

(19) 日本国特許庁 (JP)

(12) 特 許 公 報 (B2)

(11) 特許番号

特許第6438646号
(P6438646)

(45) 発行日 平成30年12月19日 (2018.12.19)

(24) 登録日 平成30年11月22日 (2018.11.22)

(51) Int. Cl.	F I
G 0 1 T 1/29 (2006.01)	G 0 1 T 1/29 A
G 2 1 K 5/04 (2006.01)	G 2 1 K 5/04 C
H 0 5 H 13/04 (2006.01)	H 0 5 H 13/04 R
G 0 1 J 5/48 (2006.01)	G 0 1 J 5/48 A

請求項の数 5 (全 13 頁)

(21) 出願番号	特願2013-212385 (P2013-212385)	(73) 特許権者	301032942
(22) 出願日	平成25年10月9日 (2013.10.9)		国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構
(65) 公開番号	特開2015-75410 (P2015-75410A)		千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
(43) 公開日	平成27年4月20日 (2015.4.20)	(74) 代理人	100135781
審査請求日	平成28年10月3日 (2016.10.3)		弁理士 西原 広徳
		(72) 発明者	片桐 健
			千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
			独立行政法人放射線医学総合研究所内
		(72) 発明者	北條 悟
			千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
			独立行政法人放射線医学総合研究所内
		(72) 発明者	鈴木 和年
			千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号
			独立行政法人放射線医学総合研究所内
			最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 荷電粒子ビーム分布測定システムおよび荷電粒子ビーム分布測定方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項 1】

荷電粒子ビームが照射されると照射部分に温度変化が生じる被照射媒体と、
前記被照射媒体の前記照射部分以外の少なくとも一部を冷却する冷却部と、
前記被照射媒体の少なくとも前記照射部分の温度分布を測定する温度分布測定装置と、
前記温度分布測定装置によって測定した二次元温度分布から二次元熱源分布を得、この二次元熱源分布から二次元ビーム分布を算出するビーム分布算出部とを備え、
前記被照射媒体は、表面が前記荷電粒子ビームの透過方向と直角となるように配置され、
前記冷却部は、前記荷電粒子ビームの行路上に設けられず前記被照射媒体の周囲に設けられた

荷電粒子ビーム分布測定システム。

【請求項 2】

前記被照射媒体は、ニオブ薄膜である
請求項 1 記載の荷電粒子ビーム分布測定システム。

【請求項 3】

前記温度分布測定装置は、画素毎に温度を測定して前記温度分布として二次元温度分布を測定する構成であり、
前記ビーム分布算出部は、
前記温度分布測定装置によって得られた目的画素の温度と前記目的画素に隣接する隣接画素の温度を含む前記二次元温度分布より、二次元定常熱伝導方程式を用いて前記各画素に

対する熱源の分布である二次元熱源分布を得る第 1 の演算と、
該二次元熱源分布より前記荷電粒子ビームに関する前記被照射媒体でのエネルギー損失を
用いて前記ビーム分布としての二次元ビーム分布を得る第 2 の演算とを行う構成である
請求項 1 または 2 記載の荷電粒子ビーム分布測定システム。

【請求項 4】

荷電粒子ビームが照射されると照射部分に温度変化が生じる被照射媒体に対し、前記照射部分以外の少なくとも一部を冷却部が冷却し、
前記被照射媒体は、前記荷電粒子ビームの照射範囲より広い面積を有し、
前記冷却部は、前記荷電粒子ビームの行路上に設けられず前記被照射媒体の周囲に設けられ、

10

前記被照射媒体の少なくとも前記照射部分の温度分布を温度分布測定装置が測定し、
前記温度分布測定装置によって測定した温度分布からビーム分布算出部がビーム分布を算出する

荷電粒子ビーム分布測定方法であって、

前記温度分布測定装置は、画素毎に温度を測定して前記温度分布として二次元温度分布を測定し、

前記ビーム分布算出部は、

前記温度分布測定装置によって得られた目的画素の温度と前記目的画素に隣接する隣接画素の温度を含む前記二次元温度分布より、二次元定常熱伝導方程式を用いて前記各画素に対する熱源の分布である二次元熱源分布を得る第 1 の演算と、

20

該二次元熱源分布より前記荷電粒子ビームに関する前記被照射媒体でのエネルギー損失を
用いて前記ビーム分布としての二次元ビーム分布を得る第 2 の演算とを行う

荷電粒子ビーム分布測定方法。

【請求項 5】

前記被照射媒体は、表面が前記荷電粒子ビームの透過方向と直角となるように配置された

請求項 4 記載の荷電粒子ビーム分布測定方法。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0001】

この発明は、荷電粒子ビームの分布を測定するような荷電粒子ビーム分布測定システムおよび荷電粒子ビーム分布測定方法に関する。

【背景技術】

【0002】

従来、荷電粒子を加速器で加速し、加速した荷電粒子ビームをターゲットに照射する荷電粒子ビーム照射システムが提供されている。このような荷電粒子ビーム照射システムでは、荷電粒子ビームの形状や照射位置を精度よく制御することが望まれる。ここで、荷電粒子ビームの形状や照射位置は、肉眼で確認することができない。このため、種々の荷電粒子ビーム分布測定方法が提案されている。

40

【0003】

例えば、蛍光板を用いてビーム形状を測定するビーム形状モニタシステムが提案されている（特許文献 1 参照）。このビーム形状モニタシステムは、荷電粒子ビームがシンチレータ（蛍光板）に当たることによる励起現象を利用し、この励起現象による発光を CCD 素子によって観察する。この方法により、定量的かつ容易にダクト断面に対するビームの相対位置や断面径の大きさの表示が出来るとされている。

【0004】

しかし、このようにシンチレータを用いるシステムには、RI 生成で用いられる大電流・直流ビームの診断をする際に、撮像に用いる CCD 素子が中性子線により損傷し易く、

50

シンチレータがビーム加熱により溶解するという問題点があった。

また、ワイヤーモニタを用いた荷電粒子ビーム計測装置が提案されている（特許文献2参照）。この荷電粒子ビーム計測装置は、ビーム通路を横切る方向に張られた複数の金属ワイヤを備えている。この荷電粒子ビーム計測装置は、ビームが金属ワイヤに当たり、このとき金属ワイヤに生じる電流を取り出すものである。この電流がビーム強度に比例するという性質から、荷電粒子ビーム計測装置は、荷電粒子ビームの粒子分布を知ることができる」とされている。

【0005】

しかし、ワイヤーモニタを配置して荷電粒子ビーム分布測定を行うシステムには、例えばビーム形状が中空であるような場合など、ビーム形状によっては正確に測定できないという問題があった。

10

【先行技術文献】

【特許文献】

【0006】

【特許文献1】特開平05-223943号公報

【特許文献2】特開平01-257295号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0007】

この発明は、上述した問題に鑑み、中性子線に対して耐性をもち、かつ、ビームの形状によらずに荷電粒子ビームの分布を測定できる荷電粒子ビーム分布測定システムおよび荷電粒子ビーム分布測定方法を提供することを目的とする。

20

【課題を解決するための手段】

【0008】

この発明は、荷電粒子ビームが照射されると照射部分に温度変化が生じる被照射媒体と、前記被照射媒体の前記照射部分以外の少なくとも一部を冷却する冷却部と、前記被照射媒体の少なくとも前記照射部分の温度分布を測定する温度分布測定装置と、前記温度分布測定装置によって測定した二次元温度分布から二次元熱源分布を得、この二次元熱源分布から二次元ビーム分布を算出するビーム分布算出部とを備え、前記被照射媒体は、表面が前記荷電粒子ビームの透過方向と直角となるように配置され、前記冷却部は、前記荷電粒子ビームの行路上に設けられず前記被照射媒体の周囲に設けられた荷電粒子ビーム分布測定システム、および荷電粒子ビーム分布測定方法であることを特徴とする。

30

【発明の効果】

【0009】

この発明により、中性子線に対して耐性をもち、かつ、ビームの形状によらずに荷電粒子ビームの分布を測定できる荷電粒子ビーム分布測定システムおよび荷電粒子ビーム分布測定方法を提供することができる。

【図面の簡単な説明】

【0010】

【図1】荷電粒子ビーム照射システムの概略構成を示す説明図。

40

【図2】遮蔽膜周辺を示す分解斜視図。

【図3】熱源と離散空間の温度の位置を示す画素マップ図。

【図4】ビーム分布を算出する動作のフローチャート。

【図5】測定したビーム分布を画像表示により説明する説明図。

【発明を実施するための形態】

【0011】

本発明者らは、荷電粒子ビーム照射システムによって照射された荷電粒子ビームの分布を測定する方法を鋭意研究した結果、従来の方法では困難であったビーム形状によらずに精度よくビーム分布を測定できる荷電粒子ビーム分布測定システムを開発した。

【0012】

50

以下、この発明の一実施形態を図面と共に説明する。

図１（Ａ）は、荷電粒子ビーム照射システム１の概略構成を示すブロック図であり、図１（Ｂ）は、荷電粒子ビーム分布測定システム８の概略構成を示す縦断正面図である。図２は、図１（Ｂ）のＡ－Ａ面で切断して遮蔽膜１７周辺を示す分解斜視図である。

【００１３】

図１（Ａ）に示すように、荷電粒子ビーム照射システム１は、荷電粒子発生装置２、加速器４、及び荷電粒子ビーム照射部６により構成されている。

荷電粒子発生装置２は、荷電粒子を発生させる装置であり、所望のイオン種を発生させるイオン源等、適宜の装置で構成することができる。この荷電粒子発生装置２が発生させる荷電粒子は、電子、陽子、重陽子、アルファ粒子、または重イオンなど、目的に応じて適宜のものとすることができる。

10

【００１４】

加速器４は、荷電粒子を加速する装置であり、例えばサイクロトロンで構成することができる。なお、加速器４は、サイクロトロンに限らず、シンクロトロン等の適宜の加速器としてもよく、また、図示するように円形加速器に限らず線形加速器とする、あるいは線形加速器と円形加速器の両方とするなど、適宜の構成とすることができる。

【００１５】

荷電粒子ビーム照射部６は、荷電粒子をターゲットに照射する部分の装置であり、コンピュータ７が設けられている。荷電粒子ビーム照射部６とコンピュータ７により、荷電粒子ビーム分布測定システム８が構成される。

20

【００１６】

コンピュータ７は、演算装置、入力装置、記憶装置、及び出力装置（モニタ）からなる適宜のコンピュータから構成される。

コンピュータ７は、温度分布測定装置である赤外線カメラ１５（サーモグラフィックカメラ、図１（Ｂ）参照）から入力装置により温度分布データを受け、記憶装置に実装された変換プログラムを演算装置で動作させることで、その温度分布データをビーム分布データに変換し、その結果を出力装置であるモニタに送信する。

コンピュータ７は、この一連の動作を連続して繰り返し実行する事ができる。このため、ビーム分布データは常に更新され、遮蔽膜１７（図１（Ｂ）参照）に荷電粒子ビームが照射されているビームスポットの位置と大きさと形状をリアルタイムに表示できる。

30

【００１７】

なお、コンピュータ７は、ＦＰＧＡ（*field programmable gate array*）やＤＳＰ（*digital signal processor*）等のデジタル演算器を含むシステムとして構成されても良い。本発明の温度分布からビーム分布への変換処理で行う演算は、後述するようにシンプルに構築されているため、これらのデジタル演算器でも問題なく処理できる。

【００１８】

図１（Ｂ）に示すように、荷電粒子ビーム分布測定システム８は、荷電粒子ビーム照射部６と、コンピュータ７とで構成されている。

40

荷電粒子ビーム照射部６は、ビーム搬送ダクト１１と、観察ダクト１２と、赤外線カメラ１５と、遮蔽膜１７と、冷却部２０と、照射ダクト３１とを有している。照射ダクト３１の後段（図示下方）には、ターゲット３３が配置されている。

【００１９】

ビーム搬送ダクト１１は、円筒形の導管であり、内部が真真空に保たれている。このビーム搬送ダクト１１内には、加速器４（図１（Ａ）参照）からターゲット３３へ向けて荷電粒子ビームが通過する。ビーム搬送ダクト１１の後段側（ビーム放出側）の端部は、遮蔽膜１７で隙間なく遮蔽されている。

【００２０】

観察ダクト１２は、ビーム搬送ダクト１１の側面で遮蔽膜１７に近い位置に接続されて

50

いる円筒形の導管である。この観察ダクト１２は、ビーム搬送ダクト１１に対して４５度傾斜して配置され、遮蔽膜１７とは反対側となる観察側（図示左上側）に設けられた観察窓１３によって、観察ダクト１２の内部は真空封じされる。赤外線カメラ１５は、観察ダクト１２の外側（大気圧）に、観察窓１３越しに遮蔽膜１７を撮影する向きに設置される。

【００２１】

観察窓１３は、フッ化バリウム（ BaF_2 ）のガラスまたはフッ化カルシウム（ CaF_2 ）のガラス等、赤外線を透過させる素材（赤外線透過部材）で形成された板状の部材である。この観察窓１３は、赤外線カメラ１５のレンズ１５ａ側が取り付けられる取付部としても機能する。なお、取付部は、観察窓１３に赤外線カメラ１５を直接固定して取り付けの構成とする、あるいは赤外線カメラ１５をビーム搬送ダクト１１等の他の部位に固定してレンズ１５ａを観察窓１３に向い合せて配置する構成とする等、適宜の構成とすることができる。

10

【００２２】

赤外線カメラ１５は、赤外線を測定して温度分布を測定するサーモグラフィーである。この赤外線カメラ１５は、観察窓１３と観察ダクト１２により、荷電粒子ビームの照射方向Ｙ１に対して４５度の角度となる確認方向Ｙ２で遮蔽膜１７の少なくとも荷電粒子ビーム照射範囲全体を撮影することができるよう配置されている。この赤外線カメラ１５は、赤外領域を撮影できる適宜のカメラで構成することができ、中でも中性子線に耐性のあるものが好ましい。この実施例では、赤外線カメラ１５として、中性子線に耐性のある非冷却型マイクロボロメーター等を撮像素子として用いたもの等を使用する。

20

【００２３】

遮蔽膜１７は、真空を保つための円盤形状で肉厚一定の膜であり、荷電粒子ビームが透過し、かつ、この透過によって温度変化が生じる素材により形成されている。この遮蔽膜１７は、荷電粒子ビームの照射範囲より広い面積を有し、平面（表面）が荷電粒子ビームの透過方向と直角となるように、言い換えれば荷電粒子ビームの幅方向が平面方向となるように配置されている。この遮蔽膜１７は、ビーム輸送ライン（ビーム搬送ダクト１１側）と照射ターゲット部（照射ダクト３１側）の圧力差を保つ機能を有している。また、この遮蔽膜１７は、荷電粒子ビームが照射される被照射媒体としても機能し、ビーム分布を測定するために赤外線カメラ１５で撮影される被撮影体としても機能する。このため、遮蔽膜１７は、荷電粒子ビームの照射によって少しでも温度が変化する素材で作成される。具体的には、遮蔽膜１７は、ニオブ（ Niobium ）、グラファイト、アルミニウム、または銅等の素材とすることができる。

30

【００２４】

冷却部２０は、遮蔽膜１７を外側から冷却する冷却装置である。この冷却部２０は、図２に示すように、リング状に形成されたリング状部２１と、このリング状部２１の側面に互いに近接配置された冷媒流入口２３及び冷媒排出口２４を有している。冷媒流入口２３及び冷媒排出口２４は、冷媒を循環させる冷却装置３５に接続されている。冷却装置３５により供給されて冷媒流入口２３から流入する冷媒２２は、リング状部２１内を循環し、冷媒排出口２４から排出される。なお、図２は、冷媒２２の流路をわかりやすくするため、左右対称形状である冷却部２０の冷媒流入口２３付近を一部切断して図示している。

40

【００２５】

また、冷却部２０のリング状部２１は、遮蔽膜１７の円盤形状の外周部分とほぼ同じ大きさのリング形状に形成されている。特に、荷電粒子ビームを妨げないために、遮蔽膜１７に荷電粒子ビームが照射される照射領域１８全体がリング状部２１の内側に生じる中空部となるように構成されている。これにより、冷却部２０は、荷電粒子ビームの通過を妨げることなく、遮蔽膜１７を外周部から冷却できる。

【００２６】

なお、照射領域１８は、荷電粒子ビームが主に照射される領域（照射部分）を指しており、照射領域１８の外側にビーム経路から若干逸脱したごく少量の荷電粒子ビームが照射

50

されるような場合を排除するものではない。

また、冷媒 22 は、冷却用の液体又は気体とすることができ、液体窒素や水や空気等適宜の媒体とすることができる。

【0027】

照射ダクト 31 は、円筒形のダクトであり、ターゲット 33 までの通路を被覆している。

ターゲット 33 は、荷電粒子ビームを照射する目的物である。このターゲット 33 は、荷電粒子ビーム照射システム 1 を使用する目的に応じて適宜のものとする事ができる。

【0028】

図 3 は、熱源と離散空間の温度の位置を示す画素マップ図である。ここで、荷電粒子ビーム分布測定プログラムで実行する温度分布からビーム分布への変換処理方法の考え方について説明する。

【0029】

遮蔽膜 17 中での個々の入射イオンのエネルギー損失量 E が遮蔽膜 17 の z 軸方向（ビームの進行方向）で一様である場合には、温度分布 $T(x, y)$ と熱源 $S(x, y)$ の関係は、次の [数 1] に示す二次元定常熱伝導方程式により定まる。

【0030】

【数 1】

$$\frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 T(x, y)}{\partial y^2} = -S(x, y)/\lambda(T)$$

10

20

(T): 温度に依存する熱伝導率。

【0031】

[数 1] の 2 階微分項に中心差分法を適用し、 $S_{i, j}$ について解くと、次の [数 2] が得られる。

【0032】

【数 2】

$$S_{i, j} = -\lambda_{i, j} \left\{ \frac{T_{i+1, j} - 2T_{i, j} + T_{i-1, j}}{\Delta x^2} + \frac{T_{i, j+1} - 2T_{i, j} + T_{i, j-1}}{\Delta y^2} \right\}$$

30

i, j : 離散空間における x, y 座標。

x, y : 離散空間で分割されたセルの x, y 方向の 1 辺の長さ。

$T_{i, j}$: 点 (i, j) にあるセル上の温度。

$S_{i, j}$: 点 (i, j) にあるセル上の熱源。

【0033】

[数 2] より、点 (i, j) の熱源は、その点とその周り 4 点の温度より求まることが示される。すなわち、図 3 の画素マップ図に示すように、熱源 50 は、目的画素 40 と、この目的画素 40 の各辺に隣接する 4 つの隣接画素 41 ~ 44 の温度（つまり図示で着色されている 5 つの画素の温度）から算出することができる。

40

【0034】

ここで、遮蔽膜 17 には厚みがあり、熱は x, y, z の 3 次元方向に伝搬していくにもかかわらず、このように二次元の計算で成立するのは、本発明の構成によるものである。すなわち、冷却部 20 は、遮蔽膜 17 の周囲に設けられており、ビームの行路上には設けられていない。このため、荷電粒子ビームが遮蔽膜 17 を通過して熱が生じると、この熱が、冷却部 20 の存在する方向、すなわち荷電粒子ビームの幅方向 (x, y 方向) へ伝搬する。荷電粒子ビームの進行方向 (z 方向) には冷却部 20 が存在していないため、遮蔽膜 17 の厚み方向 (z 方向) には温度の勾配がない。そのため、熱の伝搬方向を二次元に制限したことにより、微分方程式から z 方向の項を無視する事ができ、図 3 の画素マップ

50

図に示したように、その点（目的画素 4 0）と周りの 4 点（隣接画素 4 1 ~ 4 4）の温度を考慮する二次元の計算式で表すことができる。

【 0 0 3 5 】

以上の関係を用いて、熱源からビーム分布への変換を、次の [数 3] を用いて行う。

【 0 0 3 6 】

【 数 3 】

$$I_{i,j} = q S_{i,j} l_z / \Delta E$$

q : イオンの電荷。 l z : 遮蔽膜 1 7 の厚さ。

10

E : ビームを成す個々のイオンの遮蔽膜 1 7 中におけるエネルギー損失。

【 0 0 3 7 】

以上に説明した温度分布からビーム分布への変換処理方法と、赤外線カメラ 1 5 により測定された二次元温度データ上のノイズ除去のための平均化およびフィルタリング法を組み合わせ、荷電粒子ビーム分布測定プログラムが実行する変換アルゴリズムが構成される。

【 0 0 3 8 】

図 4 は、荷電粒子ビーム分布測定プログラムに従ってコンピュータ 7 が実行するアルゴリズムを示すフローチャートである。このフローチャートを実行するコンピュータ 7 は、ビーム分布算出部として機能する。

20

【 0 0 3 9 】

まず、コンピュータ 7 は、変数 N に「 0 」を代入して初期化し（ステップ S 1 ）、赤外線カメラ 1 5 で撮影した二次元温度データを収集する（ステップ S 2 ）。このとき、赤外線カメラ 1 5 は、x , y 座標の二次元画像の各画素について温度データを取得し、この各画素の温度データをコンピュータ 7 が取得する。

【 0 0 4 0 】

コンピュータ 7 は、変数 N に 1 加算し（ステップ S 3 ）、予め定めた所定回数である平均値計算用繰り返し回数に到達していなければ（ステップ S 4 : N o ）、ステップ S 2 に処理を戻して二次元温度データの収集を繰り返す。

【 0 0 4 1 】

30

二次元温度データの収集回数が平均値計算用繰り返し回数に至っていれば（ステップ S 4 : Y e s ）、コンピュータ 7 は、平均化処理を実行する（ステップ S 5 ）。この平均化処理は、各画素単位で N a v e 個の温度データから平均値を算出する処理である。

【 0 0 4 2 】

コンピュータ 7 は、変数 N に「 0 」を代入して初期化し（ステップ S 6 ）、変数 N に代入されている回数が予め定めた所定回数であるフィルタリング回数に至っているかを判定する（ステップ S 7 ）。このフィルタリング回数は、例えば 1 回とする、あるいは複数回とするなど、適宜の回数とすることができる。

【 0 0 4 3 】

フィルタリング回数に至っていなければ（ステップ S 7 : N o ）、コンピュータ 7 は、フィルタリング処理を実行し（ステップ S 8 ）、変数 N の値に 1 加算して（ステップ S 9 ）、ステップ S 7 に処理を戻して繰り返す。このフィルタリング処理は、ガウシアンフィルタ等の平滑化フィルタにより、二次元温度データを平滑化する処理である。

40

【 0 0 4 4 】

フィルタリング回数に至っていれば（ステップ S 7 : Y e s ）、コンピュータ 7 は、温度分布からビーム分布への変換処理方法を実行する（ステップ S 1 0 ）。この温度分布からビーム分布への変換処理方法は、平均化処理（ステップ S 5 ）とフィルタリング処理（ステップ S 8 ）の完了した温度データに対して、上述した [数 2] の式により、二次元温度データを二次元熱源分布に変換し、さらに [数 3] の式により二次元熱源分布から二次元ビーム分布に変換する。

50

【 0 0 4 5 】

以上の構成およびアルゴリズムにより、荷電粒子ビームの分布を精度よく測定することができる。

温度分布からビーム分布への変換処理方法で行う演算の効果を確かめる為に、ビーム照射の際に赤外線カメラ 15 によって得られる遮蔽膜 17 の二次元温度データをノイズも含めてシミュレーションにより模擬し、その結果に本アルゴリズムを適用すること二次元ビーム分布を求めた。

赤外線カメラ 15 によって得られる遮蔽膜 17 の二次元温度データの模擬は、以下の (1)、(2) の手順により行った。

(1) ビームのパラメーター (エネルギー、電流、ビーム幅)、及び遮蔽膜 17 の厚さ、材料を決めて、この条件で生じる温度分布を二次元定常熱伝導方程式から求める。

100 mm の領域を 200 × 200 のセルで離散化し、有限差分法により二次元定常熱伝導方程式を解く。

(2) ノイズは、その振幅が正規分布であると仮定し、 $2 = T_{NETD}$ となるように擬似乱数を用いて決める。得られたノイズは、(1) で計算されたノイズを含まない温度分布に加える。

【 0 0 4 6 】

この T_{NETD} (NETD : noise equivalent temperature difference) は、ノイズの振幅に相当する温度の広がりを示したものであり、赤外線カメラ 15 の性能に依存する。

【 0 0 4 7 】

本解析では、比較的ノイズの大きい汎用の赤外線カメラ 15 の使用を想定して、 $T_{NETD} = 0.3 \text{ K}$ とした。

【 0 0 4 8 】

以上のシミュレーションにより得られた温度分布を、温度分布からビーム分布への変換処理方法のアルゴリズムを用いてビーム分布に変換した。その結果を、あらかじめ決められた厳密解と比較した結果が、図 5 (A) ~ 図 5 (F) である。

【 0 0 4 9 】

図 5 (A) および図 5 (B) は、平均化、フィルタリングを行わずに、温度分布からビーム分布への変換処理方法のみを用いて導出したビームプロファイルを示す。図 5 (A) は、x , y 方向の二次元分布を色の濃淡により示す画像図であり、図 5 (B) は、x 方向の本来のビーム分布 (黒の破線) と演算により測定したビーム分布 (グレーの実線) を示すグラフである。入射ビームは、20 MeV、20 μ A、ビーム径 $2 = 10 \text{ mm}$ のプロトンビームとした。また、遮蔽膜 17 は、厚さ 100 μm の銅箔とした。

【 0 0 5 0 】

図 5 (A) の二次元分布に見られるように、ある程度のビーム形状を判断する事が可能であるが、ノイズが目立つ。このノイズは、変換前の温度分布から伝搬して生じたものである。図 5 (B) に示す通り、ノイズの振幅とビーム分布の強度が同程度である。従って、ビーム分布の正確な測定のためには、ここから温度分布上のノイズを除去することが必要である。

【 0 0 5 1 】

図 5 (C) と図 5 (D) は 10 枚分の温度分布を用いて平均化した後に変換法を用いて導出したビーム分布を示す。図 5 (C) は、x , y 方向の二次元分布を色の濃淡により示す画像図であり、図 5 (D) は、x 方向の本来のビーム分布 (黒の破線) と演算により測定したビーム分布 (グレーの実線) を示すグラフである。このように、平均化処理をすることで、ノイズが減少していることがわかる。

【 0 0 5 2 】

図 5 (E) と図 5 (F) は、10 枚分の温度分布を用いた平均化し、さらに 1 回のフィルタリングを行った後に変換法を用いて導出したビーム分布である。図 5 (E) は、x , y 方向の二次元分布を色の濃淡により示す画像図であり、図 5 (F) は、x 方向の本来

のビーム分布（黒の破線）と演算により測定したビーム分布（グレーの実線）を示すグラフである。このように、平均化のみではまだ少し残るノイズを、フィルタリングによって効果的に除去出来る。また、変換されたビーム分布は破線で示す厳密解を十分よく再現出来ていることが確認出来る。今回考慮した $2 = 10 \text{ mm}$ のビームに対して、薄膜上の温度分布の幅は $2 = 30 \text{ mm}$ となり、3 倍程度広がった分布が観測された。したがって、正しくビーム分布を正確に検証する上で、今回開発したアルゴリズムは非常に有用である。

【0053】

次に、図5（G）～図5（I）と共に、温度分布では正確に検知できないようなビーム形状であっても、上述した本発明の温度分布からビーム分布への変換処理方法により精度

10

【0054】

図5（G）は、温度分布を示す画像図である。図示するように、中央の広い部分が明るくなっており、1つの大きな円形で中央へ向かって明るく（温度が高く）なっていることがわかる。

【0055】

この温度分布から、本発明の温度分布からビーム分布への変換処理方法により求めたビーム分布が図5（H）に示すビーム分布の画像図である。図示するように、実際には図示上下方向に細長い楕円形の2つのビームが図示左右方向に横並びに照射されていることがわかる。このように、温度分布では2つのビームによる熱が混ざって識別できなくなり、1つの大きなビームのように見えるような場合でも、本発明の温度分布からビーム分布への変換処理方法を行うことで、2つの楕円形ビームであることを正確に確認することができる。

20

【0056】

図5（I）は、この温度分布とビーム分布をx方向に表示したグラフである。本来のビーム分布（黒の破線）が中央付近で2か所突出するように高くなっていることに対し、温度分布（グレーの破線）はこの2か所の頂点を1つの大きな頂点とする山形になる。これに対し、本発明の温度分布からビーム分布への変換処理方法により求めたビーム分布（グレーの実線）は、本来のビーム分布とほぼ同じ形状となり、中央付近で2か所突出するように高くなっている。

30

【0057】

以上に説明したように、荷電粒子ビーム分布測定システム8は、ビーム形状にかかわらず、ビーム分布を精度よく測定することができる。

【0058】

撮影に使用するカメラが撮像素子としてマイクロボロメーター等を用いた赤外線カメラ15であるため、中性子線に対して耐性があり、繰り返しの使用に耐えることができる。

【0059】

また、冷却部20は、遮蔽膜17の周囲から冷却する構造であるため、遮蔽膜17の中での熱の伝搬をビーム幅方向であるx, y方向の二次元にすることができる。

【0060】

また、この熱伝搬を二次元にすることで、微分方程式からz軸の項を削減して二次元での計算が可能となり、温度分布からビーム分布を求める式をシンプルにすることができる。

40

【0061】

また、シンプルな式で演算できるため、高性能のコンピュータを用いずとも、FPGAやDSP等を用いて実現することができる。

【0062】

また、本発明により、赤外線カメラ15として比較的ノイズの大きいもの（TNETD 0.3 K）を用いた場合でも、ニオブ薄膜を用いる事で0.1 μA から数10 μA 程度のプロトンビームについて、十分正確にビーム分布を測定できることが計算により確認

50

された。

【0063】

また、平均化処理では、複数回取得した温度を用いて画素毎に平均化をするため、すべての画素における測定結果のバラツキを解消して精度を向上することができる。

【0064】

また、フィルタリング処理では、隣接する画素間での差を平滑化するため、画素間でのバラツキや誤差を解消して精度を向上することができる。

【0065】

このように、画素内での誤差解消を行う平均化処理と、画素間での誤差解消を行うフィルタリング処理の両方を行うことで、荷電粒子ビームの放射性核種が遮蔽膜17内で確率的に熱を発生することにより生じるノイズを精度よく解消し、ビーム分布の測定結果を真のビーム分布に高精度で近づけることができる。

10

【0066】

なお、冷却部20は、遮蔽膜17の周囲全体を冷却する構造としたが、これに限らず、遮蔽膜17の周囲の複数箇所を冷却する構造とするなど、適宜の構造とすることができる。このような場合でも、冷却部20が遮蔽膜17の周囲にある程度均等間隔に配置されていれば、温度をx, y方向へ満遍なく伝搬させることができ、上述した実施例と同じ効果を得ることができる。

【0067】

また、冷却部20は、ビーム搬送ダクト11の外側に配置したが、これに限らず、ビーム搬送ダクト11の内側に配置してもよい。この場合、遮蔽膜17において荷電粒子ビームが照射されない周囲部分に冷却部20を配置し、冷却部20で冷却している部分に荷電粒子ビームが通過しないように構成する。この場合も、上述した実施例と同じ効果を得ることができる。

20

【0068】

また、遮蔽膜17は、ビーム輸送ライン(ビーム搬送ダクト11側)と照射ターゲット部(照射ダクト31側)の圧力差を保つための膜としたが、これに限らず、圧力差を保つための膜とは別に、温度分布からビーム分布を測定する測定用膜を設けても良い。この場合、赤外線カメラ15は、圧力差を保つための膜ではなく、測定用膜を撮影するように構成すれば良い。また、この場合、冷却部20は、測定用膜を周囲から冷却する構成にすればよい。この場合も、ビーム分布を精度よく測定することができ、上述した実施例と同じ効果を得ることができる。なお、この場合、ターゲット33そのものを測定用膜として利用し、ターゲット33の周囲に冷却部20を設けてもよい。

30

【0069】

また、冷却部20は、冷媒22によって冷却する構造としたが、これに限らず、遮蔽膜17の周辺部に設けたヒートシンクとするなど、遮蔽膜17の周辺部を冷却する適宜の構造とすることができる。

【産業上の利用可能性】

【0070】

この発明は、荷電粒子ビームを照射する適宜の装置に用いることができる。例えば、PET用RI製造ライン、BNCT治療などに用いる中性子発生システム、陽子線治療システム、加速器実験、材料照射、放射光の入射電子、粒子線治療、電子線滅菌など、荷電粒子ビームを照射する様々な用途に用いることができる。

40

【符号の説明】

【0071】

7...コンピュータ

8...荷電粒子ビーム分布測定システム

15...赤外線カメラ

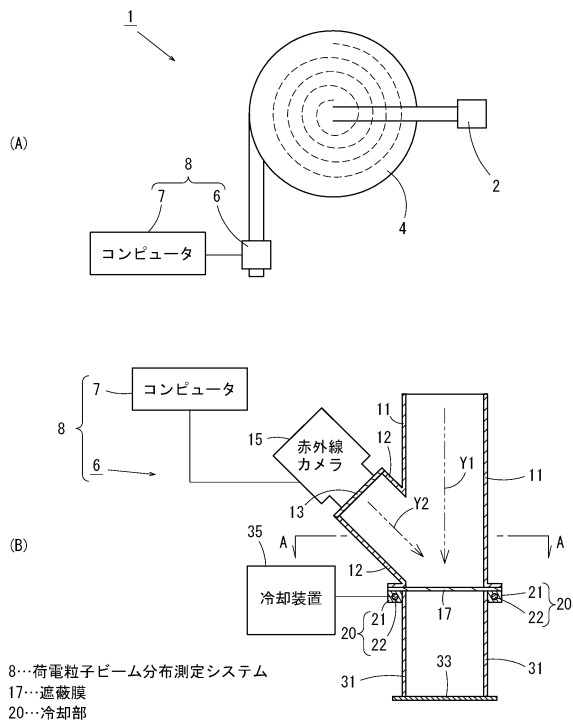
17...遮蔽膜

18...照射領域

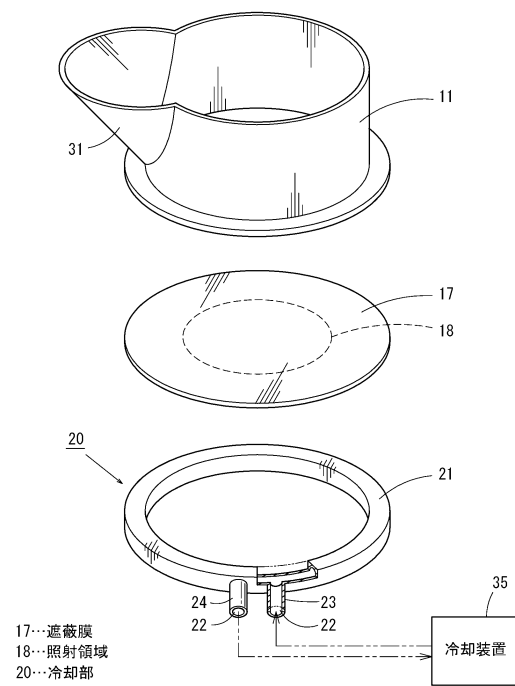
50

2 0 ... 冷却部
 4 0 ... 目的画素
 4 1 ~ 4 4 ... 隣接画素

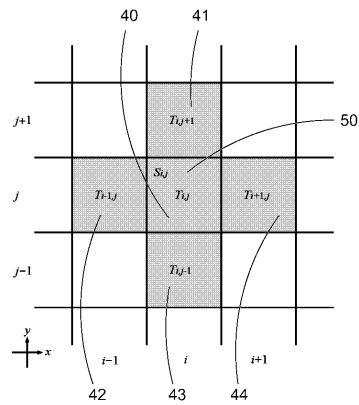
【図 1】



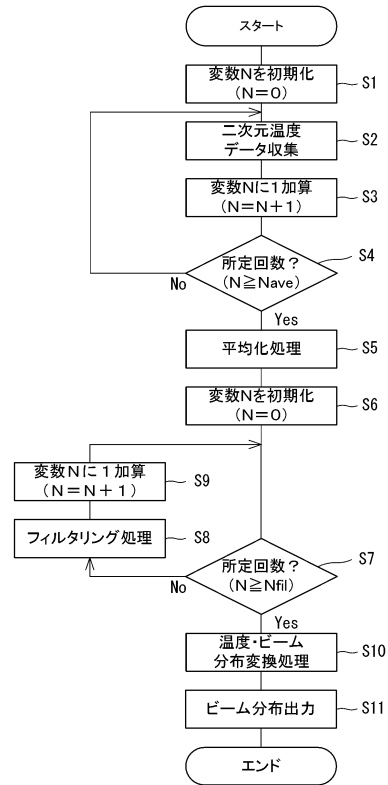
【図 2】



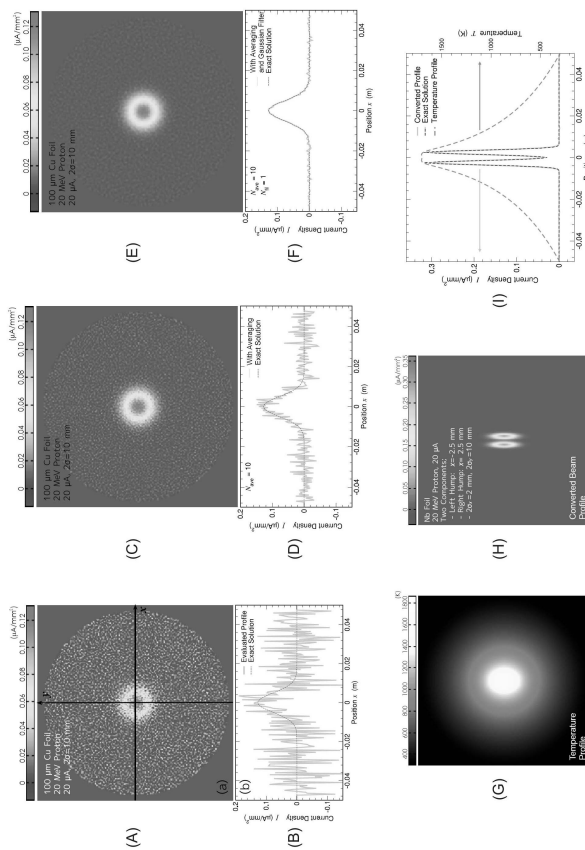
【図 3】



【図 4】



【図 5】



フロントページの続き

特許法第30条第2項適用 1 平成25年7月11日掲載 http://www.pasj.jp/web_publish/pasj10/abstracts/index_abstracts.html http://www.pasj.jp/cgi-bin/meetings/pasj10/pdf_get.cgi?SAP0%2FSAP077%2FSAP077.pdf 2 平成25年8月3日発表 第10回日本加速器学会年会 3 平成25年8月掲載 <http://cyc13proc.triumf.ca/prepress/index.htm> <http://cyc13proc.triumf.ca/prepress/papers/tuppt008.pdf> 4 平成25年9月17日発表 20th International Conference on Cyclotrons and their Applications

(72)発明者 野田 章

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内

(72)発明者 野田 耕司

千葉県千葉市稲毛区穴川四丁目9番1号 独立行政法人放射線医学総合研究所内

審査官 藤原 伸二

(56)参考文献 特開2001-194229(JP,A)

特開2006-098223(JP,A)

特開昭55-156880(JP,A)

実開昭55-127287(JP,U)

米国特許第5861625(US,A)

M.Takada et al.,, Innovative real-time and non-destructive method of beam profile measurement under large beam current irradiation for BNCT, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Secion A , 2012年10月11日, vol. 689 , p.22-28

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G01T 1/00 - 1/16

G01T 1/167 - 7/12

G21K 5/04

H05H 3/00 - 15/00

G01J 5/00 - 5/62

G01J 1/00 - 1/60