

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特 許 公 報(B2)

(11) 特許番号

特許第5339325号  
(P5339325)

(45) 発行日 平成25年11月13日(2013.11.13)

(24) 登録日 平成25年8月16日(2013.8.16)

(51) Int.Cl.	F 1	
<b>H05G 2/00</b>	<b>(2006.01)</b>	H05G 1/00 L
<b>G21K 1/00</b>	<b>(2006.01)</b>	G21K 1/00 E
<b>G21K 1/093</b>	<b>(2006.01)</b>	G21K 1/00 X
<b>G21K 5/02</b>	<b>(2006.01)</b>	G21K 1/093 D
<b>H05H 9/00</b>	<b>(2006.01)</b>	G21K 5/02 X

請求項の数 5 (全 15 頁) 最終頁に続く

(21) 出願番号 特願2007-310897 (P2007-310897)  
 (22) 出願日 平成19年11月30日(2007.11.30)  
 (65) 公開番号 特開2009-135018 (P2009-135018A)  
 (43) 公開日 平成21年6月18日(2009.6.18)  
 審査請求日 平成22年2月10日(2010.2.10)

(出願人による申告)平成19年度経済産業省委託研究「高透過性光子ビームを用いた非破壊検査技術の開発と高度化に関する研究」産業技術力強化法第19条の適用を受ける特許出願

(73) 特許権者 301021533  
 独立行政法人産業技術総合研究所  
 東京都千代田区霞が関1-3-1  
 (72) 発明者 豊川 弘之  
 茨城県つくば市東1-1-1 独立行政法人産業技術総合研究所つくばセンター内  
 (72) 発明者 大垣 英明  
 京都府宇治市五ヶ庄  
 審査官 亀澤 智博

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 X線発生装置及びX線発生方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

磁場の向きを高速で切り替えることが出来る偏向磁石を用いて、電子軌道に上下又は左右の偏向を与えることで軌道あるいは角度変調を行う電子加速器を備えたX線発生装置において、

前記偏向を与えて蛇行させることで、該偏向を与えた電子軌道における点の下流において、所定の位置に空間的一定の点であるノードを形成し、該位置にレーザーを集光することでレーザーコンプトン散乱によってX線ビームを発生させるとともに、前記偏向磁石の磁場の向きを切り替え又は変調し、前記ノードにおける電子軌道の角度のみを切り替え又は変調することにより、前記X線ビームの発生方向を切り替え又は変調することを特徴とする電子加速器を備えたX線発生装置。

【請求項2】

前記電子軌道は、電子蓄積リングのような円形軌道であることを特徴とする請求項1記載の電子加速器を備えたX線発生装置。

【請求項3】

前記電子軌道は、電子線形加速器であることを特徴とする請求項1記載の電子加速器を備えたX線発生装置。

【請求項4】

前記ノードにおいて電子軌道の角度のみを切り替えることにより、レーザーコンプトンX線ビーム軌道を高速に変調することで、非破壊検査、医療用ラジオグラフィ又はCT装

置に利用される擬似扇型 X 線ビームを発生する構成としたことを特徴とする請求項 1 記載の電子加速器を備えた X 線発生装置。

【請求項 5】

請求項 1 乃至請求項 4 のいずれか 1 項に記載の X 線発生装置により短時間に発生させた細かい X 線ビーム、および一次元アレイあるいは二次元マトリクスとした X 線検出器を用い、被検査体に対して当該 X 線ビームを高速にスキャンする形式の X 線 CT を含むラジオグラフィにおいて、当該ビームが照射された位置を知ることによってその透過位置を推定し、それに対応する X 線検出素子のみを有効にすることで、被検査体からの散乱線を除去する空間分解能向上のための X 線発生方法。

【発明の詳細な説明】

10

【技術分野】

【0001】

本発明は、電子加速器に関し、特に X 線発生装置等に利用される電子加速器を備えた X 線発生装置に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、レーザーコンプトン散乱を用いた非破壊検査装置は知られている（特許文献 1 参照）。レーザーコンプトン散乱は、電子線形加速器や蓄積リングなどの加速器を用いて高エネルギーに加速した電子にレーザーを照射することによって起こる指向性の高い電磁波生成過程であり、電子のエネルギーやレーザーの波長を選択することによってさまざまなエネルギーの X 線を生成できると同時に、エネルギー広がりを数%程度のいわゆる準単色な状態とすることができる（非特許文献 1 参照）。

20

【0003】

電子蓄積リングや線形加速器と高強度レーザーを用いたレーザーコンプトン散乱 X 線は医用及び産業用のラジオグラフィ、光核反応に関する研究等に利用されている（非特許文献 2～4 参照）。ここでいう X 線とは数 MeV 以上の高エネルギー線領域の光子も含んだ広義の用語として定義する。

【0004】

医用及び産業用ラジオグラフィの研究では、X 線の単色性を生かした低被ばく、高画質イメージング研究を行っているが、高エネルギー単色 X 線ビームを用いることが重要である（非特許文献 5～6 参照）。発生 X 線の強度とエネルギーを高くするため、電子加速器の電子収束点やエネルギー分散の小さい長直線部などのビーム径が最小となる位置で電子ビームにレーザーを照射することが一般的である。

30

【0005】

発生した X 線ビームを貫通孔を設けた鉛製ブロック（コリメータ）を通過させることで細かいビームとするとともに、散乱角度を制限することによって準単色とする。これによってレーザーコンプトン散乱を利用した高エネルギー X 線ビームは必然的に直径数 mm～数 cm の細かいビームとなる。

【0006】

下記の式 1 に示すように、レーザーコンプトン散乱は衝突前のレーザーと電子ビームの成す角度によって、衝突後の X 線エネルギーの上限が決まり、かつ電子ビームの進行方向に最も高いエネルギーの X 線が放出される。

40

【0007】

【数 1】

$$E_{\gamma} = \frac{E_0(1 - \beta \cos \theta_1)}{1 - \beta \cos \theta_2 + E_0 \frac{1 - \cos(\theta_2 - \theta_1)}{E_e}}$$

10

【0008】

そのため、通常は、コリメータを電子ビーム軌道の延長上に置いて立体角を制限することで、最もエネルギーの高いX線ビームを含み、かつ最もX線束強度の高い部分を取り出す。たとえば、エネルギー760 MeVの電子ビームに対して波長532 nmのレーザーを照射した場合、式1より最高20 MeVのエネルギーのX線が発生することが計算によって求まる。

【0009】

ここで $E$ 、 $E_0$ 、 $E_e$ はそれぞれレーザーコンプトンX線、レーザー、電子のエネルギーであり、 $\beta$ は電子の速度と光速の比、 $\theta_1$ 、 $\theta_2$ はそれぞれレーザーと電子ビームのなす角度、および散乱X線と電子ビームのなす角度である。通常、最も高いエネルギーと収量を得るには $\theta_1$ を180度に近い角度とし、 $\theta_2$ は0度に近い角度とする。

20

【0010】

図1にNaI(Tl)シンチレーション検出器によって実測したエネルギースペクトルを示す。内径2 mm×長さ20 cmの鉛製コリメータをビーム軸中心に配置することで最高エネルギーから5%程度のエネルギー幅のX線を取り出した。検出器の分解能は10%程度である。

レーザーコンプトンX線ビームの高い透過性と指向性を利用して、1 mm程度に絞ったレーザーコンプトンX線ビームと、被検査体を載せ高速で移動スキャンするCTステージを用いて、空間分解能および密度分解能がそれぞれ1 mm以下および3%の高精度検査を行うことのできる第一世代CTによる産業用非破壊検査装置が開発されている（非特許文献7参照）。空間分解能としては1 mm以下が達成されている。

30

【0011】

【特許文献1】特開2002-162371号公報

【非特許文献1】R. H. Milburn, Phys. Rev. Lett. 10(3) 75-77 (1963).

【非特許文献2】S. Goko et al, Phys. Rev. Lett., 96-192501, 1-4(2006).

【非特許文献3】H. Utsunomiya et al, Nuclear Physics A, 738(28), 136-142 (2004).

【非特許文献4】K. Y. Hara et al, Phys. Rev. D68, 072001-1 - 072001-6 (2003).

【非特許文献5】H. Toyokawa, Nucl. Instrum. and Methods in Phys. Res. A545, 469-474 (2005).

【非特許文献6】H. Toyokawa et al, Rev. Sci. Instrum., 73(9), 3358-3362 (2002).

40

【非特許文献7】H. Toyokawa et al, Proceedings of the 5th World Congress on Industrial Process Tomography, 2007, Bergen, Norway, in press.

【発明の開示】

【発明が解決しようとする課題】

【0012】

レーザーコンプトン散乱を用いた産業用非破壊検査方法における最大の問題点は、X線ビームの指向性が非常に高いため、照射野が小さいことである。上記式1より計算すると、図1の条件(電子エネルギー760 MeV、レーザー波長)において1.5 mradの範囲におよそ80%のX線が放出される。すなわち光源より5 mの位置においても15~20 mm程度しか広がらず、広い照射を確保することが難しい。

50

## 【 0 0 1 3 】

このような高いX線エネルギー領域において、数cm程度の照射野の透過像を十分に高い分解能と検出効率で測定する一次元あるいは二次元イメージング検出器は開発されておらず、レーザーコンプトン散乱を用いたCTでは、平行移動及び回転を繰り返すステージ上に被検査体を載せ、細く絞ったX線ビームによって透過像を得る第一世代の装置が必然的にとられる。

## 【 0 0 1 4 】

より高い空間分解能を達成しようとする、ビームをより細くコリメートする方法が一般的である。しかしX線ビーム強度はコリメータ面積に比例して低下するため、CT測定に要する時間が飛躍的に長くなるという欠点があった。

10

## 【 0 0 1 5 】

例えば、空間分解能1mmの測定と同等の統計量または画質のノイズレベルが得られる測定を、半分の空間分解能とするためには、コリメータ径を半分にすると共に回転角度ピッチを半分にする必要がある。

## 【 0 0 1 6 】

さらに、X線ビーム強度が約25%となるため、結果として測定時間は単純に見積もって16倍となる。これが第一世代CT装置の大きな問題点であった。

## 【 0 0 1 7 】

この問題を解決するために、CT装置を第二世代や第三世代に改良することが考えられる。そのためには10MeV程度の準単色、高エネルギー及び高強度のX線ビームを扇形ビームとして、被検査体を広く覆うようにすることが必須である。しかし、当該目的のためには、従来、適切な準単色、高エネルギー及び高強度のX線ビームが存在しなかった。

20

## 【 0 0 1 8 】

本発明との比較のため小型電子加速器を用いたX線発生装置について説明する。小型電子加速器を用いたX線発生装置から発生するX線エネルギーは低く、エネルギー広がりも大きい、高い強度と空間分解能が得られるという利点のため非破壊検査用に広く用いられている。

## 【 0 0 1 9 】

10MeV程度に加速した電子ビームをタンタル、タングステン、銅などの金属ターゲットに照射すると、平均数100keV～数MeVの高エネルギー制動放射X線を数100mradの角度広がり発生することが可能である。

30

## 【 0 0 2 0 】

しかし制動放射X線はエネルギー広がりが大きくスペクトルは白色であるため、高い密度分解能を達成することが困難である。

## 【 0 0 2 1 】

また、制動放射X線と同時に単色性の良い特性X線が発生するが、原子番号82の鉛のように極めて重い元素ですら、その特性X線エネルギーは最高で160keVであり、透過力の観点から10MeV程度を必要とする高精度な非破壊検査に用いることは難しい。

## 【 0 0 2 2 】

本発明は、上記従来の課題を解決することを目的とするものであり、準単色かつ高エネルギーX線扇型ビームを発生する装置、および電子加速器を実現することを課題とするものである。

40

## 【課題を解決するための手段】

## 【 0 0 2 3 】

本発明は上記課題を解決するために、磁場の向きを高速で切り替えることが出来る偏向磁石を用いて、電子軌道に上下又は左右の偏向を与えることで軌道変調を行う電子加速器を備えたX線発生装置において、前記偏向を与えることで、該偏向を与えた電子軌道における点の下流において、任意の位置に空間的一定の点であるノードを形成し、該位置にレーザーを集光することでレーザーコンプトン散乱によってX線ビームを発生させるとともに、前記偏向磁石の磁場の向きを切り替え又は変調し、電子軌道の角度のみを切り替え又

50

は変調することにより、前記X線ビームの発生方向を切り替え又は変調可能であることを特徴とする電子加速器を備えたX線発生装置を提供する。

【0024】

前記電子軌道は、電子蓄積リングのような円形軌道としてもよい。

【0025】

前記電子軌道は、電子線形加速器としてもよい。

【0026】

前記ノードにおいて電子軌道の角度のみを切り替えることにより、レーザーコンプトンX線ビームを高速変調することで、非破壊検査、医療用ラジオグラフィ又はCT装置に利用される擬似扇型X線ビーム発生する構成としてもよい。

【発明の効果】

【0027】

本発明によれば、次のような効果が生じる。

(1) 第一世代高エネルギーX線CT装置にて行っていた測定を極めて短時間に行うことが可能となる。具体的には、直径100mmの被検査体を1mmの分解能で十分に画像ノイズの少ないCT測定を行う際、第一世代では5～6時間が必要であるが、本発明では、それ以上の画質のCTを300秒程度で取得することができるため、十分に実用化可能なレベルとなり、産業用非破壊検査において重要な手段となることが期待される。

(2) 従来、直径数mm～数cmの細いビームで利用されていたレーザーコンプトンX線ビームを大きな照射野で利用することが可能となる。

(3) 原理的にどのようなエネルギーのX線ビームも扇型とすることが可能であり、大面積X線、線照射などを必要とする放射線イメージングや検出器応答を調べる際に非常に有用となる。

(4) これによって、原子核・素粒子実験、非破壊検査、医用イメージング、放射線計測などの分野への貢献が期待される。

(5) 従来のX線、線ラジオグラフィ、CT装置等では不可能であった、厚みのある被検査体内部の透視図、あるいは断面図を、高空間分解能及び高密度分解能で得ることができる。

【発明を実施するための最良の形態】

【0028】

本発明に係るX線発生装置を実施するための最良の形態を実施例に基づいて図面を参照して、以下に説明する。

【0029】

まず、本発明の原理的な面から説明する。本発明者は、レーザーコンプトンX線ビームの高い指向性と広い照射野を同時に実現するために、X線発生位置を固定したまま放出角度のみを変調する方法および装置を発明した。

【0030】

この方法及び装置は、レーザーコンプトンX線が電子と光子の運動量の違いにより、主として電子の進行方向を中心として放出されることを利用し、電子ビーム角度を数Hz～数千Hzで高速掃引することでレーザーコンプトンX線ビームの角度を振り、疑似的に扇型ビームにするという極めて独創的なものである。

【0031】

本発明に係るX線発生装置では、電子線形加速器と電子蓄積リングでは実施形態が異なる。まず電子蓄積リングを用いた場合について説明する。本発明の概念図を図2に示す。電子は紙面に対して時計回りに回っている。ビーム軌道上のある点でビーム軌道を外周側へあるいは内周側へ蹴り出すような垂直方向磁場を与える。

【0032】

図2では簡略化のため偏向電磁石や収束用四極電磁石等を省略しているが、これらの磁場によって電子は設計軌道を中心として蛇行する。電子蓄積リングでは一周すると必ず元の場所に戻ることから、この蛇行は必ず閉軌道となる。設計軌道から変形した状態で軌道

10

20

30

40

50

が閉じる状態を閉軌道変形Closed orbit distortionという。以下ではCODと呼ぶ。

【 0 0 3 3 】

ビームが設計軌道を横切る位置では、キック角 を変えてもビーム位置は動かない。本明細書では、この位置をノードと呼ぶ。レーザーと電子ビームの衝突点をノードに合わせ、キック角度を正方向から負方向、さらに正方向へ交流的に変調すると、レーザーコンプトンX線ビームの角度は掃引され、疑似的に扇型ビームとなる。すなわち電子の運動量が光子のそれに比較してはるかに大きいため、レーザーコンプトンX線の方向を変えるためには電子ビームの角度を変える必要があり、電子ビームを高速偏向することでレーザーコンプトンX線ビームの放出方向を制御する。

【 0 0 3 4 】

レーザーはノードにおいて電子ビーム蛇行面に対して任意の角度で照射することができるが、例えば電子の蛇行面に対して垂直(90度)に照射した場合は電子ビームの偏向方向によらず一定エネルギーのレーザーコンプトンX線が発生する。それ以外の場合は偏向角によってエネルギーは変調される。発生したX線は下流に配置されたコリメータで準単色化されるが、扇型ビームであるため電子の偏向面方向に長い、長方形の物を使うことが望ましい。

【 0 0 3 5 】

これらの結果、これまで不可能であった準単色高エネルギー扇型ビームを安定した強度で生成することが可能となる。従来、出来る限り小さくすべきCODを積極的に励起させ利用することが本発明のユニークな点である。

【 0 0 3 6 】

上記説明を若干補足する。電子軌道の進む方向に座標系を取る。キックを与えた位置を  $S_1$  とし、その地点、およびそこから任意の下流地点  $s$  におけるベータatron振動の振幅関数と位相をそれぞれ  $(S_1)$  および  $(S)$ 、  $(S)$  および  $(S_1)$  とする。横方向のキックは、水平(x)又は垂直(y)どちらでも良いが、ここでは (mrad)で表わされる水平方向(x)のキックを与えるものとする。

【 0 0 3 7 】

外周側への蹴り角を正方向とする。  $v_x$  を水平方向のベータatron振動数として、電子蓄積リングのある点において蹴り角 の横方向のキックを与えた際に生ずるCODは、中心軌道からの変異を  $dx$  として次の式2で表わされる。

【 0 0 3 8 】

【数2】

$$dx(s) = \frac{\sqrt{\beta(s)\beta(s_1)}}{2\sin(\pi\nu_x)} \theta \cos[\pi\nu_x - |\phi(s) - \phi(s_1)|]$$

【 0 0 3 9 】

通常の小型電磁石で発生する100mT程度の磁場を用いて電子ビームに = 数 mrad の偏向角を与えるものとする。

【 0 0 4 0 】

例として、2個の偏向電磁石の間に3個の四極電磁石(それぞれフォーカス、デフォーカス、フォーカスの順に並んでいるものとする)を配置した基本セルを4回対称で組み合わせた蓄積リングを考える。あるデフォーカス四極電磁石の直後で1 mrad、2 mrad、および -3 mradのキックを与えた際に観測されるCODを計算した結果を図3に示す。ベータatron振動数は2.75とした。

【 0 0 4 1 】

電子軌道の特定の点では軌道が動かないこと、およびベータatron振動数を適当に調整することでノード位置を微調整することができることが分かる。図中にはキック位置とノ

10

20

30

40

50

ード位置の関係が示されている。(s)も併記したが、関数が小さいところでノードが形成されていることが分かる。

【0042】

本来ならば(S)が最小の点においてノードが形成されるところを、局所キックによって極小値の点においてノードが形成され、ここが2つの偏向磁石の間にある長直線部となっているため、ビーム径と発散角が最小となる。この点にレーザーを集光することで高効率にレーザーコンプトンX線を発生できる。

【0043】

電子蓄積リングを用いたシンクロトロン放射光に関しても照射が小さいという問題があり、これに対して、本発明と類似の装置である電子波動リング(特開平1-95500号公報、特公平6-101400号公報など参照)がすでに発明されている。

10

【0044】

この従来発明では、N回対称の電子蓄積リングにおいて、電子ビームのベータatron振動数が次の式3の関係を満たす時にノードがN個となることが示されているが、本発明ではリング全周にわたってノード位置をコントロールすることは必要なく、N=4で=2.75となっており、式3の条件には当てはまらない。

【0045】

【数3】

$$\frac{N}{2} - \frac{1}{2} < \nu < \frac{N}{2} + \frac{1}{2}$$

20

【0046】

また、電子波動リングでは放射光の照射野を平面的に拡大することを目的としているのに対して、本発明は水平、あるいは垂直のみに発散を持たせた高エネルギー準単色X線扇型ビームの生成を目的としている点が異なる。

【0047】

本発明では、前記ノードにおいて電子軌道の角度のみを切り替えることにより、レーザーコンプトンX線ビーム軌道を高速に変調することで、非破壊検査、医療用ラジオグラフィ又はCT装置に利用される擬似扇型X線ビーム発生するような構成とすることが好ましい。

30

【0048】

本発明では、電子軌道に上下又は左右の偏向を与えることで軌道変形を行う電子加速器において、前記偏向を与えることで、該偏向を与えた電子軌道における点の下流において、任意の位置にノードを形成し、該位置にレーザーを集光することでレーザーコンプトン散乱によってX線を発生させるとともに、前記偏向磁石の磁場の向きを切り替え又は変調し、電子軌道の角度のみを切り替え又は変調することにより、前記X線の発生方向を切り替え又は変調することを特徴とする電子加速器を備えたX線発生装置を提供する。

40

【0049】

また、それによって非破壊検査に用いる準単色高エネルギー扇型X線ビームを生成し、さらにそれを用いた非破壊検査用第二世代及び第三世代CT装置を提供する。

【0050】

前記電子軌道は、局所偏向磁石を備えた電子蓄積リングのような円形軌道、あるいは一周期以上のウィグラーやアンジュレータを備えた電子線形加速器とすることが好ましい。

【0051】

電子線形加速器においても、例えば4極のウィグラーまたはアンジュレータ磁場を交流変調することによって、軌道上のある位置において電子ビームの角度のみを変調すること

50

ができ、これによって扇型レーザーコンプトンX線ビームを生成することができる。

【0052】

図4において交流変調可能な偏向磁石A～Dと固定磁場の偏向磁石Eを用いて電子軌道を蛇行させ、電磁石BとCの間でノードを形成する。ここにレーザーを照射することで角度変調のあるレーザーコンプトンX線を発生する。発生したX線は電子と並走するが、偏向磁場Eを設置することでX線を電子から分離して取り出す。なお、図中では簡略化のため上部磁極の表示を省略している。またこのような磁場はハルパツハ型アンジュレータ等によっても実現できる。

【0053】

電子ビーム蛇行面に対して垂直にレーザーをノードへ照射すると、電子の偏向角によらず一定エネルギーのレーザーコンプトンX線が発生する。発生したX線は偏向磁石Eの下流に配置されたコリメータFで準単色化されるが、扇型ビームであるため偏向面方向に長い長方形の物を使うことが望ましい。

10

【0054】

さらに、本発明について構成面から説明する。上記従来の課題を解決するために、本発明者は、準単色高エネルギー扇型X線ビームを発生する電子加速器、およびそれを用いたCT装置等を想到した。

【0055】

即ち、本発明では、電子加速器において、極性を切り替え又は変調できる偏向磁石を軌道上に設置し、それによって、電子軌道に上下又は左右の偏向を与えて、軌道変形を生じさせる。軌道変形の切り替えあるいは変調は、両極性電流源によって励磁する空芯あるいは珪素鋼板などをコアに用いた偏向磁石を電子加速器の所定の位置に配置することで実現する。

20

【0056】

磁場を切り替え、あるいは変調速度を高速にするためには、比較的小型の電磁石が望ましい。一例として、760 MeVの電子を10 mrad偏向するために必要な磁場を1 kHzで高速変調する場合に必要な磁石の仕様は次のとおりである。

ギャップ間隔：100 mm

ビーム軌道における最大磁場強度：70 mT

磁極長：200 mm

磁場変調周波数：1 kHz以下

30

【0057】

電子ビーム軌道に局所的な偏向を与えることで、集束磁石や偏向磁石による偏向効果が生じ、結果として、電子軌道は、設計軌道を中心として蛇行する。ここで言う設計軌道とは全ての集束磁石の磁場中心を通る軌道であるとする。

【0058】

軌道変形は、電子加速器の設計によって様々な位置にノードを形成する。図2に電子蓄積リングによるCODを用いた簡単な例を図示する。局所的に加えた偏向によって、電子は設計軌道を中心に蛇行するが、数か所で設計軌道と交差する。閉軌道変形は、偏向角を反転すると設計軌道に対して反転するため、偏向磁石の極性を切り替えるタイミングに同期してノード位置では電子ビームの振り角が変わる。

40

【0059】

本発明者は、電子加速器の集束磁石や偏向磁石の磁場強度を適当に調整することによって、ノードをレーザーコンプトン散乱に最適な位置に移動できることを見出した。これは電子波動リングのように全周にわたってノード位置を調整するための条件を課す必要がないため、電子波動リングよりもより汎用性の高い装置であり、かつ発生する光子は10 MeVあるいはそれ以上の高エネルギー線領域となるため、高精度の産業用非破壊検査に適している。

【0060】

電子蓄積リング中を周回する760 MeVの電子に局所的に、1～10 mradの偏向

50



を与えた際に生じる軌道変形を図3に示す。この場合、電子は無限に近い回数を周回するため、この軌道変形を特に閉軌道変形と呼ぶ。図3の場合は6箇所ノードが形成されるが、偏向を与えた地点から4つ目のノードは長直線部で形成されている。

【0061】

長直線部などのドリフトスペースでは、電子に角度分散がなく、エネルギー分散がない状態とすることも可能であることから、電子ビームの径方向の大きさが最小となるため、最もビームを絞ることができ、したがってここにレーザーを照射することによって最も効果的にレーザーコンプトン散乱を行うことができる。

【0062】

また、レーザーと電子の散乱点はノードであるため、偏向磁石の磁場を切り替え又は変調しても、電子ビーム位置は変わらず、角度のみが変化する。すなわちノードにおいて、電子の蛇行面に対して垂直な方向からレーザーを照射することでX線は安定に発生し、偏向磁石の磁場の向きを切り替え又は変調しても、X線ビームの強度は変わらず、放出角度だけが変化するため疑似的な扇型ビームとすることができる。

【0063】

もしノード以外の位置でレーザーコンプトン散乱を行おうとすると、電子ビーム位置の変調に合わせてレーザー照射位置も変調しなくてはならず、非常に複雑な制御機構が必要となる。

【0064】

しかし、本発明によれば、電子ビームに対して任意の偏向角のキックを局所的に与えることで、軌道変形を利用してビーム軌道上にノードを作ること、および偏向角を高速に変調することで実効的に扇型ビームと等価なX線ビームを作り出すことができる。このビームを被検査体へ照射して、その透過強度をX線検出器で測定することでCTを行うのであるが、従来の第一世代CTの装置では被検査体を移動させながら測定する必要があった。

【0065】

しかし、これでは数10～数千Hzの非常に高速な移動が困難であった。本発明によって高速スキャンが可能となり、一次元アレイ状のX線検出器を用いることで第二世代あるいは第三世代CTにした場合は測定に要する時間が数桁短縮できる。検出器素子は1～数mm程度のシンチレータや半導体検出器が使用でき、数MeV以上の高エネルギー線に対して十分高い検出効率を有している。CTの分解能は検出器素子の大きさで決まるが、扇型ビームを用いた拡大光学系を使用できるため、1mm以下の空間分解能を達成できるため、実用上問題はない。

【0066】

また扇型ビームを用いた第二世代以上のCTでは被検査体からの散乱線によって画像の空間分解能が著しく劣化することが問題となっている。本発明では時間及び空間的に一般的な扇型ビームではなく、高速にスキャンする細いビームを用いた疑似扇型ビームを用いている。

【0067】

被検査体に照射したX線ビームの位置は変調磁場強度から類推することができるため、ビームが透過した位置近傍の素子の応答だけを抽出することで散乱線の影響を著しく低減させることができる。

【0068】

すなわち、短時間の間には本装置で得られるビームは細く、被検査体のごく狭い領域のみ照射しているため、その領域に対応する検出器素子の応答を抽出することで高い空間分解能を達成することができる。

【0069】

このビームを用いて第二世代、第三世代CT装置を構築すると、高い空間分解能と密度分解能を有し、かつ短時間の測定で高精度な検査を行う非破壊検査用CT装置が得られる。

【実施例】

10

20

30

40

50

## 【 0 0 7 0 】

本発明の実施例を、従来例と較べてその相違が明確になるように、まず、従来例を説明してから説明する。

## 【 0 0 7 1 】

図5において、従来のレーザーコンプトンX線ビーム1を発生する装置は、電子加速器2及びレーザー3より構成され、レーザーコンプトン散乱によってX線ビームを発生する。これをコリメータ4を通し、直径数mmに絞ることによって準単色、かつペンシルビームとする。

## 【 0 0 7 2 】

この準単色レーザーコンプトンX線ビーム1を、CT装置におけるCTステージに載せた被検査体5に照射し、透過光の強度をX線検出器6で測定することによって内部を非破壊検査する。被検査体を順次移動および回転することによって、又は順次移動もしくは回転することによって、透過や断層画像を得る。

10

## 【 0 0 7 3 】

図6は、本発明の実施例の概略図を示す。電子加速器2において、その電子軌道は、偏向磁石7によって水平あるいは垂直に偏向されるが、偏向磁石の極性を交流的に反転することによって、レーザーと電子ビームの相互作用位置において、電子ビームの角度のみを振ることができる。たとえば、偏向磁石7は1kHz程度の交流変調を行うことができる。

## 【 0 0 7 4 】

本発明では、このような実施例によって、レーザーの照射位置や角度を変調することなくすることなく、通常のレーザーコンプトン散乱と全く同じ方法でX線ビームを発生することができる。

20

## 【 0 0 7 5 】

ただし、レーザーコンプトンX線が放出される角度は、レーザーが照射される点の上流に設置された偏向磁石によって任意の向きで任意の角度に変調することができる。

## 【 0 0 7 6 】

電子蓄積リングではキックを与える偏向磁石を挿入する位置とベータトロン振動数の兼ね合いを調節することによって電子ビーム径と発散角が最小の位置においてレーザーコンプトン散乱を高効率に行うことが可能である。

30

## 【 0 0 7 7 】

電子線形加速器では4極の交流偏向磁石を用いることでレーザーコンプトンX線が放出される角度を変調することができる。珪素鋼板電磁石などを用いることで変調周波数を1kHz程度まで交流的に変調することができる。

## 【 0 0 7 8 】

また変調パターンは正弦波や三角波などを用いることができる。空間的に一様な強度でレーザーコンプトンX線を照射するためには三角波のような線形応答をする変調が望ましいが、検出器の応答によって照射強度分布を補正することが可能であるため、高速で変調する場合は正弦波を用いても良い。

## 【 0 0 7 9 】

このX線ビームをコリメータを用いて準単色化することで所望する扇型X線ビームを得る。コリメータとしては通常は円形のものを用いて断面が円形のX線ビームとするが、本形態の場合には横長の長方形のものを用いることができる。

40

## 【 0 0 8 0 】

このX線ビームを、CTステージに載せた被検査体5に照射し、透過光の強度を複数のX線検出器6で測定することによって内部を非破壊検査する。

## 【 0 0 8 1 】

以上、本発明を実施するための最良の形態を実施例に基づいて説明したが、本発明はこのような実施例に限定されることなく、特許請求の範囲記載の技術的事項の範囲内で、いろいろな実施例があることは言うまでもない。

50

## 【産業上の利用可能性】

## 【0082】

本発明に係るX線発生装置は、以上のような構成であるから、本発明は、レーザーコンプトン散乱を用いた高エネルギー準単色扇型X線ビームを、非破壊検査、医療用ラジオグラフィ又はCT装置等に適用することが可能である。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0083】

【図1】従来のNaI(Tl)シンチレーション検出器によって実測したエネルギースペクトルを示す図である。

【図2】周回電子軌道の一部に局所的な偏向を加えた際の閉軌道変形を示す模式図である。

【図3】周回電子軌道の一部に局所的な偏向を加えた際の閉軌道変形を示す計算例である。

【図4】電子線形加速器の電子軌道の一部に局所的な偏向を加えた際の軌道変形を示す模式図である。

【図5】従来のレーザーコンプトンX線ビームを用いた第一世代CT装置を説明する図である。

【図6】本発明の実施例を説明する図であり、扇型X線ビームを用いたCTによる非破壊検査装置を示す図である。

## 【符号の説明】

## 【0084】

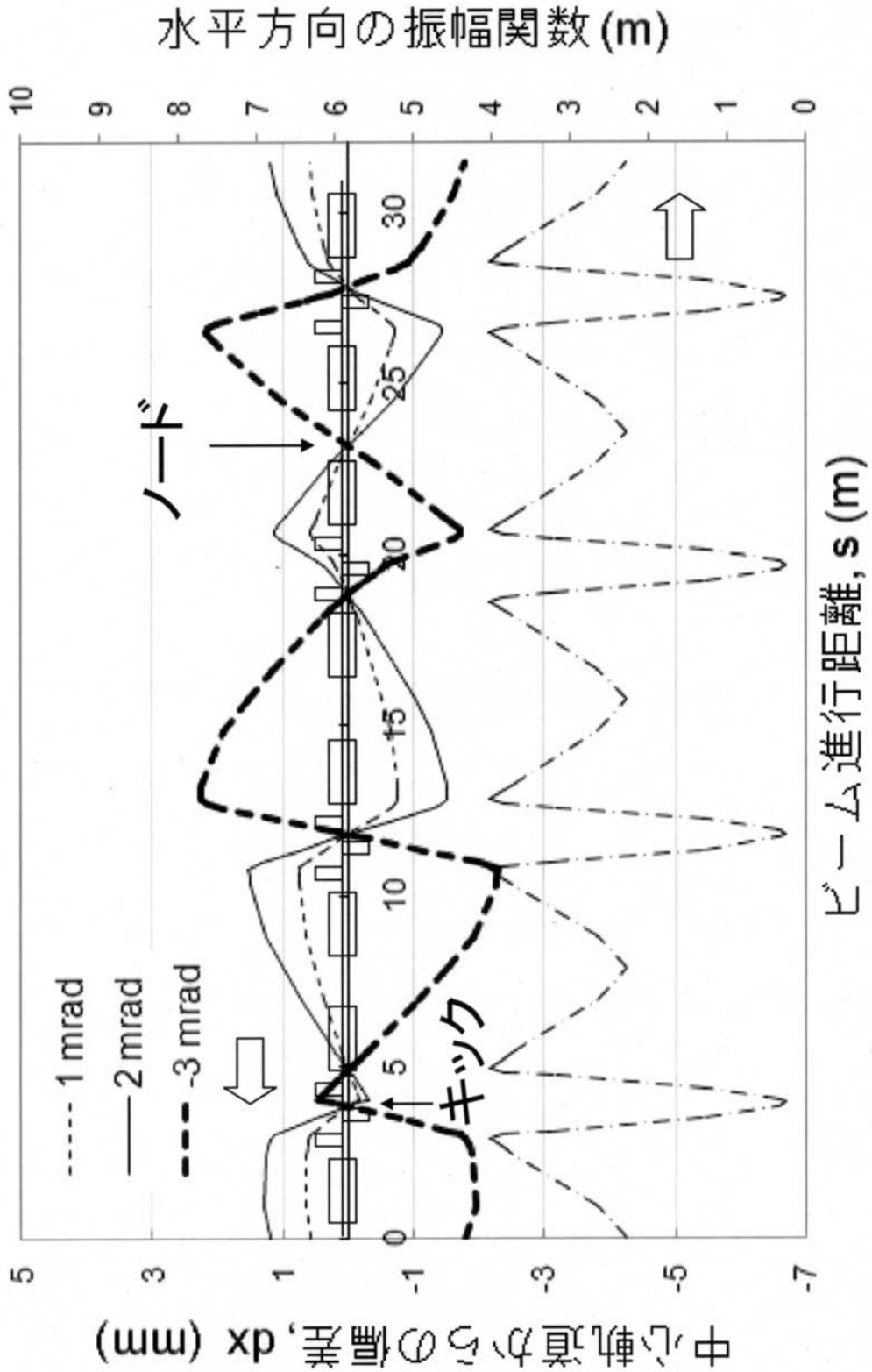
- 1 レーザーコンプトンX線ビーム
- 2 電子加速器
- 3 レーザー
- 4 コリメータ
- 5 被検査体
- 6 X線検出器

10

20

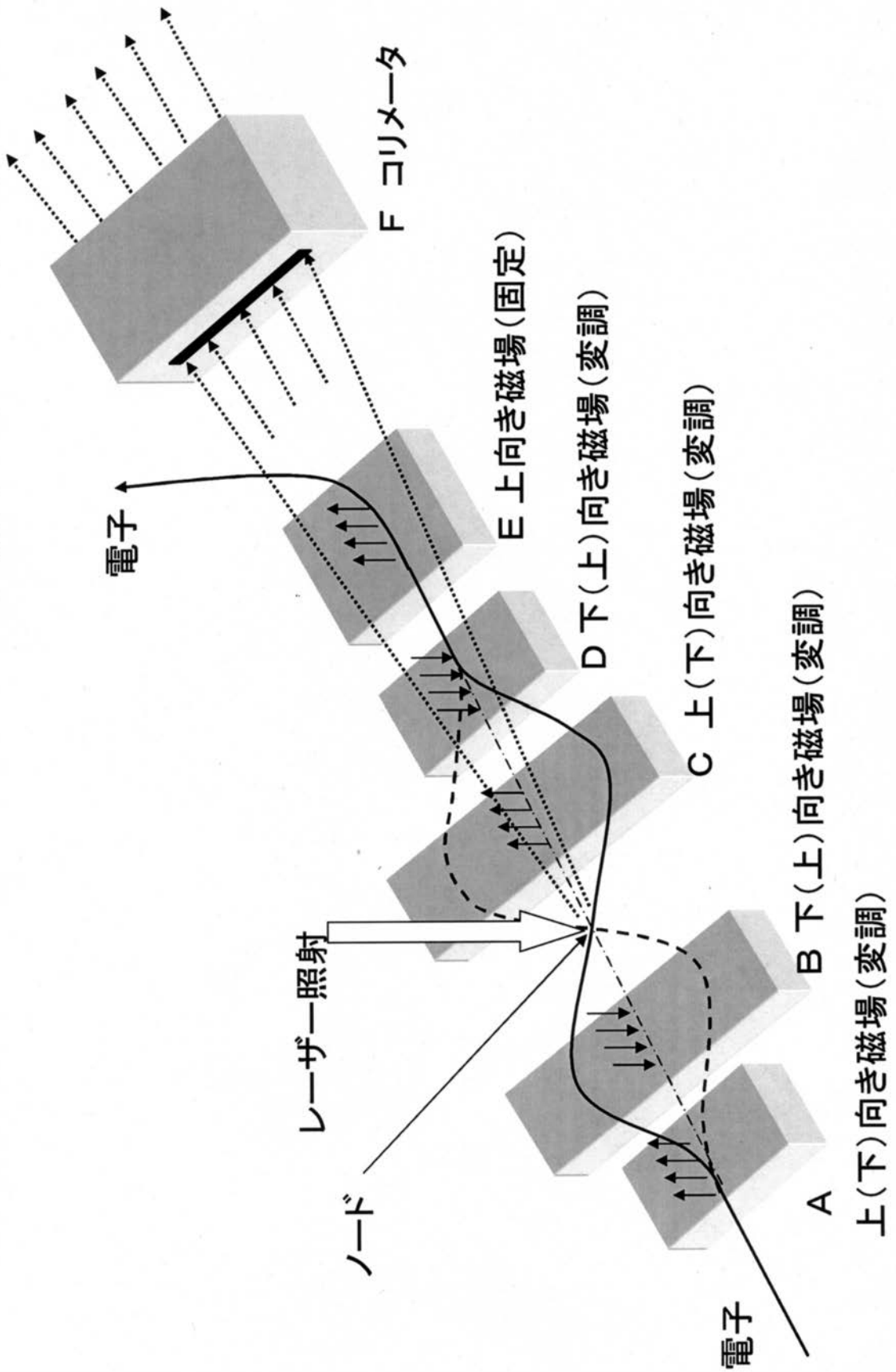


【図3】



【 図 4 】

G 扇型レーザーコンプトンX線ビーム



## フロントページの続き

(51)Int.Cl.		F I	
<i>H 0 5 H</i>	<i>13/04</i>	<i>(2006.01)</i>	H 0 5 H 9/00 A
<i>G 0 1 N</i>	<i>23/04</i>	<i>(2006.01)</i>	H 0 5 H 13/04 N
			G 0 1 N 23/04

(56)参考文献 特開2007-281066(JP,A)  
 特開2005-285764(JP,A)  
 特開2004-227952(JP,A)  
 特開2004-226271(JP,A)  
 特開2003-232892(JP,A)  
 特開平11-264899(JP,A)  
 特開平02-001999(JP,A)  
 特開2002-139758(JP,A)  
 実開平05-090900(JP,U)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 0 5 G	2 / 0 0
G 0 1 N	2 3 / 0 4
G 2 1 K	1 / 0 0
G 2 1 K	1 / 0 9 3
G 2 1 K	5 / 0 2
H 0 5 H	9 / 0 0
H 0 5 H	1 3 / 0 4