

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6569048号
(P6569048)

(45) 発行日 令和1年9月4日(2019.9.4)

(24) 登録日 令和1年8月16日(2019.8.16)

(51) Int. Cl.	F I	
G 2 1 K 1/14 (2006.01)	G 2 1 K	1/14
G 2 1 K 1/00 (2006.01)	G 2 1 K	1/00 A
G O 1 T 1/185 (2006.01)	G O 1 T	1/185 A
H O 5 H 5/06 (2006.01)	H O 5 H	5/06
H O 1 J 37/30 (2006.01)	H O 1 J	37/30 A
請求項の数 18 (全 28 頁) 最終頁に続く		

(21) 出願番号 特願2019-507550 (P2019-507550)
 (86) (22) 出願日 平成30年3月9日(2018.3.9)
 (86) 国際出願番号 PCT/JP2018/009288
 (87) 国際公開番号 W02018/173812
 (87) 国際公開日 平成30年9月27日(2018.9.27)
 審査請求日 平成31年3月1日(2019.3.1)
 (31) 優先権主張番号 特願2017-55416 (P2017-55416)
 (32) 優先日 平成29年3月22日(2017.3.22)
 (33) 優先権主張国・地域又は機関
 日本国(JP)

(73) 特許権者 505374783
 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構
 茨城県那珂郡東海村大字舟石川765番地
 1
 (73) 特許権者 597156502
 株式会社ベスコ
 東京都港区東新橋二丁目5番地12号
 (74) 代理人 100139114
 弁理士 田中 貞嗣
 (74) 代理人 100088041
 弁理士 阿部 龍吉
 (74) 代理人 100139103
 弁理士 小山 卓志

早期審査対象出願

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 イオンビーム機能性透過膜、イオンビーム機能性透過膜を用いたビームライン機器、イオンビーム機能性透過膜を用いたフィルター機器、フィルター機器の調整方法

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

一方向に進行するイオンビームが通過するビームライン機器に用いられ、チャンネルを有し、入射イオンの荷電分布が平衡状態を保つことができる厚みを有するイオンビーム機能性透過膜であって、

チャンネル軸が、前記イオンビームの進行方向と実質的に平行であることを特徴とするイオンビーム機能性透過膜。

【請求項2】

前記イオンビーム機能性透過膜が結晶であることを特徴とする請求項1に記載のイオンビーム機能性透過膜。

【請求項3】

前記イオンビーム機能性透過膜が、空洞が形成されたポーラス物質であることを特徴とする請求項1に記載のイオンビーム機能性透過膜。

【請求項4】

イオンビームが内部を通過する真空容器と、チャンネルを有し、入射イオンの荷電分布が平衡状態を保つことができる厚みを有する前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、

前記イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を調整する位置決めステージと、を有し、

前記位置決めステージによって、イオンビームのビームライン中に前記イオンビーム機能

性透過膜が配されるように、かつ、前記イオンビーム機能性透過膜のチャンネル軸が、前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整されることを特徴とするビームライン機器。

【請求項 5】

前記イオンビーム機能性透過膜が結晶であり、前記位置決めステージによって、前記結晶における結晶軸が前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整することで、チャンネル軸を前記イオンビームの進行方向と実質的に平行とすることを特徴とする請求項 4 に記載のビームライン機器。

【請求項 6】

前記結晶が単結晶であることを特徴とする請求項 5 に記載のビームライン機器。

10

【請求項 7】

前記イオンビーム機能性透過膜が、空洞が形成されたポーラス物質からなる薄膜であることを特徴とする請求項 4 に記載のビームライン機器。

【請求項 8】

ビームライン機器が加速器であることを特徴とする請求項 4 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載のビームライン機器。

【請求項 9】

ビームライン機器がストリッパーであることを特徴とする請求項 4 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載のビームライン機器。

【請求項 10】

ビームライン機器がディグレーダーであることを特徴とする請求項 4 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載のビームライン機器。

20

【請求項 11】

ビームライン機器が電離箱であることを特徴とする請求項 4 乃至請求項 7 のいずれか 1 項に記載のビームライン機器。

【請求項 12】

真空容器内で進行するイオンビームに含まれる不要分子を除去するフィルター機器であって、

チャンネルを有し、入射イオンの荷電分布が平衡状態を保つことができる厚みを有する前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、

30

前記イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を調整する位置決めステージと、を有し、

前記位置決めステージによって、イオンビームのビームライン中に前記イオンビーム機能性透過膜が配されるように、かつ、前記イオンビーム機能性透過膜のチャンネル軸が、前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整されることを特徴とするフィルター機器。

【請求項 13】

前記イオンビーム機能性透過膜が結晶であり、前記位置決めステージによって、前記結晶における結晶軸が前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整することで、チャンネル軸を前記イオンビームの進行方向と実質的に平行とすることを特徴とする請求項 12 に記載のフィルター機器。

40

【請求項 14】

前記結晶が単結晶であることを特徴とする請求項 13 に記載のフィルター機器。

【請求項 15】

前記イオンビーム機能性透過膜が、空洞が形成されたポーラス物質からなる薄膜であることを特徴とする請求項 12 に記載のフィルター機器。

【請求項 16】

イオンビームが内部を通過する真空容器と、

チャンネルを有し、前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、

前記イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を

50

調整する位置決めステージと、
前記位置決めステージの下流側に配され、イオンビームを補足するファラデーカップと、
前記ファラデーカップで補足されたイオンビームに基づく電流を計測する電流計測部と、
を有するフィルター機器の調整方法であって、
前記位置決めステージによってビームライン中に前記イオンビーム機能性透過膜が配されるようにし、前記電流計測部で計測される電流が最大となるように前記位置決めステージの姿勢を調整するステップと、を有することを特徴とするフィルター機器の調整方法。

【請求項 17】

イオンビームが内部を通過する真空容器と、
チャンネルを有し、前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、
前記イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を調整する位置決めステージと、
前記位置決めステージの下流側に配され、イオンビームを補足するファラデーカップと、
前記ファラデーカップで補足されたイオンビームに基づく電流を計測する電流計測部と、
を有するフィルター機器の調整方法であって、
前記位置決めステージにおける前記イオンビーム機能性透過膜が配されていない位置に、
イオンビームが通過するように配し、前記電流計測部で計測される電流が最大となるように前記位置決めステージの姿勢を調整する第1ステップと、
前記第1ステップの後、前記位置決めステージによってビームライン中に前記イオンビーム機能性透過膜が配されるようにし、前記電流計測部で計測される電流が最大となるように前記位置決めステージの姿勢を調整する第2ステップと、を有することを特徴とするフィルター機器の調整方法。

【請求項 18】

前記第2ステップの後、前記ファラデーカップをビームラインから外す第3ステップを有することを特徴とする請求項 17 に記載のフィルター機器の調整方法。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、イオンビームが透過する透過率を改善したイオンビーム機能性透過膜、そのようなイオンビーム機能性透過膜を用いたビームライン機器、イオンビーム機能性透過膜の調整方法に関する。

【背景技術】

【0002】

加速器などの機器において、通常、イオンビームのエネルギーが1 MeV (数10 keV) 程度以上になると1 μm (数10 nm) 程度の薄膜を透過できる。従来のイオンビーム機能性透過膜 (Functional Membrane for Ion beam Transmission (以下、「FMIT」とも称す)) は、その透過現象を基礎として利用するものである。

【0003】

FMITの用途は、荷電変換等を機能としたタンデム加速器の荷電ストリッパ、ビームライン上での荷電数上昇を機能としたポストストリッパ、エネルギー減衰を機能としたディグレーダーがある。荷電ストリッパとポストストリッパは単にストリッパと称することもある。なお、セカンドストリッパと呼ばれる言葉があるが、上記の荷電ストリッパ用薄膜としてもポストストリッパ薄膜としても用いられるため、その用語は使用しないこととする (非特許文献1、2)。

【0004】

荷電ストリッパおよびポストストリッパの機能は、イオンが薄膜を通過する際のイオンの電子脱離という現象を利用している。イオンが薄膜を通過するとき、イオンと固体中の電子や原子核との衝突が発生する。入射イオンは、電子脱離と電子捕獲、励起と脱励起を繰り返しながら、入射エネルギーで決まる荷電分布 (すなわち平衡荷電分布) に至る。このときの平衡電荷は、入射イオンの電荷よりも通常高いため、通過するイオンの電荷

は、平均として入射イオンの電荷に比べ高くなる（非特許文献3）。

【0005】

荷電ストリッパーは、加速器に入射した負イオンを正イオンに変換し射出する機能を持つ。荷電ストリッパーは代表的にはタンデム加速器に用いられる。タンデム加速器は、入射口と出射口の中央にターミナルという部位を備え、これと入射口とは加速管で結ばれた構造になっている。

【0006】

ターミナルに正電荷を外部から与えることで、ターミナルの電位が最も高くなり、入射口に向かって電位が徐々に下がるような、山なりの電位分布が形成される。入射した負イオンは、正電位のターミナルに向かって加速され、ターミナル部の荷電ストリッパーにおいて、電子が剥ぎ取られ正イオンになる。正イオンは、正電位のターミナルとの電気的反発力を受け、出射口に向かって再び加速される。このように荷電ストリッパーは、タンデム加速器の機構において本質的な役割を担っている（非特許文献1）。

【0007】

荷電ストリッパーは、加速器質量分析（Accelerator Mass Spectrometry：以後、「AMS」と称す）においては、分析を妨害する分子のフィルター機能を兼ねる。具体的には、AMSでは、分析目的の核種とほぼ同じ質量を持つ分子（以後、「妨害分子」と称す）は目的核種の検出を妨害するが、荷電ストリッパーは妨害分子を解離させる働きを持つ（非特許文献2、5）。

【0008】

ポストストリッパーは、通常、タンデム加速器等より加速されたイオンに対し、学術的な実験目的等のためイオンの荷電数を上昇させる機能を持つ。代表的なものとしては、重イオン照射医療等に有用な物理データベースの構築に必要な実験、すなわち、イオンと固体の相互作用において、固体に入射するイオンの荷電数を調節することにある（非特許文献4）。

【0009】

ディグレーダーは、タンデム加速器等により加速されたイオンに対し、目的に応じてイオンのエネルギーを減衰させる機能を持つ。代表的には、AMSでの分析目的核種と妨害核種の分別において、両者を薄膜に入射し、阻止能の違いにより両者のエネルギーの間に差を作ることにある。加速器質量分析では、目的核種と等しい質量をもつ安定した同重体等が存在する場合、例えば、 $^{10}\text{B e}$ に対する ^{10}B 、 $^{36}\text{C l}$ に対する ^{36}S 、 $^{53}\text{M n}$ に対する $^{53}\text{C r}$ 等、これらの同重体等は目的核種の測定を妨害する核種（以下、「妨害核種」と称す）となり、これらの妨害核種の分別が主要な技術となっている（非特許文献2、5）。ディグレーダーは検出器（例えば電離箱）の手前、あるいはその付近のビームライン上に設置することが一般的である。検出器の窓にディグレーダーの機能を持たせたものを本明細書ではディグレーダーウィンドウと称す。

【0010】

以上述べたFMITのいずれの用途でも、イオンは薄膜中の原子核との多重散乱によりビームの品質の指標となるビームエミッタンス（ビームの空間的な広がり標準偏差と角度広がり標準偏差との積）の増加と透過率の減衰が発生する。

【0011】

従来、荷電ストリッパーに対しては透過率の高さを優先する場合、薄膜ではなくガスが用いられる。一方、高い電荷を得ることを優先する場合、薄膜が望まれる。薄膜で発生する大角散乱による透過率の減衰及びエミッタンスの増加に対しては、従来、薄膜の後にビーム収束レンズを設置して対処されてきた。しかしビーム集束レンズを用いたとしても、一旦悪化したエミッタンスはもはや改善することができない。（非特許文献1）

従来、AMS装置の小型化に向けた技術開発においては、イオンエネルギーの低下に伴い、妨害分子除去の機能を兼ねる荷電ストリッパーに対してはガスを使用せざるを得ないとされてきた。これは、イオンのエネルギーが1MeVよりも小さくなると、透過膜中の散乱（特に原子との弾性散乱）が顕著になり、エミッタンスと透過率がともに大きく悪

10

20

30

40

50

化するためである。

【 0 0 1 2 】

ところで、AMS装置の小型化を制限している主要な問題は、ガスを用いた荷電ストリッパの機能維持とビームラインの高真空を両立させることが困難であることである。ガスを用いた荷電ストリッパの機能を保持するためにストリッパへのガス量を増やすとビームラインへのガス漏れが増加し、イオンは漏れ出たガス分子に衝突・散乱し、その軌道がずれる確率が高くなる。

【 0 0 1 3 】

逆に、ガスを用いた荷電ストリッパのガス量を減らすとストリッパの機能が低下する。現在、AMS装置の小型化は、そのような荷電ストリッパ機能維持とビームラインの真空度維持のせめぎ合いで制限されている。しかしながら、イオンビームの透過率の高い透過膜が存在すれば、それらの両立が可能となり、その制限を取り除くことができる。したがって、透過率が改善されたFMITの開発はAMS装置を劇的な小型化に結びつく。

【 先行技術文献 】

【 特許文献 】

【 0 0 1 4 】

【 特許文献 1 】 特表 2 0 1 3 - 0 1 9 5 0 9 号 公 報

【 特許文献 2 】 特表 1 9 9 7 - 1 8 9 4 3 6 号 公 報

【 非特許文献 1 】 「Electrostatic Accelerators - Fundamentals and Applications」, R. Hellborg 編, Springer 2005, 第10章.

【 非特許文献 2 】 「Developments in accelerator mass spectrometry」, H.A.Synal International Journal of Mass Spectrometry, 349 350 (2013) 192 202.

【 非特許文献 3 】 「イオンビーム工学(イオン・固体相互作用編)」 藤本文範、小牧研一郎、内田老鶴園1995第4章

【 非特許文献 4 】 「Equilibrium and non equilibrium charge state distributions of 2.0 MeV/u carbon ions passing through carbon foils」, M. Imai他、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B 354 (2015) 172 176.

【 非特許文献 5 】 「加速器質量分析の原理」 東京大学 松崎 浩之氏 学会誌 真空 Vol.50, No.7 (2007) 467 474.

【 発明の概要 】

【 発明が解決しようとする課題 】

【 0 0 1 5 】

上述したように、従来、イオンビームの透過率が高いイオンビーム機能性透過膜が求められていたが、そのようなイオンビーム機能性透過膜が開発されておらず、問題であった。

【 課題を解決するための手段 】

【 0 0 1 6 】

上記のような問題点を解決するために、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜は、一方向に進行するイオンビームが通過するビームライン機器に用いられ、チャンネルを有するイオンビーム機能性透過膜であって、チャンネル軸が、前記イオンビームの進行方向と実質的に平行であることを特徴とする。

【 0 0 1 7 】

また、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜は、前記イオンビーム機能性透過膜が結晶であることを特徴とする。

【 0 0 1 8 】

また、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜は、前記イオンビーム機能性透過膜が、空洞が形成されたポーラス物質であることを特徴とする。

【 0 0 1 9 】

また、本発明に係るビームライン機器は、イオンビームが内部を通過する真空容器と、

チャンネルを有し、入射イオンの荷電分布が平衡状態を保つことができる厚みを有する前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、前記イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を調整する位置決めステージと、を有し、前記位置決めステージによって、イオンビームのビームライン中に前記イオンビーム機能性透過膜が配されるように、かつ、前記イオンビーム機能性透過膜のチャンネル軸が、前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整されることを特徴とする。

【0020】

また、本発明に係るビームライン機器は、前記イオンビーム機能性透過膜が結晶であり、前記位置決めステージによって、前記結晶における結晶軸が前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整することで、チャンネル軸を前記イオンビームの進行方向と実質的に平行とすることを特徴とする。

10

【0021】

また、本発明に係るビームライン機器は、前記結晶が単結晶であることを特徴とする。

【0022】

また、本発明に係るビームライン機器は、前記イオンビーム機能性透過膜が、空洞が形成されたポーラス物質からなる薄膜であることを特徴とする。

【0023】

また、本発明に係るビームライン機器は、ビームライン機器が加速器であることを特徴とする。

【0024】

また、本発明に係るビームライン機器は、ビームライン機器がストリッパであることを特徴とする。

20

【0025】

また、本発明に係るビームライン機器は、ビームライン機器がディグレーダーであることを特徴とする。

【0026】

また、本発明に係るビームライン機器は、ビームライン機器が電離箱であることを特徴とする。

【0027】

また、本発明に係るフィルター機器は、真空容器内で進行するイオンビームに含まれる不要分子を除去するフィルター機器であって、チャンネルを有し、入射イオンの荷電分布が平衡状態を保つことができる厚みを有する前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、前記イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を調整する位置決めステージと、を有し、前記位置決めステージによって、イオンビームのビームライン中に前記イオンビーム機能性透過膜が配されるように、かつ、前記イオンビーム機能性透過膜のチャンネル軸が、前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整されることを特徴とする。

30

【0028】

また、本発明に係るフィルター機器は、前記イオンビーム機能性透過膜が結晶であり、前記位置決めステージによって、前記結晶における結晶軸が前記イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整することで、チャンネル軸を前記イオンビームの進行方向と実質的に平行とすることを特徴とする。

40

【0029】

また、本発明に係るフィルター機器は、前記結晶が単結晶であることを特徴とする。

【0030】

また、本発明に係るフィルター機器は、前記イオンビーム機能性透過膜が、空洞が形成されたポーラス物質からなる薄膜であることを特徴とする。

【0031】

また、本発明に係るフィルター機器の調整方法は、イオンビームが内部を通過する真空容器と、チャンネルを有し、前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、前記

50

イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を調整する位置決めステージと、前記位置決めステージの下流側に配され、イオンビームを補足するファラデーカップと、前記ファラデーカップで補足されたイオンビームに基づく電流を計測する電流計測部と、を有するフィルター機器の調整方法であって、前記位置決めステージによってビームライン中に前記イオンビーム機能性透過膜が配されるようにし、前記電流計測部で計測される電流が最大となるように前記位置決めステージの姿勢を調整するステップと、を有することを特徴とする。

【0032】

また、本発明に係るフィルター機器の調整方法は、イオンビームが内部を通過する真空容器と、チャンネルを有し、前記真空容器内に配されるイオンビーム機能性透過膜と、前記イオンビーム機能性透過膜が取り付けられ、前記イオンビーム機能性透過膜の姿勢を調整する位置決めステージと、前記位置決めステージの下流側に配され、イオンビームを補足するファラデーカップと、前記ファラデーカップで補足されたイオンビームに基づく電流を計測する電流計測部と、を有するフィルター機器の調整方法であって、前記位置決めステージにおける前記イオンビーム機能性透過膜が配されていない位置に、イオンビームが通過するように配し、前記電流計測部で計測される電流が最大となるように前記位置決めステージの姿勢を調整する第1ステップと、前記第1ステップの後、前記位置決めステージによってビームライン中に前記イオンビーム機能性透過膜が配されるようにし、前記電流計測部で計測される電流が最大となるように前記位置決めステージの姿勢を調整する第2ステップと、を有することを特徴とする。

【0033】

また、本発明に係るフィルター機器の調整方法は、前記第2ステップの後、前記ファラデーカップをビームラインから外す第3ステップを有することを特徴とする。

【0034】

本発明は、具体的には、FMIT（イオンビーム機能性透過膜）として結晶等の薄膜を用い、適正な厚みを持つ結晶等の薄膜に、イオンを適正な入射角度で透過させるときに発生する「イオンチャネリング透過（Ion Channeling Transmission：ICT）」なる現象を利用し、ストリッパーやディグレーダーの機能を保ちつつ大角散乱によるイオン透過率の低下及びエミッタンスの増加を著しく抑える方法である。従来使用される透過膜は非晶質の薄膜でありICTは発生しない。以後、ICTが発生しない状況を、イオンランダム透過（Ion Random Transmission：IRT）と呼ぶ。

【発明の効果】

【0035】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜を用いたビームライン機器、イオンビーム機能性透過膜を用いたフィルター機器、フィルター機器の調整方法は、イオンビーム機能性透過膜の結晶における結晶面がイオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整されており、イオンビームの透過率を高めることが可能となり、エミッタンスの改善を図ることができる。

【図面の簡単な説明】

【0036】

【図1】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜が適用される機器構成例を示す図である。

【図2】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜の原理を説明する図である。

【図3】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜が複数枚搭載されるマルチ薄膜システム210の構成を説明する図である。

【図4】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜が1枚搭載されるシングル薄膜システム320の構成を説明する図である。

【図5】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜をタンデム加速器10に適用した例を示す図である。

【図6】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜をポストストリッパー30に

10

20

30

40

50

適用した例を示す図である。

【図 7】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜をディグレーダー 50 に適用した例を示す図である。

【図 8】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜を電離箱 70 に適用した例を示す図である。

【図 9】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜の ICT 状態の実施例を示す図である。

【図 10】本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜による、特に AMS の妨害核種分別性能向上効果の実施例を説明する図である。

【図 11】本発明の実施形態に係る小型 AMS システム 500 の概要構成を説明する図である。

【図 12】本発明の実施形態に係るフィルター機器 600 を構成するマルチ薄膜システム 610 の構成を説明する図である。

【図 13】本発明の実施形態に係るフィルター機器 600 及びこれを制御するフィルター機器制御装置 650 を示す図である。

【図 14】ポーラス物質の構造を説明する模式図である。

【図 15】測定目的核種検出器 580 の詳細構成を説明する図である。

【図 16】静電偏向器への電圧 V_0 に対する規格化計数の変化を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0037】

以下、本発明の実施の形態を図面を参照しつつ説明する。図 1 は本発明の実施形態に係るイオンビーム機能性透過膜が適用される機器構成例を示す図である。本発明に係るイオンビーム機能性透過膜が適用される機器においては、一方向に進行するイオンビームがビームラインを通過するものである。また、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜としては結晶等の薄膜が用いられる。

【0038】

なお、図において、z 方向は機器の内部を通過するイオンビームが進行する方向である。また、y 方向は鉛直上方であり、x 方向は y 方向及び z 方向の双方と直交する方向として定義される。

【0039】

また、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜が複数枚搭載されるシステムをマルチ薄膜システム 210 と称し、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜が 1 枚搭載されるシステムをシングル薄膜システム 320 と称する。

【0040】

図 1 は、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜を、タンデム加速器 10 の荷電ストリッパ 11 に適用した場合を示すものであり、より具体的には図 5 に示すタンデム加速器 10 の要部模式図である。

【0041】

不図示のイオン源で生成した負イオンはタンデム加速器 10 に導かれ、図 5 に示すようにターミナル 5 に向かって加速させる。このターミナル 5 には、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜が複数枚搭載されているマルチ薄膜システム 210 が設置される。

【0042】

本発明では、ターミナル 5 に設置したマルチ薄膜システム 210 (図 3) のイオンビーム機能性透過膜に入射させ、ICT (ICT: Ion Channeling Transmission、イオンチャネリング透過)状態を作ることによってストリッパの機能を保持しつつ、大角散乱を抑制することによるイオン透過率及びエミッタンスの改善を図る。

【0043】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜を、ポストストリッパ 30 に適用した場合、図 6 に示すように加速器で加速したイオンをポストストリッパ部に導き、ここに設置したマルチ薄膜システム 210 (図 3) のイオンビーム機能性透過膜に入射させ、ICT 状

20

30

40

50

態を作ることによってストリッパーの機能を保持しつつ大角散乱を抑制することによるイオン透過率及びエミッタンスの改善を図る。

【0044】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜を、ディグレーダー50に適用した場合、分析電磁石で価数選別されたイオンを、図7に示すようにディグレーダー部に導き、ここに設置したマルチ薄膜システム210(図3)のイオンビーム機能性透過膜に入射させ、ICT状態を作ることによってディグレーダーの機能を保持しつつ、AMSでの妨害核種分別の効率を格段に改善する。

【0045】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜を、例えば、ディグレーダーウィンドウに適用した場合、図8に示すようにイオンビームを加速器装置の末端部にあたる電離箱70の入射窓に導き、ここに設置したシングル薄膜システム320(図4)のイオンビーム機能性透過膜に入射させ、ICT状態を作ることによってディグレーダーの機能を保持しつつ、ディグレーダーウィンドウのイオン透過率及びエミッタンスを改善する。

【0046】

以上のような実施形態に対して、表1に示す結晶薄膜に入射するイオンのエネルギーに対応して定めた結晶薄膜の厚みの基準に従ってICT状態を作り、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の機能を保持するものである。表1は、本発明に使用できるイオンのエネルギー領域、これに対応する結晶薄膜の厚みの基準を示す数値表である。

【0047】

【表1】

本発明のイオンのエネルギー領域、これに対応する結晶薄膜の厚みの基準

入射イオン*の エネルギー領域	FMITの厚みの 下限の目安**	FMITの厚みの 上限の目安***
10 keV	1 nm ⁽¹⁾	25 nm
100 keV	数 nm ⁽²⁾	80 nm
1 MeV	数 nm ⁽²⁾	250 nm
10 MeV	数10 nm ⁽³⁾	2.5 μm
100 MeV	数100 nm ⁽³⁾	100 μm

本表では、FMITとしてSi単結晶薄膜を想定

* 本表ではイオン核種として¹⁰Bを想定

** 平衡荷電状態に到達する厚みを文献値を基に推定

*** FMIT通過中のエネルギー損失が入射エネルギーの10%に到達することに対応する厚みを数値計算コード(SRIM/TRIM)により算出
(チャネリング効果としてエネルギー損失効率がIRT状態の1/2であることを仮定。すなわち厚みはIRT状態に対しては記載数値の半分。)

(1) H. A. Synal, et al., Nucl. Instrum. Methods B 294 (2013) 349-352.

(2) M. Sarkar, et al., Phys. Rev. ST Accel. Beams 15 (2012) 100101.

(3) M. Imai, et al., Nucl. Instrum. Methods B 354 (2015) 172-176.

【0048】

ここで、ICT状態について、図2により詳しく説明する。図2は結晶の中を進むイオンを模式的に表したものである。

【0049】

結晶内の原子は、規則正しく列をなして並んでいるが、この原子列に沿った方向(以後、結晶軸方向と呼ぶ)から眺めると、各原子列の間に原子の存在しない大きな空間(以後、チャンネルと呼ぶ)が広がっていること分かる。

10

20

50

【 0 0 5 0 】

したがって、図 2 に示すように、イオンをほぼ結晶軸方向に入射すると、イオンは原子列に近づいたとしても緩やかに離れること（小角散乱）を繰り返しながらチャンネルを進行する。このような現象をイオンのチャネリングという。

【 0 0 5 1 】

特に結晶軸に沿ったチャネリングを軸チャネリング、結晶面に沿ったチャネリングを面チャネリングと呼ぶ。軸チャネリングの方がチャネリングの効果を得やすい。

【 0 0 5 2 】

以下、ICT 状態は断りのない限りイオンが軸チャネリングで結晶等の薄膜を透過する状態を指すが、面チャネリングによっても本発明を実現することができる。

10

【 0 0 5 3 】

チャネリングするイオンは結晶原子に衝突しても、その進行方向がチャンネルから大きく逸れることはない（チャネリング効果）。したがって、ICT 状態を作ることにより透過薄膜中での大角散乱を格段に抑えることができたため、透過薄膜の透過率の改善と、エミッタンス増加の抑制に結びつく。実際 ICT 状態が作られると透過薄膜の透過率は 10 倍程度以上になる（非特許文献 3）。

【 0 0 5 4 】

本発明は、以上のようなチャネリング現象を、イオンビーム装置のビームライン機器における、イオンビームが衝突する結晶等の薄膜で発現させ、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜となしたことが特徴点である。

20

【 0 0 5 5 】

より詳しくは、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜は、一方向に進行するイオンビームが通過するビームライン機器に用いられ、結晶からなるイオンビーム機能性透過膜であって、前記結晶の結晶面が前記イオンビームの進行方向と平行であることを特徴としている。さらに、前記結晶の結晶軸が前記イオンビームの進行方向と平行であるようにすると、軸チャネリングを発現させることができ、より効果が高い。

【 0 0 5 6 】

このような本発明に係るイオンビーム機能性透過膜によれば、各種機器において、イオンビームの透過率を高めることが可能となり、エミッタンスの改善を図ることができる。

【 0 0 5 7 】

なお、結晶等の薄膜の厚みが適切であれば、ICT 状態が作られていても、荷電ストリッパ 11、ポストストリッパ 30 やディグレーダー 50 等のイオンビーム機能性透過膜としての機能を持たせることができる。ICT 状態では、前述のようにイオンは結晶の原子列に近づいたり離れたたり（小角散乱）を繰り返しながらチャンネルを進行する。近づいたときイオンに束縛されている電子は、結晶の原子に衝突し、電子の損失・捕獲、イオン励起・脱励起等の素過程が発生する。結晶薄膜の厚みが表 1 に示す基準を満たせば、ICT 状態であっても、前記の素過程が繰り返されイオンビーム機能性透過膜の機能を持たせることができる。

30

【 0 0 5 8 】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜として用い得る結晶等の薄膜は、あらゆる元素で構成されたものでも使用可能である。この中でも、結晶薄膜としては SiC などの多結晶のものも用い得るが、単結晶薄膜はチャンネルの幅が大きく ICT 状態を作り出すうえで有利である。さらに、ケイ素（シリコン Si）の単結晶薄膜は、市販されており入手が容易であるだけでなく、結晶間隔の比較的信頼性が高いため ICT 状態を作り出すための結晶薄膜としては望ましい。結晶薄膜としては Si 単結晶薄膜が最も汎用性がある。

40

【 0 0 5 9 】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜として用いる結晶等の薄膜に入射できるイオンの核種としては任意のものとする事ができる。

【 0 0 6 0 】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の機能を保持するための結晶薄膜の厚みの基準

50

[表1参照]は、次のような考え方と方法で定められる。厚みの下限は、基本的には、入射イオンの荷電分布が平衡状態を保つことができる厚みである。厚みを原子一層分から増やすと、入射イオンの価数は、複数の価数に分かれ荷電分布を形成する。厚みをさらに増やすと荷電分布は厚みによらず一定となる。

【0061】

この平衡状態に到達する厚みは、非特許文献4の中で使用されている数値計算コード(ETACHA code等)で推定することができる。一例として、10MeVのホウ素Bをシリコン単結晶に入射する場合、厚みの下限は数十nmとなる。この厚みをさらに薄くすると非平衡状態となり、平均電荷が厚みに強く依存することや、特許文献1におけるコヒーレント共鳴励起の影響が強まるため、荷電分布の予測が複雑になり、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜として機能は期待できない。

10

【0062】

一方、厚みの上限は、入射イオンが透過薄膜を通過中に失うエネルギーが、イオンビームの利用目的において問題にならないほど小さい状態を保つことができる厚さである。チャネリング中のイオンは小角散乱に伴って、電子の損失・捕獲、励起・脱励起等の素過程を繰り返し、エネルギーを徐々に失っていく。これらの素過程の頻度は、厚みが増えると増加し、エネルギーが低下するだけでなく、エネルギーのばらつきが拡大する(エネルギー・ストラグリングの増大)。

【0063】

エネルギーのばらつきは、イオンビームの偏向・収束でイオン数の損失をもたらすため、抑制されることが望ましい。厚みが上限を超えエネルギーの低下とばらつきが目的に合わないほど大きくなると、もはや本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の機能を維持しているとは言えなくなる。厚みに対するエネルギーの低下とばらつきは、数値計算コード(SRIM/TRIM等)で推定することができる。

20

【0064】

したがって、その数値計算コードにより厚みの上限の目安が得られる。表1には、当発明で規定するイオンビーム機能性透過膜への入射イオンのエネルギー領域と、これに対応する厚みの上限と下限を記載した。上限としては、例として、イオンビーム機能性透過膜通過中のエネルギー損失が入射エネルギーの10%に到達することに対応する厚みを数値計算コード(SRIM/TRIM)により算出したものである。本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の厚みをこの上限と下限の間に取りることにより、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の機能を持たせることができる。

30

【0065】

ICT状態を作るためには、結晶軸に対するイオンの入射角度を、チャネリングの臨界角と呼ばれる角度よりも小さな角度にする必要がある。その臨界角φ_c文字は、近似的には下式(1)により表すことができる。

【0066】

【数1】

$$\varphi_c \approx \sqrt{\frac{Z_1 Z_2 e^2}{2\pi\epsilon_0 E d}} \quad (1),$$

【0067】

ここで、Z₁とZ₂はそれぞれ入射および透過薄膜の原子番号、eは電気素量、Eは入射イオンのエネルギー、dは原子列の原子間隔である。臨界角は、入射イオンの元素とエネルギー、透過薄膜の元素によって与えられる(非特許文献2)。一例として、10MeVのホウ素Bをシリコン単結晶(d=5.4[オングストローム])に入射する場合、φ_c=±0.49°となる。このようにして入射角度の基準が臨界角をもってあらかじめ定められる。

50

【 0 0 6 8 】

イオンの入射角度をチャネリングの臨界角以内に調節し I C T 状態を作るため、透過薄膜の角度、位置を図 3 や図 4 に示す結晶等の薄膜を支持する薄膜システムを使用し、その位置決めステージにより薄膜の角度、位置 x, y を精密に調節する。

【 0 0 6 9 】

荷電ストリッパ 1 1、ポストストリッパ 3 0、ディグレーダー 5 0 に対しては、使用目的上、結晶等の薄膜を支持する円盤を真空中において自由に動かすことができるようにする。図 3 に示すマルチ薄膜システム 2 1 0 ように、結晶等の薄膜を予備として複数備え、その場で交換できる機能をもつ構造にすることが好ましい。

【 0 0 7 0 】

具体的には、リボルバー型のマルチ薄膜ホルダ 2 1 4 に複数の薄膜アセンブリ 2 1 3 (薄膜 2 1 2 とフレーム 2 1 1 からなる) を装着した状態でビームラインに組み込み、長時間のビーム透過により結晶等の薄膜が劣化した際、例えば、図示時計回り方向にマルチ薄膜ホルダ 2 1 4 を順次回転させ未使用の結晶薄膜を使用するというものである。

【 0 0 7 1 】

図 3 において、マルチ薄膜用位置決めステージ 2 1 5 は基台部 2 3 0 を有している。第 1 軸 2 3 1 は基台部 2 3 0 に対して回転可能とされている。また、第 1 軸 2 3 1 には枠体 2 3 5 が取り付けられており、基台部 2 3 0 に対して第 1 軸 2 3 1 が \pm 方向に回転することにより、枠体 2 3 5 も \pm 方向に回転することができるようになっている。

【 0 0 7 2 】

また、枠体 2 3 5 には、第 2 軸 2 3 2 が枠体 2 3 5 に対して回転可能に配されている。第 2 軸 2 3 2 にはマルチ薄膜ホルダ 2 1 4 が取り付けられており、第 2 軸 2 3 2 の \pm 方向の回転に伴い、マルチ薄膜ホルダ 2 1 4 も \pm 方向に回転することができるようになっている。

【 0 0 7 3 】

I C T 状態は、上記のようなマルチ薄膜用位置決めステージ 2 1 5 を用いて結晶等の薄膜の角度及び位置を調整して作り上げ、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜となす。荷電ストリッパ 1 1 及びポストストリッパ 3 0 では、イオンビーム強度が比較的に強いいため、結晶等の薄膜の劣化が比較的早まる。したがって、予備の薄膜をその場で交換できる機能を備えておくことは重要である。特に、前タンデム型加速器 1 0 の荷電ストリッパ 1 1 については、薄膜システムの取外しが加速器タンク内での手作業になり時間がかかるため、その重要性は一層高い。

【 0 0 7 4 】

電離箱 7 0 におけるディグレーダーウィンドウ 7 1 に対しては、使用目的上、図 4 に示すように、結晶等の薄膜を支持する円盤自体が真空を封じる真空フランジ 1 2 等も兼ねることがある。

【 0 0 7 5 】

このため、構造上、薄膜システムに予備となる結晶等の薄膜を備えることは難しい。したがって、ディグレーダーウィンドウ 7 1 用のシングル薄膜システム 3 2 0 は、単一の結晶等の薄膜を使用することとなる。この構成は、薄膜アセンブリ 2 1 3、シングル薄膜ホルダ 3 2 1、シングル薄膜用位置決めステージ 3 2 2 からなる。多くの場合、ディグレーダーウィンドウ 7 1 をビームラインから取り外すことは比較的容易であるため、予備の薄膜をその場で交換する機能をもたせる必要性は低い。

【 0 0 7 6 】

図 4 において、シングル薄膜用位置決めステージ 3 2 2 は基台部 3 3 0 を有している。第 1 軸 3 3 1 は基台部 3 3 0 に対して回転可能とされている。また、第 1 軸 3 3 1 には枠体 3 3 5 が取り付けられており、基台部 3 3 0 に対して第 1 軸 3 3 1 が \pm 方向に回転することにより、枠体 3 3 5 も \pm 方向に回転することができるようになっている。

【 0 0 7 7 】

また、枠体 3 3 5 には、第 2 軸 3 3 2 が枠体 3 3 5 に対して回転可能に配されている。

10

20

30

40

50

第 2 軸 3 3 2 にはシングル薄膜ホルダ 3 2 1 が取り付けられており、第 2 軸 3 3 2 の ± 方向の回転に伴い、シングル薄膜ホルダ 3 2 1 も ± 方向に回転することができるようになってい

【 0 0 7 8 】

本発明を実施するための最小単位となる前記基本機器構成は、図 1 に示すように、図 3 や図 4 で示した薄膜システムを中心に置き、磁気四重極 (Magnetic Quadrupole) あるいは電気四重極 (Electric Quadrupole) によるビーム収束レンズ (以後、単にレンズ) 3 をビーム軸に沿って配置したものである。

【 0 0 7 9 】

前記のように I C T 状態の生成には入射角度の調節が必要である。イオンビーム中のできるだけ多くのイオンに対して I C T 状態を作るためには、結晶等の薄膜の入射前に平行ビームを作ることが重要になる。薄膜システムの上流側に置くレンズは平行ビームを作るためである。下流側に置くレンズは、イオンビームの利用目的に応じてビームの収束する必要性があれば用いるものである。この下流側レンズは、荷電ストリッパ 1 1、ポストストリッパ 3 0、ディグレーダー 5 0 に対しては有用である。一方、電離箱 7 0 のディグレーダーウィンドウ 7 1 に対して必要性は低い。

【 0 0 8 0 】

本発明を、タンデム型加速器 1 0 の荷電ストリッパ 1 1 に適用した場合を図 5 に示す。マルチ薄膜システム 2 1 0 はタンデム型加速器 1 0 のターミナル 5 に取り付け、レンズ 3 はタンデム型加速器 1 0 の出入口に設置する。薄膜システムは図 3 に示したマルチ薄膜システム 2 1 0 である。レンズでの質量分別は、電気四重極レンズでは生じないため、特に複数の同位体をほぼ同時に加速器に入射させる必要がある A M S において有利となる。入口のレンズを調節し平行ビームにしてイオンを結晶等の薄膜に入射し、I C T 状態を作る。

【 0 0 8 1 】

本発明をポストストリッパ 3 0 に適用した場合を図 6 に示す。図 1 の構成はほぼそのままの形でポストストリッパ部に組み入れる。この場合、マルチ薄膜システム 2 1 0 を使用する。レンズ 3 は前記と同様に電気四重極レンズの方が有利となる場合がある。いずれにしてもレンズの効果はイオンの荷電数に依存するため、どの荷電数のイオンに対して I C T 状態を作るのかを予め定めておく必要がある。

【 0 0 8 2 】

本発明をディグレーダー 5 0 に適用した場合を図 7 に示す。図 1 の基本構成をほぼ同じ形でディグレーダー部に組み入れる。ディグレーダー 5 0 は、A M S の希少核種用ビームライン、すなわち複数の同位体が混在しないビームラインに用いるため、比較的取り扱いやすい磁気四重極レンズの使用が可能となる。この A M S におけるディグレーダーを使用した場合の実施例については後述する。

【 0 0 8 3 】

本発明を電離箱 7 0 のディグレーダーウィンドウ 7 1 に適用した場合を図 8 に示す。基本構成は、シングル薄膜システム 3 2 0、イオンビームの上流側のレンズ 3 で構成される。シングル薄膜システム 3 2 0 による結晶等の薄膜の位置及び角度の調節は、電離箱 7 0 ごと動く仕組みとなる。上流側の真空容器との間に生じる力学的な歪はベローズで吸収する。

[実施例 1]

I C T 状態を作り上げる実施例を図 9 に示す。本実施例は、同図左側に描いた実験系を用いて、7 . 0 M e V の $^{10}\text{B}^{2+}$ をピンホールに通して S i 結晶薄膜へ入射して行ったものである。I C T と I R T のそれぞれの状態に対して、結晶薄膜を透過するイオンを静電偏向器で振り分けながら電離箱での収量を測定し、それより荷電分布を求めた。なお、厚さ 2 0 0 n m の S i 結晶薄膜の厚みは、表 1 に示した厚みの基準を満たしており、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の機能を果たすことが保証される。実際、同図から求められる平均電荷は 4 . 0 程度であり、文献から得られる値に等しい。すなわち、荷電分布

は平衡状態に達し、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の機能を有する証となる。同図より、荷電数4+でのICT状態の透過量は、IRT状態の透過量の6倍に達することが分かる。これは、IRT状態よりもICT状態に対して、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜でのイオンの大角散乱が大幅に低減していることの証左となる。したがって、本発明により、イオンビーム機能性透過膜の機能を保持しつつイオンビーム機能性透過膜の透過率とエミッタンスが格段の改善されることが明らかになった。

[実施例2]

AMSのディグレーダー50に適用した場合の実施例を図10に示す。前記のようにAMSでは分析目的核種と等しい質量をもつ安定した同重体等の核種が存在する場合、例えば、 ^{10}Be に対する ^{10}B 、 ^{36}Cl に対する ^{36}S 、 ^{53}Mn に対する ^{53}Cr 等、これらは目的核種の測定を妨害する核種(妨害核種)となり、妨害核種分別が主要な技術課題となっている。

【0084】

ディグレーダー50は一つの分別技術として次のように用いられる。分析目的核種と妨害核種の両者を薄膜に入射すると、阻止能の原子番号依存性により、双方のどちらかのエネルギーが比較的大きく損失し、両者のエネルギーの間に差が生じる。したがって、その差を基に両者を後段のエネルギー分析器で分別する。

【0085】

図10は、ICT状態(本発明によるイオンビーム機能性透過膜使用)とIRT状態でのディグレーダー50による同重体分別の実施例を示したものである。この実施例では、分析目的核種に ^{10}Be 、同重体に ^{10}B を充てている。なお本実施例は、前図9に描いた実験系を用いて得たものである。ただし、実際の入射イオンは $^{10}\text{Be}^{2+}$ ではなくその安定同位体の $^9\text{Be}^{2+}$ であり、得られた $^9\text{Be}^{2+}$ 荷電分布の横軸(電場)に係数をかけ、 $^{10}\text{Be}^{2+}$ の荷電分布になるよう理論的に補正している。

【0086】

図10に示すように ^{10}B の荷電分布は ^{10}Be の荷電分布よりも低い電場の側に計数のピークを持つ。これは、 ^{10}B のほうが ^{10}Be よりも原子番号が一つ大きいこと、結晶薄膜中のエネルギー損失が ^{10}B で大きくなることに起因する。すなわち、電離箱に入射するイオンのエネルギーは ^{10}Be に比べ ^{10}B がやや低くなる。図10を見ると、電場が $1.0 \sim 1.5 \text{ kV/cm}$ の範囲でICT、IRT状態ともに、 ^{10}Be の計数が ^{10}B の計数を上回っており、この電場の範囲を用いると同重体分別の効率が高い。ICT状態とIRT状態の差を数値的に評価するために、ディグレーダー50の効果を、次の二つのように規定する。

(1) Be の計数率に対して B の計数率がどれだけ抑えられるか。

(2) Be 自体の計数率をどれだけ稼ぐことができるか。

上記(1)の指標として Be/B を与えることができ、 Be/B が大きいほど有利である。一方上記(2)の指標としては Be の計数自身と与えることができる。実際には、(1)と(2)の両方が同時に大きくなれば効果が高いため、両者を掛け合わせた指標として Be^2/B と置くことができる。この指標についてICTとIRTの二つの状態についてまとめたものが図10の最下段である。この図より、ディグレーダーの効果は、ICT状態の方がIRT状態に比べ約2.6倍程度高いことが分かる。ちなみに、指標(1)の Be/B 自体は、両者で差は大きくないが、ICT状態の指標(2)の Be 計数自体が格段に大きい分だけディグレーダー50の効果が高くなっている。

【0087】

以上のように、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜の機能を保持しつつ透過率を数倍以上に改善できること、また、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜が用いられるAMSにおけるディグレーダーの効果数を数倍以上に向上できることを示した。これは、加速器装置の小型化、加速器装置作業効率の改善の他、AMSでの測定精度の向上をもたらす。特に荷電ストリッパに適用した場合は、AMSの小型化で指標となる 100 keV 程度の低エネルギーのイオンに対しても、荷電ストリッパ機能維持とビームラインの高真

空維持との両立を可能にし、AMS装置の劇的な小型化に結びつく。

【0088】

以上、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜及びイオンビーム機能性透過膜の調整方法は、一方向に進行するイオンビームが通過するビームライン機器に用いられ、結晶からなるイオンビーム機能性透過膜であって、前記結晶の結晶面が前記イオンビームの進行方向と平行であるので、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜によれば、各種機器において、イオンビームの透過率を高めることが可能となり、エミッタンスの改善を図ることができる。

【0089】

さらに、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜のイオン透過率及びエミッタンスがICT状態により格段に改善することにより、次の(a)~(b)に挙げる効果が得られる。

(a) 荷電ストリッパー及びポストストリッパーを透過した後のイオンビーム強度の減衰が抑えられるため、加速器装置の利用にかかわるすべての作業、分析、測定 of 各効率が高まる。

(b) 前記AMSでは、ディグレーダーの妨害核種分別性能が高まるため、分析精度を向上させることができる。電離箱への入射用ウィンドウを兼ねたディグレーダーに適用した場合、ウィンドウでのイオンの散乱が大幅に抑えられ、電離箱のイオン検出領域に入るイオン数が増加するため、電離箱から得られるエネルギースペクトルのピークプロファイルが先鋭になる。これも妨害核種分別性能の向上に繋がる。

(c) 特に前記荷電ストリッパーに適用した場合、本発明により、AMSの小型化で指標となる数十keV~百keV程度の低エネルギーのイオンに対しても、荷電ストリッパー機能維持とビームラインの高真空維持との両立が可能となる。これは、従来、AMS装置の小型化に向けた技術開発において障害になっていた、ガスを用いたストリッパーの機能を維持しようとするビームラインにガス漏れが著しくなり妨害核種が増える問題が解消する。したがって、本発明は、AMS装置の劇的な小型化に結びつく。

【0090】

次に、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜を用いたビームライン機器の一種である小型AMSシステムのより具体的な構成について説明する。このような小型AMSシステムは、加速器質量分析(Accelerator Mass Spectrometry)法によって、試料に含まれる極微量の同位体を計数することで、試料中の同位体比を測定するものである。本発明に係る小型AMSシステムにおいては、イオンビーム機能性透過膜を、質量分析を妨害する不要分子の除去手段として利用することで、従来の加速器より小型化を図ったことが大きな特徴点となっている。ここで、本発明に係る小型AMSシステムで用いる、上記のような不要分子除去手段をフィルター機器と称することとする。

【0091】

「小型AMSシステム」に含まれるアルファベットの「A」の文字は、「Accelerator」(加速器)の略ではあるが、本明細書で言う「小型AMSシステム」には、一般通念上の加速器や加速装置といった構成は含まれていない。ただし、本明細書に係る「小型AMSシステム」の負イオン源510の引き出し電極部(不図示)には、イオンを加速する構成は含まれる。また、本明細書に係る「小型AMSシステム」は、ビームライン機器に包含される概念である。以上から、本明細書で言う「小型AMSシステム」は、負イオン源510から取り出された後のイオンが、加速器や加速装置で加速されることなく、質量分析を行うことが可能な機器である、とも定義することができる。「小型AMSシステム」の「小型」は、上記のように加速器や加速装置が不要で、機器構成を小型化することが可能であることに由来している。

【0092】

本発明に係る小型AMSシステムは、タンデム加速器を取り除いたイオンエネルギー50keV程度のものである。加速器において、50keV程度のイオンエネルギーに対する荷電変換用および妨害分子(分析に不要な不要分子)の除去の機能は、ガストリッパ

ーが検討されてきている。しかし、イオンエネルギーが低くなると、イオンから電子を剥ぎ取る確率を高める必要性から、ガストリッパの機能を保持するためのガス量は多くなる。そうすると、ビームラインのガス圧が高まり、イオンの散乱頻度が高まるため、測定限界が悪化する。つまり、例えば、タンデム型加速器において用いられているようなガストリッパを小型AMSシステムでも用いることは、妨害分子除去維持と測定限界維持を両立させることが困難であった。

【0093】

そこで、本発明に係る小型AMSシステム500においては、ガスを用いず固体を用いる妨害分子(不要分子)の除去手段として機能するフィルター機器600を用いる構成を採用する。ここで、フィルター機器600は、ガストリッパと同様に、妨害分子(不要分子)の電子を剥ぎ取り分子の解離を促すものとして機能するものである。図11は本発明に係る小型AMSシステム500の概要構成を説明する図であり、小型AMSシステム500を鳥瞰的に見た図である。

【0094】

本発明に係る小型AMSシステム500は、イオンビームが進行する順で見て、主として、負イオン源510、入射電磁石520、フィルター機器600、分析電磁石560、安定核種検出器565、エネルギー分析器570、測定目的核種検出器580から構成されている。また、各構成は真空容器の配管によって接続されている。

【0095】

従来のタンデム型加速器においては、図11におけるフィルター機器600の位置にガストリッパが置かれていた(例えば、米国特許公報8791410号参照)。これに対して、本発明に係る小型AMSシステム500では、ガストリッパの代わりにフィルター機器600が配置され、測定目的核種とほぼ同じ質量の妨害分子を、フィルター機器600によって解離し除去の準備を行う。

【0096】

フィルター機器600は、概略、マルチ薄膜システム610(或いは、シングル薄膜システム)とファラデーカップ645と、これらを収めた真空容器604とから構成される。また、薄膜システムで用いる結晶がイオンビームに対して脆弱であり、交換頻度が高く見積もられる場合には、薄膜システムとして、マルチ薄膜システム610を用いることが好ましい。また、薄膜システムで用いる結晶としては、単結晶、多結晶などの結晶薄膜、或いは、結晶薄膜又は非晶質の薄膜に空洞が形成されたポーラス物質からなる薄膜(本明細書ではこのような薄膜を「ポーラス薄膜」と言う。)を用いることができる。

【0097】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜に用い得る物質は、チャンネル(ビームラインを構成するイオンの通路)を有する物質であるということができる。チャンネルを有する物質におけるイオンの通路を「チャンネル」と称することもできる。このようなチャンネルを有する物質としては、単結晶、多結晶などの結晶、或いは、結晶薄膜又は非晶質の薄膜に空洞が形成されたポーラス物質である。

【0098】

チャンネルを有する物質が結晶の場合では、結晶における結晶面と平行な軸、又は結晶の結晶軸と平行な軸をチャンネル軸ということができる。また、チャンネルを有する物質がポーラス物質の場合では、ポーラス物質に形成された空洞の形状を略円柱状と捉えたとすると、当該円柱の円柱軸と平行な軸ということができる。

【0099】

なお、結晶質のポーラス物質においては、前記空洞の内空表面の粗さをnmスケール未満にし、イオンの入射角をチャネリングの臨界角未満にした場合、表面チャネリングが顕著に現れ、表面での散乱は鏡面反射が主となる。したがって、この場合、非晶質の薄膜に空洞が形成されたポーラス物質に比べて、イオンの大角散乱が抑えられビーム透過率が高まりやすい。ただし、後者のポーラス物質では表面粗さの制限が緩まるため、後者のポーラス物質には製造上のハードルが低い、というメリットがある。

10

20

30

40

50

【0100】

本発明に係るイオンビーム機能性透過膜を用いたビームライン機器、フィルター機器等においては、イオンビーム機能性透過膜が有するチャンネルを、一方向に進行するビームラインが通過するように調整されてなることが特徴点となっている。

【0101】

以下、小型AMSシステム500に用いる本発明に係るフィルター機器600についてより詳細に説明する。図12は本発明の実施形態に係るフィルター機器600を構成するマルチ薄膜システム610の構成を説明する図であり、イオンビームの進行方向でマルチ薄膜システム610を見た図である。また、図13は本発明の実施形態に係るフィルター機器600及びこれを制御するフィルター機器制御装置650を示す図である。図13において、フィルター機器600の構成は、概略、図11におけるA-A'断面を示すものである。

10

【0102】

フィルター機器600を構成するマルチ薄膜システム610においては、結晶等の薄膜やポーラス物質の薄膜などの結晶を支持する円盤状のマルチ薄膜ホルダ614を真空中において、不図示の駆動力により動かすことができるようにする。マルチ薄膜システム610は、結晶を予備として複数備えており、真空容器604を空けることなく、ビームラインが通過する結晶を交換できる機能を有し、好ましい。

【0103】

0を中心として回転するリボルバー型のマルチ薄膜ホルダ614には、複数の薄膜アセンブリ613(結晶612と、この結晶612を保持する枠体であるフレーム611とからなる)を装着した状態で真空容器604内に組み込む。マルチ薄膜システム610においては、マルチ薄膜ホルダ614の複数の結晶612のうちの一つにはイオンビームが透過される形で運用され、長時間のビーム透過により結晶612が劣化した際、0を通り紙面に対して垂直な軸を回転軸としてマルチ薄膜ホルダ614を順次回転させ、次に未使用の結晶を使用するというものである。

20

【0104】

フィルター機器600を制御するフィルター機器制御装置650における演算部660は、演算を実行するCPUや、このCPUのワークエリアとなる書き換え可能な記憶手段であるRAMや、基本的なプログラムが書き込まれている不揮発性の記憶手段であるROMや、書き換え可能で不揮発性のフラッシュメモリーや、インターフェイス手段である入出力部などを有するマイクロコンピュータで構成することができる。

30

【0105】

ホルダ回転制御部673は、上記のような演算部660と通信可能に構成されており、演算部660からの指令に基づいて、マルチ薄膜システム610におけるマルチ薄膜ホルダ614の回転の制御を行うようになっている。

【0106】

マルチ薄膜用位置決めステージ615は基台部630と、この基台部630が挿通される第1軸631とを有している。第1軸631は、不図示の駆動機構により基台部630に対して、1点鎖線を中心として方向に回転可能とされている。また、第1軸631には枠体635が取り付けられており、基台部630に対して第1軸631が±方向に回転することにより、枠体635も±方向に回転することができるようになっている。第1軸回転制御部671は、演算部660と通信可能に構成されており、演算部660からの指令に基づいて、第1軸631の回転の制御を行うようになっている。

40

【0107】

また、枠体635には、第2軸632が枠体635に対して、2点鎖線を中心として方向に回転可能に配されている。第2軸632は、不図示の駆動機構により回転されるようになっている。第2軸632にはマルチ薄膜ホルダ614が取り付けられており、第2軸632の±方向の回転に伴い、マルチ薄膜ホルダ614も±方向に回転することができるようになっている。第2軸回転制御部672は、演算部660と通信可能に構成さ

50

れており、演算部 6 6 0 からの指令に基づいて、第 2 軸 6 3 2 の回転の制御を行うようになっている。

【 0 1 0 8 】

なお、図 1 2 において、1 点鎖線と 2 点鎖線の交点が、ビームラインを通過するポイントであることが想定されている。

【 0 1 0 9 】

また、上記のような第 1 軸 6 3 1 は、基台部 6 3 0 に対して、x y 調整機構（不図示）によって、x 方向及び y 方向に変位可能とされている。x y 調整機構制御部 6 7 0 は、演算部 6 6 0 と通信可能に構成されており、演算部 6 6 0 からの指令に基づいて、当該 x y 調整機構の変位の制御を行うようになっている。

10

【 0 1 1 0 】

なお、マルチ薄膜用位置決めステージ 6 1 5 には、フレーム 6 1 1 中の結晶 6 1 2 を位置決めするための x y 調整機構（不図示）、第 1 軸 6 3 1、第 2 軸 6 3 2、マルチ薄膜ホルダ 6 1 4 などの全ての構成が含まれる。

【 0 1 1 1 】

マルチ薄膜用位置決めステージ 6 1 5 の下流側には、イオンビームを補足するファラデーカップ 6 4 5 が配されている。なお、本明細書においては、イオンビームの発生源側を上流側として定義する。ファラデーカップ 6 4 5 で補足されるイオンの数量・荷数に応じて電流が流れるようになっており、この電流は電流計測部 6 5 5 で計測される。電流計測部 6 5 5 で計測された電流データは、演算部 6 6 0 に対して送信され、演算部 6 6 0 で電流データに対する演算処理が行われるようになっている。

20

【 0 1 1 2 】

真空容器 6 0 4 の一部には基台部 6 4 0 が設けられており、この基台部 6 4 0 にはファラデーカップ支持部材 6 4 6 が設けられている。ファラデーカップ 6 4 5 は、このファラデーカップ支持部材 6 4 6 の端部に取り付けられており、不図示の変位機構により変位するように構成されている。ファラデーカップ 6 4 5 の変位機構（不図示）を制御する変位機構制御部 6 8 0 は、演算部 6 6 0 と通信可能に構成されており、演算部 6 6 0 からの指令に基づいて、ファラデーカップ 6 4 5 の変位の制御を行うようになっている。変位機構制御部 6 8 0 からの制御によりファラデーカップ 6 4 5 を変位させることで、ファラデーカップ 6 4 5 をビームライン中に配しイオンビームを補足するようなレイアウトとしたり、ファラデーカップ 6 4 5 をビームラインから外しイオンビームを補足しないレイアウトとしたりすることができるようになっている。

30

【 0 1 1 3 】

次に、本発明に係るフィルター機器 6 0 0 のマルチ薄膜システム 6 1 0 に搭載する結晶について説明する。これまで説明したように、マルチ薄膜システム 6 1 0 に搭載する結晶としては、単結晶、多結晶などの結晶薄膜、或いは、結晶薄膜又は非晶質の薄膜に空洞が形成されたポーラスからなる薄膜（「ポーラス薄膜」）を用いることができる。

【 0 1 1 4 】

本発明に係る小型 AMS システム 5 0 0 における分析で、通常の結晶薄膜を採用するか、又は、空洞が形成されたポーラス薄膜を採用するかを選択するにあたっては、コストやイオンビームによる電流値（熱負荷）との兼ね合いを検討する。

40

【 0 1 1 5 】

マルチ薄膜システム 6 1 0 に搭載される結晶に入射するイオンビームの時間平均電流が $1 \text{ nA} \sim 10 \text{ nA}$ を大きく超える場合、ポーラス薄膜を選択することが好ましい。イオンエネルギーが 50 keV 程度のイオンに適する膜厚 $20 \sim 30 \text{ nm}$ の結晶薄膜（例えば、結晶シリコンの場合）では、炭素測定でよく使用される時間平均電流 $1 \mu\text{A}$ の熱負荷は耐えられない。ポーラス薄膜は、そのような熱負荷に対処することが可能である。

【 0 1 1 6 】

次に、結晶薄膜とポーラス薄膜との相違について説明する。
（結晶薄膜について）

50

薄膜システムに配する結晶薄膜は、例えば結晶シリコンで30nm厚程度まで薄くする必要がある。結晶薄膜の角度調整機構の駆動範囲を狭くできる観点から、結晶薄膜の面法線は主要な結晶軸方向に一致することが望ましい。例えば、シリコン結晶を用いる場合、面の法線は $\langle 100 \rangle$ 、 $\langle 110 \rangle$ 等であることが好ましい。これにより、チャネリングを発現させるための調整角度範囲は、ビーム入射軸と面法線のなす角が0度付近に絞られる。結晶薄膜は、マルチ薄膜ホルダ614に装着し、これをさらにマルチ薄膜システム610本体に装着する。マルチ薄膜システム610はフィルター機器600の一部として、図に示したように真空容器604に配される。

(ポーラス薄膜について)

ポーラス薄膜は、イオンビームに対する耐久性を備えており、本発明に係るフィルター機器600に用いる薄膜として好ましい。図14はポーラス薄膜の構造を説明する模式図である。

【0117】

ポーラス薄膜は数ミクロンの孔が並んだ膜である。これらの孔がイオンの通路であるチャネルを形成する。図14(A)中では、孔形状を矩形にしたものを示しており、白抜き部がこれに相当する。ポーラス薄膜の膜面を見ると、図14(A)に示すようにチェッカーフラッグ様となる。この図のB-B'で切ったときの断面図を図14(B)に示す。

【0118】

膜断面の形状は、入射面部と出射面部において角度でくさび状になっている。イオンが図面左側から入ると飛行と壁面での散乱を繰り返して図面右側から出る。このような状況は、結晶のイオンチャネリングと類似し、疑似チャネリング効果と呼ばれている(Hajnal, et al., Nucl. Inst. and Meth. B 118 (1996) 617.)。

【0119】

特に、図14に示すように断面をくさび状にし、イオンP、Qを互いにほぼ平行で紙面左側からくさび角度と同じ角度で入射する状況を作ると、それらのイオンは、上面、下面で同じ回数だけ散乱を繰り返し紙面右側から同じ角度で出射する。

【0120】

このような状況設定により、ポーラス薄膜の実効的な開口率(porosity)が100%近くに高まる。また、孔壁面(ポーラス薄膜に形成された空洞の内空表面)の表面粗さが原子レベルでみて平坦(具体的には表面粗さが原子サイズのスケール(数nm程度未満)でみて平坦)であれば、入射角度をチャネリングの臨界角未満にすることで、壁面での散乱は、表面チャネリングによる鏡面散乱となる。

【0121】

これは、ポーラス薄膜での透過率を高める役割を果たす。実際、ポーラス薄膜の透過率に表面チャネリングが寄与することが知られている(前記のHajnalの論文)。このような斜め入射はイオンビームを受ける面積の増大につながるため、熱流束を低減できる。サイズの一例は次のとおりである。50keVのイオンに対する臨界角は約3°であり、インビームの発散角を考慮し、くさび角を2°と設定する。ポーラス薄膜の孔ピッチaを5μmとすると、くさび長は143μm、散乱回数を上面と下面の2回とすると膜厚は430μm程度となる。

【0122】

2回の散乱回数は、本発明に係るフィルター機器600の機能の保持に十分であると考えられる。このポーラス薄膜は、ビーム負荷に耐えるものであるため、マルチ薄膜システムの必要性は下がり、先に説明したシングル薄膜システム320の使用が可能となる。このようなポーラス薄膜はシングル薄膜ホルダ321に装着される。さらにシングル薄膜システム320の本体に装着する。シングル薄膜システム320は本発明に係るフィルター機器600の一部としても、真空容器604と共に用いることができる。

(結晶薄膜を採用した場合の調整方法)

次に、本発明に係るフィルター機器600に、結晶薄膜を採用しマルチ薄膜システム6

10を用いた場合におけるフィルター機器600の調整方法を説明する。

【0123】

まず、第1ステップとして、マルチ薄膜システム610のマルチ薄膜ホルダ614においては、結晶が装着されていないフレーム611を少なくとも1フレーム設けておき、真空容器604に収容する。また、変位機構制御部680によって、ファラデーカップ645の配置をイオンビームが通過する予定のビームライン上としておく。

【0124】

続いて、ホルダ回転制御部673によってマルチ薄膜ホルダ614を回転させて、イオンビームが通過するビームライン上に、先の結晶が装着されていないフレーム611が配されるように調整する。このときイオンビームの発生は停止させている。

10

【0125】

続いて、イオンビームを発生させて、結晶が装着されていないフレーム611中の空洞部に、イオンビームが通過するようにする。次に、xy調整機構制御部670で第1軸631のxy位置を調整しながら、ファラデーカップ645によってイオンビームを補足し、電流計測部655で電流データを取得して、これを演算部660に送信して記憶していく。そして、電流計測部655で計測される電流データが最大となる位置で、第1軸631の位置を固定する。第1軸631の位置が固定されると、イオンビームの発生を一旦停止する。

【0126】

第2ステップとして、ホルダ回転制御部673によって、マルチ薄膜ホルダ614を回

20

【0127】

続いて、イオンビームを発生させて、結晶612が装着されているフレーム611中の結晶612に、イオンビームが通過するようにする。次に、第1軸回転制御部671によって第1軸631で を回転させ、また、第2軸回転制御部672によって第2軸632で 回転させながら、ファラデーカップ645によってイオンビームを補足し、電流計測部655で電流データを取得して、これを演算部660に送信して記憶していく。そして、電流計測部655で計測される電流データが最大となる位置で、第1軸631の回転位置、及び、第2軸632の回転位置を固定する。各軸の回転位置が固定されると、イオンビームの発生を一旦停止し、本発明に係る小型AMSシステム500におけるフィルター機器600の調整が完了する。

30

【0128】

なお、本実施形態では、第1ステップで結晶が装着されていないフレーム611のxy位置を、第1軸631のxy移動で調整するようにしたが、もともと第1軸631のxy位置がビーム通過位置と一致しているとみなせる場合、例えば前回の調整から間もない状況などの場合、このような調整を省略することも可能である。

(ポーラス薄膜を用いた場合の調整方法)

本発明に係るフィルター機器600に、ポーラス薄膜を採用しマルチ薄膜システム610を用いた場合におけるフィルター機器600の調整方法を説明する。この調整方法は、結晶薄膜を採用した場合とある程度は同じである。異なるところは、シングル薄膜システムの使用が可能になること、また第2ステップである。

40

【0129】

ポーラス薄膜を用いた場合、フィルター機器600においては、マルチ薄膜システム610に代えて、先に説明したシングル薄膜システム320を用いることもできる。このとき、シングル薄膜システム320のシングル薄膜用位置決めステージ322にも、第1軸331のxy調整機構及びその制御部、第1軸331の回転角 の回転調整機構及びその制御部、第2軸332の回転角 回転調整機構及びその制御部を設けて、マルチ薄膜システム610と同様の調整をすることが好ましい。マルチ薄膜システム使用時の第1ステップで用いられる膜の取り付けられていない孔は、シングル薄膜システムでは、例えば、真

50

空フランジ 1 2 の中心から + y 方向に位置するボルト孔を流用すればよい。そのボルト孔は、図 8 の説明で述べたように、シングル薄膜システム 3 2 0 と電離箱等を接続する際にボルトを通して用いられるものであり、フィルター機器 6 0 0 での使用では、ボルトは通されておらず空洞になっている。このボルト孔を使用しない場合は、駆動調整に支障のない箇所に、ポーラス薄膜用の孔と同程度の径を持つ孔を設けておくことが望ましい。

【 0 1 3 0 】

次に第 2 ステップでは、第 1 ステップで使用した、例えば、ボルト孔の孔位置と真空フランジ 1 2 の中心の距離、すなわち孔位置半径だけ第 1 軸 3 3 1 を y 方向に押し込む。これにより、ビームライン上に、フランジ 1 2 の中心に装着されたポーラス薄膜が配されることになる。そしてイオンビームを発生させて、ポーラス薄膜に、イオンビームが通過するようにする。

【 0 1 3 1 】

以下の調整方法の説明では、ポーラス薄膜を図 1 4 の方位のまま、図 1 3 のようにイオンビームが左から入射する系に配置した場合を想定する。すなわち、図 1 4 のチャンネル壁断面のくさびの角度、すなわちテーパ状開口の角度 の回転軸と、図 1 3 の角度 の回転軸は平行であるものとする。

【 0 1 3 2 】

次に、第 1 軸回転制御部 6 7 1 によって第 1 軸 6 3 1 で 回転させ、ファラデーカップ 6 4 5 によってイオンビームを補足し、電流計測部 6 5 5 で電流データを取得して、これを演算部 6 6 0 に送信して記憶していく。そして、電流計測部 6 5 5 で計測される電流データが最大となる位置で、第 1 軸 6 3 1 の 回転位置を固定する。

【 0 1 3 3 】

回転も、 回転と似たように、第 2 軸回転制御部 6 7 2 によって第 2 軸 6 3 2 で、図 1 3 の 回転方向に沿って回転させながら、電流計測部 6 5 5 で電流データを取得していく。ただし、 回転の場合、主要な電流ピークが二つ現れる。すなわち、ある角度 でピークが現れた後、ある角度を経るともう一つのピークが現れる。これは、図 1 4 で示したポーラス薄膜断面のイオン入出側に設けている「チャンネル壁断面のテーパ状開口部」の幾何学的な効果による。この効果により、図 1 4 で図示しているように、このテーパ面に平行に入射したイオンが壁面で反射し出射するという疑似チャネリングが生じるとともに、実質的な開口率が高まるため、通過するイオンが増加し、上記の一つのピークを形成する。もう一つのピークは、ポーラス薄膜内部の幅 a の平行チャンネルのチャンネル軸と平行にイオンが入射し、壁面にほとんど接すること無しでポーラス膜を透過する寄与である。両者のピークをもたらす角度の差は、チャンネル壁断面のくさびの角度、すなわちテーパ状開口の角度 に一致する。上記で想定した、ポーラス薄膜の配位では、一つ目に出てくる電流ピークを与える角度が、目的とする疑似チャネリングをもたらす角度であり、ここで固定する。このピーク電流の大きさは、チャンネル壁面での散乱が表面チャネリングによる鏡面反射が起きる場合、もう一つのピークの大きさを超え、最大となり得る。かくして、ポーラス薄膜を用いた場合の、本発明に係る小型 A M S システム 5 0 0 におけるフィルター機器 6 0 0 の調整が完了する。

【 0 1 3 4 】

以上のような知見を踏まえ、本発明の範疇には、イオンビーム機能性透過膜（例えば、ポーラス薄膜）のチャンネル軸が、イオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整される場合も含まれるものと定義する。

（同重体分別の実証結果）

次に、シングル薄膜システム 3 2 0 を用いたフィルター機器 6 0 0 を、測定目的核種検出器 5 8 0 に適用した本発明の実証結果について説明する。図 1 5 は測定目的核種検出器 5 8 0 の詳細構成を説明する図である。図 1 6 は静電偏向器への電圧 V_0 に対する規格化計数の変化を示す図である。

【 0 1 3 5 】

加速器質量分析では分析目的核種と等しい質量をもつ安定した同重体等の核種が存在す

10

20

30

40

50

る場合、例えば、 ^{10}Be に対する ^{10}B 、 ^{36}Cl に対する ^{36}S 、 ^{53}Mn に対する ^{53}Cr 等、これらは目的核種の測定を妨害する核種（妨害核種）となり、妨害核種分別（以下、同重体分別）が主要な技術課題となっている。

【0136】

この技術の一つとしてディグレーダー膜を用いた方法がある。通常、ディグレーダー膜は分析電磁石と静電偏向器の間に設置され、阻止能の原子番号依存性より目的核種と同重体の間にエネルギーの差を作り、両者を分別する。この方法は、低エネルギーのためアプソーパーが使用できない場合や、同重体入射率が電離箱の限界（5 kHz 程度超）などの場合に効果的であるとされている。

【0137】

従来は、ディグレーダー膜として非晶質材料（代表的には窒化ケイ素）が用いられてきた。本発明に係るフィルター機器600では単結晶薄膜によるイオンチャネリングを利用する技術である。イオンチャネリングの利点は二つあり、一つは、ビーム発散の抑制、もう一つは十分な阻止能である。これらを活かすことで、従来用いることができなかった、目的核種と妨害核種のエネルギー差を比較的大きくできる $1\ \mu\text{m}$ 程度の膜を用いてもチャネリングによる大角散乱の低減により、膜から目的核種検出器までの透過率を飛躍的に高めることができる。以下、 ^{10}Be と ^{10}B の分別に本発明に係るフィルター機器600を適用した場合である。

【0138】

フィルター機器600に入射する BeO - 電流は $1 \sim 2\ \mu\text{A}$ であった。加速器のターミナル電圧は $1.0\ \text{MV}$ とした。この場合、 Si 単結晶薄膜への $^{10}\text{Be}^{2+}$ と $^{10}\text{B}^{2+}$ のエネルギー E は $2.44\ \text{MeV}$ となる。 Si 単結晶薄膜の膜の面は (100) 面であり、同結晶薄膜のサイズは $4.8 \times 4.8\ \text{mm}$ 、厚みは $2\ \mu\text{m}$ のものを用いた。角度調節は2軸回転のゴニオメーターで行った。角度の定義としては、 $[100]$ 軸チャネリングが起きるようなビーム軸と薄膜のなす角が直角になる時を $\theta = 0^\circ$ とした。 Si 単結晶薄膜の非チャネリング状態は、 $\theta = 8.5^\circ$ 、 $\theta = 5^\circ$ とした。表2に結晶薄膜をチャネリング状態とした本発明の場合の結果と、結晶薄膜をチャネリング状態としない比較例の場合の結果とを示す。

【0139】

【表2】

	チャネリング状態 (本発明)	非チャネリング状態 (比較例)
使用結晶薄膜種別	Si単結晶薄膜2 μm 厚	
$^{10}\text{Be}/^{10}\text{B}$ 比	$(3 \pm 1) \times 10^{-3}$	$(4 \pm 4) \times 10^{-4}$
結晶薄膜-電離箱の透過率	26%	1%
エネルギー分離比 $[(E_{\text{Be}} - E_{\text{B}})/E_0]$	12%	16%
同位体分別性能	320	16

【0140】

イオンビームの発散角は、内径 $1\ \text{mm}$ のピンホールで 0.06° ($1\ \text{mrad}$) 未満に制限される。この角度は、 $2.44\ \text{MeV}$ での $^{10}\text{Be}^{2+}$ と $^{10}\text{B}^{2+}$ の臨界角 0.5° よりも小さいため、イオンのほとんどがチャネリング可能となる。電離箱の位置は中心軸から偏向方向に $30\ \text{mm}$ ずらした。電離箱入射窓は、厚さ $50\ \text{nm}$ の Si_3N_4 膜とした。 Si 膜への ^{10}Be と ^{10}B の入射比 $^{10}\text{Be}/^{10}\text{B}$ は 7×10^{-5} であった。

【0141】

10

20

30

50

静電偏向器への電圧 V_0 に対する規格化計数の変化を図 15 に示す。(a) のチャネリング状態では、荷電分布の構造が出現しており、特に $V_0 = 2.5 \text{ kV}$ で、 ^{10}B の抑制、 ^{11}Be の増加が見られる。(b) の非チャネリング状態では、荷電分布の構造ははっきりしない。(c) は $^{11}\text{Be} / ^{10}\text{B}$ 比の V_0 依存性である。チャネリング状態では $V_0 = 2.5 \text{ kV}$ で最大 3×10^3 に達する。この値は、非チャネリング状態の一桁程度高い。これらは、チャネリング条件では、前に述べた所期の二つの効果による。

【0142】

同重体分別性能の比較が表 2 に示されている。単結晶薄膜から電離箱への透過率は、チャネリング状態において非チャネリング状態よりも一桁以上高い。エネルギー分離比は、両者の差は小さい。その透過率とエネルギー分離比の積を同重体分別性能と置くと、その値はチャネリング状態において非チャネリング状態よりも格段に高い。以上、チャネリングを利用した本発明に係るフィルター機器 600 の優位性が実証された。

【0143】

以上、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜、イオンビーム機能性透過膜を用いたビームライン機器、イオンビーム機能性透過膜を用いたフィルター機器、フィルター機器の調整方法は、イオンビーム機能性透過膜におけるチャンネル軸がイオンビームの進行方向と実質的に平行となるように調整されており、イオンビームの透過率を高めることが可能となり、エミッタンスの改善を図ることができる。

【産業上の利用性】

【0144】

従来、ビームライン機器等においては、イオンビームの透過率が高いイオンビーム機能性透過膜が求められていたが、そのようなイオンビーム機能性透過膜が開発されておらず、機器の小型化の阻害要因等になり問題であった。これに対して、本発明に係るイオンビーム機能性透過膜は、一方向に進行するイオンビームが通過するビームライン機器に用いられ、チャンネルを有するイオンビーム機能性透過膜であって、チャンネル軸が、前記イオンビームの進行方向と実質的に平行であるので、イオンビームの透過率を高めることが可能となると共に、エミッタンスの改善を図ることができるため、産業上の利用性が非常に大きい。

【符号の説明】

【0145】

- 3・・・ビーム収束レンズ
- 4・・・真空容器
- 5・・・ターミナル
- 10・・・タンデム型加速器
- 11・・・荷電ストリッパ
- 12・・・真空フランジ
- 30・・・ポストストリッパ
- 50・・・ディグレーダー
- 70・・・電離箱
- 71・・・ディグレーダーウィンドウ
- 210・・・マルチ薄膜システム
- 211・・・フレーム
- 212・・・薄膜
- 213・・・薄膜アセンブリ
- 214・・・マルチ薄膜ホルダ
- 215・・・マルチ薄膜用位置決めステージ
- 230・・・基台部
- 231・・・第 1 軸
- 232・・・第 2 軸
- 235・・・枠体

10

20

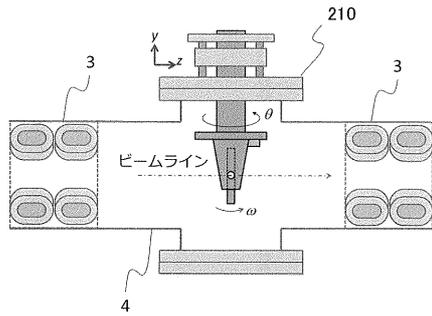
30

40

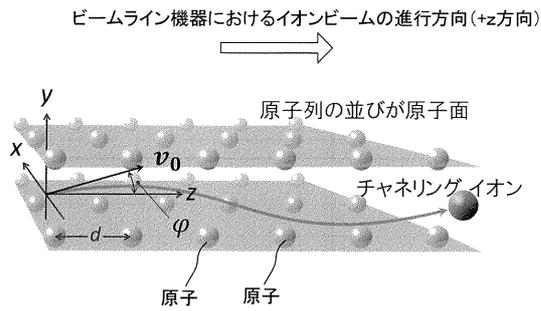
50

3 2 0 . . .	シングル薄膜システム	
3 2 1 . . .	シングル薄膜ホルダ	
3 2 2 . . .	シングル薄膜用位置決めステージ	
3 3 0 . . .	基台部	
3 3 1 . . .	第 1 軸	
3 3 2 . . .	第 2 軸	
3 3 5 . . .	枠体	
5 0 0 . . .	小型 A M S システム	
5 1 0 . . .	負イオン源	
5 2 0 . . .	入射電磁石	10
5 6 0 . . .	分析電磁石	
5 6 5 . . .	安定核種検出器	
5 7 0 . . .	エネルギー分析器	
5 8 0 . . .	測定目的核種検出器	
6 0 0 . . .	フィルター機器	
6 0 4 . . .	真空容器	
6 1 0 . . .	マルチ薄膜システム	
6 1 1 . . .	フレーム	
6 1 2 . . .	薄膜	
6 1 3 . . .	薄膜アセンブリ	20
6 1 4 . . .	マルチ薄膜ホルダ	
6 1 5 . . .	マルチ薄膜用位置決めステージ	
6 3 0 . . .	基台部	
6 3 1 . . .	第 1 軸	
6 3 2 . . .	第 2 軸	
6 3 5 . . .	枠体	
6 4 0 . . .	基台部	
6 4 5 . . .	ファラデーカップ	
6 4 6 . . .	ファラデーカップ支持部材	
6 5 0 . . .	フィルター機器制御装置	30
6 5 5 . . .	電流計測部	
6 6 0 . . .	演算部	
6 7 0 . . .	x y 調整機構制御部	
6 7 1 . . .	第 1 軸回転制御部	
6 7 2 . . .	第 2 軸回転制御部	
6 7 3 . . .	ホルダ回転制御部	
6 8 0 . . .	変位機構制御部	

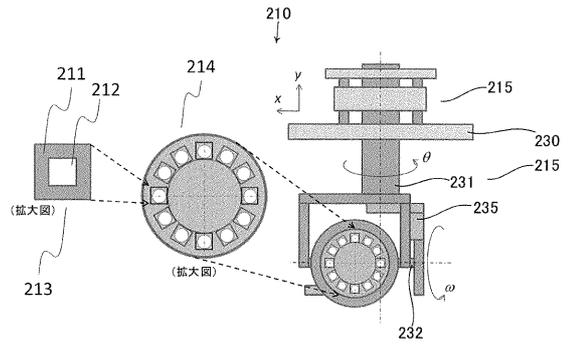
【図 1】



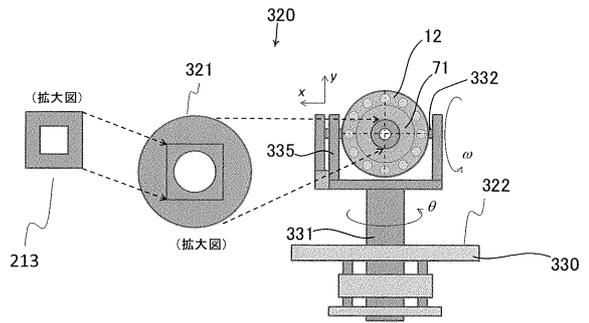
【図 2】



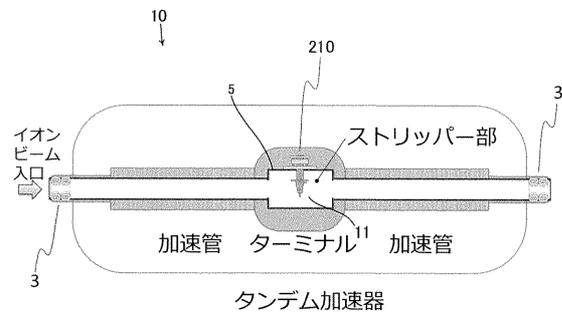
【図 3】



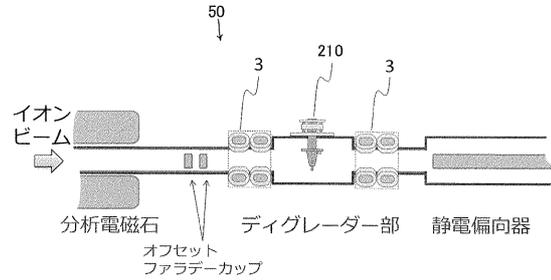
【図 4】



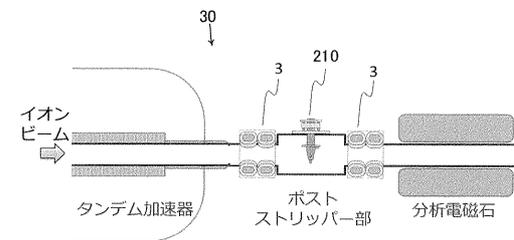
【図 5】



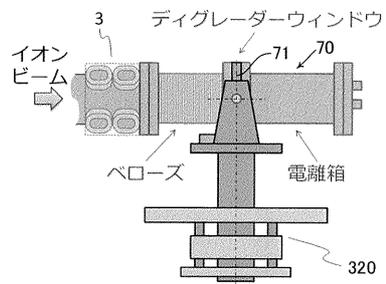
【図 7】



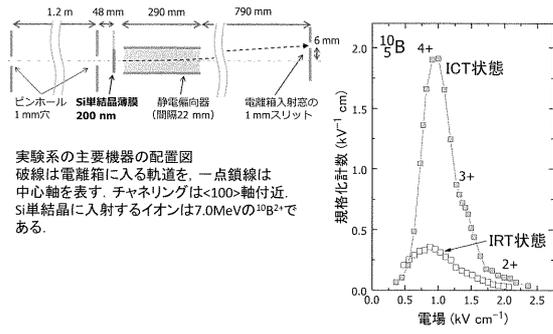
【図 6】



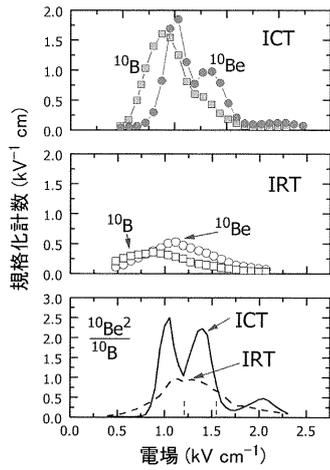
【図 8】



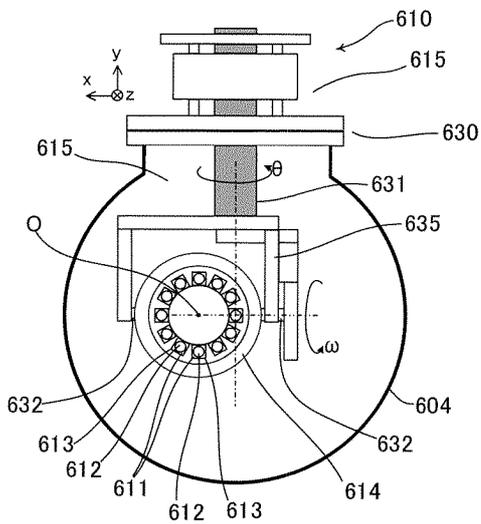
【図9】



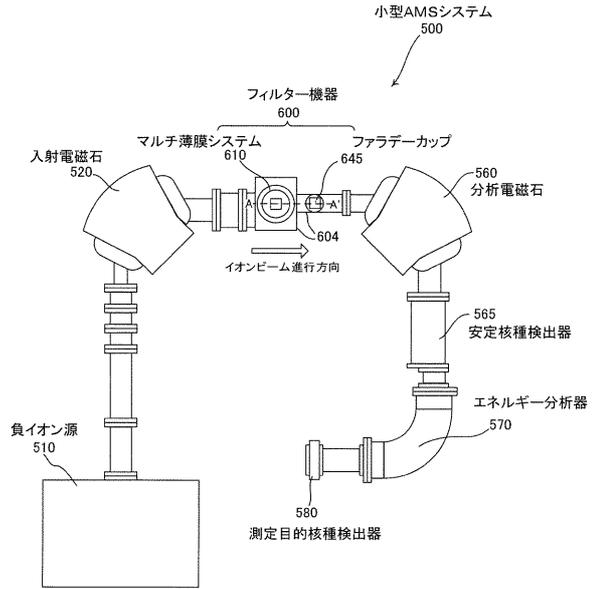
【図10】



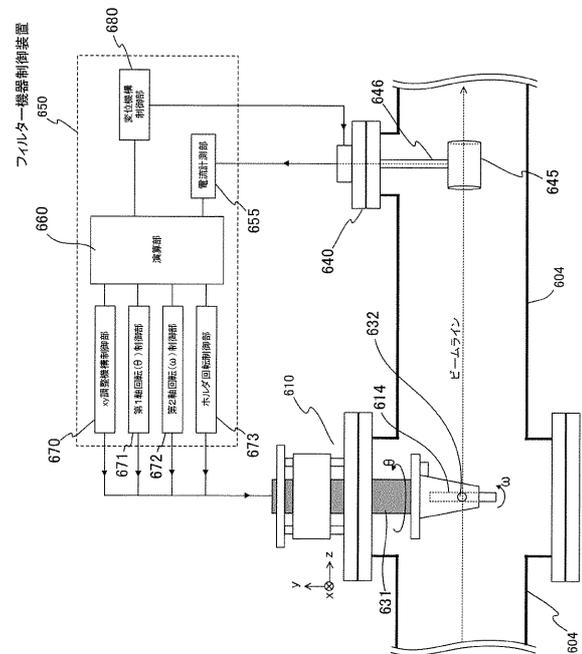
【図12】



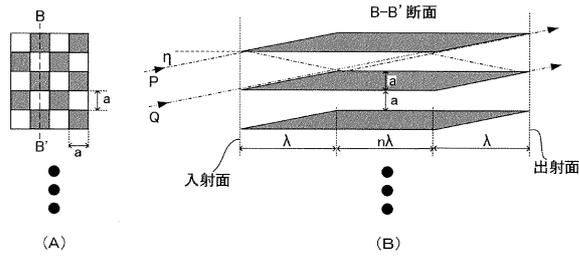
【図11】



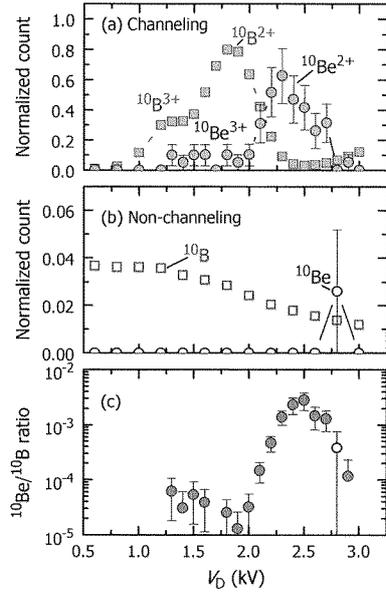
【図13】



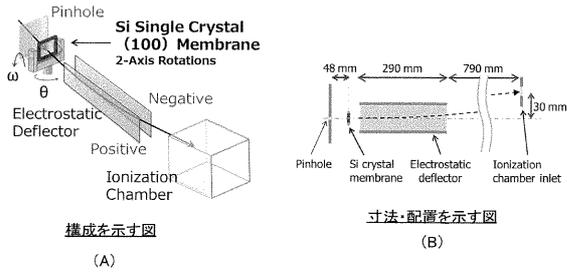
【 図 1 4 】



【 図 1 6 】



【 図 1 5 】



静電偏向器への電圧 V_D に対する規格化計数の変化。
 ^{10}Be の計数は5000倍拡大。(c)のプロットの中塗りはチャネリング状態、白抜きは非チャネリング状態を示す。

フロントページの続き

(51)Int.Cl. F I
H 0 1 J 37/04 (2006.01) H 0 1 J 37/04 A

(72)発明者 藤田 奈津子
岐阜県土岐市泉町定林寺959番地の31 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 東濃地科学センター内

(72)発明者 松原 章浩
岐阜県土岐市土岐口南町3-25 株式会社ペスコ内

審査官 藤本 加代子

(56)参考文献 特許第6086587(JP, B2)
特開昭55-039694(JP, A)
特開平08-083741(JP, A)
国際公開第2016/167307(WO, A1)
特開平11-038195(JP, A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

G 2 1 K	1 / 1 4
G 2 1 K	1 / 0 0
G 0 1 T	1 / 1 8 5
H 0 1 J	3 7 / 0 4
H 0 1 J	3 7 / 3 0
H 0 1 J	3 7 / 1 8
H 0 1 J	4 9 / 2 8
H 0 5 H	5 / 0 6
G 0 1 N	2 7 / 6 2