

(19)日本国特許庁(JP)

(12)特許公報(B2)

(11)特許番号
特許第7489094号
(P7489094)

(45)発行日 令和6年5月23日(2024.5.23)

(24)登録日 令和6年5月15日(2024.5.15)

(51)国際特許分類

F I

G 0 1 N 23/222(2006.01)

G 0 1 N 23/222

請求項の数 9 (全25頁)

(21)出願番号	特願2020-84238(P2020-84238)	(73)特許権者	503359821
(22)出願日	令和2年5月13日(2020.5.13)		国立研究開発法人理化学研究所
(65)公開番号	特開2021-179345(P2021-179345		埼玉県和光市広沢 2 番 1 号
	A)	(74)代理人	100097515
(43)公開日	令和3年11月18日(2021.11.18)		弁理士 堀田 実
審査請求日	令和5年3月3日(2023.3.3)	(74)代理人	100136700
			弁理士 野村 俊博
		(72)発明者	若林 泰生
			埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開
			発法人理化学研究所内
		(72)発明者	大竹 淑恵
			埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開
			発法人理化学研究所内
		(72)発明者	池田 裕二郎
			埼玉県和光市広沢 2 番 1 号 国立研究開
			最終頁に続く

(54)【発明の名称】 濃度検出装置と濃度検出方法

(57)【特許請求の範囲】

【請求項 1】

検査対象物の表面へ中性子線を照射する中性子源と、
前記検査対象物において前記中性子線により発生したガンマ線のうち対象成分に由来の特定ガンマ線を検出して、該特定ガンマ線の検出量を求めるガンマ線検出装置と、
前記検出量に基づいて前記検査対象物における各深さ又は特定深さの対象成分の濃度を求める濃度算出装置と、を備え、
前記特定ガンマ線として、エネルギーが互いに異なる複数種類の特定ガンマ線があり、
前記複数種類のそれぞれに対応する複数の関係式が予め定められて前記濃度算出装置に保持されており、
各前記関係式は、前記検査対象物を仮想的に複数の層に区分した場合に、前記複数の層のそれぞれに同時に存在する対象成分の複数の濃度と当該関係式に対応する前記種類の前記特定ガンマ線の前記検出量との関係を表し、
前記ガンマ線検出装置が求めた前記複数種類の特定ガンマ線それぞれの複数の前記検出量を、当該複数種類にそれぞれ対応する前記複数の関係式に適用することにより連立方程式を生成し、該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける前記層の前記濃度を算出する、濃度検出装置。

【請求項 2】

検査対象物の表面へ中性子線を照射する中性子源と、
前記検査対象物において前記中性子線により発生したガンマ線のうち対象成分に由来の

特定ガンマ線を検出して、該特定ガンマ線の検出量を求めるガンマ線検出装置と、

前記検出量に基づいて、前記検査対象物における各深さ又は特定深さの対象成分の濃度を求める濃度算出装置と、を備え、

前記特定ガンマ線として、エネルギーが互いに異なる複数種類の特定ガンマ線があり、前記中性子源と前記ガンマ線検出装置のガンマ線検出器と前記検査対象物との位置関係及び姿勢関係の一方又は両方を配置関係として、複数の配置関係が設定され、

前記検査対象物を仮想的に複数の層に区分した場合に、前記複数の層における対象成分の複数の濃度と前記検出量との関係を表す関係式が、前記特定ガンマ線の前記種類毎に、当該種類と前記複数の配置関係の各々との組合せについて、予め定められて前記濃度算出装置に保持されており、

10

前記濃度算出装置は、前記種類毎に、各前記組合せに対して前記ガンマ線検出装置が求めた前記検出量を、当該組合せに対応する前記関係式に適用することにより連立方程式を生成し、該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける前記層の前記濃度を算出する、濃度検出装置。

【請求項 3】

前記関係式は、

$$\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$$

で表され、

i は、前記層の番号であり、 k は、前記種類の番号であり、 i と k は、 $1 \sim n$ の値を取り、 n は、 2 以上の整数であり、

20

X_i は、 i 番目の前記層における前記対象成分の濃度を示し、

$\alpha_{i,k}$ は、 i 番目の層と k 番目の前記種類とに対応する係数であり、予め求められたものであり、

$\sum$ は、前記複数の層 i の全てに関する総和を示し、

D_k は、 k 番目の前記種類について前記ガンマ線検出装置により求められる前記特定ガンマ線の検出量である、請求項 1 に記載の濃度検出装置。

【請求項 4】

前記関係式は、

$$\sum X_i \times \alpha_{i,k,j} = D_{k,j}$$

で表され、

30

i は、前記層の番号であり、 k は、前記種類の番号であり、

j は、前記配置関係の番号であり、

X_i は、 i 番目の前記層における前記対象成分の濃度を示し、

$\alpha_{i,k,j}$ は、 i 番目の層と k 番目の前記種類と j 番目の前記配置関係とに対応する係数であり、予め求められたものであり、

$\sum$ は、前記複数の層 i の全てに関する総和を示し、

$D_{k,j}$ は、 k 番目の前記種類と j 番目の前記配置関係との前記組合せについて前記ガンマ線検出装置により求められる特定ガンマ線の検出量である、請求項 2 に記載の濃度検出装置。

【請求項 5】

40

前記検査対象物は、鉄筋を内部に含むコンクリート構造物であり、前記対象成分は塩分である、請求項 1 ～ 4 のいずれか一項に記載の濃度検出装置。

【請求項 6】

(A) 中性子源により検査対象物の表面へ中性子線を照射し、

(B) 前記検査対象物において前記中性子線により発生したガンマ線のうち対象成分に由来の特定ガンマ線を検出して、該特定ガンマ線の検出量を求め、

エネルギーが互いに異なる複数種類の前記特定ガンマ線について、前記 (B) を行うことにより、当該複数の種類に対応する複数の前記検出量を求め、

(C) 濃度算出装置により前記複数の検出量に基づいて対象成分の濃度を求め、

前記複数種類のそれぞれに対応する複数の関係式が予め定められて前記濃度算出装置に保

50

持されており、

各前記関係式は、前記検査対象物を仮想的に複数の層に区分した場合に、前記複数の層のそれぞれに同時に存在する対象成分の複数の濃度と当該関係式に対応する前記種類の前記特定ガンマ線の前記検出量との関係を表し、

前記（Ｃ）において、前記（Ｂ）で求めた前記複数種類の特定ガンマ線それぞれの複数の前記検出量を、前記濃度算出装置が、当該複数種類にそれぞれ対応する前記複数の関係式に適用することにより連立方程式を生成し、該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける前記層の前記濃度を算出する、濃度検出方法。

【請求項 7】

（Ａ）中性子源により検査対象物の表面へ中性子線を照射し、

10

（Ｂ）ガンマ線検出装置により、前記検査対象物において前記中性子線により発生したガンマ線のうち対象成分に由来の特定ガンマ線を検出して、該特定ガンマ線の検出量を求め、
（Ｃ）濃度算出装置により前記検出量に基づいて対象成分の濃度を求め、

前記特定ガンマ線として、エネルギーが互いに異なる複数種類の前記特定ガンマ線があり、前記中性子源と前記ガンマ線検出装置のガンマ線検出器と前記検査対象物との位置関係及び姿勢関係の一方又は両方を配置関係として、複数の配置関係が設定され、

前記検査対象物を仮想的に複数の層に区分した場合に、前記複数の層における対象成分の複数の濃度と前記検出量との関係を表す関係式が、前記特定ガンマ線の前記種類毎に、当該種類と前記複数の配置関係の各々との組合せについて、予め定められて前記濃度算出装置に保持されており、

20

前記種類毎に、各前記組合せについて前記（Ｂ）を行うことにより、複数の前記組合せに対応する複数の前記検出量を求め、

前記（Ｃ）において、前記濃度算出装置が、前記種類毎に、各前記組合に対して前記（Ｂ）で求められた前記検出量を当該組合せに対応する前記関係式に適用することにより連立方程式を生成し、該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける前記層の前記濃度を算出する、濃度検出方法。

【請求項 8】

前記検査対象物は、鉄筋を内部に含むコンクリート構造物であり、前記対象成分は塩分である、請求項 6 又は 7 に記載の濃度検出方法。

【請求項 9】

30

前記検査対象物は、鉄筋を内部に含むコンクリート構造物であり、

前記対象成分が前記鉄筋の成分であるとして、前記（Ａ）～（Ｃ）を行うことにより、各前記層における前記鉄筋の成分の濃度を求め、

（Ｄ）当該濃度が閾値以上となった前記層を、鉄筋が存在する層として定め、

前記対象成分が塩分であるとして、前記（Ａ）～（Ｃ）を行うことにより、前記（Ｄ）により定めた前記層における塩分の濃度を求める、請求項 6 又は 7 に記載の濃度検出方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、検査対象物内に存在する対象成分の濃度を求める技術に関する。

40

【背景技術】

【0002】

検査対象物内において対象成分が存在する深さと、その深さにおける対象成分の濃度を非破壊的に求める装置と方法が、下記特許文献 1 に開示されている。

【0003】

特許文献 1 では、次のように対象成分の存在深さと濃度を求めている。検査対象物に中性子線を入射し、中性子線により発生したガンマ線のうち検査対象物内の対象成分に由来の特定ガンマ線を検出する。この時、エネルギーが異なる複数種類の特定ガンマ線の強度を、検出強度としてそれぞれ検出する。

【0004】

50

次いで、複数種類の特定ガンマ線の検出強度同士の比率を、対象成分が存在する深さを示す指標値として求める。この比率を、比率と深さとの対応関係に適用して、対象成分が存在する深さを求める。

【 0 0 0 5 】

また、特許文献 1 では、求めた深さと特定ガンマ線の強度とを、深さとガンマ線の検出強度と対象成分の濃度との対応関係に適用して、求めた深さでの対象成分の濃度を求める。

【 0 0 0 6 】

このような技術により、例えば、コンクリート構造物内の塩分を対象成分として塩分の深さと濃度を検出することができる。この検出結果に基づいて、コンクリート構造物における塩分による鉄筋の腐食可能性を把握することができる。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【 0 0 0 7 】

【文献】国際公開第 2 0 1 9 / 1 9 8 2 6 0 号

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【 0 0 0 8 】

検査対象物内において、各深さにおける対象成分の濃度、又は、所望の特定深さにおける対象成分の濃度を非破壊的に検出する技術が望まれる。

【 0 0 0 9 】

20

そこで、本発明の目的は、検査対象物内の各深さ又は所望の特定深さにおける対象成分の濃度を非破壊的に求めることができる装置と方法を提供することにある。

【課題を解決するための手段】

【 0 0 1 0 】

上述の目的を達成するため、本発明による濃度検出装置は、検査対象物の表面へ中性子線を照射する中性子源と、前記検査対象物において前記中性子線により発生したガンマ線のうち対象成分に由来の特定ガンマ線を検出して該特定ガンマ線の検出量を求めるガンマ線検出装置と、前記検出量に基づいて検査対象物における各深さ又は特定深さの対象成分の濃度を求める濃度算出装置とを備える。

検査対象物を仮想的に複数の層に区分した場合に、前記複数の層における対象成分の複数の濃度と前記検出量との関係を表す関係式が、特定ガンマ線の種類毎に又は検出条件毎に予め定められて前記濃度算出装置に保持されている。

30

前記濃度算出装置は、各前記種類又は各前記検出条件に対してガンマ線検出装置が求めた前記検出量を、当該種類又は検出条件に対応する前記関係式に適用することにより連立方程式を生成し、該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける前記層の前記濃度を算出する。

【 0 0 1 1 】

また、上述の目的を達成するため、本発明による濃度検出方法は、

(A) 検査対象物の表面へ中性子線を照射し、

(B) 前記検査対象物において前記中性子線により発生したガンマ線のうち対象成分に由来の特定ガンマ線を検出して、該特定ガンマ線の検出量を求め、

40

互いに異なる複数種類の特定ガンマ線について、又は、互いに異なる複数の検出条件について、前記 (B) を行うことにより、当該複数の種類又は検出条件に対応する複数の前記検出量を求め、

(C) 濃度算出装置により前記複数の検出量に基づいて対象成分の濃度を求める。

検査対象物を仮想的に複数の層に区分した場合に、前記複数の層における対象成分の複数の濃度と前記検出量との関係を表す関係式が、前記種類毎又は前記検出条件毎に予め定められて前記濃度算出装置に保持されている。

前記 (C) において、前記濃度算出装置により、各前記種類又は各前記検出条件に対してガンマ線検出装置が求めた前記検出量を、当該種類又は検出条件に対応する前記関係式

50

に適用することにより連立方程式を生成し、該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける前記層の前記濃度を算出する。

【発明の効果】

【0012】

本発明によると、各深さ又は所望の特定深さにおける対象成分の濃度を非破壊的に求めることができる。

【図面の簡単な説明】

【0013】

【図1】本発明の第1実施形態による濃度検出装置の構成例を示す。

【図2】検査対象物を仮想的に複数の層に区分した場合の一例を示す。

10

【図3】本発明の第1実施形態による濃度検出方法における関係式取得処理を示すフローチャートである。

【図4A】関係式取得処理の説明図である。

【図4B】関係式取得処理の別の説明図である。

【図4C】関係式取得処理の更に別の説明図である。

【図5】本発明の第1実施形態による濃度検出方法における濃度検出処理を示すフローチャートである。

【図6A - 6B】本発明の第2実施形態による濃度検出装置の構成例を示し、関係式に関する説明図でもある。

【図7】本発明の第3実施形態による濃度検出装置の構成例を示し、関係式に関する説明図でもある。

20

【図8】本発明の第3実施形態による濃度検出方法における濃度検出処理を示すフローチャートである。

【発明を実施するための形態】

【0014】

本発明の実施形態を図面に基づいて説明する。なお、各図において共通する部分には同一の符号を付し、重複した説明を省略する。また、以下の説明は、特許請求の範囲に記載された発明を限定するものではない。例えば、本発明は、以下で述べる構成要素の全てを備えるものに限定されない。

【0015】

30

[第1実施形態]

(濃度検出装置)

図1は、本発明の第1実施形態による濃度検出装置10の構成を示す。濃度検出装置10は、検査対象物1の外部からその表面2へ中性子線を入射し、これにより検査対象物1において発生したガンマ線のうち検査対象物1内の対象成分に由来のガンマ線（以下で、単に特定ガンマ線という）を検出し、この検出結果に基づいて、検査対象物1における各深さ又は特定深さでの対象成分の濃度を求める。ここで、深さは、検査対象物1の表面2からの深さである。また、対象成分の濃度は元素としての濃度であってよい。

【0016】

1つの実施例では、検査対象物1は、鉄筋を内部に含むコンクリート構造物であり、対象成分は塩分（塩素）である。対象成分が塩分である場合、塩分は、例えば、安定して存在する塩素 ^{35}Cl の同位体 ^{35}Cl であってよい。なお、検査対象物1と対象成分は、コンクリート構造物と塩分の組み合わせに限定されない。すなわち、検査対象物1はコンクリート構造物に限定されず、対象成分は、検査対象物1に入射された中性子線との反応により特定ガンマ線を放出するものであればよい。例えば、対象成分は、カルシウム（主に ^{40}Ca ）、ケイ素（主に ^{28}Si ）などであってもよい。なお、水素（ ^1H ）は、1種類（単一のエネルギー）の特定ガンマ線しか放出しないので、後述するように複数種類の特定ガンマ線を利用する第1実施形態と第2実施形態では水素は対象成分として不適切であるが、後述する第3実施形態においては水素を対象成分としてもよい。

40

【0017】

50

濃度検出装置 10 は、中性子源 3 と、ガンマ線検出装置 5 と、濃度算出装置 7 とを備える。

【0018】

中性子源 3 は、検査対象物 1 の表面 2 へ多数の中性子線 (neutron ray) を (例えば中性子ビームとして) 照射し、中性子線を検査対象物 1 に入射させる。中性子源 3 は、一例では、中性子を発生する放射性線源 (RI (radioactive isotope) 線源) であってもよい。この場合、放射性線源は、 ^{252}Cf であってもよいが、これに限定されない。別の例では、中性子源 3 は、荷電粒子ビームが照射されることにより中性子線を発生するターゲットを有するものであってもよい。この場合、ターゲットは、ベリリウムであってもよいが、これに限定されない。

10

【0019】

中性子源 3 により検査対象物 1 に入射された中性子線は、検査対象物 1 内の対象成分と反応する。これにより、対象成分に由来の特定ガンマ線が発生する。第 1 実施形態では、エネルギー (すなわち波長) が異なる複数種類の特定ガンマ線が対象成分から発生する。対象成分が塩分の場合には、複数種類の特定ガンマ線として、エネルギーが 517 keV、786 keV、788 keV、1165 keV、1951 keV、6111 keV である特定ガンマ線がある。

【0020】

ガンマ線検出装置 5 は、検査対象物 1 において中性子線により発生したガンマ線のうち対象成分に由来の特定ガンマ線を検出して、該特定ガンマ線の検出量を求める。ガンマ線検出装置 5 は、ガンマ線検出器 5a と検出量抽出部 5b を有する。

20

【0021】

ガンマ線検出器 5a は、検査対象物 1 からのガンマ線の各エネルギー (各波長) について、ガンマ線を検出し、その検出データを検出量抽出部 5b に入力する。この検出データは、検出した各ガンマ線のエネルギーに対応する波高値であってもよい。ガンマ線検出器 5a は、例えばゲルマニウム検出器を用いたものであってもよいが、これに限定されない。なお、第 1 実施形態において、ガンマ線検出器 5a には、後述のコリメータ 6 が設けられてもよい。

【0022】

検出量抽出部 5b は、入力された検出データに基づいて、特定ガンマ線の検出量を求める。例えば、検出量抽出部 5b は、ガンマ線検出器 5a から入力された検出データとしての各波高値に基づいて、ガンマ線のエネルギースペクトルを取得する。このエネルギースペクトルは、ガンマ線の各エネルギーにおけるガンマ線の検出回数を示す。検出量抽出部 5b は、当該エネルギースペクトルに基づいて、特定ガンマ線 (第 1 実施形態では発生した複数種類の特定ガンマ線のうち n (n は 2 以上の整数) 種類の各々の特定ガンマ線) の検出回数を検出量として求める。

30

【0023】

この検出回数は、第 1 実施形態では、所定の測定時間にわたる検出回数であってもよい。所定の測定時間は、中性子線を検査対象物 1 に照射している期間内の時間であってもよい。所定の測定時間は、例えば、100 秒、200 秒、または 300 秒などの時間であってもよいが、これらの時間に限定されない。

40

【0024】

濃度算出装置 7 は、ガンマ線検出装置 5 が求めた特定ガンマ線の検出量に基づいて、検査対象物 1 における各深さ又は特定深さの対象成分の濃度を求める。

【0025】

対象成分の濃度を求めるために、検査対象物 1 を仮想的に複数の層 (本明細書において、単に層ともいう) に表面 1 と直交する方向に区分する。これらの層の各々の厚みは、数 cm 程度 (例えば 2 cm 又は 3 cm 程度) であってもよいが、他の範囲内の値であってもよい。

【0026】

50

図 2 は、検査対象物 1 を仮想的に複数の層 1 a , 1 b , 1 c に区分した場合の一例を示す。図 2 の例では、検査対象物 1 は 3 つの層 1 a , 1 b , 1 c に区分されている。区分された複数の層は、表面 2 と直交する方向に重なっているものであってよい。区分された各層において対象成分の濃度が一定であるとする。区分された複数の層における複数の濃度と、ガンマ線検出装置 5 により求められる特定ガンマ線の検出量との関係を表す関係式（関数）が、特定ガンマ線の種類（以下で単に種類ともいう）毎に予め定められて濃度算出装置 7 に保持されている。

【 0 0 2 7 】

上述の関係式は、次の式（ 1 ）で表されてよい。

$$\sum X_i \times \alpha_{i, k} = D_k \quad \cdots (1)$$

10

【 0 0 2 8 】

この関係式（ 1 ）における各記号の意味は、次の通りである。

i は、上述の層の番号であり、1 ~ n の値をとり、n は、上述した層の数である。

k は、特定ガンマ線の種類を示す。すなわち、k は、検出量を求める対象となる特定ガンマ線の種類の番号である。k は、1 ~ n の値をとり、n は、上述した層の数である。すなわち、互いに異なるこれらの種類の数は、検査対象物 1 を区分した層の数と同じである。各種類 k について関係式が予め求められている。言い換えると、n 個の関係式（ 1 ）が予め求められている。例えば、対象成分が塩素（³⁵Cl）である場合は、k = 1 , 2 , 3 は、それぞれ 1 1 6 5 k e V , 1 9 5 1 k e V , 6 1 1 1 k e V のエネルギーを有する特定ガンマ線を示す。対象成分がケイ素（²⁸Si）である場合は、k = 1 , 2 , 3 は、それぞれ 2 0 9 2 k e V , 3 5 3 8 k e V , 4 9 3 3 k e V のエネルギーを有する特定ガンマ線を示す。

20

【 0 0 2 9 】

X_i は、i 番目の層における対象成分の濃度（質量濃度）を示す。X_i は、未知数である。

α_{i, k} は、k 番目の種類と i 番目の層とに対応する係数である。α_{i, k} は、予め求められたものである。

D_k は、ガンマ線検出装置 5 により求められる、k 番目の種類の特定ガンマ線の検出量である。

Σ は、全ての i（すなわち複数の層の全て）に関する総和を示す。

30

【 0 0 3 0 】

第 1 実施形態では、濃度検出装置 1 0 が検査対象物 1 に対する検査（後述の濃度検出処理）において、複数種類の特定ガンマ線の検出量を求める時に、これら複数の（n 個の）種類の間で、検出条件は同じであってよい。ここで、検出条件は、後述の前提事項（b）と（c）や、検査対象物 1 とガンマ線源とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係などを含む。

【 0 0 3 1 】

第 1 実施形態では、各種類 k についての上記関係式（例えば上述の関係式（ 1 ））は、当該種類 k に対応する種類の特定ガンマ線に関する式である。言い換えると、各種類 k における上記関係式（ 1 ）の D_k は、k 番目の種類の特定ガンマ線の検出量である。このように、第 1 実施形態では、D_k は、添え字 k が示す種類の特定ガンマ線の検出量である。

40

【 0 0 3 2 】

濃度算出装置 7 は、ガンマ線検出装置 5 が求めた、各種類 k の特定ガンマ線の検出量を、当該種類についての上述の関係式に適用することにより連立方程式を生成し、当該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける層での対象成分の濃度を算出する。例えば、濃度算出装置 7 は、ガンマ線検出装置 5 が求めた n 個の検出量 D_k（k は 1 ~ n の整数）を、それぞれに対応する n 個の関係式（ 1 ）に適用することにより、D_k の数値が特定された n 個の関係式（連立方程式）を生成し、当該連立方程式を解くことにより、各深さ又は特定深さにおける層での対象成分の濃度を算出する。

【 0 0 3 3 】

50

< 濃度検出のより詳しい説明 >

以下において、濃度検出についてより詳しく説明する。第 1 実施形態では、次の事項 (a) ~ (d) を前提とする。なお、後述の第 2 実施形態と第 3 実施形態でも、これらの事項 (a) ~ (d) を前提とする。

【 0 0 3 4 】

(a) 検査対象物 1 を仮想的に複数の層に区分した場合に、これらの層の各々において対象成分の濃度が上述のように一定である。これについて、各層において、対象成分の濃度は、当該層の厚み方向と直交する方向において、ある程度の範囲では一定であるとする。当該範囲を、特定ガンマ線を発生させる濃度検出対象の範囲とする。

(b) 中性子源 3 から検査対象物 1 に放射される中性子線のスペクトルが、既知であり、各種類の特定ガンマ線の検出量は、一定のスペクトルの中性子線に対して求められる。中性子線のスペクトルは、単位時間あたりに中性子源 3 から放射される多数の中性子のエネルギー分布であり、この分布において、各エネルギーについて、当該エネルギーを有する中性子の数が表される。

(c) 中性子源 3 から検査対象物 1 に照射される中性子線の強度が、既知であり、各種類の特定ガンマ線の検出量は、一定の強度の中性子線に対して求められる。中性子線の強度は、単位時間あたりに中性子源 3 から検査対象物 1 へ照射される中性子の数である。

(d) ガンマ線検出装置 5 により求められる上述の検出量が、複数の層における対象成分の複数の濃度の関数 (上述の関係式) により表される。この関数が線形である場合には、当該関係式は、上述の関係式 (1) であってよい。

【 0 0 3 5 】

検査対象物 1 を図 2 のように 3 つの層 1 a , 1 b , 1 c に区分する場合には、上述の関係式 (1) は、次の 3 つの関係式 (2) ~ (4) となる。

$$X_1 \times \alpha_{1,1} + X_2 \times \alpha_{2,1} + X_3 \times \alpha_{3,1} = D_1 \quad \cdots (2)$$

$$X_1 \times \alpha_{1,2} + X_2 \times \alpha_{2,2} + X_3 \times \alpha_{3,2} = D_2 \quad \cdots (3)$$

$$X_1 \times \alpha_{1,3} + X_2 \times \alpha_{2,3} + X_3 \times \alpha_{3,3} = D_3 \quad \cdots (4)$$

【 0 0 3 6 】

関係式 (2) は、1 番目 (k = 1) の種類の特定ガンマ線に関する関係式であり、関係式 (3) は、2 番目 (k = 2) の種類の特定ガンマ線に関する関係式であり、関係式 (3) は、3 番目 (k = 3) の種類の特定ガンマ線に関する関係式である。すなわち、関係式 (2) ~ (4) の D_1 と D_2 と D_3 は、それぞれ、互いに種類 (エネルギー、すなわち、波長) が異なる特定ガンマ線の検出量であり、検査対象物 1 の検査時 (例えば後述のステップ S 1 3) において求められる。3 つの関係式 (2) ~ (4) において、9 つの係数 $\alpha_{1,1} \sim \alpha_{3,3}$ は、後述するように予め求められている。したがって、 D_1 と D_2 と D_3 が求められた関係式 (2) ~ (4) を連立方程式として解くことにより、3 つの未知数 X_1 , X_2 , X_3 を求めることができる。検査対象物 1 を、3 以外の複数の層に区分する場合についても同様である。

【 0 0 3 7 】

(濃度検出方法)

第 1 実施形態による濃度検出方法について説明する。濃度検出方法は、上述した濃度検出装置 1 0 を用いて行われる。濃度検出方法は、関係式取得処理と濃度検出処理を含む。

【 0 0 3 8 】

< 関係式取得処理 >

図 3 は、関係式取得処理を示すフローチャートである。関係式取得処理では、検査対象物 1 を複数の層に仮想的に区分した場合に、これら複数の層のそれぞれにおける対象成分の複数の濃度と検出量との関係を表す関係式 (例えば上記関係式 (1)) を求める。関係式取得処理は、ステップ S 1 ~ S 5 を有する。

【 0 0 3 9 】

ステップ S 1 では、検査対象物 1 を模擬した供試体と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a とを配置する。ステップ S 1 で配置した供試体と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位

10

20

30

40

50

置関係及び姿勢関係は、実際の検査時（すなわち後述の濃度検出処理を行う時）における検査対象物 1 と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係と同じである。

【 0 0 4 0 】

供試体は、上述の複数（ n 個）の層のそれぞれに対応する複数のブロックを、順に配置して互いに重ねたものである。複数の層の数とブロックの数とは、同じである。これらのブロックは、検査対象物 1（対応する層の部分）と同じ材質と構成で形成されており、それぞれ上記複数の層と同じ厚みを有する。供試体を構成するこれらのブロックのうち、1 つのブロック（以下で成分含有ブロックという）のみが既知の濃度で対象成分を含んでおり、他のブロック（以下で成分ゼロブロックという）は対象成分を含んでいない。供試体を構成する複数のブロックは、同じ大きさと形状を有してよい。

10

【 0 0 4 1 】

検査対象物 1 が図 2 のように 3 つの層 1 a , 1 b , 1 c からなると仮定した場合（ $n = 3$ の場合）、ステップ S 1 では、例えば、図 4 A のように、3 つのブロック 1 0 1 a , 1 0 1 b からなる供試体 1 0 1 と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a を配置している。図 4 A において、3 つブロック 1 0 1 a , 1 0 1 b のうち、ブロック 1 0 1 a は、成分含有ブロックであり、他の 2 つのブロック 1 0 1 b は、成分ゼロブロックである。

【 0 0 4 2 】

ステップ S 1 において、供試体を構成するように複数のブロックを中性子源 3 側から順に配置して互いに重ねる。この配置において、中性子源 3 側から数えた成分含有ブロックの順番を i 番目にする。図 4 A の例では、成分含有ブロック 1 0 1 a の順番は 1 番目である。上述のように供試体を構成するブロックの数を n とした場合、成分含有ブロックの取り得る順番は、1 番目から n 番目までの n 通りある。

20

【 0 0 4 3 】

ステップ S 2 では、ステップ S 1 で配置した供試体と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係の状態、中性子源 3 により中性子線を供試体に照射する。例えば、図 4 A において、中性子源 3 により中性子線を供試体 1 0 1 に照射する。

【 0 0 4 4 】

ステップ S 3 では、ステップ S 2 で照射した中性子線により供試体（すなわち成分含有ブロック）において発生した、対象成分に由来の複数種類の特定ガンマ線を、ガンマ線検出器 5 a で検出する。また、ステップ S 3 では、この検出データが、ガンマ線検出器 5 a から検出量抽出部 5 b に入力され、当該検出データに基づいて、検出量抽出部 5 b により、 n 種類の特定ガンマ線のそれぞれの検出量 $d_{i,k}$ を求める。

30

【 0 0 4 5 】

当該検出量を表わす $d_{i,k}$ の添え字 i は、ステップ S 1 において配置された成分含有ブロックの上記順番を示す。すなわち、添え字 i は、供試体 1 0 1 を構成する複数のブロックのうち成分含有ブロックが i 番目に配置されている場合の検出量であることを示す。 $d_{i,k}$ の添え字 k は、上記 n 種類のうち k 番目の種類の特定ガンマ線の検出量であることを示す。図 4 A の状態でステップ S 2、S 3 を行った場合には、当該ステップ S 3 において、3 つの検出量 $d_{1,1}$, $d_{1,2}$, $d_{1,3}$ が求められる。

【 0 0 4 6 】

このようなステップ S 1 ~ S 3 を、ステップ S 1 における成分含有ブロックの上記順番を変えて繰り返すように、ステップ S 3 を終えたら、ステップ S 4 の判断を行う。ステップ S 4 では、成分含有ブロックを、取り得る n 通りの全ての上記順番の各々に配置した状態でステップ S 2 とステップ S 3 を行ったかを判断する。

40

【 0 0 4 7 】

ステップ S 4 の判断の結果が否定である場合には、ステップ S 1 に戻り、上述したステップ S 1 ~ S 4 を再び行う。戻った再度のステップ S 1 では、成分含有ブロックを未だ配置していない順番にして構成した供試体と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a を配置する。再度のステップ S 1 についての他の点は、上述と同じであってよい。例えば、再度のステップ S 2 で配置した供試体と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係

50

は、実際の検査時における検査対象物 1 と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係と同じである。なお、再度のステップ S 2 において、中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a の位置と向きは、最初のステップ S 2 で配置した状態に保たれていてよい。

【 0 0 4 8 】

1 回目のステップ S 1 で、図 4 A のように成分含有ブロック 1 0 1 a の順番を 1 番目にした場合には、例えば、2 回目のステップ S 1 では図 4 B のように成分含有ブロック 1 0 1 a の順番を 2 番目にし、3 回目のステップ S 1 では図 4 C のように成分含有ブロック 1 0 1 a の順番を 3 番目にする。この場合、2 回目のステップ S 3 では、3 つの検出量 $d_{2,1}$, $d_{2,2}$, $d_{2,3}$ が求められ、3 回目のステップ S 3 では、3 つの検出量 $d_{3,1}$, $d_{3,2}$, $d_{3,3}$ が求められる。

10

【 0 0 4 9 】

ステップ S 1 ~ S 4 を繰り返すことにより、ステップ S 4 の判断の結果が肯定となったら、ステップ S 5 へ進む。

【 0 0 5 0 】

ステップ S 5 では、複数回のステップ S 3 の各々で求めた n 種類の特特定ガンマ線の検出量 $d_{i,k}$ と、成分含有ブロックにおける対象成分の既知の濃度 C とに基づいて、検査対象物 1 の複数の層におけるそれぞれの対象成分の濃度と検出量との関係を表す上記関係式を求める。例えば、ステップ S 5 では、複数回のステップ S 3 の各々で求めた n 種類の特特定ガンマ線の検出量 $d_{i,k}$ と、成分含有ブロックにおける対象成分の濃度 C とに基づいて、上述の関係式 (1) の各係数 $\alpha_{i,k}$ を求める。各層における対象成分の濃度と各種類の特特定ガンマ線の検出量とが比例関係にあるとして、各係数 $\alpha_{i,k}$ を、次の式 (5) で求めることができる。

20

$$\alpha_{i,k} = d_{i,k} / C \quad \cdots (5)$$

【 0 0 5 1 】

したがって、検査対象物 1 の n 個の層におけるそれぞれの対象成分の濃度と検出量との関係を表す上記関係式 (1) として次の関係式 (6) が求められる。この関係式 (6) は、記憶部 7 b に記憶され、後述の濃度検出処理で用いられる。

$$\sum X_i \times d_{i,k} / C = D_k \quad \cdots (6)$$

【 0 0 5 2 】

図 4 A ~ 図 4 C のように、供試体 1 0 1 を 3 つのブロック 1 0 1 a, 1 0 1 b で構成した場合 (n = 3 の場合) には、関係式 (6) として次の 3 つの関係式 (7) ~ (9) が得られる。

30

$$X_1 \times d_{1,1} / C + X_2 \times d_{2,1} / C + X_3 \times d_{3,1} / C = D_1 \quad \cdots (7)$$

$$X_1 \times d_{1,2} / C + X_2 \times d_{2,2} / C + X_3 \times d_{3,2} / C = D_2 \quad \cdots (8)$$

$$X_1 \times d_{1,3} / C + X_2 \times d_{2,3} / C + X_3 \times d_{3,3} / C = D_3 \quad \cdots (9)$$

【 0 0 5 3 】

< 濃度検出処理 >

図 5 は、濃度検出処理を示すフローチャートである。濃度検出処理では、検査対象物 1 に対して実際に検査を行うことにより、検査対象物 1 の各層又は特定の層に相当する検査対象物 1 の各深さ又は特定深さにおける対象成分の濃度を検出する。濃度検出処理は、ステップ S 1 1 ~ S 1 4 を有する。

40

【 0 0 5 4 】

ステップ S 1 1 では、検査対象物 1 に対して中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a を配置する。ステップ S 1 1 での配置では、検査対象物 1 と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係を、上述のステップ S 1 において配置した供試体と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係と同じになるようにする。より詳しくは、ステップ S 1 1 での配置において検査対象物 1 の表面 2 から見た中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a の位置と姿勢が、ステップ S 1 での配置において供試体の表面 (例えば図 4 A ~ 図 4 C における表面 1 0 2) から見た中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a の位置と姿勢と同じになるようにする。

50

【 0 0 5 5 】

ステップ S 1 2 では、ステップ S 1 1 での配置による検査対象物 1 と中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係の状態、検査対象物 1 の表面 2 に、中性子源 3 により中性子線を照射する。

【 0 0 5 6 】

ステップ S 1 3 では、ステップ S 1 2 で照射した中性子線により検査対象物 1 において発生した、対象成分に由来の複数種類の特定ガンマ線を、ガンマ線検出器 5 a で検出する。また、ステップ S 1 3 では、この検出データが、ガンマ線検出器 5 a から検出量抽出部 5 b に入力され、当該検出データに基づいて、検出量抽出部 5 b により n 種類の特定ガンマ線のそれぞれの検出量 D_k (k は 1 ~ n までの整数) 求める。

10

【 0 0 5 7 】

ここで求められる検出量 D_k の数は、検査対象物 1 において区分された複数の層の数 n と同じである。また、当該検出量 D_k の添え字 k は、ガンマ線検出装置 5 が求めた、 k 番目の種類の特定ガンマ線の検出量を示す。

【 0 0 5 8 】

図 2 のように複数の層の数 n が 3 である場合には、ステップ S 1 3 では、1 番目の種類の特定ガンマ線の検出量 D_1 と、2 番目の種類の特定ガンマ線の検出量 D_2 と、3 番目の種類の特定ガンマ線の検出量 D_3 が求められる。

【 0 0 5 9 】

ステップ S 1 4 では、ステップ S 1 3 で求めた n 種類の検出量 D_k を、濃度算出部 7 a により、それぞれに対応し記憶部 7 b に記憶されている上述の n 個の関係式 (1) に、すなわち、 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ の D_k (k は 1 ~ n までの整数) に適用する。これにより、濃度算出部 7 a が、 D_k が具体的な数値となった連立方程式 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ を生成し、該連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 における複数の層のうち、各深さ又は特定深さに存在する層における対象成分の濃度を、検査対象物 1 の各深さ又は特定深さにおける対象成分の濃度として算出する。

20

【 0 0 6 0 】

図 2 のように複数の層の数 n が 3 である場合には、ステップ S 1 4 では、濃度算出部 7 a は、検出量 D_1 と検出量 D_2 と検出量 D_3 を、上述の関係式 (7) ~ (9) の D_1 と D_2 と D_3 にそれぞれに適用する。これにより、濃度算出部 7 a は、 D_1 と D_2 と D_3 が具体的な数値となった関係式 (7) ~ (9) を連立方程式として生成する。濃度算出部 7 a は、当該連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 の各層における対象成分の濃度 X_1 , X_2 , X_3 、あるいは、特定深さにおける層の濃度 X_1 , X_2 又は X_3 を求める。

30

【 0 0 6 1 】

(第 1 実施形態の効果)

第 1 実施形態では、検査対象物 1 を仮想的に複数の層に区分し、これら複数の層のそれぞれにおける対象成分の濃度と、特定ガンマ線の検出量との関係式を特定ガンマ線の種類毎に予め求めておく。検査時に、検査対象物 1 に中性子線を照射することにより、検査対象物 1 において発生した対象成分に由来の特定ガンマ線を検出して、その検出量を求める。この検出量を特定ガンマ線の種類毎に求める。求められた複数の検出量を、予め求めた複数の関係式に適用することにより連立方程式を生成する。この連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 における複数の層のうち、各深さ又は特定深さに存在する層における対象成分の濃度を、検査対象物 1 の各深さ又は特定深さにおける対象成分の濃度として算出することができる。このように、検査対象物 1 の各深さ又は所望の特定深さにおける対象成分の濃度を非破壊的に求めることができる。

40

【 0 0 6 2 】

[第 2 実施形態]

(濃度検出装置)

本発明の第 2 実施形態による濃度検出装置 1 0 を説明する。図 6 A と図 6 B は、第 2 実施形態による濃度検出装置 1 0 の構成例を示す。図 6 A は、後述のコリメータ 6 が設けら

50

れている場合を示し、図 6 B は、コリメータ 6 が設けられていない場合を示す。図 6 A と図 6 B では、一例として、検査対象物 1 を 3 つの層 1 a , 1 b , 1 c に仮想的に区分している。第 2 実施形態について、以下において説明しない点は、第 1 実施形態と同じであってよい。第 2 実施形態による濃度検出装置 10 は、第 1 実施形態と同様に、中性子源 3 と、ガンマ線検出装置 5 と、濃度算出装置 7 とを備える。

【 0 0 6 3 】

第 2 実施形態において、第 1 実施形態と同様に、検査対象物 1 を仮想的に複数の層に区分した場合に、これら複数の層のそれぞれにおける $\alpha_{i,k}$ を求めるための測定または計算を予め行っておく。

【 0 0 6 4 】

また、第 2 実施形態において、第 1 実施形態と同様に、各種類についての当該関係式は、例えば上述の関係式 (1)、すなわち、 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ であってよい。また、第 2 実施形態においても、上記関係式 (上述の関係式 (1)) は、各種類 k の特定ガンマ線に関する式である。

【 0 0 6 5 】

第 2 実施形態では、上述の関係式 (1) の各係数 $\alpha_{i,k}$ の求め方が第 1 実施形態の場合と異なる。

【 0 0 6 6 】

$\alpha_{i,k}$ は、次の式 (10) で表される。

$$\alpha_{i,k} = N_i \times T_{i,k} \times \varepsilon_{i,k} \times b_k \times d_i \times \sigma_i \times (N_A \times r / A) \cdots (10)$$

【 0 0 6 7 】

$\alpha_{i,k}$ は、上述した前提 (a) ~ (d) の下で、予め求められている。 $\alpha_{i,k}$ を表す上記式 (10) の各記号について説明する。なお、以下で適宜に図 6 A と図 6 B を参照して補足説明する。図 6 A の例のように、ガンマ線検出器 5 a にはコリメータ 6 が設けられている場合には、ガンマ線検出器 5 a は、検査対象物 1 において発生した特定ガンマ線のうち、コリメータ 6 の向きと一致する方向からガンマ線検出器 5 a に進行して来た特定ガンマ線のみを選択的に検出してもよい。式 (10) の各記号の意味は以下の通りである。

【 0 0 6 8 】

N_i は、上述した所定の測定時間にわたる i 番目の層への入射中性子量である。詳しくは、検査時における検査対象物 1 と中性子線とガンマ線検出器 5 a との位置関係及び姿勢関係は予め定められており、当該位置関係及び姿勢関係の下で中性子源 3 が中性子線を表面 2 に照射することにより、検査対象物 1 の i 番目の層に入射する中性子の数が入射中性子量 N_i である。入射中性子量 N_i は、中性子源 3 から散乱せずに i 番目の層に入射する中性子の数であってもよいし、当該数を含むだけでなく、検査対象物 1 内において散乱して i 番目の層に入射する中性子の数も含んでよい。

【 0 0 6 9 】

コリメータ 6 を設けた場合には、i 番目の層において、コリメータ 6 の向きの方向にガンマ線検出器 5 a と重なる重複領域 R_i に入射する中性子の数が中性子量 N_i であってよい。この重複領域 R_i は、図 6 A の例では、1 番目の層では R_1 であり、2 番目の層では R_2 であり、3 番目の層では R_3 である。

【 0 0 7 0 】

N_i は、放射線輸送シミュレーション又は事前の実験により予め求められている。放射線輸送シミュレーションでは、例えば、次のように N_i を求めてよい。材質が既知である検査対象物 1 において、中性子源 3 から入射された中性子の挙動を、放射線輸送シミュレーションにより把握して、当該挙動に基づいて N_i を求める。事前の実験では、例えば、次のように放射化法により N_i を求めてよい。検査対象物 1 と材質が同じであり、検査対象物 1 の表面 2 から i 番目の層までの厚みを有する供試体を用意する。この供試体の裏面に金箔を張り付ける。このような供試体の表面に中性子源 3 (例えば ^{252}Cf 線源) から中性子線を照射する。その後、金箔からのガンマ線を測定し、そのガンマ線スペクトルに

10

20

30

40

50

基づいて N_i を求める。

【 0 0 7 1 】

$T_{i,k}$ は、 i 番目の層で発生した k 番目の種類の特定ガンマ線が、 i 番目の層からガンマ線検出器 5 a まで進行する経路において検査対象物 1 の内部を透過する率である。透過率 $T_{i,k}$ は、当該経路上における i 番目の層における基準位置 P_i から当該経路上の表面 2 の位置 P_s (以下で表面位置という) までの距離に基づいて求められてよい。例えば、当該距離と同じ厚みを有し検査対象物 1 と同じ材質で形成された供試体を用意し、この供試体に対して、その厚み方向に、 ^{152}Eu などのガンマ線標準線源からガンマ線を照射する実験により、 $T_{i,k}$ を求めてよい。あるいは、ガンマ線の透過率に関するデータベースに基づいて $T_{i,k}$ を求めてもよい。透過率 $T_{i,k}$ は、 i 番目の層の基準位置 P_i から表面位置 P_s までを k 番目の種類の特定ガンマ線が透過する率である。

10

【 0 0 7 2 】

図 6 A の例のようにガンマ線検出器 5 a にコリメータ 6 が設けられている場合には、上記の基準位置 P_i は、上述した重複領域 R_i 内の位置 (例えば重複領域 R_i の中心位置) であってよい。図 6 B の例のようにガンマ線検出器 5 a にコリメータ 6 が設けられていない場合には、上記の基準位置 P_i は、検査時に検査対象物へ照射された中性子線が通過する領域内の位置 (例えば当該領域の中心位置) であってよい。図 6 A と図 6 B の例では、基準位置 P_i は、1 番目の層では P_1 であり、2 番目の層では P_2 であり、3 番目の層では P_3 である。図 6 B では、上述の位置 P_s は層毎に異なる。 $T_{i,k}$ は、シミュレーション又は事前の実験又は理論計算により予め求められている。

20

【 0 0 7 3 】

$\varepsilon_{i,k}$ は、予め定められた上述の位置関係により定まる値であって、 i 番目の層で発生した k 番目の種類の特定ガンマ線に対するガンマ線検出器 5 a の検出効率である。言い換えると、検出効率 $\varepsilon_{i,k}$ は、 i 番目の層で発生した k 番目の種類の特定ガンマ線の量に対する、当該量のうちガンマ線検出器 5 a が検出する k 番目の種類の特定ガンマ線の量の割合である。一般的に、検出効率は、ガンマ線検出器 5 a の形状、ガンマ線発生位置とガンマ線検出器 5 a との距離、ガンマ線のエネルギーなどに依存する。したがって、検出効率 $\varepsilon_{i,k}$ は、ガンマ線検出器 5 a の形状、 k 番目の種類の特定ガンマ線のエネルギー、ガンマ線検出器 5 a と i 番目の層との距離などに依存する。例えば、 $\varepsilon_{i,k}$ は、 ^{152}Eu などのガンマ線標準線源を用いて求められてよい。その際、当該線源とガンマ線検出器 5 a との間には、物体が何も存在しないようにする。

30

【 0 0 7 4 】

図 6 A と図 6 B のように、検出効率 $\varepsilon_{i,k}$ は、ガンマ線の発生位置とみなす基準位置 P_i とガンマ線検出器 5 a との距離と、 k 番目の種類の特定ガンマ線のエネルギーと、ガンマ線検出器 5 a の形状とに基づいて求められてよい。

【 0 0 7 5 】

b_k は、 k 番目の種類の特定ガンマ線の絶対強度 (%) を示す。言い換えると、100 個の中性子が対象成分に捕獲された場合に、 k 番目の種類の特定ガンマ線が対象成分から m 個放出されたとすると、 b_k は $m\%$ である。 b_k として、文献などに記載されている値を用いてよい。

40

d_i は、 i 番目の層の厚みである。

【 0 0 7 6 】

σ_i は、 i 番目の層における対象成分の中性子捕獲反応断面積である。 σ_i は、中性子のエネルギーに依存する。 σ_i は、Japanese Evaluated Nuclear Data Library (JENDL) などのデータベースから取得されてよい。 σ_i は、 i 番目の層での中性子エネルギースペクトルに依存する。この中性子エネルギースペクトルは、例えば放射線輸送シミュレーションにより求められてよい。また、 σ_i は、平均的な値であってよい。例えば、 $\sigma_i = \int I(E) \cdot f(E) dE / \int I(E) dE$ により、 σ_i を求めてもよい。ここで、 $I(E)$ は、 i 番目の層内での深さによる中性子エネルギースペクトルの変化や、 $(i+1)$ 番目の層から散乱により戻ってくる中性子等を考慮した、 i 番目の層での平均的な中性子線

50

のスペクトルにおけるエネルギー E を有する中性子の数であり、 $f(E)$ は、エネルギー E での捕獲断面積であり、 $\int$ は E についての積分である。

【0077】

N_A は、アボガドロ数 (6.022×10^{23} 個/mol) である。 A は、対象成分の原子量である。対象成分が同一の元素に属する複数種類の同位体のいずれかである場合に、 r は、これら複数種類の同位体における対象成分の自然存在比である。この場合、上述の関係式 (1) における X_i は、当該元素としての濃度である。対象成分が塩素の ^{35}Cl の場合は、 $r = 0.7577$ 、 $A = 35.4527$ である。

【0078】

このように予め求めた N_i と $T_{i,k}$ と $\varepsilon_{i,k}$ と b_k 等により、 $\alpha_{i,k} = N_i \times T_{i,k} \times \varepsilon_{i,k} \times b_k \times d_i \times \sigma_i \times (N_A \times r / A)$ を定めておき、 $\alpha_{i,k}$ を用いた上述の関係式 (1) を記憶部 7b に記憶させておく。

10

【0079】

図6の例のように、層の数 n が3である場合には、上述の関係式 (1) は、次の3つの関係式 (11) ~ (13) となる。

$$X_1 \times N_1 \times T_{1,1} \times \varepsilon_{1,1} \times b_1 \times d_1 \times \sigma_1 \times (N_A \times r / A) + X_2 \times N_2 \times T_{2,1} \times \varepsilon_{2,1} \times b_1 \times d_2 \times \sigma_2 \times (N_A \times r / A) + X_3 \times N_3 \times T_{3,1} \times \varepsilon_{3,1} \times b_1 \times d_3 \times \sigma_3 \times (N_A \times r / A) = D_1 \cdots (11)$$

$$X_1 \times N_1 \times T_{1,2} \times \varepsilon_{1,2} \times b_2 \times d_1 \times \sigma_1 \times (N_A \times r / A) + X_2 \times N_2 \times T_{2,2} \times \varepsilon_{2,2} \times b_2 \times d_2 \times \sigma_2 \times (N_A \times r / A) + X_3 \times N_3 \times T_{3,2} \times \varepsilon_{3,2} \times b_2 \times d_3 \times \sigma_3 \times (N_A \times r / A) = D_2 \cdots (12)$$

20

$$X_1 \times N_1 \times T_{1,3} \times \varepsilon_{1,3} \times b_3 \times d_1 \times \sigma_1 \times (N_A \times r / A) + X_2 \times N_2 \times T_{2,3} \times \varepsilon_{2,3} \times b_3 \times d_2 \times \sigma_2 \times (N_A \times r / A) + X_3 \times N_3 \times T_{3,3} \times \varepsilon_{3,3} \times b_3 \times d_3 \times \sigma_3 \times (N_A \times r / A) = D_3 \cdots (13)$$

【0080】

(濃度検出方法)

第2実施形態による濃度検出方法において関係式取得処理は、上述のように N_i と $T_{i,k}$ と $\varepsilon_{i,k}$ と b_k と d_i と σ_i 等予め求め、 $\alpha_{i,k} = N_i \times T_{i,k} \times \varepsilon_{i,k} \times b_k \times d_i \times \sigma_i \times (N_A \times r / A)$ を用いた上述の関係式 (1) を記憶部 7b に記憶させておく処理である。

30

【0081】

第2実施形態による濃度検出方法において濃度検出処理は、第1実施形態の場合と同様であるので、図3のフローチャートに基づいて説明する。第2実施形態による濃度検出処理は、ステップ S11 ~ S14 を有する。

【0082】

ステップ S11 では、検査対象物 1 に対して中性子源 3 とガンマ線検出器 5a を、上述のように予め定めた位置関係及び姿勢関係となるように配置する。

【0083】

ステップ S12 では、ステップ S11 での配置による検査対象物 1 と中性子源 3 とガンマ線検出器 5a との位置関係及び姿勢関係の状態で、検査対象物 1 の表面 2 に、中性子源 3 により中性子線を照射する。例えば、図6において、検査対象物 1 の表面 2 に、中性子源 3 により中性子線を照射する。

40

【0084】

ステップ S13 では、ステップ S12 で照射した中性子線により検査対象物 1 において発生した、対象成分に由来の複数種類の特定ガンマ線を、ガンマ線検出器 5a で検出する。また、ステップ S13 では、この検出データが、ガンマ線検出器 5a から検出量抽出部 5b に入力され、当該検出データに基づいて、検出量抽出部 5b により n 種類の特定ガンマ線のそれぞれの検出量 D_k (k は $1 \sim n$ までの整数) を求める。

【0085】

図6のように複数の層の数 n が3である場合には、ステップ S13 では、1 番目の種類

50

の特定ガンマ線の検出量 D_1 と、2 番目の種類の特定ガンマ線の検出量 D_2 と、3 番目の種類の特定ガンマ線の検出量 D_3 が求められる。

【0086】

ステップ S 1 4 では、ステップ S 1 3 で求めた n 種類の検出量 D_k を、濃度算出部 7 a により、それぞれに対応し記憶部 7 b に記憶された上述の n 個の関係式 (1) に、すなわち、 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ の D_k (k は 1 ~ n までの整数) に適用する。これにより、濃度算出部 7 a が、 D_k が具体的な数値となった連立方程式 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ を生成し、該連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 における上述の複数の層のうち、各深さ又は特定深さに存在する層における対象成分の濃度を、検査対象物 1 の各深さ又は特定深さにおける対象成分の濃度として算出する。

10

【0087】

図 6 のように複数の層の数 n が 3 である場合には、ステップ S 1 4 では、濃度算出部 7 a は、検出量 D_1 と検出量 D_2 と検出量 D_3 を、上述の関係式 (1 1) ~ (1 3) の D_1 と D_2 と D_3 にそれぞれに適用する。これにより、濃度算出部 7 a は、 D_1 と D_2 と D_3 が具体的な数値となった関係式 (1 1) ~ (1 3) を連立方程式として生成する。濃度算出部 7 a は、当該連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 の各層における対象成分の濃度 X_1 , X_2 , X_3 、あるいは、特定深さにおける層の濃度 X_1 , X_2 又は X_3 を求める。

【0088】

(第 2 実施形態の効果)

第 2 実施形態においても、第 1 実施形態と同様に、検査対象物 1 の各深さ又は所望の特定深さにおける対象成分の濃度を非破壊的に求めることができる。

20

【0089】

[第 3 実施形態]

(濃度検出装置)

本発明の第 3 実施形態による濃度検出装置 10 を説明する。図 7 は、第 3 実施形態による濃度検出装置 10 の構成例を示す。図 7 では、一例として、検査対象物 1 を 3 つの層 1 a , 1 b , 1 c に仮想的に区分している。第 3 実施形態について、以下において説明しない点は、第 2 実施形態と同じであってよい。

【0090】

第 3 実施形態による濃度検出装置 10 は、第 2 実施形態と同様に、中性子源 3 と、ガンマ線検出装置 5 と、濃度算出装置 7 とを備える。図 7 の例では、3 つのガンマ線検出器 5 a が図示されているが、後述のように、1 つのガンマ線検出器 5 a を、1 番目の位置と、2 番目の位置と、3 番目の位置に順に配置する場合に、これらの位置に配置した状態を同時に図示している。すなわち、濃度検出装置 10 は、1 つのガンマ線検出装置 5 (1 つのガンマ線検出器 5 a) を有してよい。また、濃度検出装置 10 は、1 つのガンマ線検出装置 5 を有している場合に限定されず、後述のように複数のガンマ線検出装置 5 を有していてもよい。

30

【0091】

第 3 実施形態において、検査対象物 1 を仮想的に複数の層に区分した場合に、これら複数の層のそれぞれにおける対象成分の濃度と、特定ガンマ線の検出量との関係式を検出条件毎に予め求めておく。ここで、第 3 実施形態では関係式が検出条件毎に求められるのに対して、第 1 実施形態では関係式が特定ガンマ線の種類毎に求められる点で両実施形態は相違するが、第 3 実施形態における関係式の求め方の他の点は、第 1 実施形態と同様であってよい。検出条件は、ガンマ線検出装置 5 が特定ガンマ線を検出して特定ガンマ線の検出量を求めることに関する条件である。

40

【0092】

また、第 3 実施形態において、各検出条件についての当該関係式は、例えば上述の関係式 (1)、すなわち、 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ であってよい。ここで、 k は、検出条件の番号であり、1 ~ n の値を取り、 n は、上述した層の数である。すなわち、互いに異なるこれらの検出条件の数は、検査対象物 1 を区分した層の数と同じである。各検出条件 k につ

50

いて関係式が予め求められている。言い換えると、 n 個の関係式(1)が予め求められている。例えば、各検出条件 k についての上記関係式(上述の関係式(1))は、当該検出条件 k に対応する配置関係に関する式である。この配置関係は、中性子源3とガンマ線検出器5aと検査対象物1との位置関係及び姿勢関係の一方又は両方であり、以下で単に配置関係という。記号 k は、第2実施形態では特定ガンマ線の種類を示していたが、第3実施形態では、上述の配置関係を示す。即ち、複数の配置関係を予め定めておく。予め定めた複数の配置関係の数は n である。すなわち、配置関係を示す記号 k は $1 \sim n$ の整数をとる。

【0093】

第3実施形態において、中性子源3が検査対象物1に中性子線を照射することにより、検査対象物1内において対象成分から放出される特定ガンマ線の種類は1種類であってもよい。対象成分から放出される特定ガンマ線の種類が複数種類である場合には、これら種類のうち、予め定めた1つの種類の特定ガンマ線の検出量が、各検出条件 k についての上記関係式(上述の関係式(1))における検出量である。

【0094】

第3実施形態では、上述の関係式(1)の各 $\alpha_{i,k}$ は、第1実施形態又は第2実施形態の場合と同じであってよい。すなわち、関係式(1)の各 $\alpha_{i,k}$ は、第1実施形態又は第2実施形態の場合と同様に求められてよい。各 $\alpha_{i,k}$ を第1実施形態の場合と同様に求める場合には、上述した成分含有ブロックの各順番 i について、各検出条件 k (配置関係)の下で上述のステップS1～S3を行う。これにより、上述のステップS5のように各 $\alpha_{i,k} = d_{i,k} / C$ を求めることができる。第3実施形態において、第2実施形態のように各 $\alpha_{i,k}$ を求める場合については、以下のように補足説明する。

【0095】

$\alpha_{i,k}$ は、上述の式(10)と同じ次の式(14)で表される。

$$\alpha_{i,k} = N_{i,k} \times T_{i,k} \times \varepsilon_{i,k} \times b_k \times d_i \times \sigma_i \times (N_A \times r / A) \cdots (14)$$

【0096】

$\alpha_{i,k}$ は、上述した前提(a)～(d)の下で、予め求められている。 $\alpha_{i,k}$ を表わす上記式(14)の各記号について、以下で説明するが、以下で説明しない点は、第2実施形態における上述の式(10)の各記号の場合と同じであってよい。なお、以下で適宜に図7を参照して補足説明する。図7の例のように、第3実施形態では、ガンマ線検出器5aにはコリメータ6が設けられており、ガンマ線検出器5aは、検査対象物1において発生した特定ガンマ線のうち、コリメータ6の向きと一致する方向からガンマ線検出器5aに進行して来た特定ガンマ線のみを選択的に検出する。

【0097】

$N_{i,k}$ は、第3実施形態では、 i 番目の層において、 k 番目の配置関係の下でコリメータ6の向きの方向にガンマ線検出器5aと重なる重複領域 $R_{i,k}$ に、上述した所定の測定時間にわたって入射する中性子の数である。図7の例では、3つの配置関係(すなわち1番目～3番目の位置のガンマ線検出器5a)を同時に示しており、3つの配置関係の間で検査対象物1と中性子源3との位置関係及び姿勢関係は一定であるが、ガンマ線検出器5aの位置 k が互いに異なり、ガンマ線検出器5a(コリメータ6)の向きは互いに一定である。

【0098】

図7の例のように、複数の層の数 n が3である場合には、ガンマ線検出器5aの位置として n と同じ数の3つの位置(配置関係)を予め設定する。この場合、図7において、1番目($k=1$)のガンマ線検出器5aの位置については $R_{1,1}, R_{2,1}, R_{3,1}$ の3つの $R_{i,k}$ があり、2番目($k=2$)のガンマ線検出器5aの位置については $R_{1,2}, R_{2,2}, R_{3,2}$ の3つの $R_{i,k}$ があり、3番目($k=3$)のガンマ線検出器5aの位置については $R_{1,3}, R_{2,3}, R_{3,3}$ の3つの $R_{i,k}$ がある。 $N_{i,k}$ は、第2実施形態の場合と同様に、シミュレーション又は事前の実験により予め求められる。

【 0 0 9 9 】

$T_{i,k}$ は、重複領域 $R_{i,k}$ で発生した特定ガンマ線がガンマ線検出器 5 a まで進行する経路において検査対象物 1 の内部を透過する率である。透過率 $T_{i,k}$ は、当該経路上における重複領域 $R_{i,k}$ における基準位置 $P_{i,k}$ から当該経路上の表面 2 の位置（以下で表面位置 P_S という）までの距離に基づいて求められてよい。言い換えると、透過率 $T_{i,k}$ は、k 番目の配置関係の下で、i 番目の層の基準位置 $P_{i,k}$ から表面位置 P_S までを特定ガンマ線が透過する率である。

【 0 1 0 0 】

上記の基準位置 $P_{i,k}$ は、上述した重複領域 $R_{i,k}$ 内の位置（例えば重複領域 $R_{i,k}$ の中心位置）であってよい。図 7 のように、複数の配置関係の間で、ガンマ線検出器 5 a の位置が異なり、ガンマ線検出器 5 a とコリメータ 6 の向きが同じである場合には、 $T_{i,k}$ は、検出条件 k （ガンマ線検出器 5 a の位置 k ）によらず一定であり、層の番号 i に応じて変化する。図 7 の例では、 $T_{1,1}$ は、基準位置 $P_{1,1}$ と、基準位置 $P_{1,1}$ から 1 番目の位置のガンマ線検出器 5 a までの経路上の表面位置 $P_{S,1}$ との距離に基づいて定められ、 $T_{1,2}$ と $T_{1,3}$ は、 $T_{1,1}$ と同じ値である。同様に、図 7 の例では、 $T_{2,1}$ は、基準位置 $P_{2,1}$ と表面位置 $P_{S,1}$ との距離に基づいて定められ、 $T_{2,2}$ と $T_{2,3}$ は、 $T_{2,1}$ と同じ値であり、 $T_{3,1}$ は、基準位置 $P_{3,1}$ と表面位置 $P_{S,1}$ との距離に基づいて定められ、 $T_{3,2}$ と $T_{3,3}$ は、 $T_{3,1}$ と同じ値である。

【 0 1 0 1 】

$\varepsilon_{i,k}$ は、予め定められた上述の配置関係により定まる値であって、重複領域 $R_{i,k}$ で発生した特定ガンマ線に対するガンマ線検出器 5 a の検出効率である。検出効率 $\varepsilon_{i,k}$ は、ガンマ線の発生位置とみなす上述の基準位置 $P_{i,k}$ とガンマ線検出器 5 a との距離と、特定ガンマ線のエネルギーと、ガンマ線検出器 5 a の形状とに基づいて求められてよい。図 7 のように、複数の配置関係の間で、ガンマ線検出器 5 a の位置 k が異なり、ガンマ線検出器 5 a とコリメータ 6 の向きが同じである場合には、 $\varepsilon_{i,k}$ は、検出条件 k （ガンマ線検出器 5 a の位置 k ）によらず一定であり、層の番号 i に応じて変化する。

【 0 1 0 2 】

b_k 、 d_i 、 σ_i 等は、第 2 実施形態の場合と同じである。このように予め求めた $N_{i,k}$ 、 $T_{i,k}$ 、 $\varepsilon_{i,k}$ 等により $\alpha_{i,k} = N_{i,k} \times T_{i,k} \times \varepsilon_{i,k} \times b_k \times d_i \times \sigma_i \times (N_A \times r / A)$ を定めておき、 $\alpha_{i,k}$ を用いた上述の関係式 (1) を記憶部 7 b に記憶させておく。

【 0 1 0 3 】

図 7 の例のように、層の数 n が 3 である場合には、上述の関係式 (1) は、第 2 実施形態における上述の関係式 (11) ~ (13) と同じになる。

【 0 1 0 4 】

(濃度検出方法)

第 3 実施形態による濃度検出方法において関係式取得処理は、上述のように $\alpha_{i,k}$ を予め求め、 $\alpha_{i,k}$ を用いた上述の関係式 (1) を記憶部 7 b に記憶させておく処理である。

【 0 1 0 5 】

図 8 は、第 3 実施形態による濃度検出方法における濃度検出処理を示すフローチャートである。第 3 実施形態による濃度検出処理は、ステップ S 2 1 ~ S 2 4 を有する。

【 0 1 0 6 】

ステップ S 2 1 では、検査対象物 1 に対して中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a を、 k 番目の配置関係で配置する。図 7 の場合には、例えば、この図における 1 番目の位置 ($k = 1$) のガンマ線検出器 5 a の位置にガンマ線検出器 5 a を配置する。

【 0 1 0 7 】

ステップ S 2 2 では、ステップ S 1 1 での配置関係の状態、検査対象物 1 の表面 2 に、中性子源 3 により中性子線を照射する。

【 0 1 0 8 】

ステップ S 2 3 では、ステップ S 1 2 で照射した中性子線により検査対象物 1 において

10

20

30

40

50

発生した、対象成分に由来の特定ガンマ線を、ガンマ線検出器 5 a で検出する。また、ステップ S 1 3 では、この検出データが、ガンマ線検出器 5 a から検出量抽出部 5 b に入力され、当該検出データに基づいて、検出量抽出部 5 b により特定ガンマ線の検出量 D_k を求める。

【0109】

ステップ S 2 4 では、全ての配置関係について上述のステップ S 2 2 とステップ S 2 3 を行ったかを判断する。この判断の結果が否定である場合には、ステップ S 2 1 へ戻り、ステップ S 2 1 ~ S 2 4 を再び行う。再度のステップ S 2 1 では、予め定めた複数の配置関係のうち、中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a をまだ配置していない配置関係で、中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a を検査対象物 1 に対して配置する。この状態で、ステップ S 2 2 ~ S 2 4 を再び行う。

10

【0110】

図 7 の場合には、例えば、2 回目のステップ S 2 1 では、この図における 2 番目の位置 ($k = 2$) のガンマ線検出器 5 a の位置にガンマ線検出器 5 a を配置して、ステップ S 2 2 , S 2 3 を再び行い、3 回目のステップ S 2 1 では、この図における 3 番目の位置 ($k = 3$) のガンマ線検出器 5 a の位置にガンマ線検出器 5 a を配置して、ステップ S 2 2 , S 2 3 を再び行う。

【0111】

ステップ S 2 4 の判断の結果が肯定である場合には、ステップ S 2 5 へ進む。この場合、予め定めた全て (n 種類) の配置関係について、ステップ S 2 3 で検出量 D_k (k は 1 ~ n の整数) が求められている。図 7 のように n が 3 である場合には、1 番目の配置関係についての検出量 D_1 と、2 番目の配置関係についての検出量 D_2 と、3 番目の配置関係についての検出量 D_3 が、3 回のステップ S 2 3 で求められている。

20

【0112】

ステップ S 2 5 では、複数回 (n 回) のステップ S 2 3 で求めた n 個の検出量 D_k を、濃度算出部 7 a により、それぞれに対応し記憶部 7 b に記憶されている上述の n 個の関係式 (1) に、すなわち、 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ の D_k (k は 1 ~ n までの整数) に適用する。これにより、濃度算出部 7 a が、 D_k が具体的な数値となった連立方程式 $\sum X_i \times \alpha_{i,k} = D_k$ を生成し、該連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 における上述の複数の層のうち、各深さ又は特定深さに存在する層における対象成分の濃度を、検査対象物 1 の各深さ又は特定深さにおける対象成分の濃度として算出する。

30

【0113】

図 7 のように複数の層の数 n が 3 である場合には、濃度算出部 7 a は、3 回のステップ S 2 3 で求めた検出量 D_1 と検出量 D_2 と検出量 D_3 を、第 1 実施形態の場合と同様の上述の関係式 (7) ~ (9) 又は第 2 実施形態の場合と同じ上述の関係式 (11) ~ (13) の D_1 と D_2 と D_3 にそれぞれに適用する。これにより、濃度算出部 7 a は、 D_1 と D_2 と D_3 が具体的な数値となった関係式 (7) ~ (9) 又は (11) ~ (13) を連立方程式として生成する。濃度算出部 7 a は、当該連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 の各層における対象成分の濃度 X_1 , X_2 , X_3 、あるいは、特定深さにおける層の濃度 X_1 , X_2 又は X_3 を求める。

40

【0114】

< 複数のガンマ線検出装置を設ける場合 >

第 3 実施形態において、濃度検出装置 10 は、複数 (n 個) のガンマ線検出装置 5 を有していてもよい。この場合、1 回のステップ S 2 1 において、 n 個のガンマ線検出器 5 a を互いに異なる位置に同時に配置することにより、各ガンマ線検出器 5 a と中性子源 3 と検査対象物 1 との配置関係を 1 つの配置関係として、 n 個の配置関係を同時に成立させてよい。例えば、 n が 3 である場合には、図 7 における 1 番目 ~ 3 番目の各位置にガンマ線検出器 5 a を同時に配置することで、3 つのガンマ線検出器 5 a により 1 回のステップ S 2 1 で 3 つの配置関係を同時に成立させてよい。

【0115】

50

したがって、続いてのステップ S 2 2 とステップ S 2 3 により、各ガンマ線検出装置 5 により検出量 D_k (k は 1 ~ n までの整数) が求められる。ここで、 D_k は、 k 番目のガンマ線検出器 5 a を有するガンマ線検出装置 5 により求められた特定ガンマ線の検出量である。このように、ステップ S 2 1 ~ S 2 3 を 1 回行うことにより、 n 個の検出量 D_k が得られる。その後、ステップ S 2 4 を省略して、ステップ S 2 5 へ進み、ステップ S 2 5 では、濃度算出部 7 a により、 n 個の検出量 D_k を上記関係式 (1) に適用して、上述と同様に、各深さ又は特定深さに存在する層における対象成分の濃度を算出する。

【 0 1 1 6 】

(第 3 実施形態の効果)

第 3 実施形態においても、第 1 実施形態と同様に、検査対象物 1 の各深さ又は所望の特定深さにおける対象成分の濃度を非破壊的に求めることができる。

10

【 0 1 1 7 】

[応用例]

上述した各実施形態による濃度検出装置 1 0 と濃度検出方法は、様々な構造物や材料・部材に適用可能であるが、検査対象物 1 は、例えば、鉄筋を内部に含むコンクリート構造物であってよい。検査対象物 1 が鉄筋を内部に含むコンクリート構造物である場合には、次のように濃度検出方法を行ってもよい。ここで、行われる濃度検出方法は、第 1 実施形態と第 2 実施形態と第 3 の実施形態のいずれによる濃度検出方法であってもよい。

【 0 1 1 8 】

対象成分が鉄筋の成分 (例えば鋼又は他の成分) であるとして、上述の関係式取得処理を行うことにより、鉄筋の成分に関する上記関係式 (例えば上記関係式 (1)) を予め求めて鉄筋用の関係式として記憶部 7 b に記憶させておく。

20

【 0 1 1 9 】

更に、対象成分が塩分であるとして、上述の関係式取得処理を行うことにより、塩分に関する上記関係式 (例えば上記関係式 (1)) を予め求めて塩分用の関係式として記憶部 7 b に記憶させておく。

【 0 1 2 0 】

その後、対象成分が鉄筋の成分であるとして、上述の濃度検出処理を行うことにより、各層における鉄筋の成分の濃度を求める。この時に用いる上記関係式は、鉄筋用の上記関係式である。この時に求めた鉄筋の成分の上記濃度が予め定めた閾値以上となった層を、鉄筋が存在する特定深さの層として定める。

30

【 0 1 2 1 】

次に、対象成分が塩分であるとして、上述の濃度検出処理を行うことにより、鉄筋の成分の濃度が上記閾値以上となった層 (特定深さの層) における塩分の濃度を求める。この時に用いる上記関係式は、塩分用の上記関係式である。

【 0 1 2 2 】

このように、鉄筋の成分の濃度が上記閾値以上となった層を鉄筋が存在する層として定め、当該層における塩分の濃度を求めることにより、鉄筋が存在する層 (深さ) における塩分の濃度を求めることができる。塩分の当該濃度が高い場合には、鉄筋が腐食する可能性がある判断できる。

40

【 0 1 2 3 】

本発明は上述した実施の形態に限定されず、本発明の技術的思想の範囲内で種々変更を加え得ることは勿論である。例えば、以下の変更例 1 又は変更例 2 を採用してもよい。この場合、以下で述べない点は、上述と同じであってよい。

【 0 1 2 4 】

(変更例 1)

変更例 1 によると、以下のように、上述した第 1 実施形態又は第 2 実施形態において、複数種類の特定ガンマ線の利用に加えて、複数種類の配置関係を利用してもよい。この変更例 1 では、上述の関係式 (1) は、次の式 (1 5) となる。

$$\sum X_i \times \alpha_{i, k, j} = D_{k, j} \quad \cdots (1 5)$$

50

【 0 1 2 5 】

式 (1 5) において、 $\alpha_{i, k, j}$ と $D_{k, j}$ の添え字 j は、配置関係の番号であり、 $1 \sim q$ の値をとり、 q は、配置関係の数である。配置関係 j は、中性子源 3 とガンマ線検出器 5 a と検査対象物 1 との位置関係及び姿勢関係の一方又は両方である。したがって、 $\alpha_{i, k, j}$ は、特定ガンマ線の k 番目の種類と i 番目の層と j 番目の配置関係に対応する係数である。このように、変更例 1 では、 $\alpha_{i, k, j}$ は、上述の $\alpha_{i, k}$ に対して更に配置関係 j にも依存するが、 $\alpha_{i, k, j}$ の他の点は、上述の $\alpha_{i, k}$ と同様である。

【 0 1 2 6 】

変更例 1 において、配置関係 j の数を上述のように q とし、使用する特定ガンマ線の種類 k の数を s とし (すなわち、 k は、 $1 \sim s$ の値をとる)、検査対象物 1 を仮想的に区分した層 i の数を n とし (すなわち、 i は、 $1 \sim n$ の値をとる)、 n と q と s との関係は、後述のように連立方程式を解くためには、 $n \times q \times s$ を満たせばよい。 n と q と s は、それぞれ 2 以上であってよい。なお、 n と q がそれぞれ 2 以上であり、 s が 1 であってもよいが (例えば、 $n = 3$ 、 $q = 3$ 、且つ $s = 1$)、この場合は、上述の第 3 実施形態に含まれる。

【 0 1 2 7 】

式 (1 5) の関係式 (すなわち $\alpha_{i, k, j}$) を、層 i と種類 k と配置関係 j との各組合せについて、第 1 実施形態又は第 2 実施形態の場合と同様の関係式取得処理により予め求めておく。これについて、第 1 実施形態に対する変更例 1 では、図 3 のフローチャートにおいて、ステップ S 1 で、 q の (全ての) 配置関係 j が同時に成り立つように複数のガンマ線検出装置 5 (ガンマ線検出器 5 a) を配置し、この状態で関係式取得処理の以降の各ステップを行うことにより、関係式取得処理を 1 回だけ行うようにしてもよい。あるいは、ステップ S 1 で、一部の配置関係 j が成り立つように 1 つ又は複数のガンマ線検出装置 5 (ガンマ線検出器 5 a) を、配置して当該一部の配置関係 j について関係式取得処理を行い、その後、残りの配置関係 j について同様に関係式取得処理を行うように関係式取得処理を 2 回以上行ってもよい。

【 0 1 2 8 】

濃度検出処理は、図 5 のフローチャートにおいて、上述のステップ S 1 1 で、 q の (全ての) 配置関係 j が同時に成り立つように複数 (q 個) のガンマ線検出装置 5 (ガンマ線検出器 5 a) を配置してよい。すなわち、濃度検出装置 1 0 は、複数のガンマ線検出装置 5 を有していてもよい。

【 0 1 2 9 】

ステップ S 1 2 では、ステップ S 1 1 での配置の状態で、検査対象物 1 の表面 2 に、中性子源 3 により中性子線を照射する。

【 0 1 3 0 】

ステップ S 1 3 では、ステップ S 1 2 で照射した中性子線により検査対象物 1 において発生した、対象成分に由来の複数種類 (s 種類) の特定ガンマ線を、 q 個のガンマ線検出装置 5 の各々において、ガンマ線検出器 5 a で検出し、この検出データが、ガンマ線検出器 5 a から対応する検出量抽出部 5 b に入力され、当該検出データに基づいて、検出量抽出部 5 b により s 種類の特定ガンマ線のそれぞれの検出量 $D_{k, j}$ を求める。

【 0 1 3 1 】

ステップ S 1 4 では、ステップ S 1 3 で求めた $q \times s$ 種類の検出量 $D_{k, j}$ を、濃度算出部 7 a により、それぞれに対応し記憶部 7 b に予め記憶された上述の $q \times s$ 個の関係式 (1 5) に、すなわち、 $\sum X_i \times \alpha_{i, k, j} = D_{k, j}$ の $D_{k, j}$ に適用する。これにより、濃度算出部 7 a が、 $D_{k, j}$ が具体的な数値となった連立方程式 $\sum X_i \times \alpha_{i, k, j} = D_{k, j}$ を生成し、該連立方程式を解くことにより、検査対象物 1 における上述の複数の層のうち、各深さ又は特定深さに存在する層における対象成分の濃度を、検査対象物 1 の各深さ又は特定深さにおける対象成分の濃度として算出する。

【 0 1 3 2 】

ステップ S 1 1 で、 s の配置関係のうち一部の配置関係 j が成り立つように 1 つ又は複

10

20

30

40

50

数のガンマ線検出装置 5（ガンマ線検出器 5 a）を配置し、当該一部の配置関係 j についてステップ S 1 2 とステップ S 1 3 を行い、その後、残りの配置関係 j について同様にステップ S 1 1 ～ S 1 3 を行うようにステップ S 1 1 ～ S 1 3 を 2 回以上行い、これにより、全ての種類（ $q \times s$ 種類）の検出量 $D_{k,j}$ を求めてもよい。その後、これら検出量 $D_{k,j}$ について、上述と同様にステップ S 1 4 を行う。

【0133】

変更例 1 によると、配置関係 j の数を q とし、特定ガンマ線の種類 k の数を s とし、層 i の数を n とした場合に、 $n = q \times s$ であればよいので、使用する特定ガンマ線の種類を減らすことができる。例えば、対象成分に由来の特定ガンマ線の種類が少ない場合には、本変更例 1 により、層 i の数を減らすことなく、検査対象物 1 の各深さの対象成分の濃度を求めることができる。

10

【0134】

（変更例 2）

複数の層における複数の濃度と、ガンマ線検出装置 5 により求められる特定ガンマ線の検出量との関係を表す関係式（関数）は、上述の関係式（1）のように線形でなくてもよい。この場合、当該関係式は、例えば次の式（16）で表されてもよい。

$$\sum F_{i,k}(X_i) = D_k \cdots (16)$$

【0135】

ここで、 $F_{i,k}$ は、上述の特定ガンマ線の種類 k 又は上述の検出条件 k（配置関係）についての、i 番目の層に関する X_i の関数である。 $F_{i,k}$ は、層毎に異なってもよい。ただし、 $F_{i,k}$ は、各層について同じ関数であってもよい。また、 $F_{i,k}$ は、各 k について同じであってもよいし、k 毎に異なってもよい。このような関係式（16）を、シミュレーション又は実験又は理論計算により予め求め、記憶部 7 b に記憶させておいてよい。

20

【0136】

また、変更例 1 において、上述の関係式（15）の代わりに、次の式（17）を用いてもよい。

$$\sum F_{i,k,j}(X_i) = D_{k,j} \cdots (17)$$

ここで、 $F_{i,k,j}$ は、特定ガンマ線の種類 k と配置関係 j の組み合わせについての、i 番目の層に関する X_i の関数である。関係式（17）を、シミュレーション又は実験又は理論計算により予め求め、記憶部 7 b に記憶させておいてよい。

30

【符号の説明】

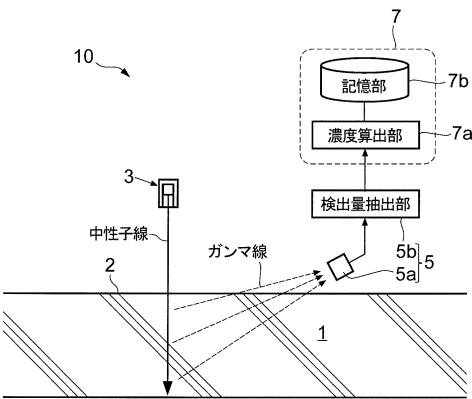
【0137】

1 検査対象物、1 a、1 b、1 c 層、2 表面、3 中性子源、5 ガンマ線検出装置、5 a ガンマ線検出器、5 b 検出量抽出部、6 コリメータ、7 濃度算出装置、7 a 濃度算出部、7 b 記憶部、10 濃度検出装置、101 供試体、101 a 成分含有ブロック、101 b 成分ゼロブロック、102 表面

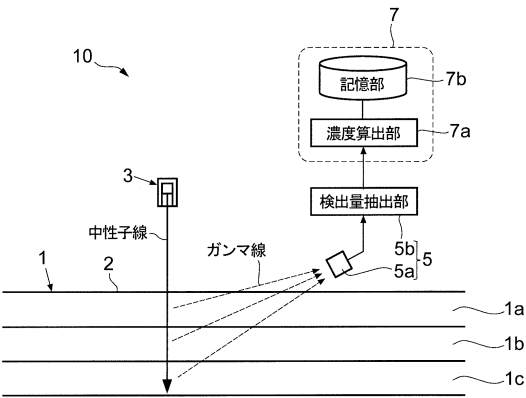
40

【図面】

【図 1】

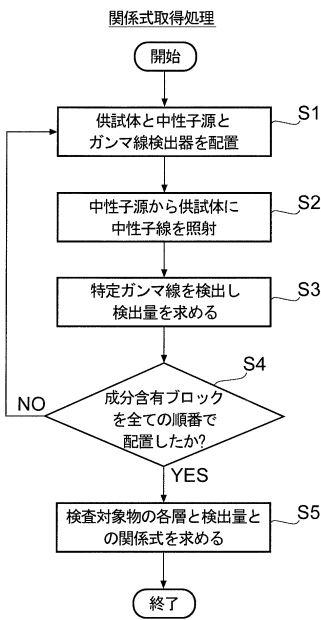


【図 2】

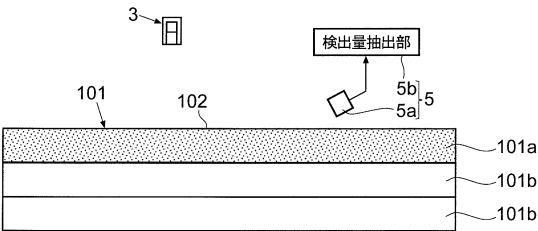


10

【図 3】



【図 4 A】



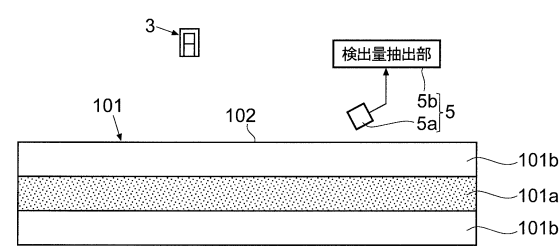
20

30

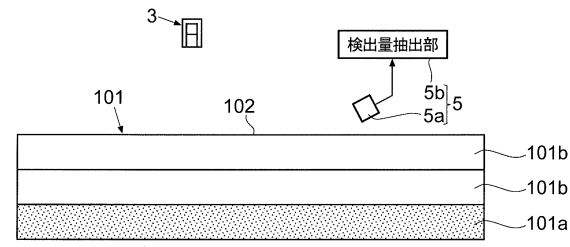
40

50

【図 4 B】

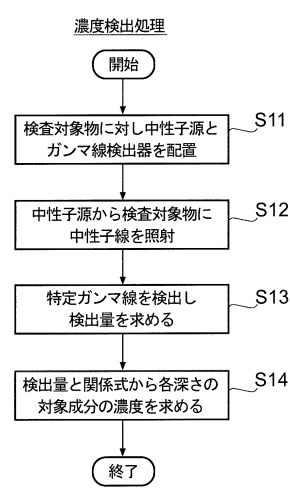


【図 4 C】

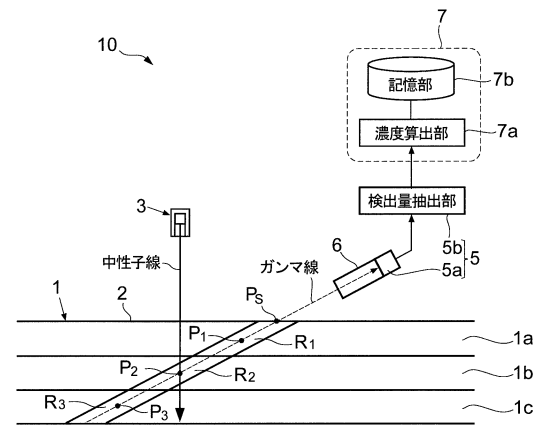


10

【図 5】



【図 6 A】



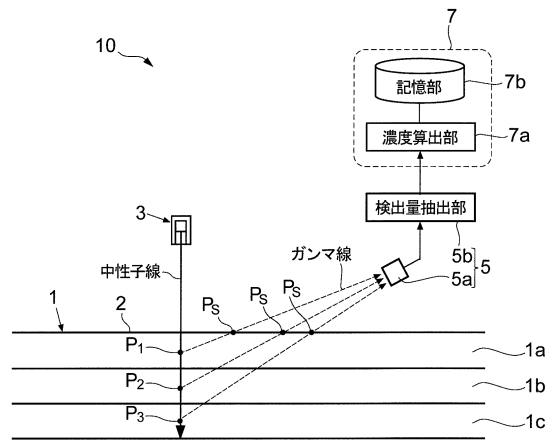
20

30

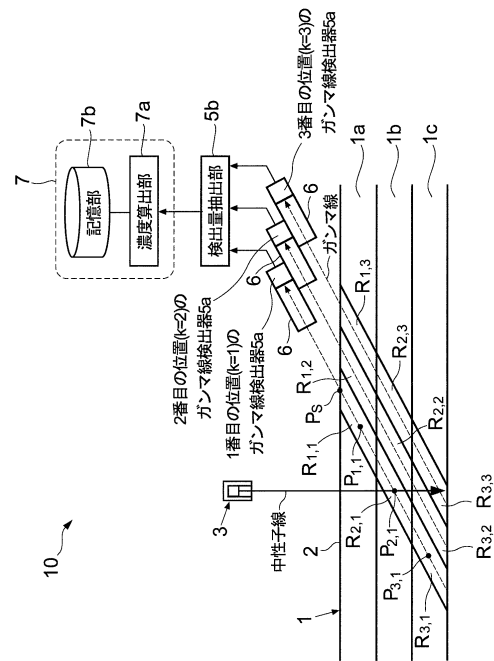
40

50

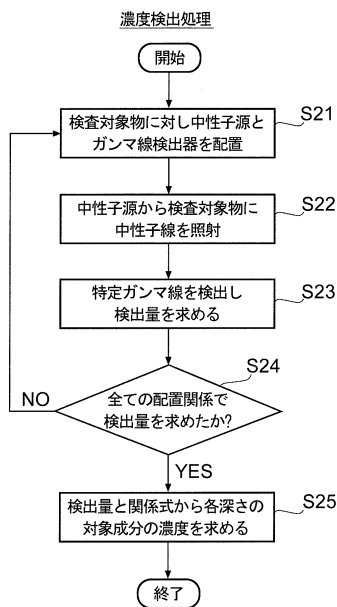
【図 6 B】



【図 7】



【図 8】



フロントページの続き

発法人理化学研究所内

審査官 井上 徹

(56)参考文献 国際公開第2019/198260(WO,A1)

特開昭62-282288(JP,A)

特開2001-194324(JP,A)

(58)調査した分野 (Int.Cl.,DB名)

G01N 23/00 - G01N 23/2276

G01T 1/00 - G01T 1/16

G01T 1/167 - G01T 7/12

JSTPlus/JMEDPlus/JST7580(JDreamIII)