

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5682882号
(P5682882)

(45) 発行日 平成27年3月11日(2015.3.11)

(24) 登録日 平成27年1月23日(2015.1.23)

(51) Int.Cl. F1
GO1N 23/02 (2006.01) GO1N 23/02

請求項の数 12 (全 26 頁)

(21) 出願番号	特願2010-166333 (P2010-166333)	(73) 特許権者	505374783 独立行政法人日本原子力研究開発機構 茨城県那珂郡東海村村松4番地49
(22) 出願日	平成22年7月23日(2010.7.23)	(74) 代理人	110000017 特許業務法人アイテック国際特許事務所
(65) 公開番号	特開2011-123048 (P2011-123048A)	(72) 発明者	田中 宏幸 東京都文京区本郷七丁目3番1号 国立大 学法人東京大学内
(43) 公開日	平成23年6月23日(2011.6.23)	(72) 発明者	高松 邦吉 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002番 独立行政法人日本原子力研究開発機構大洗 研究開発センター内
審査請求日	平成25年7月12日(2013.7.12)	審査官	藤田 都志行
(31) 優先権主張番号	特願2009-257782 (P2009-257782)		
(32) 優先日	平成21年11月11日(2009.11.11)		
(33) 優先権主張国	日本国(JP)		

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 内部状態解析方法およびプログラム並びに内部状態解析装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析方法であって、

前記構造物の内部を通過する前記高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて該高透過性粒子の散乱角を設定すると共に該設定した散乱角を用いて前記構造物の内部の状態を解析するステップを含み、

前記ステップは、前記高透過性粒子が通過する通過経路の長さとして該通過経路における物質の密度とを用いて前記散乱角の分布を定める、

ことを特徴とする内部状態解析方法。

10

【請求項2】

請求項1記載の内部状態解析方法であって、

前記散乱角の分布は、ガウス分布である、

ことを特徴とする内部状態解析方法。

【請求項3】

請求項1または2記載の内部状態解析方法であって、

前記ステップは、前記構造物の内部の一部に相当し前記高透過性粒子が通過する通過パーツにおける前記通過経路の長さとして前記通過パーツにおける物質の密度との積としての密度長を用いて前記通過パーツにおける前記散乱角の分布を定める、

ことを特徴とする内部状態解析方法。

20

【請求項 4】

請求項 3 記載の内部状態解析方法であって、

前記通過パーツにおける前記散乱角の分布は、前記通過パーツを j 、前記通過パーツ j における前記高透過性粒子の軌跡を基準平面に投影したときの該高透過性粒子の基準方向に対するズレとしての投影時角度を $\theta_x [j]$ 、前記通過パーツ j における標準偏差を $\sigma [j]$ 、前記通過パーツ j における前記散乱角の分布を $f(\theta_x [j])$ としたときに次式 (A) により表わされるガウス分布であり、前記式 (A) 中、前記通過パーツ j における前記標準偏差 $\sigma [j]$ は、前記高透過性粒子の運動量を p 、光速に対する前記高透過性粒子の速度を β 、前記通過パーツ j における前記密度長を $DL [j]$ 、前記通過パーツ j における物質の放射長を $X [j]$ としたときに式 (B) により表わされる、

10

ことを特徴とする内部状態解析方法。

【数 1】

$$f(\theta_x[j]) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma[j]} \exp\left(-\frac{\theta_x[j]^2}{2\sigma[j]^2}\right) \quad (A)$$

$$\sigma[j] = \frac{13.5}{p\beta} \sqrt{\frac{DL[j]}{X[j]}} \quad (B)$$

【請求項 5】

請求項 2 または 4 記載の内部状態解析方法であって、

前記ステップは、前記ガウス分布の標準偏差を前記高透過性粒子の散乱角として設定する、

20

ことを特徴とする内部状態解析方法。

【請求項 6】

所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析方法であって、

前記構造物の内部を通過する前記高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて該高透過性粒子の散乱角を設定すると共に該設定した散乱角を用いて前記構造物の内部の状態を解析する ステップを含み、

前記ステップは、前記高透過性粒子の前記構造物に入射する前の入射状態と前記高透過性粒子の前記構造物を通過した後の放出状態とから推定される前記高透過性粒子の散乱角である推定散乱角と、前記構造物の内部の物質として仮定した仮定物質と前記高透過性粒子の前記入射状態とから得られる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて設定される前記高透過性粒子の散乱角である分布散乱角と、の比較を前記推定散乱角と前記分布散乱角との乖離が予め設定された所定範囲内になるまで前記仮定物質を変更しながら行ない、前記推定散乱角と前記分布散乱角との乖離が前記所定範囲内になるときの前記仮定物質を前記構造物の内部の物質であると推定する、

30

ことを特徴とする内部状態解析方法。

【請求項 7】

請求項 1 ないし 6 のいずれか 1 つの請求項に記載の内部状態解析方法であって、

前記所定の高透過性は、1メートルの鉄を透過する透過性である、

40

ことを特徴とする内部状態解析方法。

【請求項 8】

請求項 1 ないし 7 のいずれか 1 つの請求項に記載の内部状態解析方法であって、

前記高透過性粒子は、ミュー粒子である、

内部状態解析方法。

【請求項 9】

請求項 1 ないし 8 のいずれか 1 つの請求項に記載の内部状態解析方法であって、

前記ステップは、ウラン、セシウム、ストロンチウムのいずれかの放射長と前記高透過性粒子の軌跡とに基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて前記構造物としての原子炉の内部の状態を解析する、

50

内部状態解析方法。

【請求項 10】

請求項 1 ないし 9 のいずれか 1 つの請求項に記載の内部状態解析方法のステップを 1 以上のコンピュータに実現させるためのプログラム。

【請求項 11】

所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析装置であって、

前記構造物の内部を通過する前記高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて該高透過性粒子の散乱角を設定すると共に該設定した散乱角を用いて前記構造物の内部の状態を解析する内部状態解析手段、

を備え、

前記内部状態解析手段は、前記高透過性粒子が通過する通過経路の長さと該通過経路における物質の密度とを用いて前記散乱角の分布を定める、

内部状態解析装置。

【請求項 12】

所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析装置であって、

前記構造物の内部を通過する前記高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて該高透過性粒子の散乱角を設定すると共に該設定した散乱角を用いて前記構造物の内部の状態を解析する内部状態解析手段、

を備え、

前記内部状態解析手段は、前記高透過性粒子の前記構造物に入射する前の入射状態と前記高透過性粒子の前記構造物を通過した後の放出状態とから推定される前記高透過性粒子の散乱角である推定散乱角と、前記構造物の内部の物質として仮定した仮定物質と前記高透過性粒子の前記入射状態とから得られる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて設定される前記高透過性粒子の散乱角である分布散乱角と、の比較を前記推定散乱角と前記分布散乱角との乖離が予め設定された所定範囲内になるまで前記仮定物質を変更しながら行ない、前記推定散乱角と前記分布散乱角との乖離が前記所定範囲内になるときの前記仮定物質を前記構造物の内部の物質であると推定する、

内部状態解析装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、内部状態解析方法およびプログラム並びに構造物、内部状態解析装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、この種の内部状態解析方法としては、ミュオンのうち天頂角 $50^\circ \sim 90^\circ$ の範囲で地表に降り注ぐ水平ミュオンを用いて、構造物の測定対象部を通過した前方水平ミュオンと構造物の測定対象部を通過しない後方水平ミュオンとの同じ入射角についての強度比により構造物の内部構造情報を得るものが提案されている（例えば、特許文献 1 参照）。この方法では、前方水平ミュオンのうち低エネルギー（5 GeV 未満）の前方水平ミュオンだけをデータとして取得し、取得した低エネルギーの前方水平ミュオンの強度と後方水平ミュオンの強度との比から構造物の内部構造情報を得ている。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0003】

【特許文献 1】特開 2007-271400 号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

10

20

30

40

50

【0004】

一般に、内部状態解析方法では、ミュオン粒子など高い透過性を有する粒子の性質を用いて構造物の内部をより適正に解析することが望まれている。このため、上述の内部状態解析方法、即ち、低エネルギーの前方水平ミュオンの強度と後方水平ミュオンの強度との比を用いて構造物の内部構造情報を解析する方法とは異なる方法の構築が課題の一つとされている。

【0005】

本発明の内部状態解析方法およびプログラム並びに構造物、内部状態解析装置は、所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部状態をより適正に解析することを目的の一つとする。本発明の構造物は、より適正な解析結果を用いた構造物の製造を可能にすることを目的の一つとする。

10

【課題を解決するための手段】

【0006】

本発明の内部状態解析方法およびプログラム並びに構造物、内部状態解析装置は、上述の目的の少なくとも一部を達成するために以下の手段を採った。

【0007】

本発明の内部状態解析方法は、

所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析方法であって、

前記構造物の内部を通過する前記高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて該高透過性粒子の散乱角を設定すると共に該設定した散乱角を用いて前記構造物の内部の状態を解析する、

20

ことを特徴とする。

【0008】

この本発明の内部状態解析方法では、構造物の内部を通過する所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる高透過性粒子の散乱角の分布を用いて高透過性粒子の散乱角を設定すると共に設定した散乱角を用いて構造物の内部の状態を解析する。これにより、高透過性粒子の性質（特に、構造物内の物質によって散乱角が異なる性質）を用いて構造物の内部の状態をより適正に解析することができる。ここで、「所定の高透過性」は、1メートルの鉄を透過する透過性である、ものとすることもできる。また、「高透過性粒子」は、ミュオン粒子である、ものとすることもできる。また、「構造物」には、原子炉や、高炉、鉄筋・鉄骨コンクリートの柱や梁などが含まれる。

30

【0009】

こうした本発明の内部状態解析方法において、前記散乱角の分布は、ガウス分布である、ものとすることもできる。

【0010】

また、本発明の内部状態解析方法において、前記高透過性粒子が通過する通過経路の長さ L と該通過経路における物質の密度 ρ とを用いて前記散乱角の分布を定める、ものとすることもできる。この場合、前記構造物の内部の一部に相当し前記高透過性粒子が通過する通過パーツにおける前記通過経路の長さ L_j と前記通過パーツにおける物質の密度 ρ_j との積としての密度長 $L_j \rho_j$ を用いて前記通過パーツにおける前記散乱角の分布を定める、ものとすることもできる。こうすれば、通過パーツにおける散乱角の分布を定めることができる。この場合、前記通過パーツにおける前記散乱角の分布は、前記通過パーツを j 、前記通過パーツ j における前記高透過性粒子の軌跡を基準平面に投影したときの該高透過性粒子の基準方向に対するズレとしての投影時角度を $\theta_x [j]$ 、前記通過パーツ j における標準偏差を $\sigma [j]$ 、前記通過パーツ j における前記散乱角の分布を $f(\theta_x [j])$ としたときに次式(A)により表わされるガウス分布であり、前記式(A)中、前記通過パーツ j における前記標準偏差 $\sigma [j]$ は、前記高透過性粒子の運動量を p 、光速に対する前記高透過性粒子の速度を β 、前記通過パーツ j における前記密度長を $D L [j]$ 、前記通過パーツ j における物質の放射長を $X [j]$ としたときに式(B)により表わされる、ものとするこ

40

50

ともできる。

【0011】

【数1】

$$f(\theta x[j]) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma[j]} \exp\left(-\frac{\theta x[j]^2}{2\sigma[j]^2}\right) \quad (A)$$

$$\sigma[j] = \frac{13.5}{p\beta} \sqrt{\frac{DL[j]}{X[j]}} \quad (B)$$

【0012】

さらに、本発明の内部状態解析方法において、前記ガウス分布の標準偏差を前記高透過性粒子の散乱角として設定する、ものとするともできる。

【0013】

あるいは、本発明の内部状態解析方法において、前記高透過性粒子の前記構造物に入射する前の入射状態と前記高透過性粒子の前記構造物を通過した後の放出状態とから推定される前記高透過性粒子の散乱角である推定散乱角と、前記構造物の内部の物質として仮定した仮定物質と前記高透過性粒子の前記入射状態とから得られる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて設定される前記高透過性粒子の散乱角である分布散乱角と、の比較を前記推定散乱角と前記分布散乱角との乖離が予め設定された所定範囲内になるまで前記仮定物質を変更しながら行ない、前記推定散乱角と前記分布散乱角との乖離が前記所定範囲内

10

20

【0014】

加えて、本発明の内部状態解析方法において、ウラン、セシウム、ストロンチウムのいずれかの放射長と前記高透過性粒子の軌跡とに基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて前記構造物としての原子炉の内部の状態を解析する、ものとするともできる。

【0015】

本発明のプログラムは、上述のいずれかの態様の本発明の内部状態解析方法のステップを1以上のコンピューターに実現させるためのものである。このプログラムは、コンピューターが読み取り可能な記録媒体（例えばハードディスク、ROM、FD、CD、DVDなど）に記録されていてもよいし、伝送媒体（インターネットやLANなどの通信網）を介してあるコンピューターから別のコンピューターに配信されてもよいし、その他どのような形で授受されてもよい。このプログラムを一つのコンピューターに実行させるか又は複数のコンピューターにステップを分担して実行させれば、上述の本発明の内部状態解析方法のステップが実行されるため、本発明の内部状態解析方法と同様の作用効果が得られる。

30

【0016】

本発明の構造物は、上述のいずれかの態様の本発明の内部状態解析方法による解析結果を用いて製造された構造部である、ことを要旨とする。これにより、より適正な解析結果を用いた構造物の製造を可能にすることができる。

40

【0017】

本発明の内部状態解析装置は、

所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析装置であって、

前記構造物の内部を通過する前記高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる前記高透過性粒子の散乱角の分布を用いて該高透過性粒子の散乱角を設定すると共に該設定した散乱角を用いて前記構造物の内部の状態を解析する内部状態解析手段、

を備えることを要旨とする。

【0018】

50

この本発明の内部状態解析装置では、構造物の内部を通過する所定の高透過性を有する粒子である高透過性粒子の軌跡に基づいて定められる高透過性粒子の散乱角の分布を用いて高透過性粒子の散乱角を設定すると共に設定した散乱角を用いて構造物の内部の状態を解析する。これにより、高透過性粒子の性質（特に、構造物内の物質によって散乱角が異なる性質）を用いて構造物の内部の状態をより適正に解析することができる。

【図面の簡単な説明】

【0019】

【図1】一実施例としての内部状態解析装置20の構成の概略を示す構成図である。

【図2】内部状態解析プログラム30の一例を示すフローチャートである。

【図3】原子炉内の全体領域およびパーツiの一例を示す説明図である。

10

【図4】ミュー粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* の分布の一例を示す説明図である。

【図5】原子炉内を対象ミュー粒子が仰角 θ_e で通過するときの様子の一例を示す説明図である。

【図6】対象ミュー粒子の軌跡と投影軌跡と投影時角度 $\theta_x [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ との関係の一例を示す説明図である。

【図7】投影時角度 $\theta_x [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ についてのガウス分布の一例を示す説明図である。

【図8】原子炉モデルの一例を示す説明図である。

【図9】図8の原子炉モデルの内部の状態の解析に内部状態解析プログラム30を用いたときの実行結果の一例を示す説明図である。

20

【図10】観測装置50の構成の概略を示す構成図である。

【図11】観測装置50におけるシンチレータ52, 54, 56の配置の様子を示す説明図である。

【図12】シミュレーションの結果である。

【図13】炭素と鉄について交互に2時間ずつ行なったときの各時間におけるコインシデンス数割合である。

【図14】鉄と鉛について交互に2時間ずつ行なったときの各時間におけるコインシデンス数割合である。

【図15】図13および図14をまとめた結果である。

【図16】仰角が 10° の1万発のミュー粒子のうち散乱角が 0.004 rad 以下の粒子数である。

30

【図17】原子炉の燃料体のモデルである。

【図18】原子炉の燃料体のモデルである。

【図19】燃焼前の原子炉モデルについての解析結果である。

【図20】燃焼後の原子炉モデルについての解析結果である。

【図21】燃焼の前後で低散乱角の粒子数がどの程度変化したかについて燃焼前の粒子数に対する燃焼後の粒子数の割合で視覚化したものである。

【発明を実施するための形態】

【0020】

次に、本発明を実施するための形態を実施例を用いて説明する。

40

【実施例】

【0021】

図1は、本発明の一実施例としての所定の高透過性の粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析装置20の構成の概略を示す構成図である。実施例の内部状態解析装置20は、図示するように、一般的な汎用コンピュータ22にアプリケーションソフトウェアとしての内部状態解析プログラム30がインストールされたものとして構成されている。

【0022】

コンピュータ22は、図示しないCPU、ROM、RAM、グラフィックプロセッサ（GPU）、グラフィックメモリ（VRAM）、システムバス、ハードディスクドライブな

50

どを備え、ハードディスクドライブに内部状態解析プログラム30などが記憶されている。内部状態解析プログラム30は、計算条件の設定などを行なうためにデータを入力するデータ入力モジュール32と、入力されたデータを用いて構造物の内部の状態を計算する計算モジュール34と、計算した結果を出力する結果出力モジュール36と、から構成されている。なお、コンピュータ22には、表示装置としてのディスプレイ40や、入力装置としてのキーボード42やマウス44などが接続されている。

【0023】

次に、こうして構成された内部状態解析装置20における内部状態解析プログラム30の一連の処理について説明する。なお、実施例では、高透過性粒子としてミュオン粒子を用いるものとし、構造物として原子炉を用いるものとした。以下、説明の都合上、まず、原子炉の仮想的なモデル（以下、原子炉モデルということがある）の内部の状態の解析に内部状態解析プログラム30を用いる場合について説明し、その後、現実の原子炉（以下、現実原子炉ということがある）の内部の状態の解析に内部状態解析プログラム30を用いる場合について説明する。図2は、原子炉モデルの内部の状態の解析に用いられる内部状態解析プログラム30の一例を示すフローチャートである。このプログラムは、ユーザによって実行が指示されたときに、CPUにより、RAMの所定アドレスに書き込まれて実行される。

【0024】

内部状態解析プログラム30が実行されると、CPUは、まず、原子炉内の全体領域の形状や、それぞれが全体領域の一部に相当する複数のパーツ（要素） i （ i はパーツの各々に対応する番号で1～ N_i 、但し N_i はパーツの数）のそれぞれの位置、複数のパーツ i のそれぞれにおいて仮定する物質（以下、仮定物質という） $Mas[i]$ 、複数のパーツ i のそれぞれにおける仮定物質 $Mas[i]$ の密度（単位体積あたりの質量） $\rho[i]$ 、後述のステップS120～S180の処理（以下、内部状態解析処理という）に用いるミュオン粒子の数である目標ミュオン粒子数 N_F などの計算条件を入力する（ステップS100）。ここで、原子炉内の全体領域と複数のパーツ i との関係は、円筒や立方体、直方体、円錐などの複数のパーツ i の組み合わせによって原子炉内の全体領域が定められるものとしてもよいし、原子炉内の全体領域の分割によって複数のパーツ i が定められるものとしてもよい。また、仮定物質 $Mas[i]$ は、実施例では、複数のパーツ i のそれぞれについて、一種類の物質（ウラン、セシウム、ストロンチウムなどのうち一つ）を用いるものとした。これらの計算条件は、例えば、ユーザによるキーボード42やマウス44の操作によって設定されたデータを入力するものとしたり、ハードディスクドライブなどに記憶されたデータを入力するものとしたりすることができる。原子炉内の全体領域およびパーツ i の一例を図3に示す。

【0025】

こうしてデータを入力すると、現在までに内部状態解析処理に用いたミュオン粒子の数である処理用ミュオン粒子数 N_C を初期化（初期値としての値0を設定）すると共に（ステップS110）、今回の内部状態解析処理に用いるミュオン粒子（以下、対象ミュオン粒子という）のエネルギー E_μ と天頂角 θ^* と水平角 ϕ と通過点 α とを設定する（ステップS120）。ここで、対象ミュオン粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* については、実施例では、図4に例示するミュオン粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* の分布に基づいて設定するものとした。具体的には、内部状態解析処理に用いたミュオン粒子の数が目標ミュオン粒子数 N_F になったときに目標ミュオン粒子数 N_F のミュオン粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* の分布が図4に応じた分布になるよう、エネルギー E_μ については0.1～100GeVの範囲内で、天頂角 θ^* については $0^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で、対象ミュオン粒子のエネルギー E_μ と天頂角 θ^* とを設定するものとした。また、ミュオン粒子の水平角 ϕ については、実施例では、周知の乱数発生プログラムを用いて $-90^\circ \sim 90^\circ$ の範囲内で設定するものとした。さらに、通過点 α については、ミュオン粒子を検出するための仮想の検出器が原子炉の全体を覆うように設置されているものとみなして、周知の乱数発生プログラムを用いて、原子炉に入射する前のミュオン粒子の通過点を設定するものとした。

【0026】

次に、対象ミュー粒子の水平角 ϕ と仰角 θ_e ($= 90^\circ - \theta^*$) と通過点 α とに基づいて、複数のパーツ i (i は $1 \sim N_i$) のうち対象ミュー粒子が通過するパーツを通過パーツ j (j は通過パーツの各々に対応する番号で $1 \sim N_j$ 、但し N_j は通過パーツの数で $1 \leq N_j \leq N_i$) として設定する (ステップ S 130)。そして、原子炉内でのミュー粒子の散乱 (移動方向の変化) を考慮せずに、通過パーツ j における対象ミュー粒子が通過する通過経路の長さである通過長 $L [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を設定すると共に (ステップ S 140)、通過パーツ j について通過長 $L [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と仮定物質 $Mas [j]$ の密度 $\rho [j]$ との積としての密度長 $DL [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を計算する (ステップ S 150)。図 5 は、原子炉内を対象ミュー粒子が仰角 θ_e で通過するときの様子の一例を示す説明図である。図 5 の例では、簡単のために、対象ミュー粒子の垂直方向の軌跡だけを図示し、水平方向の軌跡については図示を省略した。また、図 5 中、通過パーツ j については斜線を付した。通過パーツ j における通過長 $L [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ は、対象ミュー粒子の水平角 ϕ と仰角 θ_e と通過点 α とから容易に導くことができる。

10

【0027】

次に、通過パーツ j について、対象ミュー粒子の軌跡を予め定められた基準平面 (例えば、原子炉の底面に平行な平面など) に投影したときの投影軌跡の基準方向 (原子炉に入射する前のミュー粒子、例えば、通過点 α におけるミュー粒子の投影軌跡の方向) に対するズレとしての投影時角度 $\theta_x [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ に対するガウス分布 (正規分布) を次式 (1) により設定する (ステップ S 160)。対象ミュー粒子の軌跡と投影軌跡と投影時角度 $\theta_x [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ との関係の一例を図 6 に示す。また、式 (1) 中、「 $f (\theta_x [j, \phi, \theta_e, \alpha])$ 」は投影時角度 $\theta_x [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ に対する分布であり、「 $\sigma [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ 」は通過パーツ j における標準偏差であり、対応する通過パーツ j の密度長 $DL [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を用いて式 (2) により得られる。式 (2) 中、「 p 」はミュー粒子の運動量 (実施例では、対象ミュー粒子のエネルギー E_μ を用いるものとした) であり、「 β 」は光速に対する対象ミュー粒子の速度 (実施例では、値 1 を用いるものとした) であり、「 $X [j]$ 」は通過パーツ j における仮定物質 $Mas [j]$ の放射長 (例えば、ウランは 5 mm、セシウムは 11 mm、ストロンチウムは 13 mm など) である。こうして得られる投影時角度 $\theta_x [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ に対するガウス分布の一例を図 7 に示す。ミュー粒子は、高い透過性を有する一方、中性子などに比して原子量の大きな物質 (例えば、ウランやセシウム、ストロンチウム、プルトニウム、鉄など) 内で曲がりやすい性質を有することが知られている。荷電粒子は、物質中を通過する際に非常に細かい散乱を数多く経験するが、これらの散乱のほとんどは原子核との間のクーロン散乱によるものであるため、このような効果は多重クーロン散乱と呼ばれる。多重クーロン散乱の分布はモリエールの理論によって精度よく表わすことができ、このモリエールの理論は小さな散乱角度についてはおおよそガウス分布によって説明することができる。式 (1) は、対象ミュー粒子が通過パーツ j における物質を通ったときの多重クーロン散乱によるおおよその散乱角度分布を示し、式 (2) は、その散乱角度分布の標準偏差を示す。なお、対象ミュー粒子が物質内で散乱する場合、通過パーツ j における対象ミュー粒子の通過経路の長さは、ステップ S 140 で計算した通過長 $DL [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ に比して長くなったり短くなったりする。しかし、通常、ミュー粒子の透過力は通過パーツ j の大きさに比して非常に大きいため、対象ミュー粒子が物質内で散乱したとしても、その散乱角は極めて小さい。したがって、実施例では、式 (2) において、対象ミュー粒子の散乱の有無による変化を無視してステップ S 140 で計算した通過長 $DL [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ をそのまま用いるものとした。

20

30

40

【0028】

【数 2】

$$f(\theta x[j, \phi, \theta e]) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma[j, \phi, \theta e]} \exp\left(-\frac{\theta x[j, \phi, \theta e]^2}{2\sigma[j, \phi, \theta e]^2}\right) \quad (1)$$

$$\sigma[j, \phi, \theta e] = \frac{13.5}{p\beta} \sqrt{\frac{DL[j, \phi, \theta e]}{X[j, \phi, \theta e]}} \quad (2)$$

【0029】

こうして通過パーツ j におけるガウス分布を設定すると、通過パーツ j におけるガウス分布の標準偏差 $\sigma[j, \phi, \theta e, \alpha]$ を対象ミュー粒子の散乱角 $\theta_{sc}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ として設定し（ステップ S170）、設定した通過パーツ j における対象ミュー粒子の散乱角 $\theta_{sc}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ を用いて、通過パーツ j における物質が仮定物質 $Mas[j]$ であると判断するためのミュー粒子の数である条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ を設定する（ステップ S180）。条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ は、実施例では、通過パーツ j について、散乱角 $\theta_{sc}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ と通過パーツ j 内の仮定物質 $Mas[j]$ に応じた閾値 $\theta_{ref}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ との比較により設定するものとした。この条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ は、例えば、通過パーツ j について、通過パーツ j 内の仮定物質 $Mas[j]$ がミュー粒子が散乱しやすい物質（例えば、ウラン）の場合には散乱角 $\theta_{sc}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ が閾値 $\theta_{ref}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ 以上のときに条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ に値 1 を加えて更新すると共に散乱角 $\theta_{sc}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ が閾値 $\theta_{ref}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ 未満のときに条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ を保持し、通過パーツ j 内の仮定物質 $Mas[j]$ がミュー粒子が散乱しにくい物質（例えば、セシウムやストロンチウム）の場合には散乱角 $\theta_{sc}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ が閾値 $\theta_{ref}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ 以下のときに条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ に値 1 を加えて更新すると共に散乱角 $\theta_{sc}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ が閾値 $\theta_{ref}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ より大きいときに条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ を保持することにより設定することができる。なお、閾値 $\theta_{ref}[j, \phi, \theta e, \alpha]$ は、ユーザによるキーボード 42 やマウス 44 の操作によって設定されたものを入力して用いたり、仮定物質 $Mas[j]$ に応じて予め設定された固定値（ハードディスクドライブなどに記憶されたデータなど）を用いたりすることができる。

【0030】

そして、処理用ミュー粒子数 N_C をインクリメントして更新し（ステップ S190）、更新した処理用ミュー粒子数 N_C が目標ミュー粒子数 N_F に至ったか否かを判定し（ステップ S200）、処理用ミュー粒子数 N_C が目標ミュー粒子数 N_F に至っていないと判定されたときにはステップ S120 に戻る。こうしてステップ S120～S200 の処理を繰り返し実行し、ステップ S200 で処理用ミュー粒子数 N_C が目標ミュー粒子数 N_F に至ったと判定されたときに、計算結果をディスプレイ 40 に出力したりハードディスクドライブに記憶したりして（ステップ S210）、本ルーチンを終了する。計算結果の出力では、例えば、パーツ i における条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ や、パーツ i におけるミュー粒子の通過数（通過パーツ j として設定された数）に対する条件成立ミュー粒子数 $N[j, \phi, \theta e, \alpha]$ の割合などを出力することができる。

【0031】

図 8 は、原子炉モデルの一例を示す説明図であり、図 9 は、図 8 の原子炉モデルの内部の状態の解析に内部状態解析プログラム 30 を用いたときの実行結果の一例を示す説明図である。図 8 (a) は燃焼前（反応前）の原子炉モデル内即ち燃料体（図ではウラン 100%）の様子を示したものであり、図 8 (b) は燃焼後（反応後）の原子炉モデル内の様子を示したものである。なお、図 8 中、ウラン濃度の低下分は、セシウムやストロンチウムに変化したものとした。図 9 は、図 8 (b) の時点における原子炉モデル内について、

目標ミュオン粒子数 N_F を 100 万個として内部状態解析プログラム 30 を実行したときの
 実行結果を、図 8 (b) の燃料体を A-A 面からみた A A 視図に相当する形態で示したも
 のである。ミュオン粒子は天頂角 θ^* が 0° の場合において 1 秒間に 1 m^2 , 1 sr あたり
 70 個の割合で発生することが解っているため、図 9 の実行結果は、現実のミュオン粒子を
 検出する検出器の検出領域を 4 m^2 としてその検出領域を 3 ヶ月の間に通過する現実のミ
 ュオン粒子を用いてプログラムを実行したときの実行結果に相当する。図 8 (b) と図 9 と
 を比較すると、原子炉モデル内の状態を比較的精度よく解析できていることが解る。

【0032】

次に、各物質（例として、炭素や鉄，鉛）によるミュオン粒子の散乱への影響や、原子炉
 モデルの内部の状態の解析について具体例を用いてより詳細に説明する。以下、まず、各
 物質によるミュオン粒子の散乱への影響について説明し、その後、原子炉モデルの内部の
 状態の解析について説明する。

【0033】

まず、各物質によるミュオン粒子の散乱への影響について説明する。多重クーロン散乱に
 おける散乱角は物質の放射長に依存するため、比較する物質間で密度長を略等しくするこ
 とによって各物質によるミュオン粒子の散乱への影響を見ることができる。実施例では、炭
 素と鉄との比較においては、炭素の密度長を 53.4 g/cm^2 とすると共に鉄の密度長
 を 56.7 g/cm^2 とし、鉄と鉛との比較においては、鉄の密度長を 85.0 g/cm^2
 とすると共に鉛の密度長を 84.3 g/cm^2 として、図 10 および図 11 に例示する観
 測装置 50 を用いてミュオン粒子の散乱具合を測定するものとした。観測装置 50 は、図 1
 0 および図 11 に示すように、ミュオン粒子の入射方向（図中 X 軸方向）に 52.5 cm お
 よび 79.5 cm の間隔で平行配置された 3 本のシンチレータ 52, 54, 56 と、シン
 チレータ 52, 54, 56 からの信号に対してノイズを除去するディスクリミネータ 58
 と、ディスクリミネータ 58 によってノイズが除去された信号についてシンチレータ 52
 , 54 のコインシデンス（以下、2 本コインシデンスという）およびシンチレータ 52,
 54, 56 のコインシデンス（以下、3 本コインシデンスという）を検出するコインシデ
 ンス検出器 60 と、コインシデンス検出器 60 によって検出された 2 本コインシデンス数
 と 3 本コインシデンス数とをカウントする信号カウンタ 62 と、を備え、シンチレータ 5
 4, 56 の間に対象物質を配置するものとした。ここで、シンチレータ 52, 54, 56
 は、X 軸方向（実施例では鉛直方向とした）の長さが 7 cm , Y 軸方向（X 軸に直交する
 方向）の長さが 2 cm , Z 軸方向（X 軸および Y 軸に直交する方向）の長さが 100 cm
 の同一のシンチレータを用いるものとした。また、シンチレータ 52, 54, 56 には、
 光電子増倍管が取り付けられており、ミュオン粒子がシンチレータ 52, 54, 56 に入射
 されると、シンチレータ 52, 54, 56 内でフォトンが発生し、光電子増倍管で電子に
 変換されると共に増幅され、電流が流れるようになっている。この観測装置 50 では、信
 号カウンタ 62 によってカウントした 2 本コインシデンス数と 3 本コインシデンス数とを
 比較することにより、シンチレータ 52, 54 を通過したミュオン粒子のうちいくつのミュ
 オン粒子がシンチレータ 56 を通過したかを測定することができる。具体的には、2 本コイ
 ンシデンス数で 3 本コインシデンス数を除して求めた 2 本コインシデンス数に対する 3 本
 コインシデンス数の割合（以下、コインシデンス数割合という）が低いほどミュオン粒子が
 散乱せずに進んだと言える。そして、このコインシデンス数割合を物質間で比較すること
 により、ミュオン粒子がどの程度散乱せずに進むことができたかを物質間で比較すること
 ができる。なお、2 本コインシデンス数をカウントするのは、Y 軸方向に略垂直な軌道をも
 つミュオン粒子を選別するためや、ミュオン粒子の飛来数が時間によって変化する影響を除去
 するためである。

【0034】

実施例では、この観測装置 50 を用いて測定を行なう前に、モンテカルロシミュレーシ
 ョン用のプログラムとしての Geant 4 (Geometry and Tracking 4) によって観測装
 置 50 と同様のものを設計してシミュレーションを行なった。このシミュレーションでは
 、エネルギーのカットオフを 4 GeV とし、ミュオン粒子を天頂角が 0° から 59° までの分

10

20

30

40

50

布に従ってシンチレータ52に入射させた。なお、天頂角を 0° から 59° までしか考慮しなかったのは、これ以上の天頂角のミュオン粒子は、シンチレータ52の通過後にシンチレータ54には入らず、2本コインシデンスにはならないためである。また、ミュオン粒子の方位角と入射位置は乱数を用いて決定した。炭素と鉄との差を見るシミュレーションでは400万発、鉄と鉛との差を見るシミュレーションでは250万発のミュオン粒子を打ち込んだ。このシミュレーションの結果を図12に示す。図12から、コインシデンス数割合は、炭素と鉄とのシミュレーションでは約0.4%、鉄と鉛とのシミュレーションでは約0.6%の差が表れることが分かる。

【0035】

続いて、観測装置50を用いて測定を行なった。実施例では、この測定を建物内で行ない、建物の天井で多重発生した電子や陽電子の軟成分を取り除くために、シンチレータ52とシンチレータ54との間に電子の放射長の2倍の厚さの鉄板を挿入した。測定は、まず、炭素と鉄について交互に2時間ずつ40時間かけて行ない、その後に、鉄と鉛について交互に2時間ずつ40時間かけて行なった。図13は炭素と鉄について交互に2時間ずつ行なったときの各時間におけるコインシデンス数割合であり、図14は鉄と鉛について交互に2時間ずつ行なったときの各時間におけるコインシデンス数割合であり、図15は図13および図14をまとめた結果である。図13中、丸印は炭素のコインシデンス数割合であり、四角印は鉄のコインシデンス数割合である。また、図14中、丸印は鉄のコインシデンス数割合であり、四角印は鉛のコインシデンス数割合である。図15を図12と比較して、コインシデンス数割合の絶対値がシミュレーションの結果と異なるのは、シンチレータ52、54、56の検出効率の影響によると思われる。図13および図14をまとめた図15より、炭素と鉄のコインシデンス数割合の差は約0.45%、鉄と鉛のコインシデンス数割合の差は約0.61%となっていることが解る。この結果は、シミュレーションで行った結果の差に近いものとなった。即ち、各物質によるミュオン粒子の散乱具合について、シミュレーション結果と測定結果とで比較的整合性が取れていると言える。

【0036】

次に、原子炉モデルの内部の状態の解析について説明する。実施例では、原子炉モデルを設定し、そのモデルを通過したミュオン粒子のうち散乱角が小さかった粒子数を数えることによって原子炉モデルの内部構造を決定(推定)するものとした。簡単のため、燃焼したウランからはセシウムとストロンチウムのみが生成されることとした。まず、ウラン濃度とミュオン粒子の通過距離による散乱角の変化とをGeant4によって調べ、その後、設定したモデルを縦横それぞれ20分割し、通過距離とウランの平均濃度とを計算し、Geant4の結果と対応させて、原子炉モデルのウラン平均濃度分布をミュオン粒子のデータから求めるものとした。

【0037】

まず、Geant4において、ウラン濃度を0%、50%、100%と変化させて仰角が 10° のミュオン粒子を1万発入射し、それぞれの濃度でミュオン粒子が1m、2m、3mと通過したときに散乱角が 0.004 rad 以下である粒子数を数えた。この結果を図16に示す。図16から、ウラン濃度が高いほど、また通過距離が長いほど小さな散乱角を持つ粒子数が少なくなっていることが解る。

【0038】

続いて、原子炉モデルの内部の状態の解析のために、図17および図18に示すように、原子炉の燃料体をモデル化した。具体的には、図17に示すように、原子炉を半径1.5mで高さ5mの円筒形とし、図18に示すように、燃焼前はウランが100%で燃焼後は外周側から中心側に向けてウラン濃度が低くなるものとした。また、図17に示すように、ミュオン粒子の検出装置を原子炉の端部から2mの位置に配置すると仮定した。そして、設定した原子炉の燃料体のモデルを半径、高さ方向にそれぞれ20分割し、それぞれのセルに対してミュオン粒子の進行方向における長さでウランの平均濃度を計算し、そのビンに1万発のミュオン粒子が通過した場合に散乱角が 0.004 rad 以下の粒子数がいくつになるかを図16に照らし合わせて求めた。ここで、表の各値間についてはスプライン補

間を行なって求めた。そして、求めた粒子数（散乱角が 0.004 rad 以下の粒子数）をピン毎にプロットして画像化した。燃焼前の原子炉モデルについて求めた結果を図19に示し、燃焼後の原子炉モデルについて求めた結果を図20に示し、燃焼の前後で低散乱角の粒子数がどの程度変化したかについて燃焼前の粒子数に対する燃焼後の粒子数の割合で視覚化したものを図21に示す。なお、ここでは、仰角を 10° としているため、 4 m 以上の高さについては求めていない。図19に示すように、燃焼前の原子炉モデルは全てウランであるため、鉛直方向に対して変化が見られない。また、図20に示すように、燃焼後については、原子炉モデルで仮定した通りにウラン濃度の高い部分と低い部分とが色の差で表われている。さらに、図21に示すように、燃焼後のほうがウラン濃度は少ないため、燃焼が進んだ部分の方が燃焼が進んでいない部分に比して低散乱角の粒子数の割合は大きくなっている。即ち、原子炉が中央から燃焼している様子が解る。これらの結果、原子炉モデルの内部の状態を比較的精度よく解析できていることが解る。

10

【0039】

次に、現実の原子炉の内部の状態の解析に内部状態解析プログラム30を用いる場合について説明する。なお、実施例では、現実のミュ粒子を検出するための検出器が現実原子炉の一部または全体を覆うように設定されているものとした。まず、内部状態解析プログラム30とは異なる図示しないプログラムにより、目標ミュ粒子数 N_F の現実のミュ粒子について、現実の原子炉に入射する前の入射状態（エネルギー $E_{\mu 1}$ 、天頂角 θ_{1*} 、水平角 ϕ_1 、通過点 α_1 ）と現実の原子炉を通過した後の放出状態（エネルギー $E_{\mu 2}$ 、天頂角 θ_{2*} 、水平角 ϕ 、通過点 α_2 ）とを検出し、検出した入射状態と放出状態とから目標ミュ粒子数 N_F のミュ粒子の各々についての現実原子炉内での通過経路や散乱角 θ_{sc} を推定する（以下、この散乱角 $\theta_{sc} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を現実推定散乱角 $\theta_{sc \text{ est}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ という）。なお、ミュ粒子の入射状態や放出状態の検出方法については、文献Aなどに記載されている。

20

引用文献A：Hiroyuki K.M. Tanaka, Tomohisa Uchida, Manobu Tanaka, Hiroshi Shinohara Cosmic-ray muon imaging of magma in a conduit: Degassing process of Satsuma-Iwojima Volcano, Japan Geophys. Res. Lett. 36 L01304 2009

【0040】

そして、内部状態解析プログラム30では、検出した入射状態（エネルギー $E_{\mu 1}$ 、天頂角 θ_{1*} 、水平角 ϕ_1 、通過点 α_1 ）を対象ミュ粒子のエネルギー E_{μ} 、天頂角 θ_* 、水平角 ϕ 、通過点 α として入力する処理を図3のフローチャートのステップS120の処理に代えて行なう点と（ステップS120b）、現実推定散乱角 $\theta_{sc \text{ est}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と後述の解析散乱角 $\theta_{sc \text{ ana}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ との乖離が小さくなるよう仮定物質に関するパラメータ（仮定物質 $M_{as} [i]$ や仮定物質 $M_{as} [i]$ の密度 $\rho [i]$ 、以下、仮定物質パラメータという）を調整する処理を図3のフローチャートの各処理の他に行なう点と、を除いて図3のフローチャートと同様の処理を実行する。具体的には、仮定物質パラメータなどを入力し（ステップS100）、目標ミュ粒子数 N_F の現実のミュ粒子の各々について、検出した入射状態を対象ミュ粒子のエネルギー E_{μ} 、天頂角 θ_* 、水平角 ϕ 、通過点 α として入力する処理（ステップS120b）と内部状態解析処理によって散乱角 $\theta_{sc} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を設定する処理（ステップS120～S180、以下、この散乱角 θ_{sc} を解析散乱角 $\theta_{sc \text{ ana}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ という）とを行ない、目標ミュ粒子数 N_F の現実のミュ粒子の各々についての現実推定散乱角 $\theta_{sc \text{ est}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と解析散乱角 $\theta_{sc \text{ ana}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ とを比較することによって仮定物質と現実原子炉内の物質とが整合しているか否かを判定する。そして、目標ミュ粒子数 N_F の現実のミュ粒子の各々についての現実推定散乱角 $\theta_{sc \text{ est}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と解析散乱角 $\theta_{sc \text{ ana}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ との乖離が予め設定された所定範囲内にはないときには仮定物質と現実原子炉内の物質とが整合していないと判断して仮定物質パラメータを変更して内部状態解析処理によって解析散乱角 $\theta_{sc \text{ ana}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を再設定して現実推定散乱角 $\theta_{sc \text{ est}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と解析散乱角 $\theta_{sc \text{ ana}} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ とを再比較し、現実推

30

40

50

定散乱角 $\theta_{sc\ est} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と解析散乱角 $\theta_{sc\ ana} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ との乖離が所定範囲内にあるときには仮定物質と現実原子炉内の物質とが整合していると判断して現在の仮定物質パラメータに対応する仮定物質 $Mas [i]$ を現実原子炉内の物質であると推定し、内部状態解析プログラムを終了する。このように、現実推定散乱角 $\theta_{sc\ est} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と解析散乱角 $\theta_{sc\ ana} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ との乖離が十分に小さくなるように仮定物質 $Mas [i]$ を変更しながら内部状態解析処理を行なうことにより、現実原子炉の内部の状態をより適正に解析することができる。

【0041】

以上説明した実施例の内部状態解析装置 20 によれば、ミュー粒子の軌跡に基づいてミュー粒子の散乱角のガウス分布を設定すると共に設定したガウス分布を用いてミュー粒子の散乱角を設定し、設定した散乱角を用いて原子炉内の状態を解析するから、ミュー粒子の性質（特に、原子量の大きな物質内で曲がりやすい性質）を用いて原子炉内の状態（燃焼の程度など）をより適正に解析することができる。しかも、構造物の内部の一部に相当し且つ水平角 ϕ 、仰角 θ_e 、通過点 α のミュー粒子が通過する通過パーツ j について、通過長 $L [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ と仮定物質 $Mas [j]$ の密度 $\rho [j]$ との積としての密度長 $DL [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を用いてガウス分布を設定すると共に設定したガウス分布を用いて通過パーツ j におけるミュー粒子の散乱角 $\theta_{sc} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を設定し、設定した散乱角 $\theta_{sc} [j, \phi, \theta_e, \alpha]$ を用いて通過パーツ j の状態を解析するから、原子炉内の状態をより適正に解析することができる。そして、これらのように解析した結果を用いて原子炉を製造すれば、原子炉内の燃料の配置や密度などをより適正なものとし、操業効率のよい原子炉を設計、建築することができる。この結果、単位生成エネルギーあたりの二酸化炭素の排出量の低減などを図ることができる。

【0042】

実施例の内部状態解析装置 20 では、図 4 に例示したミュー粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* の分布に基づいて対象ミュー粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* を設定するものとしたが、これ以外の方法、例えば、次式 (3) により表わされるミュー粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* と発生確率 $P_\mu (E_\mu, \theta^*)$ との関係に基づいて対象ミュー粒子のエネルギー E_μ および天頂角 θ^* を設定するものとしてもよい。ここで、式 (3) 中、「 W_μ 」は式 (4) により表わされる崩壊長 L_{decay} を飛行したミュー粒子の崩壊による残存確率で式 (5) により表わされ、「 ΔE_μ 」はミュー粒子のエネルギー損失（例えば、2.6 GeV）であり、「 γ 」は Lorentz のガンマファクターと呼ばれるもので式 (6) により表わされる。また、式 (5) 中、「 R 」は地球の半径（6400 km）であり、「 r 」は大気の高さ（13 km）であり、「 L_0 」は地表に対して垂直方向の大気圧（1.013 kg/cm²）である。さらに、式 (6) 中、「 m_μ 」はミュー粒子の質量（106 MeV）である。

【0043】

【数 3】

$$\frac{dP_\mu(E_\mu, \theta^*)}{dE_\mu} = 1.8 \times 10^{-6} W_\mu (E_\mu + \Delta E_\mu)^{-\gamma} \left(\frac{0.78^{\gamma-1} \times 90 \sec \theta^*}{E_\mu + \Delta E_\mu + 90 \sec \theta^*} + 0.36 \times 0.635 \frac{0.52^{\gamma-1} \times 442 \sec \theta^*}{E_\mu + \Delta E_\mu + 442 \sec \theta^*} \right) \quad (\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{-1}) \quad (3)$$

$$L_{decay} = 6.2 E_\mu \quad (\text{km}) \quad (4)$$

$$W_\mu = \exp \left\{ - \frac{\{(R^2 \cos^2 \theta^* + 2Rr + r^2)^{1/2} - R \cos \theta^*\} L_0}{6.2 E_\mu r} \right\} \quad (5)$$

$$\gamma = \frac{E_\mu}{m_\mu} \quad (6)$$

【0044】

実施例の内部状態解析装置 20 では、通過パーツ j (j は 1 ~ N_j) の各々の密度長 D L [j , φ , θ_e , α] を用いて、通過パーツ j の各々について、投影時角度 θ_x [j , φ , θ_e , α] に対するガウス分布の標準偏差 σ [j , φ , θ_e , α] , 散乱角 θ_{s c} [j , φ , θ_e , α] , 条件成立ミュー粒子数 N [j , φ , θ_e , α] を設定するものとしたが、通過パーツ j の各々の密度長 D L [j , φ , θ_e , α] の積算値としての総密度長 D L s u m [φ , θ_e , α] を用いて、通過パーツ j の全体としての投影時角度 θ_x [φ , θ_e , α] に対するガウス分布の標準偏差 σ [φ , θ_e , α] , 散乱角 θ_{s c} [φ , θ_e , α] , 条件成立ミュー粒子数 N [φ , θ_e , α] を設定するものとしてもよい。この場合、投影時角度 θ_x [φ , θ_e , α] に対するガウス分布は次式 (7) により設定することができ、ガウス分布の標準偏差 σ [φ , θ_e , α] は式 (8) により設定することができる。

10

【0045】

【数4】

$$f(\theta_x[\phi, \theta_e]) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma[\phi, \theta_e]} \exp\left(-\frac{\theta_x[\phi, \theta_e]^2}{2\sigma[\phi, \theta_e]^2}\right) \quad (7)$$

$$\sigma[\phi, \theta_e] = \frac{13.5}{p\beta} \sqrt{\frac{DLsum[\phi, \theta_e]}{X[\phi, \theta_e]}} \quad (8)$$

20

【0046】

実施例の内部状態解析装置 20 では、通過パーツ j におけるガウス分布の標準偏差 σ [j , φ , θ_e , α] を対象ミュー粒子の散乱角 θ_{s c} [j , φ , θ_e , α] として設定するものとしたが、これに限られず、通過パーツ j におけるガウス分布を用いて対象ミュー粒子の散乱角 θ_{s c} [j , φ , θ_e , α] を設定するものであればよい。

【0047】

実施例の内部状態解析装置 20 では、ガウス分布を用いて通過パーツ j における対象ミュー粒子の散乱角 θ_{s c} [j , φ , θ_e , α] を設定するものとしたが、ガウス分布に限られず、ミュー粒子など高い透過性を有する粒子の散乱角の分布を用いて通過パーツ j における対象ミュー粒子の散乱角 θ_{s c} [j , φ , θ_e , α] を設定するものであればよい。

30

【0048】

実施例の内部状態解析装置 20 では、ミュー粒子の性質を用いて原子炉内の状態を解析するものとしたが、ミュー粒子に限られず、所定の高透過性 (例えば、1メートルの鉄を透過する透過性) を有する粒子の性質を用いて原子炉内の状態を解析するものであればよい。

【0049】

実施例の内部状態解析装置 20 では、構造物としての原子炉の内部の状態を解析するものとしたが、原子炉に限られず、高炉や、鉄筋・鉄骨コンクリートの柱や梁などの内部の状態を解析するものとしてもよい。

40

【0050】

実施例では、コンピュータ 22 に内部状態解析プログラム 30 がインストールされた内部状態解析装置 20 として説明したが、内部状態解析プログラム 30 の形態としてもよいし、所定の高透過性の粒子である高透過性粒子の性質を用いて構造物の内部の状態を解析する内部状態解析方法の形態としてもよい。

【0051】

以上、本発明を実施するための形態について実施例を用いて説明したが、本発明はこうした実施例に何等限定されるものではなく、本発明の要旨を逸脱しない範囲内において、種々なる形態で実施し得ることは勿論である。

【産業上の利用可能性】

50

【0052】

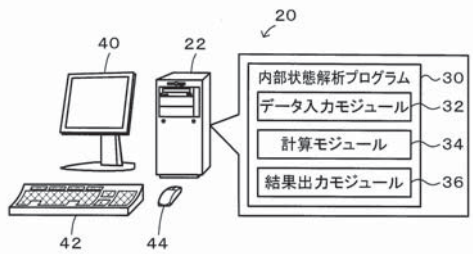
本発明は、内部状態解析装置を利用する製造産業などに利用可能である。

【符号の説明】

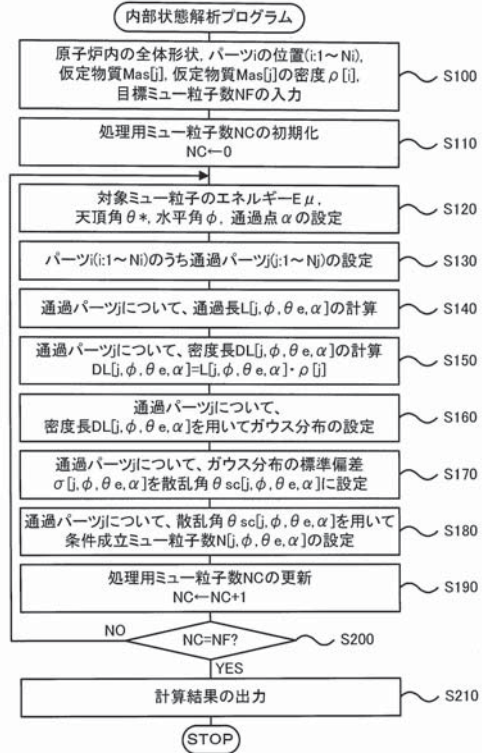
【0053】

20 内部状態解析装置、22 コンピュータ、30 内部状態解析プログラム、32 データ入力モジュール、34 計算モジュール、36 結果出力モジュール、40 ディスプレイ、42 キーボード、44 マウス。

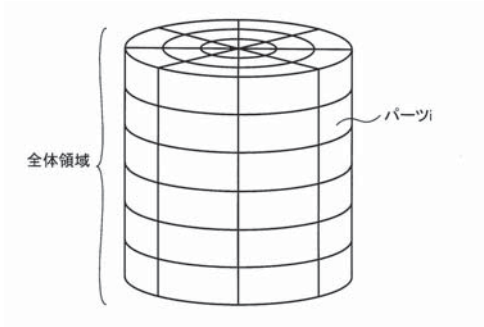
【図1】



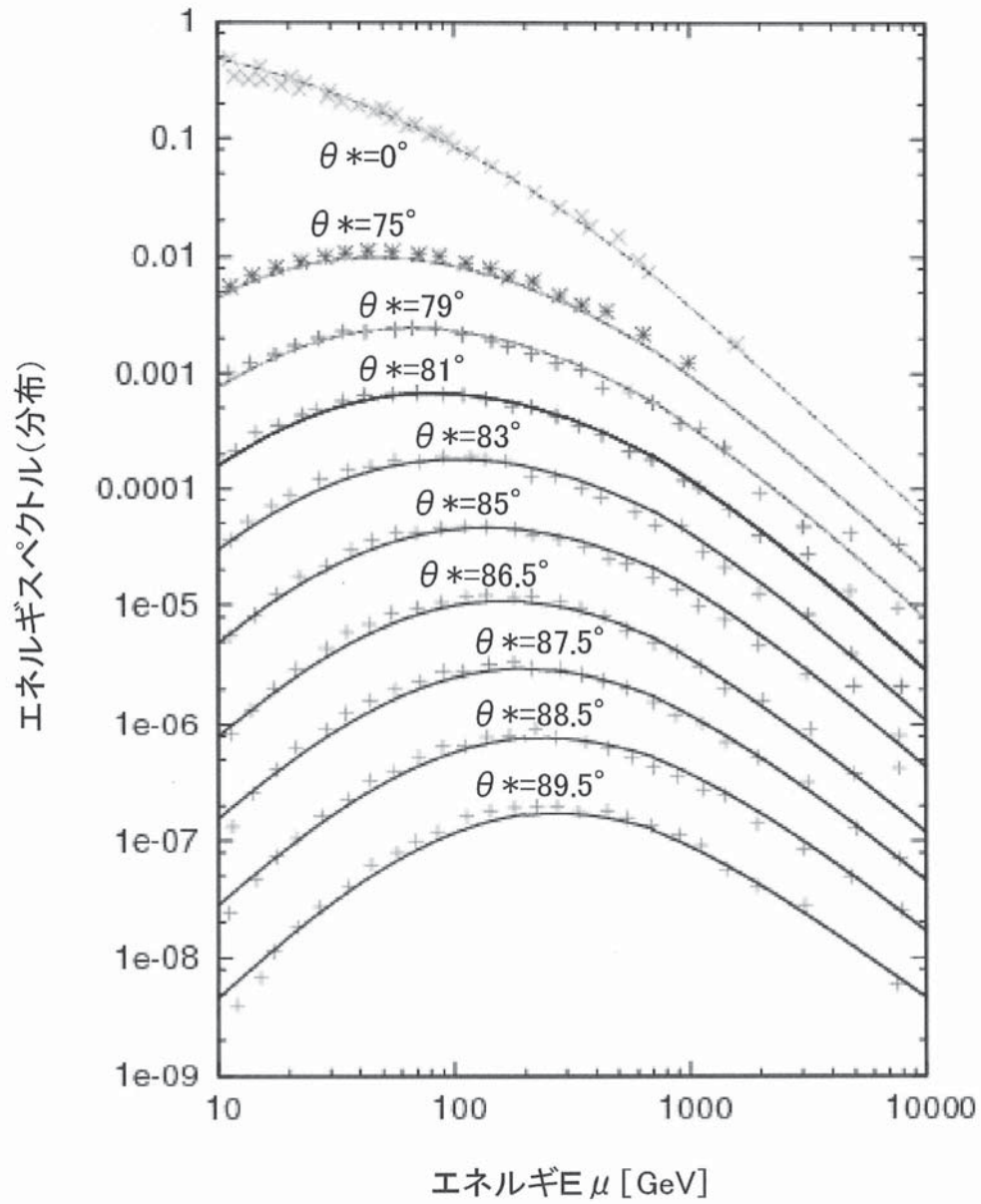
【図2】



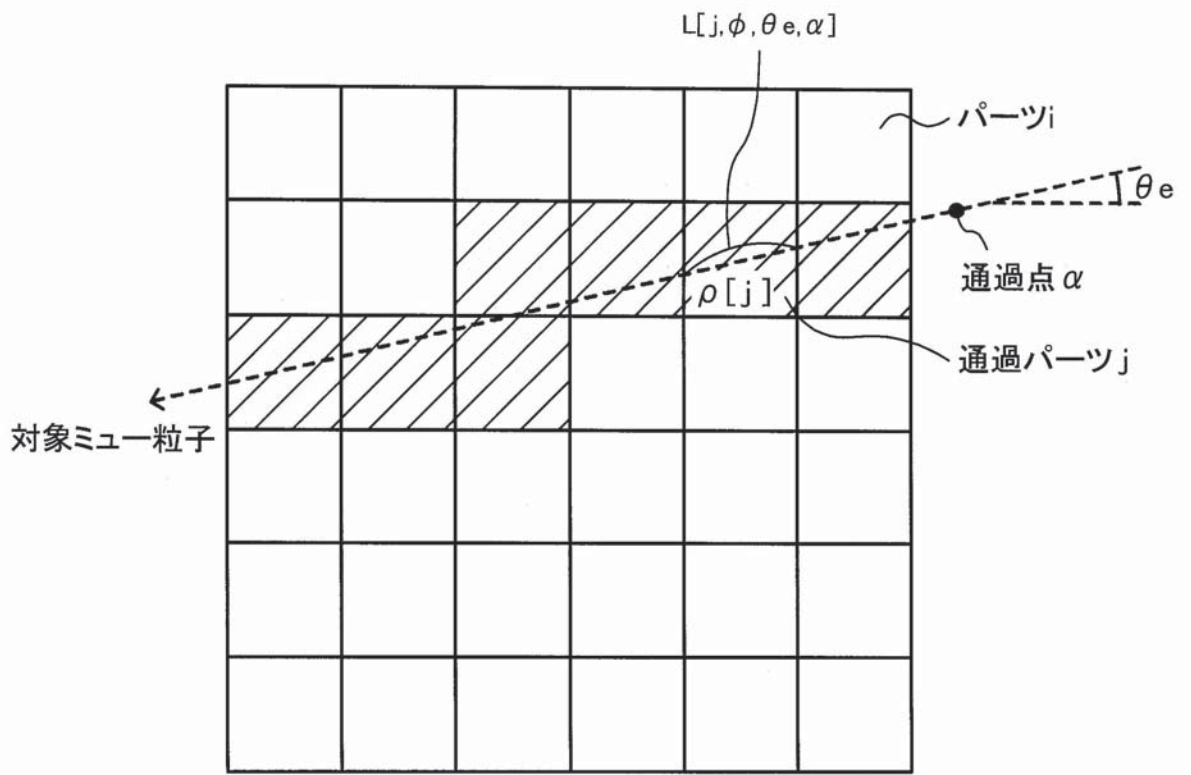
【図 3】



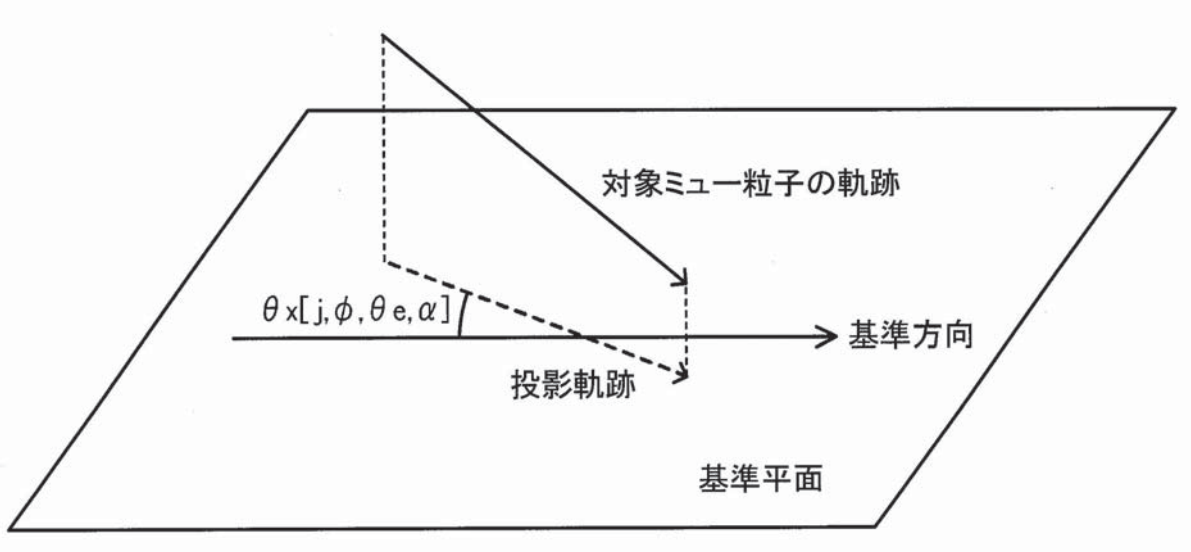
【図4】



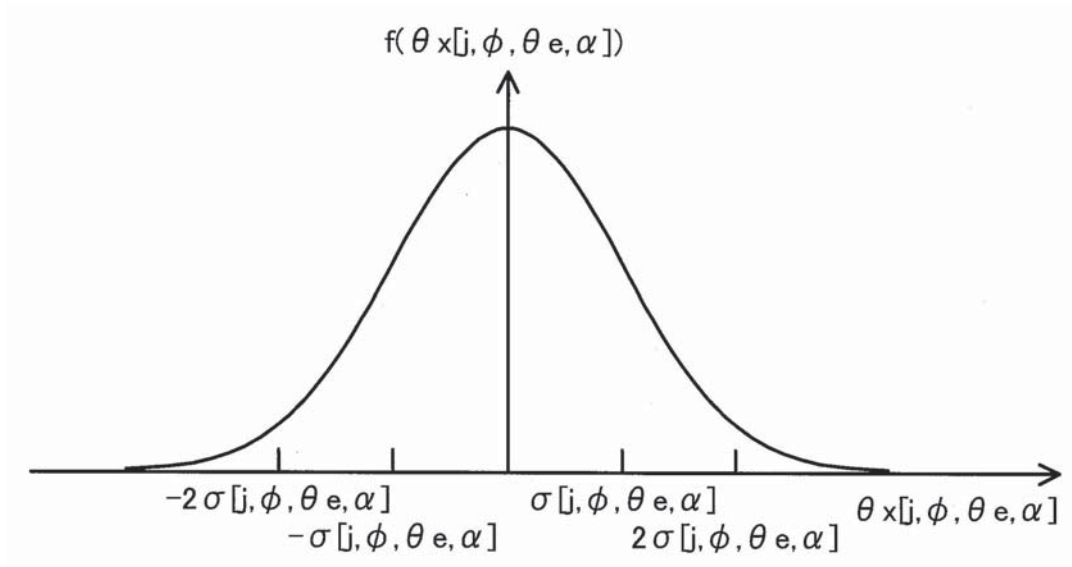
【図 5】



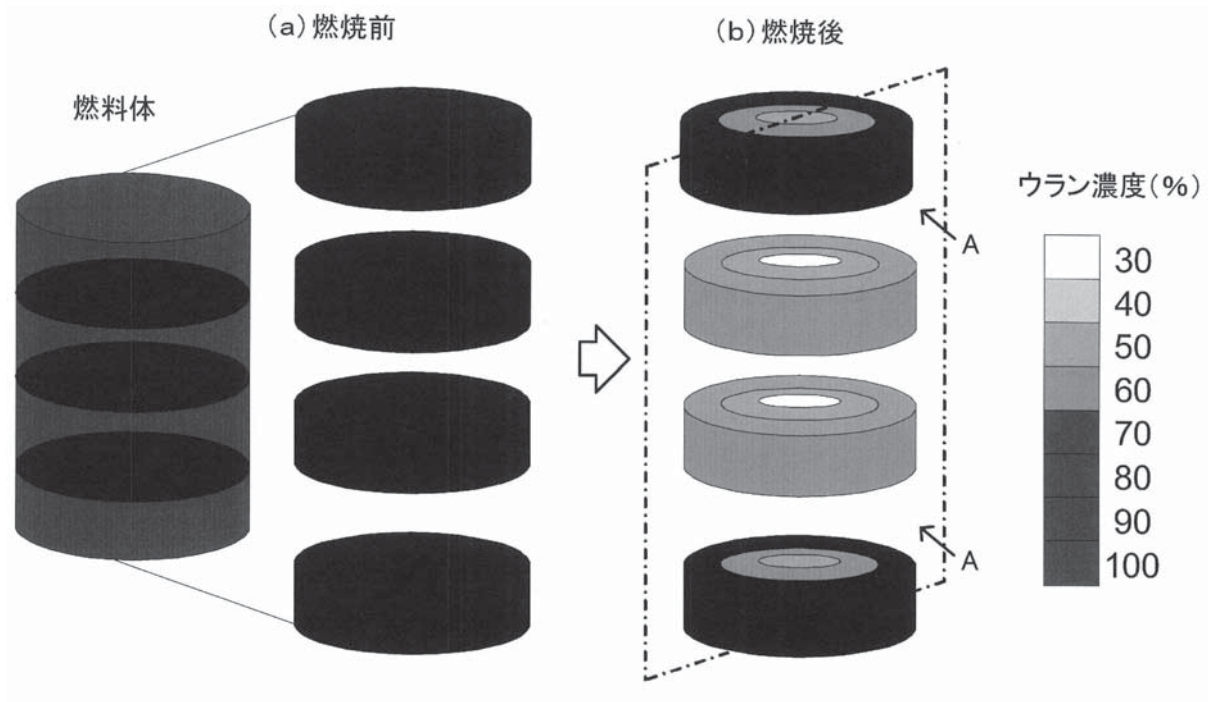
【図 6】



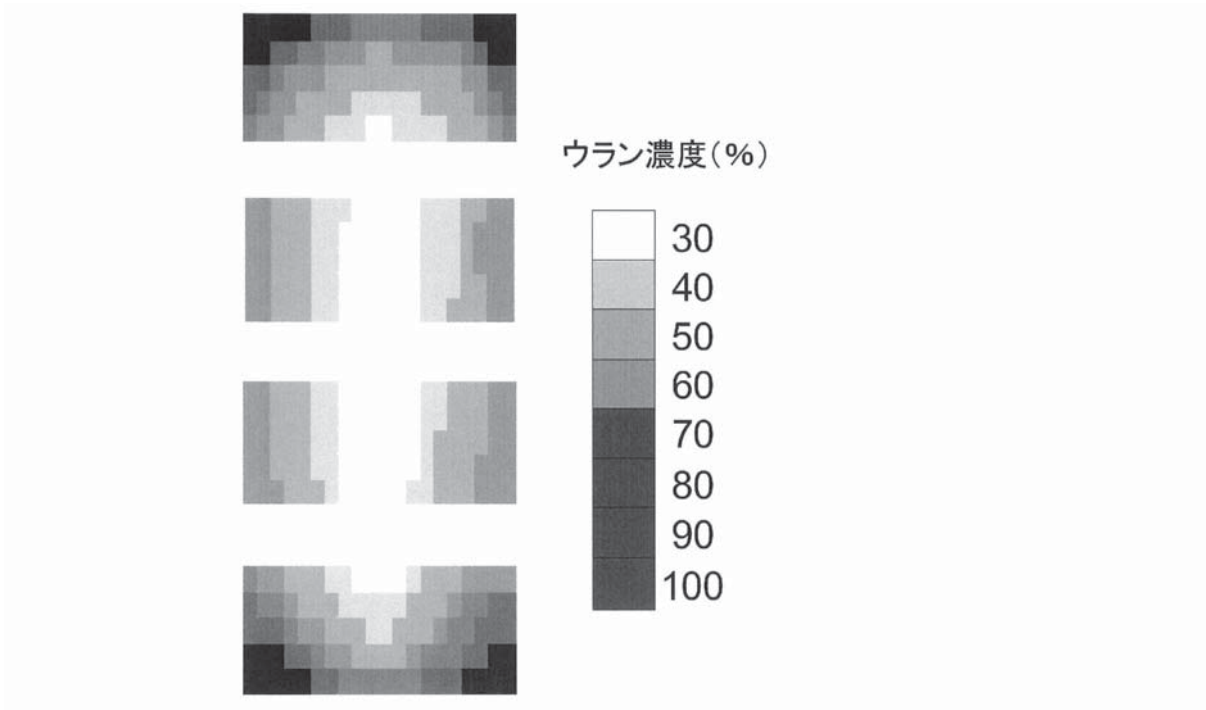
【図7】



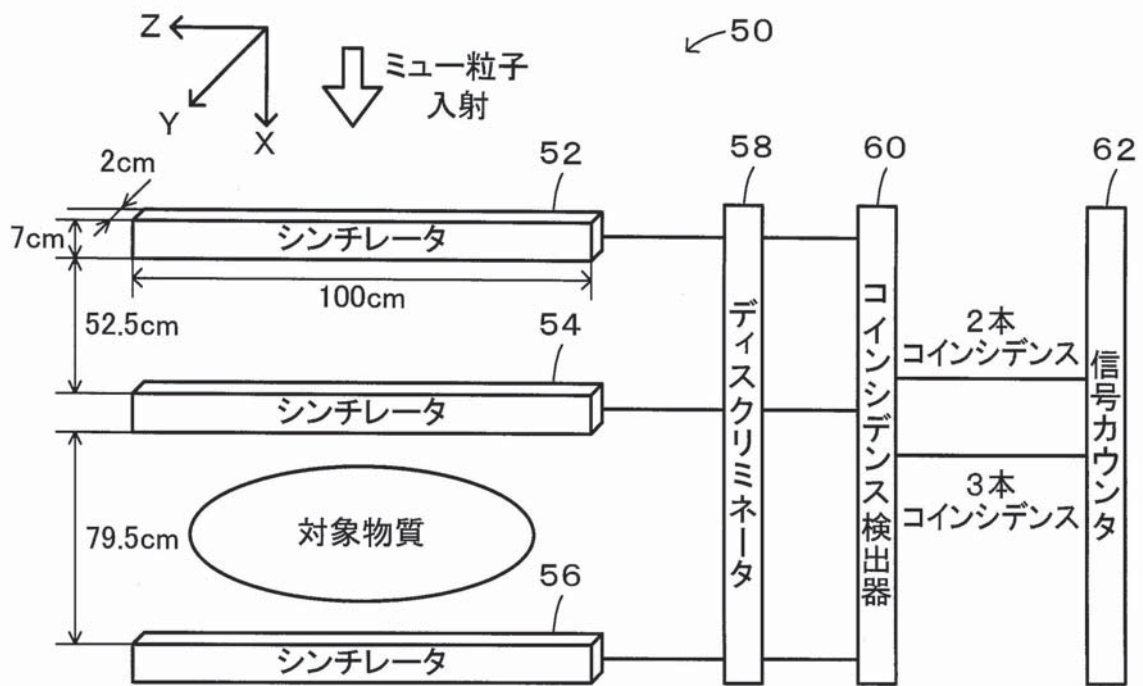
【図8】



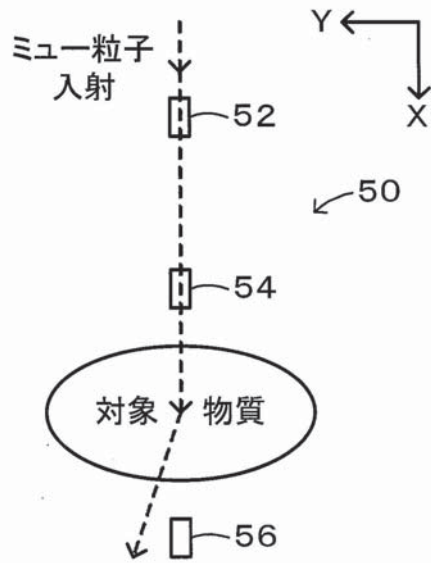
【図9】



【図10】



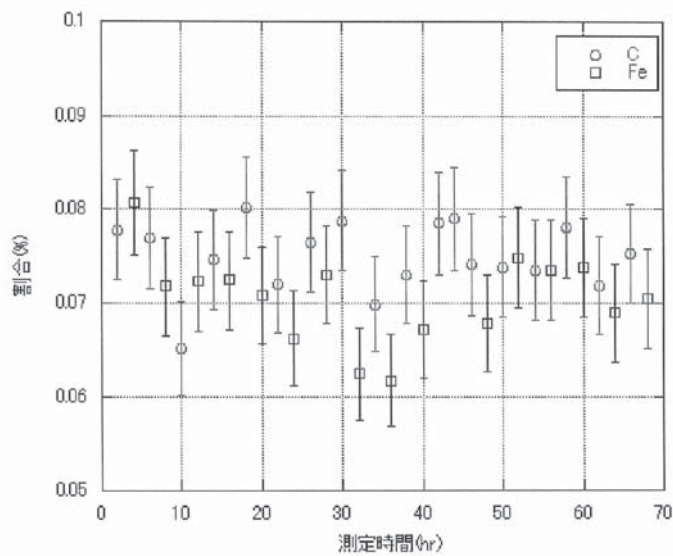
【図 1 1】



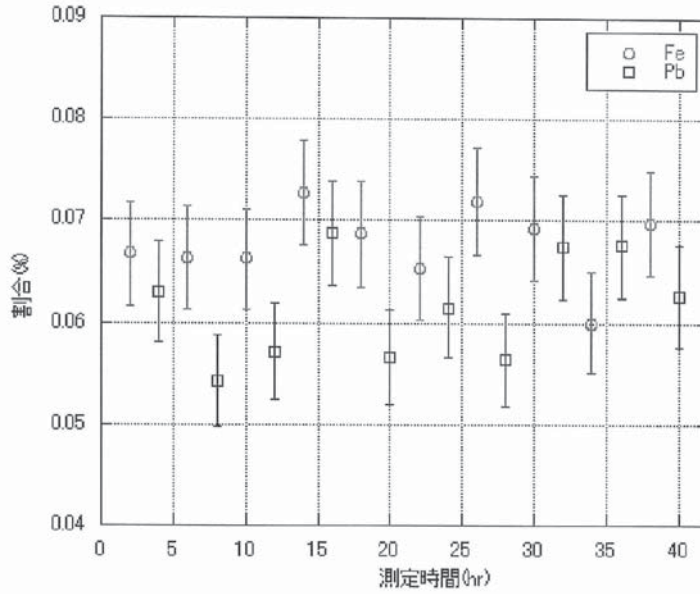
【図 1 2】

物質名	密度長[g/cm ²]	ミュー粒子数	2本コインシデンス数	3本コインシデンス数	割合[%]
炭素	53.4	4000000	85435	23800±154	27.86±0.18
鉄	56.7	4000000	85420	23452±153	27.45±0.18
鉄	85.0	2500000	53795	14619±121	27.18±0.22
鉛	84.3	2500000	53750	14286±120	26.58±0.22

【図 1 3】



【図 1 4】



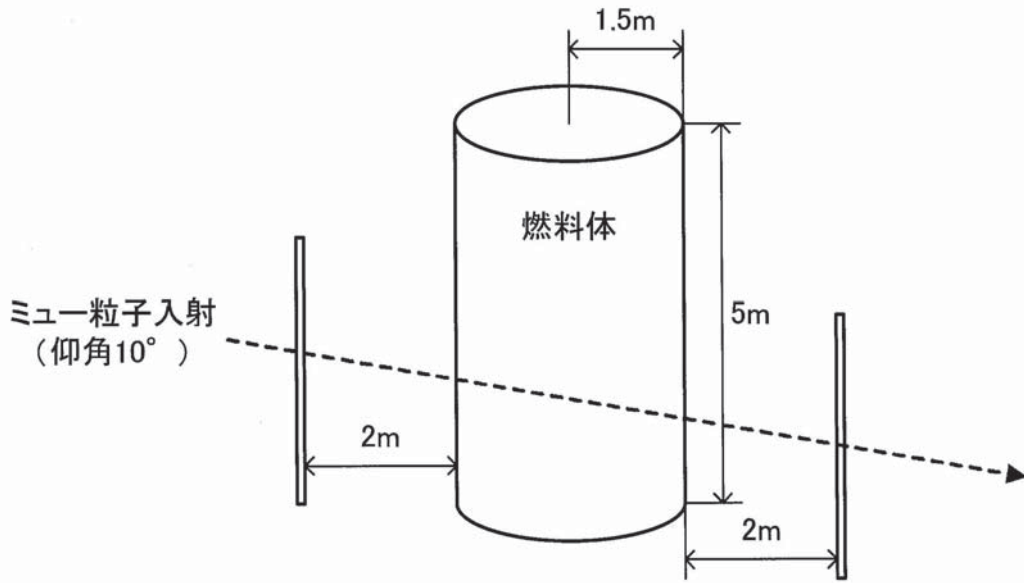
【図 1 5】

物質名	測定時間	第1同時発生数	第2同時発生数	割合[%]
炭素	36	47267	3540±59	7.49±0.126
鉄	32	41370	2914±54	7.04±0.130
鉄	20	26067	1763±42	6.76±0.161
鉛	20	26090	1604±40	6.15±0.154

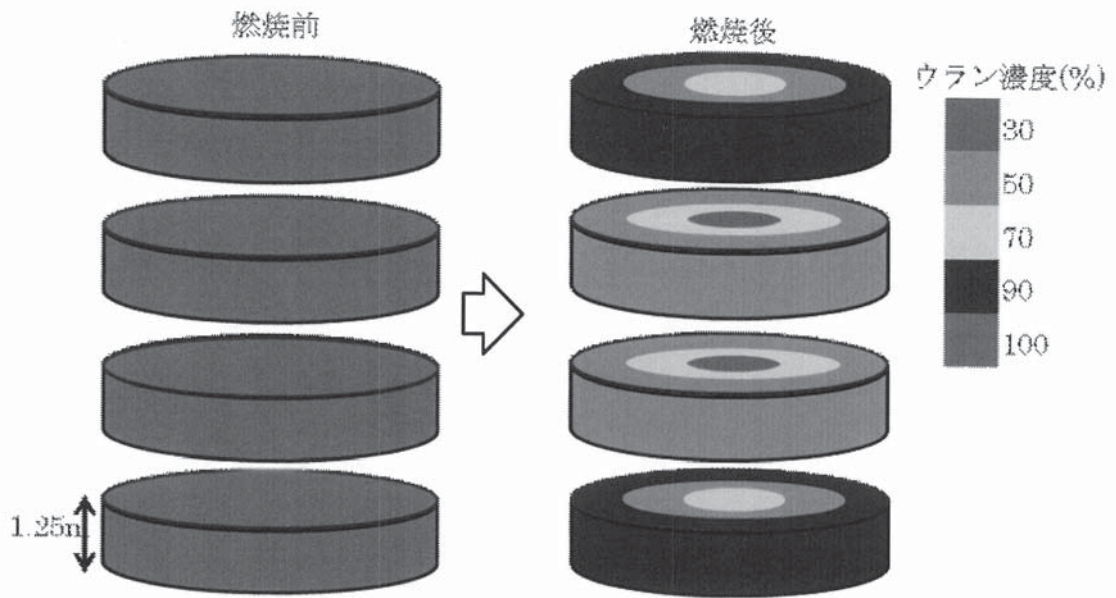
【図 1 6】

通過距離[m]	ウラン濃度[%]		
	0	50	100
1	5841	3273	2451
2	4815	2467	1765
3	4088	2051	1320

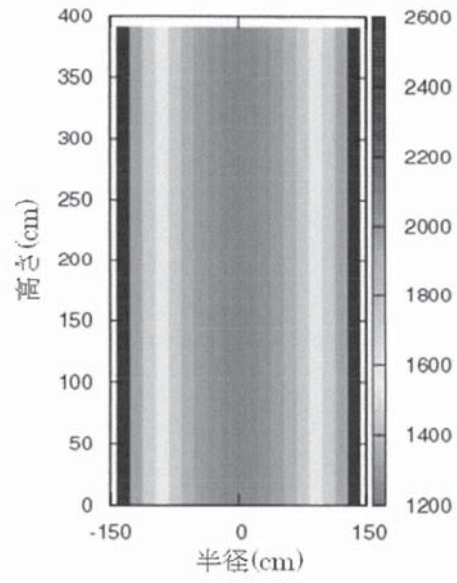
【図 17】



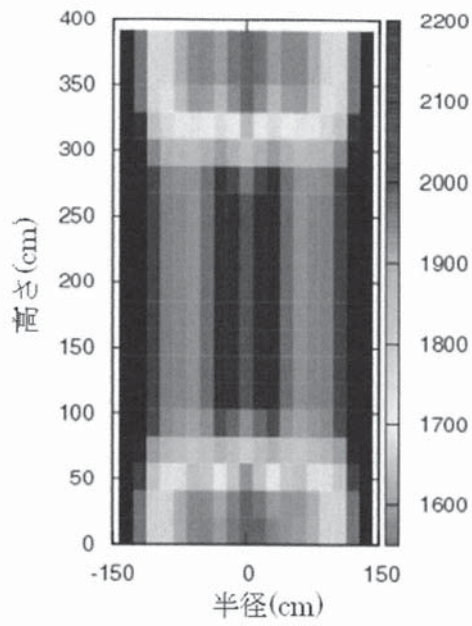
【図 18】



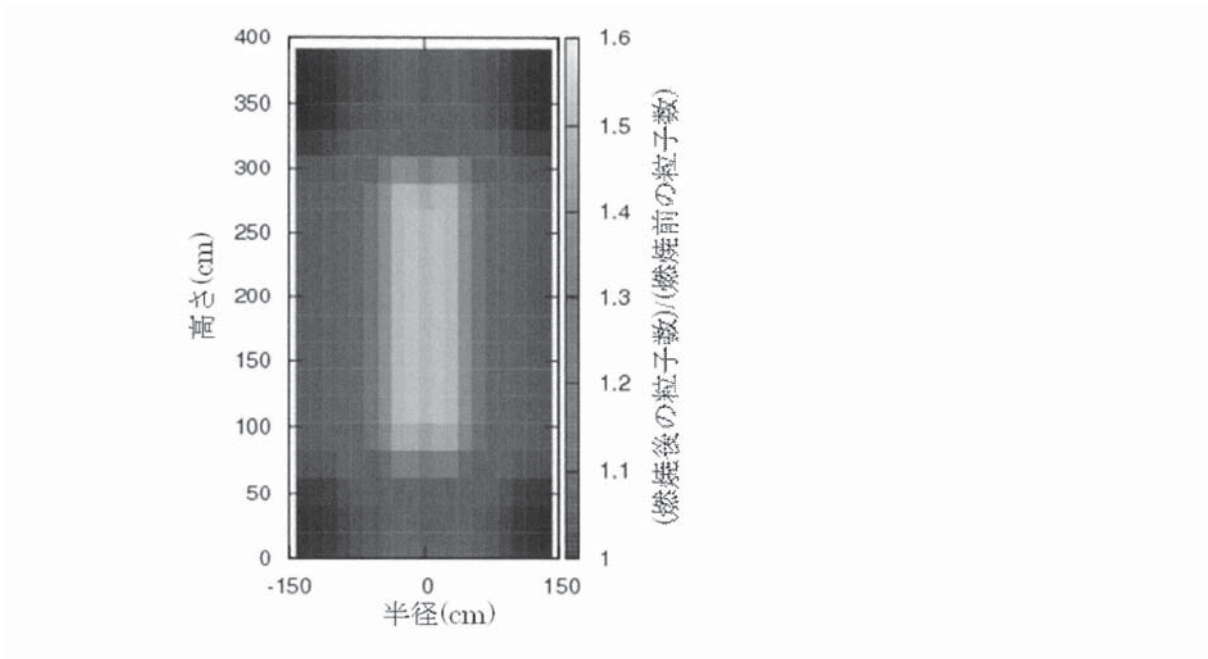
【図 19】



【図 20】



【図 2 1】



フロントページの続き

(56)参考文献 国際公開第2008/140560 (WO, A2)

特開2007-271400 (JP, A)

米国特許出願公開第2008/0315091 (US, A1)

松崎 眞六, 他8名, 「宇宙線ミュオンを用いた高炉の炉内観察技術の開発」, 材料とプロセス, 社団法人日本鉄鋼協会, 2007年 9月 1日, Vol. 20, No. 4, p. 744

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01N 23/02

JSTPlus (JDreamII)

CiNii