の測定方法。

【請求項 2】

請求項 1 に記載の原子炉内出力分布の測定方法において、压力容器内の n 個の複数燃料要素 i の出力密度を p_i とし、压力容器内外の m 個の複数検出器位置 j の中性子検出器信号を R_j とし、前記燃料要素 i 及び前記検出器位置 j に関する検出器感度を $w_{j,i}$ とし、検出器感度に関する疑似逆行列を W^+ とし、前記中性子検出器からの出力信号を

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i$$

から算出し、前記検出器感度に関する疑似逆行列を

$$W^+ = (W^T W)^{-1} W^T$$

の行列表示により算出することを特徴とする原子炉内出力分布の測定方法。

【請求項 3】

請求項 1 に記載の原子炉内出力分布の測定方法において、压力容器内の n 個の複数燃料要素 i の出力密度 p_i と、压力容器内外の m 個の複数検出器位置 j の中性子検出器信号 R_j と、前記燃料要素 i 及び前記検出器位置 j に関する検出器感度 $w_{j,i}$ との関係を表す中性子輸送方程式に基づいた下記式によって炉心の出力分布を測定する方法であって、

(1) 前記中性子検出器信号を下記式から求める第 1 のステップと、

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i$$

(2) 前記中性子検出器信号 R_j と、前記出力密度 p_i と、前記検出器感度 $w_{j,i}$ とを下記式の行列表示で表す第 2 のステップと、

$$\vec{R} = W \vec{P}$$

(3) 前記検出器感度 $w_{j,i}$ の行列表示の疑似逆行列 W^+ を下記式の行列表示により算出する第 3 のステップと、

$$W^+ = (W^T W)^{-1} W^T$$

(4) 前記出力密度 p_i の行列表示を、前記中性子検出器信号 R_j の行列表示と、前記疑似逆行列 W^+ による下記式により算出する第 4 のステップと

$$\vec{P} = W^+ \vec{R}$$

を順次実行することを特徴とする原子炉内出力分布の測定方法。

【請求項 4】

請求項 1 又は 2 に記載の原子炉内出力分布の測定方法において、前記压力容器内外の複数検出器位置に設置された中性子検出器を駆動させることにより、

前記中性子検出器信号を取得することを特徴とする原子炉内出力分布の測定方法。

【請求項 5】

請求項 1 乃至 3 のいずれかに記載の原子炉内出力分布の測定方法において、前記疑似逆行列の階数が $0.8n$ (n は前記複数燃料要素の数) 以上である場合に、妥当な測定結果として測定値を出力することを特徴とする原子炉内出力分布の測定方法。

【請求項 6】

原子炉の压力容器内の複数燃料要素の出力密度と、压力容器内外の複数検出器の位置における中性子検出器信号と、前記燃料要素及び前記検出器の位置に関する検出器感度と、の関係を表す中性子輸送方程式に基づいて炉心の出力分布を測定する装置であって、前記検出器感度に対する逆解析により前記原子炉の炉心の出力分布を算出する手順を示すプログラムを記憶している記憶装置、及び前記検出器からの信号を入力して前記プログラムに基づいて所定の演算を行う演算装置を具備することを特徴とする原子炉内出力分布の測定装置。

10

【請求項 7】

請求項 6 に記載の原子炉内出力分布の測定装置において、压力容器内の n 個の複数燃料要素 i の出力密度 p_i と、压力容器内外の m 個の複数検出器位置 j の中性子検出器信号 R_j と、前記燃料要素 i 及び前記検出器位置 j に関する検出器感度 $w_{j,i}$ との関係を表す中性子輸送方程式に基づいた下記式によって炉心の出力分布を測定する装置であって、前記プログラムは、

(1) 前記中性子検出器信号を下記式から求める第 1 のステップと、

20

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i$$

(2) 前記中性子検出器信号 R_j と、前記出力密度 p_i と、前記検出器感度 $w_{j,i}$ とを下記式の行列表示で表す第 2 のステップと、

$$\vec{R} = W\vec{P}$$

(3) 前記検出器感度 $w_{j,i}$ の行列表示の疑似逆行列 W^+ を下記式の行列表示により算出する第 3 のステップと、

$$W^+ = (W^T W)^{-1} W^T$$

(4) 前記出力密度 p_i の行列表示を、前記中性子検出器信号 R_j の行列表示と、前記疑似逆行列 W^+ による下記式により算出する第 4 のステップと

$$\vec{P} = W^+ \vec{R}$$

を順次実行するものであることを特徴とする原子炉内出力分布の測定装置。

【請求項 8】

請求項 6 又は 7 に記載の原子炉内出力分布の測定装置において、前記压力容器内外の複数検出器位置に設置された中性子検出器を駆動させることにより、前記中性子検出器信号を取得する手段を具備したことを特徴とする原子炉内出力分布の測定装置。

40

【請求項 9】

請求項 6 乃至 8 のいずれかに記載の原子炉内出力分布の測定装置において、前記疑似逆行列の階数が $0.8n$ (n は前記複数燃料要素の数) 以上である場合に、妥当な測定結果として測定値を出力する手段を具備することを特徴とする原子炉内出力分布の測定装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、中性子検出器信号を用いた逆解法によって原子炉内出力分布を測定する方法及びその装置に関する。

【背景技術】

【0002】

現行軽水炉では、炉内環境が300～400程度であるため、原子炉の燃料集合体近傍へ直接中性子検出器を装荷し、出力分布を測定し、測定された出力分布に基づいて炉内燃料の燃焼度管理が行われている（特許文献1）。一方、高温ガス炉では、炉内の温度が最高で1000程度、高速炉では600程度に達するため、炉内の出力分布測定の試みがなされてこなかった。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献1】特許第5954902号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0004】

近年、セラミックス検出器など、耐高温の中性子検出器の開発がなされてきたが、高温ガス炉への炉内計装の配置は、原子炉冷却材出口付近までの挿入は現実的ではなく、炉内への検出器の挿入場所が限られる。また、炉内構造物の観点からも、炉内への検出器の挿入は、高温ガス炉及び高速炉共に、制御棒案内管を併用するのが現実的であると思われ、各燃料体近傍に直接的に検出器を配置することは現実的ではない。

20

【0005】

上記のように、本発明は、高温ガス炉、高速炉など中性子の飛程が長い炉心で、かつ、炉内への検出器の挿入ができないもの、出来ても挿入場所が限られる原子炉の炉内出力分布の測定を可能とすることを主たる目的とする。

【0006】

本発明の主たる目的は、上述の如く、高温ガス炉、高速炉などのように中性子検出器の挿入場所が限られた原子炉の炉内出力分布の測定を可能とすることを主たる目的としているが、当然の帰結として中性子検出器の挿入場所が比較的に自由である沸騰水型原子炉や加圧水型原子炉などの軽水炉にもおいてもそのまま適用できることは言うまでもない。

30

【課題を解決するための手段】

【0007】

本発明の第1の観点に係る原子炉内出力分布の測定方法は、原子炉の压力容器内の複数燃料要素の出力密度と、压力容器外の複数中性子検出器の位置における中性子検出器からの出力信号と、前記燃料要素及び前記中性子検出器の位置に関する検出器感度との関係を表す中性子輸送方程式に基づいて炉心の出力分布を測定する方法であって、前記中性子検出器からの出力信号の行列と前記検出器感度に関する疑似逆行列との積から前記原子炉の炉心の出力分布を算出することを特徴としている。

40

【0008】

より具体的には、本発明の原子炉内出力分布の測定方法は、压力容器内のn個の複数燃料要素iの出力密度 p_i と、压力容器内外のm個の複数検出器位置jの中性子検出器信号 R_j と、前記燃料要素i及び前記検出器位置jに関する検出器感度 $w_{j,i}$ との関係を表す中性子輸送方程式に基づいた下記式によって炉心の出力分布を測定する方法であって、(1)前記中性子検出器信号を下記式から求める第1のステップと、

【数1】

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i$$

【 0 0 0 9 】

(2) 前記中性子検出器信号 R_j と、前記出力密度 p_i と、前記検出器感度 $w_{j,i}$ とを下記式の行列表示で表す第 2 のステップと、

【数 2】

$$\vec{R} = W\vec{P}$$

【 0 0 1 0 】

(3) 前記検出器感度 $w_{j,i}$ の行列表示の疑似逆行列 W^+ を下記式の行列表示により算出する第 3 のステップと、

【数 3】

$$W^+ = (W^T W)^{-1} W^T$$

【 0 0 1 1 】

(4) 前記出力密度 p_i の行列表示を、前記中性子検出器信号 R_j の行列表示と、前記疑似逆行列 W^+ による下記式により算出する第 4 のステップと

【数 4】

$$\vec{P} = W^+ \vec{R}$$

【 0 0 1 2 】

を順次実行することによって、原子炉内出力分布を測定することを特徴としている。

【 0 0 1 3 】

本発明の第 2 の観点に係る原子炉内出力分布の測定装置は、原子炉の压力容器内の複数燃料要素の出力密度と、压力容器内外の複数検出器の位置における中性子検出器信号と、前記燃料要素及び前記検出器の位置に関する検出器感度と、の関係を表す中性子輸送方程式に基づいて炉心の出力分布を測定する装置であって、前記検出器感度に対する逆解析により前記原子炉の炉心の出力分布を算出する手順を示すプログラムを記憶している記憶装置、及び前記検出器からの信号を入力して前記プログラムに基づいて所定の演算を行う演算装置を具備することを特徴とする。

【 0 0 1 4 】

より具体的には、本発明の原子炉内出力分布の測定装置は、压力容器内の n 個の複数燃料要素 i の出力密度 p_i と、压力容器内外の m 個の複数検出器位置 j の中性子検出器信号 R_j と、前記燃料要素 i 及び前記検出器位置 j に関する検出器感度 $w_{j,i}$ との関係を表す中性子輸送方程式に基づいた下記式によって炉心の出力分布を測定する装置であって、前記プログラムは、

(1) 前記中性子検出器信号を下記式から求める第 1 のステップと、

【数 1】

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i$$

【 0 0 1 5 】

(2) 前記中性子検出器信号 R_j と、前記出力密度 p_i と、前記検出器感度 $w_{j,i}$ とを下記式の行列表示で表す第 2 のステップと、

【数 2】

$$\vec{R} = W\vec{P}$$

【 0 0 1 6 】

(3) 前記検出器感度 $w_{j,i}$ の行列表示の疑似逆行列 W^+ を下記式の行列表示により算出する第 3 のステップと、

【数 3】

$$W^+ = (W^T W)^{-1} W^T$$

【 0 0 1 7 】

(4) 前記出力密度 p_i の行列表示を、前記中性子検出器信号 R_j の行列表示と、前記疑似逆行列 W^+ による下記式により算出する第 4 のステップと

【数 4】

$$\vec{P} = W^+ \vec{R}$$

【 0 0 1 8 】

を順次実行することを特徴とする。

【発明の効果】

【 0 0 1 9 】

本発明により、以下の効果が達成される。

(1) 中性子の飛程が長く、小型の炉心に対しては、炉外検出器のみによる検出器信号を用いて炉内出力分布測定が可能となる。

(2) 炉内に検出器が挿入でき、挿入場所が限られる場合には、その限られた炉内位置における検出器信号から、炉心全体の炉内出力分布測定が可能となる。

【 0 0 2 0 】

なお、先に説明したように、中性子の飛程が短い軽水炉においても、本発明を適用することによって原子炉内出力分布を測定することができ、かつ従来よりも出力分布測定の解像度を上げることが可能である。

【図面の簡単な説明】

【 0 0 2 1 】

【図 1】軽水炉の炉外検出器の検出感度の説明図。

【図 2】(A) は、高温ガス炉における炉外検出器の検出感度の説明図であり、(B) は炉内検出器の検出感度の説明図。

【図 3】本発明に係る原子炉内出力分布の測定方法を概略的に示すフローチャート。

【図 4】本発明に係る原子炉内出力分布の測定に使用する炉外検出器と炉心との位置関係を示す概略説明図。

【図 5】高温ガス炉における炉外検出器の駆動例を示す図。

【図 6】高温ガス炉における炉内検出器の駆動例を示す図。

【発明を実施するための形態】

【 0 0 2 2 】

図 1 に示すように、軽水炉の炉外検出器に対する各燃料集合体からの検出感度は、炉心の外周部の燃料体に限られ、炉外計装による原子炉中心部の炉内位置の出力分布の直接的な測定は原理的に不可能である。加圧水型軽水炉 (P W R) においては、例えば特許第 5 9 5 4 9 0 2 号に開示されているように、X e 振動を制御するための出力分布の軸方向の炉心上部・下部への出力偏差 (アクシャルオフセット) の監視のために、炉外計装によるアクシャルオフセットの評価を行う。出力分布の評価を目的としているが、実際は想定した出力分布の絶対値を周辺部の測定値により決定する問題であり、炉心中心部の出力分布自体は仮定したものであり、本発明での目的とするような、燃焼度管理に用いるような詳細な出力分布は得られない。

【 0 0 2 3 】

これは、軽水炉における減速材としての軽水の性能が優れているため、核分裂で発生した中性子が、軽水に含まれる水素と衝突し、核燃料物質に吸収されやすい熱中性子に瞬時に変わるため、中性子の飛程が非常に短く、図 1 に示すように、炉心中心部で発生した中性子が炉外への漏洩がほとんどないためである。

【 0 0 2 4 】

一方で、図 2 には、高温ガス炉の試験研究炉 H T T R の体系を対象に、本発明で想定す

10

20

30

40

50

るような、炉外検出器、炉内検出器の配置を想定した際の検出器感度を示している。軽水炉のものと比較すると広い範囲に検出器感度が分布していることが分かる。この特性を想定して、検出器信号の逆解析を行い、出力分布に再構成する技術を提示する。測定原理は次のようになる。図 2 に示すように、検出器位置からの核燃料領域への中性子の感度を中性子輸送計算により予め評価しておく。

【数 5】

$$R(r_d) = \int_{core} w(r_d, r) S(r) dr^3 \quad (1)$$

【 0 0 2 5 】

10

$w(r, r_d)$ は炉内位置 r で発生した中性子が、検出器位置 r_d において発生した中性子を検出器で検出する感度、 $S(r)$ は核分裂中性子源である。一方で、この検出器感度を評価するためには、以下の中性子輸送方程式を解く必要がある。

【数 6】

$$L\phi(r) = S(r) \quad (2)$$

【 0 0 2 6 】

L は中性子欠損演算子で、中性子の輸送、散乱、吸収による中性子の欠損を表す演算子である。その結果、得られた中性子束 $\phi(r)$ の検出器の反応が検出器信号となる。

【数 7】

$$R(r_d, r) = \Sigma_d \phi(r) \quad (3)$$

【 0 0 2 7 】

Σ_d は、検出器内の中性子反応物質の断面積を示す。 $R(r_d, r)$ は炉内位置 r で発生した中性子による検出器位置 r_d における検出器信号となる。

【 0 0 2 8 】

ここで、中性子源 $S(r)$ を次のように、炉内位置 r_i のみからの単位核分裂源と想定するならば、(ただし、 $\chi(E)$ は核分裂スペクトル)

【数 8】

$$S(r) = \frac{\chi(E)}{4\pi} \delta(r - r_i) \quad (4)$$

【 0 0 2 9 】

この検出器率自体が、検出器感度であるため、

【数 9】

$$w(r_d, r) = R(r_d, r) \quad (5)$$

【 0 0 3 0 】

となる。一方で、便宜上は、出力分布は特定の広さを持つ燃料要素について評価されるため、検出器感度も燃料要素に対して定義されるべきであり、次のように定義される。

40

【数 10】

$$w_{j,i} = \int_{fuel,i} w(r_d, r) dr^3 \quad (6)$$

【 0 0 3 1 】

これは、燃料要素 i から発生した中性子の検出器位置 j の検出器で中性子を検出する際の感度である。

【 0 0 3 2 】

一方で、この検出器感度を求める際は、(4) 式であらわされる、燃料要素 i の特定領域のみに分布された中性子源を用いた(2)式による中性子輸送計算を燃料要素の数だけ

50

行う必要があり、計算時間が増大することと、多数の数値処理による誤差の混入の恐れがあり、一般的には、以下の随伴中性子輸送方程式を解く解法が用いられる。

【数 1 1】

$$L^{\dagger}\phi^{\dagger}(r_d, r) = \Sigma_d\delta(r - r_d) \quad (7)$$

【 0 0 3 3 】

L^{\dagger} は随伴中性子欠損演算子である。これにより、(5) 式の検出器感度は以下のように表すことができる。

【数 1 2】

$$w(r_d, r) = \int \phi^{\dagger}(r_d, r, E)\chi(r, E) dE \quad (8)$$

【 0 0 3 4 】

この計算法では、(7) 式の随伴中性子輸送方程式を一度解くだけで、(6) 式と(8) 式の集計作業を行うだけで、各燃料要素に対する検出器感度の評価ができる。

【 0 0 3 5 】

ここで、検出器位置 j における検出器信号 R_j は、検出器位置 j の検出器に燃料要素 i からの感度 $w_{j, i}$ と燃料要素 i に対する出力密度 p_i によって、次のように表すことができる。なお、物理的なイメージを明確にするため、核分裂中性子源をそれに比例する出力密度に置き換えた。

【数 1 3】

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i \quad (9)$$

【 0 0 3 6 】

複数の検出器位置 j において、検出器信号を得ることにより複数の方程式が得られ、行列表示で、次式で表すことができる。

【数 1 4】

$$\vec{R} = W\vec{P} \quad (10)$$

【 0 0 3 7 】

燃料要素の数を n 、検出器位置の数を m とするとき、検出器感度は m 行 n 列の行列となる。もし、燃料要素数と検出器位置の数が同じ $n = m$ と同時に、各検出器感度の行ベクトルが一次独立である場合、検出器感度行列 W は n 行 n 列の正則行列となり、逆行列を持つことが知られている。

【数 1 5】

$$\vec{P} = W^{-1}\vec{R} \quad (11)$$

【 0 0 3 8 】

この場合、(1 1) 式から出力密度のベクトル P は厳密な解として直接得られる。これは、連立一次方程式の解が得られる条件として、変数の数だけ方程式の数が必要とする定理と同義である。ただし、実際は、任意に測定された n 個所の測定点の検出効率の一次独立性が保証されることはなく、 n 点の測定点を設定しても、一次独立の測定点としての m が $m < n$ になることは十分にあり得る。

【 0 0 3 9 】

一方で、最小二乗解を求めることで、この厳密解を含んだ一般的な表現が得られる。

【数16】

$$J = \frac{1}{2} \|W\vec{P} - \vec{R}\|^2 \quad (12)$$

【0040】

(12)式で定義される二乗誤差Jを最小とする条件は、

【数17】

$$\nabla J = 0 \quad (13)$$

【0041】

10

の解である。この解は、

【数18】

$$\vec{P} = W^+ \vec{R} \quad (14)$$

【0042】

【数19】

$$W^+ = (W^T W)^{-1} W^T \quad (15)$$

【0043】

20

として求まる。

【0044】

ここまでのステップを図3に簡潔に示す。ここで、 W^+ は疑似逆行列と呼ばれる。上記のように W は m 行 n 列の行列であり、 $n = m$ と同時に、各検出器感度の行ベクトルが一次独立である場合を除いては、逆行列を持たない。この条件を満たす場合は、

【数20】

$$W^+ = W^{-1} \quad (16)$$

【0045】

30

となり、同じ演算で、(11)式と同様の厳密解が得られる。

一方で、 $n < m$ の場合、(14)式で得られる解は、最小二乗解ではあるものの一意性はない、つまり、真値である保証はないといわれている。

【0046】

ここで、 $m < n$ の場合、つまり、変数の数に対して方程式の数が足りていない(ここでは、測定点の数が足りていない)場合、本来なら、連立一次方程式としての解は決定できないが、(13)式に示す、二乗誤差を最小にする近似解として、解の決定が可能である。しかし、のちの数値実験でも確認されるように、測定点の不足で予測される出力分布に誤差が発生している。

【0047】

40

反対に、 $m > n$ の場合、つまり、変数の数に対して方程式の方が多い場合(ここでは、測定点の数が多い場合)、やはり、最小二乗解であり、一意性はないとされている。しかし、のちの数値実験でも確認されるように、この問題においては、過剰な測定点を設定した際も厳密解が得られている。これは、以下のように考えれば、自明である。方程式の数が多ければ、その分を無視してしまえば、(16)式を用いて厳密解が得られるためである。

【0048】

例えば、 m 個の測定点における各検出器感度が一次独立な場合、その測定点(方程式)を n 個のグループと $m - n$ 個のグループに分ける。初めに、 n 個のグループで(14)式及び(16)式から、出力分布の厳密解が求まる。当然、残りの $m - n$ 個のグループの検出器信号は、(9)式から得られる検出器信号、つまり、厳密な出力分布(実際の出力分

50

布) から得られた検出器信号は、たとえ、 n 個のグループで (14) 式及び (16) 式から得られた厳密な出力分布を用いて演算 (9) 式で、残りの $m - n$ 個のグループの検出器信号を用いたとしても両者は合致する。つまり、出力分布を正しく逆算する場合は、 $m - n$ であればよいということになる。

【0049】

なお、測定に関し何らかの誤差が混入する場合、

【数21】

$$R_j = \sum_{i=1}^n w_{j,i} p_i + \varepsilon_j \quad (17)$$

【0050】

その誤差が電気ノイズのような一様な分布を持つ誤差の場合は、最小二乗法の性質を考慮すれば、測定点が多ければ多いほど、ノイズ等の不確かさの影響の排除が期待できる。この傾向は、のちの数値実験で、測定点が多いほど数値誤差と思われる誤差が低減していることから確認できる。ノイズを明示的に考慮する場合は、測定点の数は多ければ多いほど良いといえる。

【0051】

本発明では、詳細を以下に述べるように、検出器を移動させることにより多くの測定点を確保することができる。しかし、設置する原子炉の構造や高温・高線量環境などの材料健全性等の制約により、測定点が十分に確保できない場合、もしくは、評価する出力分布の解像度が燃料棒一本単位であるなどの事情で出力分布を持つ燃料要素数に対して測定点が足りない場合も十分に考えられる。その場合は、以下の方法により、測定結果の妥当性を保証するものとする。便利なことに、測定点数 m 、燃料要素数 n の大小関係にかかわらず、(15) 式に示される疑似逆行列の演算により、(14) 式を用いることにより、出力分布の決定が行える。その測定点の数が十分であるか否かは、この疑似逆行列の階数を確認することにより可能となる。行列の階数は、その行列の各行の一次独立な行の数を示す。疑似逆行列は n 行 n 列であり、階数は最大で n となる。

【0052】

測定点が多くなればなるほど、階数は上昇し、最大値の n で飽和する形になる。階数が最大値の n をとる場合、厳密解が得られることは、本発明に伴う数値実験により確認している。一方で、階数が n に満たない場合、予測された出力密度に誤差が発生する。本発明では後に示す数値実験において、表 2 に示す結果から、疑似逆行列の階数が $0.8n$ 以上の値が得られる場合において、十分に許容できる精度の出力密度分布の再現が可能であることを確認している。

【0053】

そこで、測定点の数としては、燃料要素の数と同程以上が目安となる。燃料要素の数は、燃料集合体の個数に限らず、求める解像度に依存する。燃料集合体の内部を更に、分割して燃焼度管理を行いたい場合は、その燃料要素数はさらに増える。高温ガス炉の試験研究炉である H T T R を例にとるなら、対面間距離 36 cm、高さ 58 cm の六角柱形状の燃料体ブロック 150 体から構成される。最低限、150 点の検出器信号を測定するにしても、個別の検出器で測定するのは現実的ではなく、単体、もしくは複数の検出器を移動させて検出器信号を測定する必要がある。

【0054】

そこで、本手法では、炉外計装、炉内計装、必要によってはその両方の併用を想定した検出器信号の測定を想定する。

【0055】

炉外検出器のみを用いて、出力分布を測定する場合、図 4 に示すように、圧力容器の外側から炉内からの漏洩中性子を検出しつつ、図 5 のように高さの異なる検出器信号をえるため検出器をらせん状軌道 10 に沿って駆動させる方式が本手法を用いる上では最も理想的である。本手法であれば、一つの検出器のみで、一連の動きで測定が可能であり、一般

20

30

40

50

的なX線CTでも用いられる駆動方法である。ただし、製作性、保守性の観点からは、複数の検出器を压力容器の外部の円周上に配置し、それぞれの検出器を上下駆動させる方法の方が簡便である。これにより、ほぼ、無数といえる測定点からの測定が可能となる。

【0056】

炉内計装に採用する場合は、高温ガス炉の場合、炉内環境が非常に高温であること、高速炉の場合、検出器の照射損傷が顕著であることなどから、検出器は常に炉心部に配置しておくのではなく、制御棒案内管を用いて、使用する際挿入し、使用しない場合は炉外へ格納しておくのが現実的である。高温ガス炉、高速炉両炉型において制御棒案内管が燃料から独立して存在するため、制御棒案内管の空間的な余裕はあり、検出器の駆動させる設計変更も可能である。

10

【0057】

図6に高温ガス炉の例を示す。制御棒を格納するスタンドパイプ20からの検出器の挿入を想定する。使用しないときは、検出器はスタンドパイプ20内に格納し保管する。冷却流により300程度の温度で保存でき、照射損傷も防げる。使用時は、連続的に挿入し、測定点の数を確保する。HTTRの場合、径方向形状として、燃料体が30体配置されているのに対し、16か所の制御棒案内ブロックがあり、16個の検出器を装荷した場合、燃料ブロック単位で出力分布を評価する場合は、燃料ブロック高さ58cm内で高さ方向に2か所、29cm置きに測定点を設ければ、ほぼ、燃料ブロックと同数の測定点が確保できる。図4のように高温領域を避ける場合、測定点が減少するため出力分布評価の精度の低下が予想される。その測定精度が許容できない場合、設計変更により、炉内検出器の数を増やすなどの対策により、精度低下を回避することが可能である。

20

【0058】

また、測定点の数を増やせば増やすほど、測定する出力分布の解像度を挙げられる原理であるのため、外部検出器、内部検出器を併用することにより、より高精度な出力分布測定が可能となる。

【0059】

なお、本発明を発想する過程において、軽水炉と異なる中性子飛程の長い炉心を想定したが、本技術は軽水炉の現行の炉内計装に適用することにより、その出力分布測定の解像度の増加が期待できる。軽水炉の炉内計装では、測定した中性子により予測できる出力分布は検出器周辺の燃料集合体の出力の平均値を表しているものとして処理するが、近傍の検出器でも同一の燃料集合体からの漏洩中性子を測定していることを考慮し、事前評価の検出器感度分布を用いた逆解析を行えば、集合体毎の出力分布の直接的な決定が可能となる。

30

【産業上の利用可能性】

【0060】

現行軽水炉を運用している電力事業者は、炉内計装による直接的な出力分布測定により、直接的に燃焼度を監視し、炉内燃料管理を行っている。一方で、高温ガス炉、高速炉では、これまで、高温環境を理由に炉内計装の開発を行ってきおらず、直接的な炉内出力分布測定技術の開発を行ってこなかった。本発明により、両新型炉に関しても炉内出力分布測定が初めて可能となり、軽水炉と同様の炉内燃料管理が出来るようになり、安全性が格段に向上する。

40

【0061】

小型の炉心体系で、炉心中心部の燃料体まで十分に検出器感度が確保できる場合は、炉外計装のみでの出力分布測定が可能となる。炉外検出器を駆動させることにより、必要となる測定点を得るための検出器数が減り、複数検出器の構成による検出効率の補正の手間も回避できる。

【0062】

炉内計装が装荷可能な炉心には、限られた炉内の挿入位置に対して、幅広い形での出力分布の測定が可能となり、構造上もしくは、温度・照射環境等の理由で、装荷場所が限られる場合でも出力分布の測定が可能なる。炉内計装に関しても、炉内検出器を可動式にす

50

ることにより、測定点を増やせるだけでなく検出器を使用しないときの劣化を回避できる。高温ガス炉、高速炉では、制御棒案内管が燃料集合体から独立しており、駆動式の検出器を配置する余地が十分にある。

【 0 0 6 3 】

本発明の性能を高温ガス炉試験研究炉 HTTR 体系を対象に適用し、シミュレーションにより確認した。炉外計装については、圧力容器の外周 36 点、高さ位置 5 点の計 180 点の測定で、150 体の燃料ブロックの出力分布を測定した結果を表 1 に示す。

表 1 HTTR 体系での出力分布測定誤差

	炉外計装	炉内計装
全炉心誤差		
平均(%)	1.2×10^{-9}	3.2×10^{-11}
標準偏差(%)	1.8×10^{-9}	3.8×10^{-11}
最大局所誤差		
誤差(%)	1.1×10^{-8}	2.4×10^{-10}
燃料カラム	1D1	1C1
燃料段数	4	5
逆行列の階数	150	150

【 0 0 6 4 】

全燃料ブロックの測定誤差の平均は 1.2×10^{-9} %、最大の誤差を示すブロックで 1.1×10^{-8} % 程度と無視できる誤差を示し、厳密解といえる完全一致が確認できた。炉内計装については、検出器 16 か所、高さ位置 20 点の 320 点の測定により評価した。同じく表 1 に結果を示す。全燃料ブロックの測定誤差の平均は 3.2×10^{-11}

%、最大の誤差を示すブロックで 2.4×10^{-10} % 程度と厳密解といえる解が得られている。もし、高温となる炉心下部への検出器の挿入を避けるために、部分挿入を行った場合の結果を表 2 に示す。

表 2 HTTR 体系での炉内検出器を部分挿入した際の出力分布測定誤差

	90%	80%	50%	45%	40%
全炉心誤差					
平均(%)	3.7×10^{-11}	4.7×10^{-11}	1.8×10^{-7}	0.28	1.1
標準偏差(%)	4.9×10^{-11}	5.3×10^{-11}	4.4×10^{-7}	0.65	1.8
最大局所誤差					
誤差(%)	3.7×10^{-10}	2.4×10^{-10}	2.5×10^{-6}	5.0	6.5
燃料カラム	1A1	1A1	1C1	3D1	3B3
燃料段数	5	5	5	5	5
逆行列の階数	150	150	150	144	128

【 0 0 6 5 】

測定点は位置を固定し、部分挿入により、高さ方向位置 20 点から炉心下部の測定点を除外していく。50% 挿入の場合でも厳密解といえる良い一致を示している。45%、40% 部分挿入で炉心平均の誤差で 0.28%、1.1%、最大局所誤差で、5.0%、6.5% と有意な誤差が発生している。これは、逆行列の階数の減少から明らかのように、部分挿入の位置というよりも、測定点が不足しているための誤差で、さらに、密な測定点の配置により部分挿入においても誤差を排除する改善の余地がある。このように、炉内の半分程度の検出器の挿入で、全炉心の出力分布が測定でき、高温領域への検出器の挿入を回避することが可能である。50% の部分挿入では、200 程度の検出器の環境温度の低下が期待でき、検出器の耐熱性の観点で、検出器に加わる負荷を大きく低減できる。

【 0 0 6 6 】

炉外計装を用いた出力分布測定法の適用性は、中性子の飛程と炉心の大きさの関係性により決定される。表 3 に各炉型の中性子の飛程として、中性子の発生から消滅までの移動

距離の平均を表す。

表3 各炉型の拡散距離

	軽水炉	高温ガス炉	高速炉
拡散距離(cm)	7	27	40

【0067】

拡散距離を燃料部に対し評価し比較した。軽水炉が7cm程度であるのに対し、高温ガス炉では、その4倍程度、高速炉では、その6倍程度であり、測定した中性子の情報から広い範囲の燃料集合体の出力分布の推定が可能である。軽水炉の検出器感度は図1に示すように、40cm - 60cm程度である。小型原子炉(SMR)として開発されている米国のニュースケール社(NuScale Power, LLC)の設計ですら、炉心半径が120cm程度であるため、軽水炉への適用はできない。高温ガス炉については、図2に示すように広い検出器感度分布が得られる。炉心外周部から、HTTRの実効炉心半径の130cm程度を観測できると想定した際、高温ガス炉の高出力化は出力密度上昇、炉心長増加などによる対応とともに、高出力炉心では減圧事故時の安全性の観点から、炉心の中心部に燃料を配置しない環状炉心の形状をとることから、炉心出力30MWのHTTRだけではなく、国立研究開発法人日本原子力研究開発機構で設計した実用炉設計の50MW炉心、165MW炉心、600MW炉心へも適用可能であり、SMR(Small Modular Reactor)に分類される高温ガス炉の設計の大半への適用が見込まれる。高速炉に関しては、拡散距離の長さから、より広範囲な検出器感度が期待できる。仮に、高温ガス炉と同等の130cm程度の燃料幅を観測できるとしても、高速炉SMRの代表的な設計であるPRISM(Power Reactor Innovative Small Module)炉では、炉心半径が130cm程度であることから、十分に適用が可能である。一方で、炉心半径が300cm程度となる大型高速炉では、外部検出器のみの適用は難しいと考えられる。

10

20

【0068】

炉内計装を用いた方法については、発明の対象とした、高温ガス炉、高速炉での適用が可能であるだけでなく、現行軽水炉の現行炉内計装のデータ処理に、発明技術の中核となる逆解析手法を適用することにより、炉内出力分布の解像度の向上が可能である。これは、現行手法が炉内計装の測定値を周辺燃料集合体出力の平均値とする積分的なアプローチであるのに対し、本解析は各領域に測定信号を割り当て再構成する微分的なアプローチであることから、自明な結果である。

30

【0069】

なお、以上の説明では、本質的な数学的構造を示すために、疑似逆行列を用い、その一次独立成分を測定する指標として疑似逆行列の階数について触れているが、最小二乗法を用いるにしても逆行列を用いない数値解法や、最小二乗法に代わる、最尤法などのアプローチもあり、逆解法の実装は複数存在する。

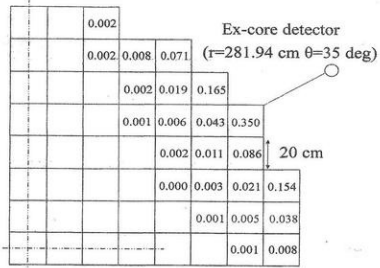
40

【符号の説明】

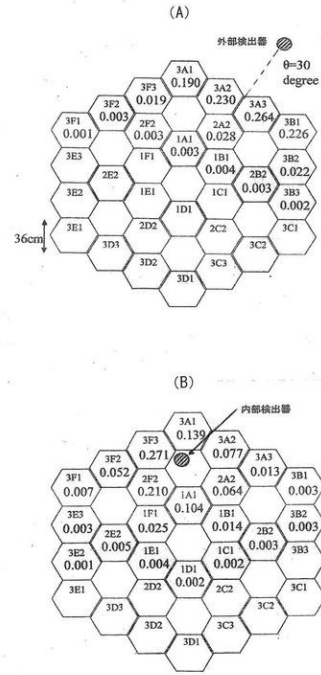
【0070】

- 10・・・らせん状軌道
- 20・・・スタンドパイプ

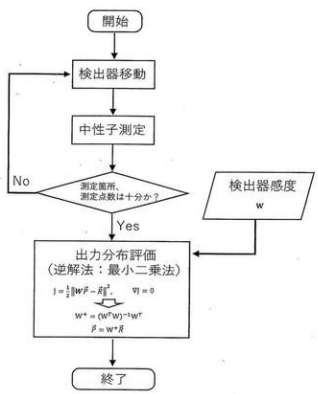
【 図 1 】



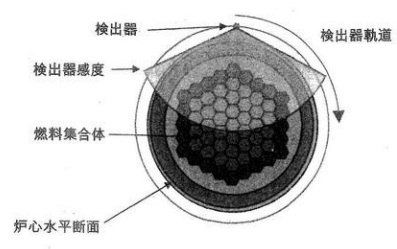
【 図 2 】



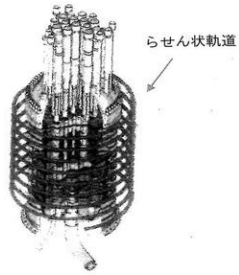
【 図 3 】



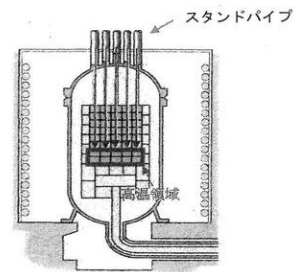
【 図 4 】



【図5】



【図6】



フロントページの続き

(72)発明者 沖田 将一郎

茨城県東茨城郡大洗町成田町4 0 0 2 番地 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 大洗研究
開発センター内

Fターム(参考) 2G075 BA03 CA08 DA08 DA20 FA06 FA19 FB15