

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 公開特許公報(A)

(11) 特許出願公開番号

特開2016-225108

(P2016-225108A)

(43) 公開日 平成28年12月28日(2016.12.28)

(51) Int.Cl.	F I	テーマコード (参考)
HO1J 49/16 (2006.01)	HO1J 49/16	2G041
HO1J 49/06 (2006.01)	HO1J 49/06	5C034
HO1J 49/04 (2006.01)	HO1J 49/04	5C038
HO1J 37/30 (2006.01)	HO1J 37/30	Z
GO1N 27/62 (2006.01)	GO1N 27/62	G

審査請求 未請求 請求項の数 5 O L (全 12 頁)

(21) 出願番号 特願2015-109624 (P2015-109624)
 (22) 出願日 平成27年5月29日 (2015.5.29)

特許法第30条第2項適用申請有り Physics of Plasmas 22, 033107 (2015) "Acceleration of highly charged GeV Fe ions from a low-Z substrate by intense femtosecond laser" <http://dx.doi.org/10.1063/1.4913434> ウェブサイトの掲載日: 2015年3月9日: 米国時間 (2015年3月10日: 日本時間)

(71) 出願人 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
 (71) 出願人 000005119
 日立造船株式会社
 大阪府大阪市住之江区南港北1丁目7番89号
 (74) 代理人 100097113
 弁理士 堀 城之
 (74) 代理人 100162363
 弁理士 前島 幸彦

最終頁に続く

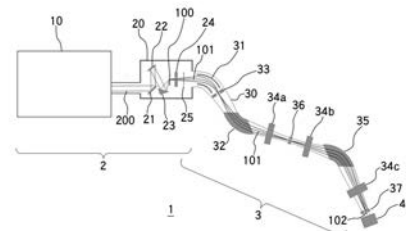
(54) 【発明の名称】 質量分析装置、イオン照射装置

(57) 【要約】

【課題】分析対象となる試料の状態によらず、高精度の質量分析を行う。

【解決手段】この質量分析装置1は、試料100中の原子のイオン化及び加速を行う高エネルギーイオン発生部2と、このイオンを質量電荷比毎に分離するイオン分離部3を具備する。高エネルギーイオン発生部2において、試料100のイオン化及び加速に用いられるパルスレーザー光200は、レーザー発振器10で生成される。この場合の試料100表面におけるパルスレーザー光200の電界強度は、100TV/m程度と極端に高いため、試料100中の原子をイオン化してイオンを生成する際に、その価数を大きく(価数>1)とすることができる。

【選択図】 図1



【特許請求の範囲】

【請求項 1】

試料の原子をイオン化して加速し、加速後のイオンを磁場下において質量電荷比に応じて分離する質量分析装置であって、

パルスレーザー光を前記試料に照射して前記試料をプラズマ化し、当該プラズマ中に同時に生成された加速場を利用して前記プラズマ中のイオンを加速する高エネルギーイオン発生部と、

前記高エネルギーイオン発生部を用いて加速された前記イオンに電場及び/又は磁場を印加し、前記イオンの前記電場及び/又は磁場中における質量電荷比に応じた軌道の違いによって前記イオンを前記質量電荷比に応じて分離するイオン分離部と、

10

を具備することを特徴とする質量分析装置。

【請求項 2】

前記パルスレーザー光におけるパルス幅は 100 fs 以下、ピークパワー強度は 10^{19} W/cm^2 以上、オン/オフのパワー比率(コントラスト比)は 10^{10} 以上であることを特徴とする請求項 1 に記載の質量分析装置。

【請求項 3】

前記加速場で加速された前記イオンを透過させることによって前記イオンの価数を一様化する電荷平衡部を具備することを特徴とする請求項 1 又は 2 に記載の質量分析装置。

【請求項 4】

前記試料に対して放射線を照射する放射線照射部を具備し、

20

前記高エネルギーイオン発生部において、前記放射線照射部において前記放射線が照射された前記試料に対して前記パルスレーザー光が照射される構成とされたことを特徴とする請求項 1 から請求項 3 までのいずれか 1 項に記載の質量分析装置。

【請求項 5】

請求項 1 から請求項 4 までのいずれか 1 項に記載の質量分析装置が用いられ、

前記イオン分離部によって分離されたイオンを被照射試料に照射させることを特徴とするイオン照射装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

30

本発明は、原子あるいはイオンを質量毎に分離する質量分析装置、あるいは分離されたイオンを被照射試料に照射するイオン照射装置の構成に関する。

【背景技術】

【0002】

分子や原子の質量に基づいて元素の組成分析を行う質量分析装置として、各種のものが知られており、各種の分野で用いられている。例えば半導体中の不純物元素の分析を行う場合には、ppt レベル (10^{-12}) よりも低い濃度の元素の分析を行うことも要求される。また、単なる元素分析だけではなく、その同位体を識別することができれば、例えば半導体中においてアルファ線や中性子を放射する放射性同位元素の分析を行うことができる。また、これによって特定の元素の同位体比を測定することができれば、試料の年代測定を行うことができる。更に、年代測定だけでなく、基礎物理学を初めとする様々な科学分野においてもこれを用いた測定を行うことができる。また、原子力分野においても、様々な核反応の状況を測定するためにこうした質量分析を適用することができる。

40

【0003】

こうした質量分析においては、一般に、分析対象となる元素をイオン化して運動エネルギーを付与した後に、磁場によってその軌道を曲げる際の偏向量が質量(正確には質量電荷比)によって異なることを利用して、分析が行われる。

【0004】

このような質量分析装置として、高精度な測定が可能であるものとしては、例えばレーザーアブレーション型高周波誘導結合プラズマ質量分析装置(LA-ICP-MS)があ

50

る。LA-ICP-MSにおいては、高強度のレーザー光を試料に照射して試料を局部的に蒸発させ、発生した試料原子(分子)を誘導結合プラズマ中に導入し、イオン化する。このイオンを引き出し電極によって引き出して加速して運動エネルギーを付与する。その後、このイオンに対して上記のような質量分析が行われる。LA-ICP-MSにおいては、分析対象となる箇所を局部的にレーザー光を照射することにより、試料の局所的な分析が可能である。

【0005】

このような質量分析においては、イオンを質量電荷比毎に静電場や静磁場によって分離するため、この分離を顕著にするためには、イオンの運動量を大きくすることが有効である。しかしながら、引き出し電極によってイオンに運動量を付与する場合には、高々数千V程度の電圧しか引き出し電極に付与できないため、その運動量は不十分である。このため、例えば1価の同重体イオンである $^{204}\text{Pb}^+$ と $^{204}\text{Hg}^+$ や、 $^{56}\text{Fe}^+$ と($^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$) $^+$ のように、質量電荷比が極めて近い元素や多原子イオンの分離をLA-ICP-MSで行うことは困難であった。

10

【0006】

これに対して、例えば特許文献1に記載されるように、高エネルギー実験等で用いられる加速器(例えばタンデム型加速器)を用いてイオンの加速を行ってから同様の質量分析を行う、加速器質量分析装置が知られている。タンデム型加速器を用いれば、例えばMV以上の加速電圧を得ることができるため、イオンのエネルギーを数MeV程度まで高めることができ、高精度の質量分析を行うことができる。この場合には、加速器に適合させるために、試料のイオン化を上記のような誘導結合プラズマで行うことはできず、専用のイオン源が用いられる。分析対象となる試料は、このイオン源の中に、イオン源に適合した形状、状態とされて設置される。また、イオン源は、分析対象となる元素毎に設定されるため、複数の元素について分析を行う場合には、複数のイオン源、試料が必要となる。こうした元素毎の専用のイオン源を用いるために、同重体の分離も行うことができる。

20

【先行技術文献】

【特許文献】

【0007】

【特許文献1】特開2014-150028号公報

【発明の概要】

30

【発明が解決しようとする課題】

【0008】

加速器質量分析装置においては、分析対象の元素毎に専用の高周波プラズマイオン源を用い、このイオン源の中に試料を設置することが必要となるため、例えばLA-ICP-MSのような、試料の局所的な分析を行うことは困難であった。更に、試料をイオン源に装着する際には、化学処理等が必要となるため、この際に不純物が混入することがあり、こうした不純物元素が本来測定すべき元素の検出に影響を与えることもあった。また、イオン源を用いてイオン化をすることが困難である元素、例えばタングステン(W)の分析は困難であった。

40

【0009】

また、特に原子力工学分野においては、高強度で放射線を発する放射性同位元素が含まれる試料が分析の対象となる場合がある。場合によっては、中性子線等を照射することによって放射化した試料を分析の対象とすることもあり、照射直後の状態において高強度の放射線を発する試料における短寿命の核種を分析することが必要な場合もある。こうした場合においては、試料をイオン源に設置する必要がある加速器質量分析装置を用いることは困難であった。

【0010】

すなわち、分析対象となる試料の状態によらず、高精度の質量分析を行うことは困難であった。

【0011】

50

本発明は、かかる問題点に鑑みてなされたものであり、上記問題点を解決する発明を提供することを目的とする。

【課題を解決するための手段】

【0012】

本発明は、上記課題を解決すべく、以下に掲げる構成とした。

本発明の質量分析装置は、試料の原子をイオン化して加速し、加速後のイオンを磁場下において質量電荷比に応じて分離する質量分析装置であって、パルスレーザー光を前記試料に照射して前記試料をプラズマ化し、当該プラズマ中に生成された加速場を利用して前記プラズマ中のイオンを加速する高エネルギーイオン発生部と、前記高エネルギーイオン発生部を用いて加速された前記イオンに電場及び/又は磁場を印加し、前記イオンの前記電場及び/又は磁場中における質量電荷比に応じた軌道の違いによって前記イオンを前記質量電荷比に応じて分離するイオン分離部と、を具備することを特徴とする。

10

本発明の質量分析装置において、前記パルスレーザー光におけるパルス幅は 100 fs 以下、ピークパワー強度は 10^{19} W/cm^2 以上、オン/オフのパワー比率(コントラスト比)は 10^{10} 以上であることを特徴とする。

本発明の質量分析装置は、前記加速場で加速された前記イオンを透過させることによって前記イオンの価数を一様化する電荷平衡部を具備することを特徴とする。

本発明の質量分析装置は、前記試料に対して放射線を照射する放射線照射部を具備し、前記高エネルギーイオン発生部において、前記放射線照射部において前記放射線が照射された前記試料に対して前記パルスレーザー光が照射される構成とされたことを特徴とする。

20

本発明のイオン照射装置は、前記質量分析装置が用いられ、前記イオン分離部によって分離されたイオンを被照射試料に照射させることを特徴とする。

【発明の効果】

【0013】

本発明は以上のように構成されているので、分析対象となる試料の状態によらず、高精度の質量分析を行うことができる。

【図面の簡単な説明】

【0014】

【図1】本発明の実施の形態に係る質量分析装置の構成を示す図である。

30

【図2】本発明の実施の形態に係る質量分析装置における、高エネルギーイオン発生部の動作を示す図である。

【図3】本発明の実施の形態に係る質量分析装置において用いられる電荷平衡部の機能を示す図である。

【図4】本発明の実施の形態に係る質量分析装置の変形例の構成を示す図である。

【発明を実施するための形態】

【0015】

以下、本発明の実施の形態に係る質量分析装置について説明する。図1は、この質量分析装置1の構成を示す図である。この質量分析装置1においては、試料のイオン化、及び加速に超短パルスレーザー光を用いたレーザープラズマ加速が用いられる。このため、LA-ICP-MSと同様に試料の局所的な分析が可能であり、かつ従来の加速器質量分析装置と同様に、イオンの高エネルギー化をすることができる。この際、イオンの価数も高めることができるため、特にイオンの高エネルギー化を図ることができるため、高精度で質量分析(質量電荷比に応じたイオンの分離)を行うことができる。

40

【0016】

この質量分析装置1は、試料100中の原子のイオン化及び加速を行う高エネルギーイオン発生部2と、このイオンを質量電荷比に応じて分離するイオン分離部3を具備する。

【0017】

高エネルギーイオン発生部2において、試料100のイオン化及び加速に用いられるパルスレーザー光200は、レーザー発振器10で生成される。このパルスレーザー光200

50

0は、真空状態とされ試料100が設置された真空試料槽20に入射する。真空試料槽20において、パルスレーザー光200は、反射鏡21、22を介して軸外し放物面鏡23によって集光された状態で試料100に入射する。

【0018】

ここで用いられるレーザー発振器10、パルスレーザー光200は、例えば特開2011-108579号公報において用いられたものと同様である。すなわち、パルスレーザー光200は、レーザープラズマ加速において用いられる超短パルスレーザー光であり、パルス幅はfsec程度100fs以下であり、試料100の表面におけるパルスのピークパワー強度は 10^{19} W/cm^2 以上とされ、パルスのオン/オフのパワー比は、 10^{10} 以上とされる。レーザー発振器10においては、例えばチャープパルス増幅（パルス幅を伸張してから増幅後、パルス圧縮を行う技術）によって、こうした超短パルスレーザー光を発振することができ、上記のパルス幅、エネルギー、コントラスト比を得ることができる。また、デフォーダブルミラー（変形鏡）や、各種パラメータの微調整が可能な光学素子を用いて位相制御を行う、あるいは、温度補償等を行うこともできる。

10

【0019】

こうした超短パルスレーザー光を試料100に照射した際の状況を模式的に図2に示す。試料100に高強度（高電界）のパルスレーザー光200が入射角 θ で入射することによって、試料100中の原子は気化してプラズマPが生成される。このため、この原子はイオン化され、イオンAとなり、前方に放出される。この際、特開2011-108579号公報に記載されるように、イオンAよりも質量の軽い電子はイオンAに先行して前方に発せられ、試料100の前方において、電子で構成されたシースSが形成される。このため、その後で前方に発せられるイオンAは、このシースによる電界（加速場）で加速されるが、この電界強度は極めて高いため、イオンAを核子あたりMeV以上のエネルギーまで加速した高エネルギーイオン101とすることができる。こうした現象は、レーザープラズマ加速として、例えば「A Modified Thomson Parabola Spectrometer For High Resolution Multi-MeV Ion Measurements - Application To Laser-Driven Ion Acceleration」、D.C. Carroll等、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A、620号、23頁（2010年）に記載されている。ここで、レーザープラズマ加速によって得られた高エネルギーイオン101のエネルギースペクトルにおいては、例えば特開2011-108579号公報に記載されるように、鋭いピークが認められる。すなわち、高エネルギーイオン101のエネルギーを、通常知られる加速器（例えばタンデム型加速器）のような高い単色性とする事はできないものの、ほぼ単色（準単色）とすることができる。

20

30

【0020】

更に、この場合の試料100表面におけるパルスレーザー光200の電界強度は、 10^{10} TV/m 程度と極端に高いため、試料100中の原子をイオン化してイオンAを生成する際に、その価数を大きく（価数 $\gg 1$ ）することができる。例えば、試料100を金（Au）の薄膜とした場合に、Auの42価（+42）のイオンAを生成することができる。このため、分析対象となる高エネルギーイオン101の質量電荷比を小さくことができ、静電場あるいは静磁場下における高エネルギーイオン101の偏向量が大きくなり、質量の違いによる偏向量の差が顕著となる。また、多原子分子は解離しやすくなるため、上記のプラズマP中に多原子分子イオンは存在しにくくなる。

40

【0021】

試料100は、高エネルギーイオン101の発生効率を高めるために、厚さ $10 \mu\text{m}$ 以下の薄膜状態であることが好ましい。ただし、試料100が薄膜として単体で存在している必要はなく、例えば、予め組成のわかっている基板上に薄膜層（例えば蒸着層）として形成されていてもよい。また、試料100に対する処理、例えば表面に付着した水素や炭素等の不純物を分析前に除去するための熱処理を行うためのヒータや、上記のレーザー

50

ラズマ加速を行うためのパルスレーザー光 200 とは別にこうした処理を行うためのレーザー光を別途発生させるためのレーザー光源を設けてもよい。

【0022】

また、例えば「Quasi-Monochromatic Pencil Beam Of Laser-Driven Protons Generated Using A Conical Cavity Target Holder」、M. Nishiu chi 等、Physics of Plasmas、19号、030706頁(2012年)に記載されるように、高エネルギーイオン101の収束効率を高めるような形状とされた試料ホルダーに試料100を設置してもよい。

【0023】

また、反射鏡21、22、軸外し放物面鏡23の位置や設定角度は、サーボモーターやステッピングモーター等によって微調整可能とすることが好ましい。これによって、試料100に対するレーザー光200の照射条件を最適化することが容易となる。

【0024】

なお、パルスレーザー光200の照射によって、試料100からは、分析対象となるイオン以外にも陽子等が発生し、この陽子が真空試料槽20の内壁に衝突することによって、この内壁から放射線や中性子線が発生し、測定に影響を及ぼすおそれがある。このため、この内壁を、こうした放射線や中性子線が発生しにくい材料、例えばタンタル(Ta)等で構成することが好ましい。また、有害な放射線(ガンマ線や中性子線等)も同様に発生し、こうした放射線が外部に漏洩することを防ぐため、真空試料槽20の外側には、ガンマ線等の遮蔽のためには鉛等、中性子線の遮蔽のためにはポリエチレン等の遮蔽体を設置することが好ましい。

【0025】

このように試料100から前方に高エネルギーで発せられた高エネルギーイオン101は、発散角調整用スリット24を通過することによってその発散角が制限された状態で、電荷平衡部25に入射する。

【0026】

前記の通り、試料100からは、価数の大きな正イオンで構成される高エネルギーイオン101が前方に向けて発せられ、イオン分離部3においては、この高エネルギーイオン101が磁場によって質量電荷比(イオンの質量の電荷に対する比率)毎に分離されることを利用して、例えば同位体の分析も行われる。ただし、ここで、最終的には質量電荷比毎の分離ではなく、質量毎に分離が行われることが、質量分析において好ましい。価数の異なる高エネルギーイオン101間においては、質量が同一であっても価数によって質量電荷比は大きく異なるために、価数が一様でないことは、質量毎の分離を行う際の障害となる。このため、ある特定元素のイオンにおける価数を一様とすることにより、質量電荷比毎の分離をほぼ質量毎の分離とみなすことができる。

【0027】

このため、真空の高エネルギーイオン発生部2においては、発散角調整用スリット24を通過後の高エネルギーイオン101を透過させることによって、高エネルギーイオン101の価数(正イオンの価数)を均一化する電荷平衡部25が設けられている。図3は、電荷平衡部25の作用を模式的に示す図である。この作用は、「Improved Charge-State Formulas」、G. Schiwietz 等、Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B、175-177号、125頁(2001年)に記載されている。原子番号 Z_p 、入射速度 v_p の高エネルギーイオン101が原子番号 Z_t の元素で構成された薄板状の電荷平衡部25に入射した場合、電荷平衡部25を構成する原子と高エネルギーイオン101との間での電子のやりとりが、高エネルギーイオン101の価数を一様化するように働く。このため、電荷平衡部25を通過した後の高エネルギーイオン101の価数の度数分布は、以下の式で表される q_{mean} をピークする分布となる。ここで、 v_0 はボア速度であり、電荷平衡部25は固体であるものとしている。

10

20

30

40

50

【 0 0 2 8 】

【 数 1 】

$$\frac{q_{\text{mean}}}{Z_p} = \frac{12x + x^4}{0.07/x + 6 + 0.3x^{0.5} + 10.37x + x^4} \quad \dots (1)$$

$$x = \left[v_p/v_0 Z_p^{-0.52} Z_t^{-0.019 Z_p^{-0.52} v_p/v_0} / 1.68 \right]^{1 + 1.8/Z_p} \quad \dots (2)$$

【 0 0 2 9 】

なお、電荷平衡部 25 は固体である必要はなく、気体層としてもよい。この場合には、前記文献に記載されるように、 q_{mean} は上記とは異なる式で表される。真空の高エネルギーイオン発生部において、差動排気を用いて気体層を形成する、あるいはこの気体層と固体層を組み合わせることもできる。いずれの場合も、電荷平衡部 25 の厚さは、対象となる高エネルギーイオン 101 が透過できる程度に構成される。この際の透過前後のエネルギー差も、以降の分析では考慮される。また、分析対象となる元素に応じて複数の電荷平衡部 25 を切り替えて用いることができる構成とすることもできる。

10

【 0 0 3 0 】

このように、電荷平衡部 25 を通過し、価数が一様化された高エネルギーイオン 101 は、イオン分離部 3 に入射し、静電場や静磁場の下で質量電荷比毎に分離された軌道を通る。この分離は、通常の質量分析におけるものと同様であり、レーザープラズマ加速後の高エネルギーイオン 101 の軌道については、「Measured And Simulated Transport Of 1.9 MeV Laser - Accelerated Proton Bunches Through An Integrated Test Beam Lines At 1 Hz」、M. Nishiuchi 等、Physical Review ST Accelerators And Beams、13 号、071304 頁 (2010 年) 等に記載されている。ここでは、レーザープラズマ加速後の高エネルギーイオン 101 の軌道が、軌道計算コードによって算出されている。

20

【 0 0 3 1 】

高エネルギーイオン 101 は、真空試料槽 20 からイオン検出器 40 までの間に設けられ高真空が維持された真空ダクト 30 中を走行する。試料 100 から発生した高エネルギーイオン 101 のうち、所望の質量電荷比、エネルギーをもつものだけがイオン検出器 40 で検出されるように、真空ダクト 30 内の構造は設定される。ここで、前記の通り、高エネルギーイオン 101 の価数を一様、エネルギーを略一定とすることによって、質量電荷比による分離を、質量による分離とみなすことができる。

30

【 0 0 3 2 】

ここでは、まず、この分解能を向上させるために、静電場と静磁場とを用いた二重収束型の構成が用いられる。まず、高エネルギーイオン 101 は、一組の二重収束用電極 31 の間を通過することによって静電場によって軌道を偏向され、その後で二重収束用二極電磁石 32 を通過し、静磁場によって逆向きに偏向される。この際、高エネルギーイオン 101 の分散が静電場と静磁場とで逆向きになることによって、この分散を低下させ、分解能を向上させることができる。この際、二重収束用電極 31 と二重収束用二極電磁石 32 との間に、質量電荷比分析スリット 33 を設け、高エネルギーイオン 101 のビーム形状、軌道を制限することによって、更に分解能を向上させることができる。

40

【 0 0 3 3 】

高エネルギーイオン 101 は、二重収束用二極電磁石 32 を通過後に、ビーム形状 (ビームの進行方向垂直な断面形状) を最適化するための四重極電磁石 34 a、34 b、34 c と、最終的な質量電荷比毎の分離を行うための静磁場を印加する質量分析用二極電磁石 35 を通過する。また、四重極電磁石 34 a、34 b の間には、高エネルギーイオン 101 の軌道、ビーム形状を制限するための分解能向上スリット 36 が設けられている。最終段の四重極電磁石 34 c を通過後の高エネルギーイオン 101 のうち、質量分析スリット

50

37を通過した検出対象イオン102が、イオン検出器40によって検出される。真空ダクト30に関わる質量分析スリット37までの構成は、(多価)イオンを質量毎に選別するイオン分離部3として機能するため、イオン検出器40には、検出するイオン種を識別する能力は不要である。このため、イオン検出器40としては、通常知られる荷電粒子の検出器、例えばファラデーカップ等の電流計測器、E-E検出器、半導体検出器、マイクロチャンネルプレート等を用いることができる。

【0034】

上記のイオン分離部3の構成においては、最終的にイオン検出器40で検出される検出対象イオン102(質量分析スリット36を通過したイオン)の電荷質量比は、二重収束用電極31による静電場、二重収束用二極電磁石32による静磁場、質量分析用二極電磁石35による静磁場の強度で設定される。すなわち、これらの設定によって、所望の質量電荷比あるいは質量をもつイオンを選択してイオン検出器40で検出することができる。これにより、様々な質量電荷比あるいは質量をもつイオンを分離してイオン検出器40で検出することができるため、試料100の組成を分析することができる。

10

【0035】

なお、上記のイオン分離部3の構成において、質量電荷比の分解能を向上させるために、質量電荷比分析スリット33、分解能向上スリット36の他にも、スリットを適宜途中に設けることができる。この際、高エネルギーイオン101がこれらのスリットに衝突した際に発生する二次イオンが高エネルギーイオン101に混入することを抑制するために、これらのスリットの形状を、こうした二次イオンの混入が抑制されるような形状(構造)とすることが好ましい。また、各スリットの幅(ビームの通過幅)や位置は、調整可能とすることが好ましい。同様に、図2における入射角や発散角調整用スリット24の幅(発散角)も調整可能とすることが好ましい。また、四重極電磁石34a、34b、34cの磁場も調整可能なことが好ましい。これらを微調整することで、上記の構成における高エネルギーイオン101のエネルギー等に応じた最適化を図ることができ、所望の元素に対する質量分解能を高くすることができる。

20

【0036】

上記の構成において、イオン分離部3における動作は、従来より知られる加速器質量分析装置において質量電荷比毎にイオンを分離する質量分析部と同様である。しかしながら、上記の質量分析装置1においては、高エネルギーイオン発生部2において、試料100のイオン化及び加速に、超短パルスレーザー光であるパルスレーザー光200が用いられる。すなわち、特定のイオン源と、これに接続された加速器を必要とせず、高エネルギーイオン発生部2において、試料100のイオン化と加速とを同時に行っている。このため、装置全体の構成を単純にすることができる。

30

【0037】

この際、レーザープラズマ加速を発生させるパルスレーザー光200においては、その電界強度が著しく高いために、核子あたりのエネルギーを高くできると共に、イオンの電離度(価数)を大きくすることができる。このため、質量電荷比を小さくすることができ、静電場や静磁場の下での高エネルギーイオン101の質量電荷比毎の偏向量の違いを顕著にすることができる。このため、質量分解能を高めることができ、同位体の分離精度も高めることができる。

40

【0038】

また、例えば $^{56}\text{Fe}^+$ と $(^{40}\text{Ar}^{16}\text{O})^+$ のように、質量電荷比が極めて近い同重体となる多原子イオンが存在する場合においても同様である。更に、上記のような超高電界下による電離の際には $^{40}\text{Ar}^{16}\text{O}$ のような多原子分子は解離しやすいため、高エネルギーイオン101中にはこうした多原子分子は存在しにくくなる。こうした観点からも同重体の分析を高精度で行うことができる。

【0039】

また、上記の高エネルギーイオン発生部2においては、試料100に含まれる全ての元素に対してイオン化及び加速が行われる。このため、従来の加速器質量分析装置で用いら

50

れるようなイオン源とは異なり、単一の試料 100 に対して、様々な元素（同位体）の分析を行うことができる。この際、試料 100 に対してパルスレーザー光 200 が照射された箇所における分析が行われるため、試料 100 上でパルスレーザー光 200 を走査すれば、異なる箇所の分析、すなわち組成分布等の測定も容易に行うことができる。

【0040】

このように、上記の質量分析装置 1 においては、分析対象となる試料 100 の状態によらず、高精度の質量分析を行うことができる。また、例えば、核反応によって生成された元素（同位体）の分析を行う際に、核反応の直後に上記のような質量分析を行うことが必要となる場合もある。上記の高エネルギーイオン発生部 2 は、単純な構造によって単一の試料 100 から高エネルギーイオン 101 を発生させるため、こうした質量分析を行う場合にも、上記の構成を適用することができる。図 4 は、こうした測定を行う場合の構成を図 1 に対応させて示す図である。この構成においては、試料 100 に対して陽子線（放射線）300 を照射するための放射線照射部 5 が、上記の質量分析装置 1 と組み合わせられる。

10

【0041】

この構成において用いられる真空試料槽 120 の内部は、図中の上半分と下半分に 2 分割され、上半分が照射室 120 A、下半分が分析試料室 120 B とされる。試料 100 は、照射室 120 A と分析試料室 120 B 間をソレノイドコイルやステップングモーター等によって移動可能とされる。ここでは、陽子線 300 が試料 100 に対して照射され、照射直後の試料 100 が分析の対象とされる。レーザー発振器 10、反射鏡 21、22、軸外し放物面鏡 23、発散角調整用スリット 24、電荷平衡部 25、及びこれらよりも高エネルギーイオン 101 の下流側の構成は図 1 と同様である。

20

【0042】

陽子線 300 は、加速器 50 によって所望のエネルギーに加速される。加速器 50 には、偏向磁石 51 が設けられ、偏向磁石 51 の駆動電流によって、陽子線 300 を構成する陽子が加速器 50 内に留まるモードと、陽子線 300 が試料 100 に照射されるモードとが切り替えられる。陽子線 300 が試料 100 に照射される場合には、陽子線 300 は、陽子線ビームライン 52 内を通り、照射室 120 A に導かれる。照射時の陽子線 300 のビーム形状は、四重極電磁石 53 a、53 b によって調整される。この際、陽子線ビームライン 52、照射室 120 A、分析試料室 120 B、真空ダクト 30 内は、同様に高真空とすることができる。このため、加速器 50 から真空試料槽 120（照射室 120 A）までが放射線照射部 5 として機能する。陽子線 300 の照射直後の試料 100 を照射室 120 A から分析試料室 120 B に移動させることによって、上記と同様の分析を行うことができる。

30

【0043】

この構成によれば、陽子線 300 の照射直後の試料 100 中に存在する短寿命の核種の分析も可能となる。この際、放射線を発する試料 100 に対して作業者が接近することなく、遠隔操作によって試料 100 を移動させることによって、こうした分析を行うことができる。

【0044】

なお、図 4 の構成においては、試料 100 に陽子線 300 が照射されたが、陽子線に限らず、他の放射線（中性子線、ガンマ線等）を試料 100 に照射する場合でも、放射線の発生器（真空試料槽以外の放射線照射部の構成）を変えるだけで、同様の構成が可能であり、照射直後における試料 100 の分析を同様に行うことができる。

40

【0045】

なお、上記の構成において、イオン分離部 3 は、特定の元素（同位体）のイオンを選別するために機能している。このため、試料 100 として、こうした元素（同位体）を多く含むものを用い、かつイオン検出器 40 の代わりに、被照射試料を設置すれば、この被照射試料に対して、特定の元素（同位体）を照射するイオン照射装置としても機能する。図 4 に示されるように放射線照射部を用いた場合には、放射線照射によって生じた短寿命の

50

同位体イオンを選別して被照射試料に照射することも可能となる。

【 0 0 4 6 】

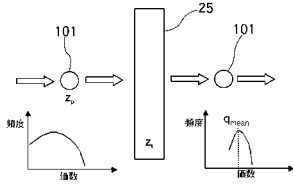
また、上記の構成において、イオン分離部の構成は、質量電荷比毎に高エネルギーイオンの分離ができる限りにおいて、任意である。

【 符号の説明 】

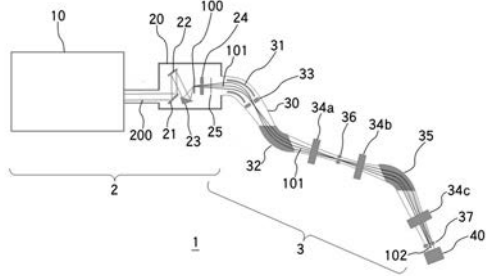
【 0 0 4 7 】

1	質量分析装置	
2	高エネルギーイオン発生部	
3	イオン分離部	
5	放射線照射部	10
10	レーザー発振器	
20、120	真空試料槽	
21、22	反射鏡	
23	軸外し放物面鏡	
24	発散角調整用スリット	
25	電荷平衡部	
30	真空ダクト	
31	二重収束用電極	
32	二重収束用二極電磁石	
33	質量電荷比分析スリット	20
34 a、34 b、34 c、53 a、53 b	四重極電磁石	
35	質量分析用二極電磁石	
36	分解能向上スリット	
37	質量分析スリット	
40	イオン検出器	
50	加速器	
51	偏向磁石	
52	陽子線ビームライン	
100	試料	
101	高エネルギーイオン	30
102	検出対象イオン	
120 A	照射室	
120 B	分析試料室	
200	パルスレーザー光	
300	陽子線	
A	イオン	
P	プラズマ	
S	シース	

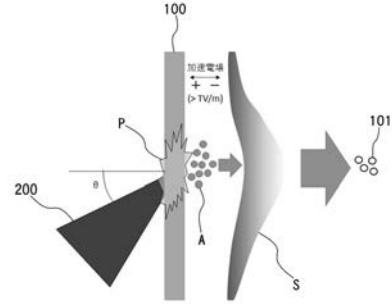
【 図 3 】



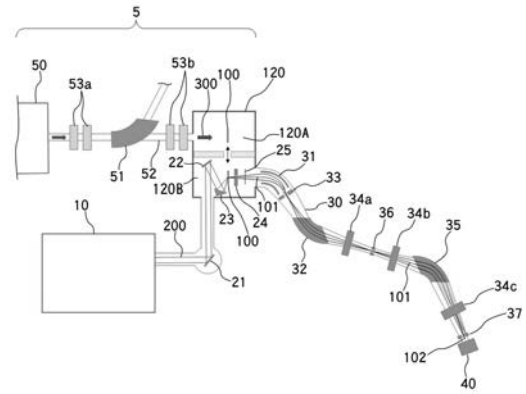
【 図 1 】



【 図 2 】



【 図 4 】



フロントページの続き

- (72)発明者 榊 泰直
京都府木津川市梅美台 8 丁目 1 番地 7 国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構 関西光科学
研究所内
- (72)発明者 西内 満美子
京都府木津川市梅美台 8 丁目 1 番地 7 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研
究所内
- (72)発明者 深掘 智生
茨城県那珂郡東海村大字白方 2 番地 4 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 原子力科学研
究所内
- (72)発明者 近藤 公伯
京都府木津川市梅美台 8 丁目 1 番地 7 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研
究所内
- (72)発明者 滝谷 俊夫
大阪府大阪市住之江区南港北 1 丁目 7 番 8 9 号 日立造船株式会社内
- (72)発明者 上野 絵理
大阪府大阪市住之江区南港北 1 丁目 7 番 8 9 号 日立造船株式会社内
- (72)発明者 福田 直晃
大阪府大阪市住之江区南港北 1 丁目 7 番 8 9 号 日立造船株式会社内
- (72)発明者 中村 豪志
大阪府大阪市住之江区南港北 1 丁目 7 番 8 9 号 日立造船株式会社内
- F ターム(参考) 2G041 CA01 DA03 GA13
5C034 AA01
5C038 EF29 EF33 FF13 GG07