

(19) 日本国特許庁(JP)

(12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第5988025号
(P5988025)

(45) 発行日 平成28年9月7日(2016.9.7)

(24) 登録日 平成28年8月19日(2016.8.19)

(51) Int.Cl.

F 1

H01J	27/24	(2006.01)	H01J	27/24	
A61N	5/10	(2006.01)	A61N	5/10	H
H05H	15/00	(2006.01)	H05H	15/00	
G21K	1/00	(2006.01)	G21K	1/00	A
H05H	1/54	(2006.01)	H05H	1/54	

請求項の数 9 (全 13 頁)

(21) 出願番号 特願2012-163410 (P2012-163410)
 (22) 出願日 平成24年7月24日 (2012.7.24)
 (65) 公開番号 特開2014-22350 (P2014-22350A)
 (43) 公開日 平成26年2月3日 (2014.2.3)
 審査請求日 平成27年5月14日 (2015.5.14)

(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
 (74) 代理人 100097113
 弁理士 堀 城之
 (74) 代理人 100162363
 弁理士 前島 幸彦
 (72) 発明者 福田 祐仁
 京都府木津川市梅美台8丁目1番7号 独
 立行政法人日本原子力研究開発機構 関西
 光科学研究所内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 イオン加速方法、イオン加速装置、及び、イオンビーム照射装置、医療用イオンビーム照射装置、核破砕用イオンビーム照射装置

(57) 【特許請求の範囲】

【請求項1】

ノズルから水素を主成分とする第1成分のガスと第2成分のガスの混合ガスが真空中に噴出されることによって前記第2成分のガスの分子からなるクラスターが前記第1成分のガス中に分散した形態で前記ノズルから柱状に形成されたクラスターガスに対し、前記混合ガスの噴出方向と略垂直の方向からパルスレーザー光を前後方向に沿って前方に向けて照射することによって前記クラスターガスをプラズマ化し、前記クラスターガスを構成する原子をイオン化して前方に向けて加速するイオン加速方法であって、

前記クラスターガス中における前記クラスターの密度を $2.0 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の範囲とし、

前記パルスレーザー光を、前記ノズルの開口の半径を100%として、前記柱状に形成されたクラスターガスの中心軸の後方において前後方向で前記中心軸から10~150%の位置で集光させることを特徴とするイオン加速方法。

【請求項2】

前記混合ガスの噴出時間を0.01~10msとし、前記噴出時間に対応して形成された前記クラスターガスの生成タイミングにおける生成時から前記噴出時間の10~20%の範囲において前記パルスレーザー光を前記柱状に形成されたクラスターガスに照射することを特徴とする請求項1に記載のイオン加速方法。

【請求項3】

前記第2成分のガスはCO₂であることを特徴とする請求項1又は2に記載のイオン加

10

20

速方法。

【請求項 4】

クラスターガスにパルスレーザー光を前後方向に沿って前方に向けて照射し、前記クラスターガスをプラズマ化し、前記クラスターガスを構成する原子をイオン化して前方に向けて加速するイオン加速装置であって、

水素を主成分とする第 1 成分のガスと第 2 成分のガスの混合ガスを真空中に噴出し、前記第 2 成分のガスの分子からなるクラスターが前記第 1 成分のガス中に分散した柱状の形態とされた前記クラスターガスを生成するノズルと、

前記パルスレーザー光を発振するレーザー光源と、

前記パルスレーザー光を予め設定された集光点で集光するように前記クラスターガスに照射させる集光光学系と、を具備し、

前記クラスターガス中における前記クラスターの密度を $2.0 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の範囲とし、

前記集光点を、前記ノズルの開口の半径を 100% として、前記柱状に形成されたクラスターガスの中心軸の後方において前後方向で前記中心軸から 10 ~ 150% の位置とすることを特徴とするイオン加速装置。

10

【請求項 5】

前記混合ガスの噴出時間を 0.01 ~ 10 ms とし、前記噴出時間に対応して形成された前記クラスターガスの生成タイミングにおける生成時から前記噴出時間の 10 ~ 20% の範囲において前記パルスレーザー光を前記柱状に形成されたクラスターガスに照射することを特徴とする請求項 4 に記載のイオン加速装置。

20

【請求項 6】

前記第 2 成分のガスは CO_2 であることを特徴とする請求項 4 又は 5 に記載のイオン加速装置。

【請求項 7】

請求項 4 から請求項 6 までのいずれか 1 項に記載のイオン加速装置によって加速されたイオンを試料に対して照射する構成を具備することを特徴とするイオンビーム照射装置。

【請求項 8】

請求項 4 から請求項 6 までのいずれか 1 項に記載のイオン加速装置によって加速されたイオンを患部に対して照射する構成を具備することを特徴とする医療用イオンビーム照射装置。

30

【請求項 9】

請求項 4 から請求項 6 までのいずれか 1 項に記載のイオン加速装置によって加速されたイオンを試料に対して照射する構成を具備することを特徴とする核破砕用イオンビーム照射装置。

【発明の詳細な説明】

【技術分野】

【0001】

本発明は、所望のイオンを高エネルギーに加速して出力するイオン加速方法、イオン加速装置に関する。また、これを用いたイオンビーム照射装置、医療用イオンビーム照射装置、核破砕用イオンビーム照射装置の構造に関する。

40

【背景技術】

【0002】

イオン（プロトン：陽子を含む）を加速したイオンビームを試料に照射して加工、成膜、分析、医療行為等を行う各種の技術が知られている。こうした技術においては、高エネルギー、高強度のイオンビームを安定して発生させることが必要である。一般に高エネルギーのイオンビームを発生して照射する装置においては、特にイオンを高エネルギーに加速する機構に大がかりな設備を必要とするため、装置全体が大型化する。従って、特に医療用途等にはこうしたイオンビーム照射装置は有効であることは明らかであるにもかかわ

50

らず、十分に普及しているとは言い難い状況にある。

【0003】

こうした状況の中で、小型化の可能なイオンビーム照射装置の一種として、レーザー駆動型の加速機構を用いたものが知られている。レーザー駆動型のイオンビーム照射装置は、例えば特許文献1、2に記載されているように、陽子や所望のイオンを多く発生することのできるターゲットを高強度の超短パルスレーザー光で照射し、これを蒸発させてプラズマ化する。このプラズマ中では、まず質量の軽い電子が加速されて高エネルギーとなり、この加速された電子の作る電界によって重い陽子やイオンが加速される。この陽子やイオンが高エネルギーのビームとなって試料に照射される。従来の加速器で用いられる加速電界は材料の絶縁耐圧等で制限されるために上限値が小さくなるのに対し、このプラズマ中で得られる加速電界はこれよりも桁違いに強くなるため、短い距離で高エネルギーの加速をすることができる。このため、このレーザー駆動型のイオンビーム照射装置は、従来より用いられている大型の加速器等と比べて装置全体を大幅にコンパクト化でき、医療用等、様々な分野への応用が期待されている。

10

【0004】

例えば医療用においては、特定の位置、深さに存在する患部に対してのみ集中的に高エネルギーのイオンを照射することが要求される。このためには、単色の（エネルギースペクトルがデルタ関数的である）高エネルギーイオンビームを高い指向性で得ることが必要である。このため、レーザー駆動型のイオンビーム照射装置におけるこれらの特性を従来の大型の加速器と同等以上とするための努力がなされている。

20

【0005】

このために有効な技術として、レーザーで照射されてプラズマ発生源となるターゲットを、通常の気体や固体ではなく、クラスターガスとする技術が非特許文献1、特許文献3に記載されている。クラスターガスは、粒子状の塊となった原子・分子の集合体（クラスター）が気体中に分散した構成のガスであり、通常の気体と固体の中間的な性質をもつ。ここでは、このクラスターガスとしてHe中にCO₂クラスターが分散したものを用い、特に高エネルギーのヘリウム（He）、炭素（C）、酸素（O）イオンが得られることが示された。このクラスターガスは、ノズルからこれらの混合ガスを真空中に噴出させ、断熱膨張させることによって得られる。

【0006】

特に、非特許文献1、特許文献3に記載の技術においては、レーザー光の照射条件を調整することにより、クラスターガス中におけるプラズマ密度分布を最適化し、イオンビームのエネルギー、指向性を高めている。特に、クラスターガスにHeガスを用いることによって、従来レーザー駆動型では困難であった核子あたり10～20MeVの高エネルギーのヘリウム、炭素、酸素イオンビームが得られている。

30

【0007】

また、非特許文献2においては、80Jのエネルギーのレーザー光をマイクロカウンターターゲットに照射することによって水素イオン（陽子）を67.5MeVまで加速する技術が記載されている。

【0008】

このようなイオン加速装置（イオンビーム照射装置）によって、指向性が高く、高強度のイオンビームを得ることができる。

40

【先行技術文献】

【非特許文献】

【0009】

【非特許文献1】「Energy Increase in Multi-MeV Ion Acceleration in the Interaction of a Short Pulse Laser with a Cluster-Gas Target」、Y. Fukuda、A. Ya. Faenov、M. Tampo、T. A. Pikuz、T. Nakamura、M. Kando、Y. Hayashi、A. Yogo、

50

H. Sakaki, T. Kameshima, A. S. Pirozhkov, K. Ogura, M. Mori, T. Zh. Esirkepov, J. Koga, A. S. Boldarev, V. A. Gasilov, A. I. Magunov, T. Yamauchi, R. Kodama, P. R. Bolton, Y. Kato, T. Tajima, H. Daido and S. V. Bulanov, Physical Review Letters, 103巻、165002頁(2009年)

【非特許文献2】「Increased Laser - Accelerated Proton Energies Via Direct Laser - Light - Pressure Acceleration of Electrons in Microcone Targets」、S. A. Gaillard, T. Kluge, K. A. Flippo, M. Bussmann, B. Gall, T. Lockard, M. Geissel, D. T. Offermann, M. Schollmeier, Y. Sentoku, and T. E. Cowan, Physics of Plasmas, 18巻、056710頁(2011年)

10

【特許文献】

【0010】

【特許文献1】特開2006-244863号公報

【特許文献2】特開2008-198566号公報

【特許文献3】特開2012-119065号公報

【発明の概要】

20

【発明が解決しようとする課題】

【0011】

しかしながら、非特許文献1、特許文献3に記載の技術によって得られるHe、炭素、酸素イオンビームのエネルギーは、高々核子あたり10~20MeV程度である。また、非特許文献2に記載の技術による陽子のエネルギーも高々67.5MeVである。これらのエネルギーは、従前より知られるレーザー駆動型のイオンビーム照射装置よりは高いものの、例えば癌治療用に用いられる水素イオン(陽子)ビームに要求されるエネルギーは80~250MeV程度であるため、こうした用途には不十分であった。

【0012】

すなわち、レーザー駆動型の加速機構を用いて、癌治療用に使用できる程度の高エネルギーのイオンビームを安定して得ることは困難であった。

30

【0013】

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】

【0014】

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。

本発明のイオン加速方法は、ノズルから水素を主成分とする第1成分のガスと第2成分のガスの混合ガスが真空中に噴出されることによって前記第2成分のガスの分子からなるクラスターが前記第1成分のガス中に分散した形態で前記ノズルから柱状に形成されたクラスターガスに対し、前記混合ガスの噴出方向と略垂直の方向からパルスレーザー光を前後方向に沿って前方に向けて照射することによって前記クラスターガスをプラズマ化し、前記クラスターガスを構成する原子をイオン化して前方に向けて加速するイオン加速方法であって、前記クラスターガスにおける前記クラスターの密度を $2.0 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の範囲とし、前記パルスレーザー光を、前記ノズルの開口の半径を100%として、前記柱状に形成されたクラスターガスの中心軸の後方において前後方向で前記中心軸から10~150%の位置で集光させることを特徴とする。

40

本発明のイオン加速方法は、前記混合ガスの噴出時間を0.01~10msとし、前記噴出時間に対応して形成された前記クラスターガスの生成タイミングにおける生成時から前記噴出時間の10~20%の範囲において前記パルスレーザー光を前記柱状に形成され

50

たクラスターガスに照射することを特徴とする。

本発明のイオン加速方法において、前記第2成分のガスは CO_2 であることを特徴とする。

本発明のイオン加速装置は、クラスターガスにパルスレーザー光を前後方向に沿って前方に向けて照射し、前記クラスターガスをプラズマ化し、前記クラスターガスを構成する原子をイオン化して前方に向けて加速するイオン加速装置であって、水素を主成分とする第1成分のガスと第2成分のガスの混合ガスを真空中に噴出し、前記第2成分のガスの分子からなるクラスターが前記第1成分のガス中に分散した柱状の形態とされた前記クラスターガスを生成するノズルと、前記パルスレーザー光を発振するレーザー光源と、前記パルスレーザー光を予め設定された集光点で集光するように前記クラスターガスに照射させる集光光学系と、を具備し、前記クラスターガス中における前記クラスターの密度を $2.0 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の範囲とし、前記集光点を、前記ノズルの開口の半径を100%として、前記柱状に形成されたクラスターガスの中心軸の後方において前後方向で前記中心軸から10～150%の位置とすることを特徴とする。

10

本発明のイオン加速装置は、前記混合ガスの噴出時間を0.01～10msとし、前記噴出時間に対応して形成された前記クラスターガスの生成タイミングにおける生成時から前記噴出時間の10～20%の範囲において前記パルスレーザー光を前記柱状に形成されたクラスターガスに照射することを特徴とする。

本発明のイオン加速装置において、前記第2成分のガスは CO_2 であることを特徴とする。

20

本発明のイオンビーム照射装置は、前記イオン加速装置によって加速されたイオンを試料に対して照射する構成を具備することを特徴とする。

本発明の医療用イオンビーム照射装置は、前記イオン加速装置によって加速されたイオンを患部に対して照射する構成を具備することを特徴とする。

本発明の核破砕用イオンビーム照射装置は、前記イオン加速装置によって加速されたイオンを試料に対して照射する構成を具備することを特徴とする。

【発明の効果】

【0015】

本発明は以上のように構成されているので、レーザー駆動型の加速機構を用いて、癌治療用に使用できる程度の高エネルギーの水素イオン（陽子）ビームを安定して得ることができる。

30

【図面の簡単な説明】

【0016】

【図1】本発明の実施の形態に係るイオン加速装置の構成の概要を示す図である。

【図2】本発明の実施の形態に係るイオン加速装置における、ノズルのON・OFF制御、クラスターガス生成量、及びパルスレーザー光の出力のタイミングを示す図である。

【図3】本発明の実施の形態に係るイオン加速装置においてノズルから噴出されるガスの分布を、プローブ光をクラスターガスに照射しシャドウグラフ法により測定した結果である。

【図4】高エネルギー電子の発生確率、及びX線強度の集光点位置依存性を実測した結果である。

40

【図5】本発明の実施の形態に係るイオン加速装置によって得られた陽子ビームの実測した結果である。

【図6】集光点を高エネルギー電子発生領域、X線発生領域のそれぞれにもってきた場合における高エネルギー陽子の発生個数を実測した結果である。

【発明を実施するための形態】

【0017】

以下、本発明の実施の形態に係るイオン加速装置について説明する。図1は、このイオン加速装置10の構成を示す図である。この図において、左はその全体を示す構成図であり、右はその一部（点線で囲まれた部分）の拡大図である。この構成は、特許文献3に記

50

載された構成と同様であり、クラスターガスの組成とレーザー光の照射条件が異なる。

【0018】

レーザー光（パルスレーザー光）20は、レーザー光源から発せられ、クラスターガス（ターゲット）30中のクラスターやガス分子をプラズマ化する。このため、レーザー光20は、クラスターガス30内やその近傍で集光するような構成とされる。レーザー光源としては、集光光学系21によって集光された状態でクラスターガス30をプラズマ化できるだけの高強度の超短パルスレーザー光を発するものを用いることができる。この点は特許文献1、2、非特許文献1、特許文献3に記載のものと同様である。具体的には、レーザー光源として、ガラスレーザー、チタンサファイアレーザー等を用いることができる。集光光学系21としては、軸外し放物面鏡等の非球面の集光鏡等を用いることができる。集光光学系21によって設定される集光点の位置については後述する。レーザー光20は短い間隔でパルスの発せられ、その照射（発振）タイミングはクラスターガス30の生成と同期して制御される。

10

【0019】

ノズル40は真空中に設置され、その先端部から真空中にガスが噴出できる構成とされる。このガスは、水素（第1成分のガス： H_2 ）と2酸化炭素（第2成分のガス： CO_2 ）の混合ガスであり、これが真空中に噴出される際の断熱膨張による急激な温度低下により CO_2 が固体化し、 H_2 中に CO_2 のクラスターが分散された柱状の形態のクラスターガス30となる。このガスが噴出される空間は真空ポンプ（図示せず）によって排気されるため、ガスが噴出された状態においても、安定してクラスターガスが生成される程度の真空度は維持される。この点についても非特許文献1、特許文献3と同様である。また、ガスの噴出は連続的に行われるのではなく、パルスの発せられる。このため、この噴出タイミングとレーザー光20による照射タイミングは同期して制御される。図1の右側に示されるように、混合ガスの噴出方向とレーザー光20の入射方向とは略垂直とされる。レーザー光20の光軸方向においてノズル40を可動とすることにより、クラスターガス30中におけるレーザー光20の集光点の位置を制御することができる。

20

【0020】

図1の右側に示されるように、クラスターガス30は、 H_2 分子31からなるガス中に、多数の CO_2 分子が凝集してナノ粒子化した CO_2 クラスター32が分散した形態となる。ノズル40から離れた箇所では H_2 分子31、 CO_2 クラスター32は熱運動によって分散して低密度化するために、ノズル40の開口の近傍におけるクラスターガス30中でレーザー光20が集光され、特に高強度となる箇所が設定される。特許文献3に記載の技術においては、クラスターガス30にHe分子と CO_2 分子の混合ガスが使用されたためにHe、C、Oイオンが生成され、電荷質量比が等しいこれらイオンが加速されたのに対し、このイオン加速装置10においては、Heガスの代わりに H_2 分子と CO_2 分子の混合ガスが使用されたためにH、C、Oイオンが生成され、集光点位置とレーザー光照射タイミングの特定により、電荷質量比が最も小さな水素（H）イオンが選択的に加速される。

30

【0021】

また、ノズル40の開（ON）閉（OFF）タイミング、集光点におけるクラスターガス30の生成量、レーザー光20の出力のタイミングチャートを図2（a）～（c）に示す。

40

【0022】

ここで、集光点におけるクラスターガス30の生成状況（b）は、ノズル40の開閉のタイミング（a）から、ノズル40から集光点までの距離をガスが流れるのに要する時間だけ遅延し、かつ、ノズル40の開閉に要する時間程度クラスターガス生成時間は間延びする。この遅延時間は、ノズル40と集光点までの距離とガス流の速度で決まる。これらの間の距離が長ければこの遅延時間は長くなる。

【0023】

ノズル40がONとされる時間は、典型的には0.01～10ms程度であり、そのO

50

N・OFFは外部からの信号により制御される。クラスターガス30のONは、レーザー光20の出力(c)と同期するように制御され、実際には上記の遅延時間を考慮した上で、ノズル40のON・OFF(時刻 t_1 、 t_2)とレーザー光20の出力(時刻 t_3 、 t_4)とが同期するように制御される。レーザー光20の出力は、非特許文献1に記載されたように、高強度の主パルスと、主パルスよりも低強度であり主パルスに先行するプレパルスとからなる。プレパルスと主パルスの時間差(t_4 と t_3 の時間差)は、1~1000ps程度(例えば150ps程度)とされる。また、プレパルス、主パルス共に、その半値幅は3~1000fs程度(例えば40fs)である。これらのレーザー光20のタイミングに関する時間は、前記のノズル40がONとされている時間 $t_2 - t_1$ と比べて無視できる程度の長さである。上記のイオン加速装置10では、主パルスの出力時刻 t_4 は固定されており、ノズル40のON時刻 t_1 を主パルスの出力時刻 t_4 に対して変化させ、効率的にイオンが加速されるレーザー光照射タイミング $t_4 - t_1$ を決定している。

10

【0024】

この構成により、非特許文献1に記載されるように、クラスターガス30中の H_2 分子31、 CO_2 クラスター32が共に分解してプラズマ化することにより電子が生成され、加速される。この加速された電子によってプラズマ中に電磁場構造が形成され、イオンを加速する高強度の電界が形成される。図1に示されるように、この電界により、プラズマ中で生成された炭素(C)イオン51、酸素(O)イオン52、水素(H)イオン53が高エネルギー化したイオンビーム50が生成される。

【0025】

20

発明者は、このクラスターガス30がレーザー光20で照射される際の状況を実験的に解析し、特に集光点の位置とレーザー光照射タイミングの特定により、出力されるイオンの高エネルギー化が可能であることを知見した。クラスターガス30においては、レーザー光20の進行方向における集光点の位置が変わることにより、内部でのプラズマの形成状況、電子の加速状況、イオンの加速状況が変化する。このため、加速されたイオンのエネルギー分布等は、集光点の位置によって異なる。この点については、特許文献3に記載の技術と同様であるが、ここでは、特に、集光点の位置を特許文献3に記載の技術と異なる領域に特定することによって、電荷質量比が最も小さな水素(H)イオン53を特に選択的に高エネルギー化することが可能であることを知見した。この際に得られる水素イオン53のエネルギーは、特許文献3に記載の技術によって得られるHeイオンのエネルギーと比べると桁違いに高い。すなわち、このイオン加速装置10によって、従来と比べて特に高いエネルギーをもつ陽子ビームを発生させることができる。

30

【0026】

以下では、このイオン加速装置10を用いて実際に水素イオン(陽子)ビームを加速した結果について説明する。ここでは、図2におけるレーザー光照射タイミング $t_4 - t_1 = 0.45ms$ 、ノズル40がONとされている時間 $t_2 - t_1 = 1ms$ とし、主パルスの半値幅は40fs、エネルギーを1J、プレパルスのコントラスト比を 10^{-10} とした。図3は、2mm径の開口をもつノズル40から60barの圧力で H_2 70%、 CO_2 30%の混合ガスをベース圧力が $5 \times 10^{-5} Torr$ とされたチャンバに噴出した際における、レーザー光20の進行方向における電子密度分布をシャドウグラフ法によって調べた結果である。ここで、プローブ光をクラスターガス30に照射し、この照射と反対側から観察をしている。図3に示されるように、上記の混合ガスを用いた場合には、ノズル40の開口(2mm)よりもやや広がった略円筒形状のクラスターガス30が生成されるが、その分布の主要部分は、この開口(2mm)に対応している。なお、図3においては、集光点は、レーザー光20から見た手前側のノズル40の開口端部(後述する記載においては、手前側に100%となる点)としている。

40

【0027】

クラスターガス30中における CO_2 クラスターの密度(cm^{-3})をD、クラスターガス30中における CO_2 分子の密度(cm^{-3})を、 CO_2 固体における CO_2 密度をS(cm^{-3})、 CO_2 クラスター半径をr(cm)とすると、 CO_2 クラスター密度

50

DとCO₂クラスター半径rの関係は以下の式で表される。

【0028】

【数1】

$$r = (3\rho / 4\pi DS)^{1/3} \quad \dots (1)$$

【0029】

やSの値については、例えば60atmの上記の混合ガス(H₂:70%、CO₂:30%)を用いた場合においては、 $\rho = 7.0 \times 10^{18} \text{ cm}^{-3}$ 、 $S = 2.1 \times 10^{22} \text{ cm}^{-3}$ であるため、(1)式より、 $r = (8 \times 10^{-5} / D)^{1/3}$ となる。

10

【0030】

非特許文献1では、発生したイオンビームを固体飛跡検出器(CR39)で受けてその飛跡を2次元画像化して評価をしている。加速されたイオンのエネルギー分布等は、集光点の位置に依存するが、高エネルギーイオン発生の最適位置をCR39により高精度で評価を行うことは困難であるため、特許文献3と同様に、以下の測定結果からイオンをより高効率で高エネルギー化できる条件を検討した。ここでは、 $D = 1.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ ($r = 0.3 \mu\text{m}$)とされたこのクラスターガス30に対してレーザー光20を照射し、その集光点をレーザー光20の光軸方向で変えた際の、放出されるX線強度を測定した。この集光点の位置は、ノズル40の中心(略円筒形状のクラスターガス30の中心軸)を基準として定められる。ここで、測定したX線は、6価の酸素イオン(O⁶⁺)のヘリウムベータ(He^β)、7価の酸素イオン(O⁷⁺)のライマンアルファ(Ly^α)線に対応する、それぞれ、665.7 eV、653.7 eVのエネルギーをもつものであり、これらX線の強度比は生成されたプラズマの密度に対応する。ただし、これらX線は、高エネルギー電子のランダムな衝突励起により発生する特性X線であるため、X線発生方向に指向性はなく、ここで検出されたX線はクラスターガス30の全体から発せられたものである。

20

【0031】

同時に、レーザー光20の1回の照射毎に高エネルギー電子(12.2 MeV以上のエネルギーをもつ電子)が放出される確率を調べた。

【0032】

30

上記の測定結果を図4に示す。2つの破線に挟まれた領域は、半径1mmのノズル40の開口を示す。X線強度は、ノズル40の中心(図4における横軸の0mm)から見て、ノズル40の半径を100%として換算した距離で記載した場合に、集光点を後方側(図4中の右側)の100%(図4における横軸1mm)~250%(同2.5mm)とした際に高くなり、200%の位置で最大値をとる(X線発生領域)。この理由は、集光点(最も光強度が高くなる点)から外れた箇所においても、レーザー光20の強度がプラズマ化を起こすのに十分な強度であり、かつ、X線発生のための衝突励起の断面積が最大となっているためである。このX線強度と12.2 MeV以上の高エネルギー電子放出確率との間には、逆相関関係が見られる。これは、クラスターガス30の中心部に集光した場合は、発生した電子のエネルギーが大きすぎてX線発生のための衝突励起の断面積が著しく低下するためである。

40

【0033】

高エネルギー電子の発生確率は、ノズル40の中心から見て手前側の10%(0.1mm)~150%(1.5mm)で高く、一定の値となっている。更に、特許文献3に記載の技術(クラスターガス30にH₂の代わりにHeを用いた場合)においては、レーザー光20の照射によってクラスターガス30中にバブル構造が観察されたのに対し、図3に示されるように、この場合にはバブル構造は見られなかった。

【0034】

特許文献3に記載の場合と同様に、上記の構成においては、質量が軽い電子がまず加速され、高エネルギー電子が生成される。これにより、プラズマ中で電磁場構造が形成され

50

強い電界（急激なポテンシャル変化）が生ずる。電子よりも重いイオンは、その後でこの電界により加速され、高エネルギーのイオンとなる。このため、高エネルギーのイオンが生成されるためには、まず高エネルギーの電子が多く生成されることが必須である。この際、特許文献3に記載の技術の場合には、バブル構造が形成され、このバブル構造の中において特に効率的にイオンが加速された。これに対して、 H_2 ガスを用いた本願の場合には、バブル構造は形成されない。このため、高エネルギー電子が多く発生する場合に、最も効率的にイオンが加速されると考えられる。また、クラスターガス30のプラズマ化が起り、加速されるべきイオンが生成されることが必要であることも明らかである。

【0035】

ここで、集光点をノズル40の中心から見て手前側の10%～150%（高エネルギー電子の発生確率が高い領域：高エネルギー電子発生領域）とした際に得られた陽子（水素イオン）ビームのスペクトルを実測した結果を図5に示す。そのピークエネルギーは135 MeV程度であり、更に最大で500 MeV程度までそのスペクトルは広がっている。このエネルギーは、特許文献3に記載の技術と比較しても、一桁高い。また、同様にレーザー光を用いて陽子を加速する非特許文献2に記載の技術と比べて、1 Jと低いエネルギーをもつレーザー光（非特許文献2に記載の技術では80 J）を用いて、より高いエネルギーまで陽子が加速されている。

【0036】

このように、上記のイオン加速装置10においては、（1）バブル構造が観測されないこと、（2）イオン（陽子）エネルギーが極めて高いこと、から考えて、装置の構成は類似しているものの、特許文献3に記載の技術とは異なる加速メカニズムによって加速が行われると考えられる。ただし、高エネルギー化した電子が陽子の加速の主因となっていることは明らかである。

【0037】

ここで、集光点を、高エネルギー電子発生領域であるノズル40の中心から見て手前側の70～100%の領域（高エネルギー電子発生領域：electron region）に設定した場合と、ノズル40の中心から見て後方の20～300%の領域（X線発生領域：X ray region）に設定した場合とで、200 MeV以上のエネルギーをもつ陽子の発生量を実測した結果を図6に示す。この結果から、高エネルギー電子発生領域に集光点を設定した場合において、高効率で高エネルギーの陽子を発生させることができることが明らかである。

【0038】

この結果より、高エネルギーの陽子ビームを得るために最適な集光点の位置は、前記の通り、ノズル40の中心から見て手前側の10%～150%の位置である。この場合、このイオン加速装置10を、特許文献3に記載の技術では適用が困難であった医療用イオンビーム照射装置にも使用することができる。

【0039】

また、レーザー光20の照射方向に対して強い加速電界が生ずることは、イオンの指向性が高まることも意味する。すなわち、集光点を上記の位置に設定することにより、高い指向性も得られる。上記のイオン加速装置10においては、この点においても、特許文献3に記載の技術よりも高い指向性が得られることは明らかである。

【0040】

また、上記の検討は、レーザー光20の照射の空間的制限についてのものである。図2に示されたように、実際にはクラスターガス30は時間的に制限されて形成される。このため、クラスターガス30の生成タイミング（図2（b））とレーザー光20の照射タイミング（図2（c））を同期させることが必要である。

【0041】

クラスターガス30が生成されている時間は、図2に示されたとおり、ノズル40がONとされている時間とほぼ等しく、0.01～10 ms程度（例えば1 ms）である。この時間が短いと、十分な量のクラスターガス30が形成されなくなるため、十分な強度の

10

20

30

40

50

イオンビームが生成されにくくなる。この時間が長いと、混合ガスが噴出される背景の真空度が劣化するため、ガスの断熱膨張が充分に行われなくなり、クラスターガス30中のCO₂クラスター32は形成されにくくなる。この時間は、レーザー光20におけるプレパルスと主パルスの間隔、プレパルスと主パルスの半値幅や、プラズマが生成される時間、電子やイオンがクラスターガス30から放出されるまでの時間等と比べて桁違いに長い。このため、クラスターガス30中において前記のようにH₂分子31とCO₂クラスター32が形成されている限りにおいて、この照射タイミングは任意である。

【0042】

このONとされた時間が長い場合の真空度の劣化は、真空チャンバーの構成や使用している真空ポンプの排気速度等に依存するが、ノズル40がONとされた期間の末期においては、背景の真空度が劣化することは明らかである。このため、実際には安定したクラスターガス30が形成されるのは、ノズル40がONとされた期間における初期であると考えることができる。例えば、ノズル40がONとされてからOFFとされるまでの間の期間の初期10～20%程度の期間にレーザー光20を照射することが好ましい。上記のイオン加速装置10では、レーザー光照射タイミング $t_4 - t_1 = 0.45 \text{ ms}$ 、ノズル40がONとされている時間 $t_2 - t_1 = 1 \text{ ms}$ と特定した。ノズル40の開閉に要する時間程度の間延び時間を考慮した実際のクラスターガス生成時間は 1.6 ms であった。ノズル40から集光点までの距離をガスが流れるのに要する遅延時間を考慮すると、上記の例では、レーザー光20は集光点においてクラスターガスが生成されてから、 0.25 ms 後、すなわち、クラスターガス生成時間の初期16%の時間に照射されている。

【0043】

なお、上記の例では、 $D = 1.5 \times 10^9 \text{ cm}^{-3}$ としたが、 $2.0 \times 10^8 \sim 2.0 \times 10^{10} \text{ cm}^{-3}$ の範囲としても同様である。

【0044】

上記の構成においては、H₂とCO₂の混合ガスを用い、CO₂クラスターが形成されたクラスターガスを用いた場合について説明した。しかしながら、他の構成の混合ガスを用い、他のクラスター種を形成した場合においても、同様である。

【0045】

上記のイオン加速装置においては、レーザー光の集光位置(集光光学系)、混合ガスを噴出するノズルの開閉タイミング(レーザー光照射タイミング)等を制御することによって、高品質のイオンビームを得ることができる。このため、従来より知られるレーザー駆動型のイオン加速装置と装置構成自身を大きく変えずにこれを実現することができる。従って、他の種類の加速装置と比べて装置全体を小型化することが可能であり、医療用等、様々な分野への応用が可能である。

【0046】

このため、このイオン加速装置によって加速されたイオンを試料に照射する構成とすれば、各種のイオンをイオンビームとして照射するイオンビーム照射装置とすることができる。従来のイオンビーム照射装置においては、イオンを加速するサイクロトロンや高周波空洞等を用いた機構が大型化するために、装置全体を小型化することが困難であった。これに対し、このイオンビーム照射装置においては、上記のとおり、この加速機構を小型化することが可能であるため、装置全体を小型化することができる。従って、このイオンビーム照射装置を各種の施設、例えば医療施設等に導入することも容易であり、医療用イオンビーム照射装置として特に好ましく用いることができる。医療用イオンビーム照射装置の他にも、同様に高エネルギーのイオンビームを照射して核破砕反応を生じさせるための核破砕用イオンビーム照射装置においても同様である。

【符号の説明】

【0047】

- 10 イオン加速装置
- 20 レーザー光(パルスレーザー光)
- 21 集光光学系

10

20

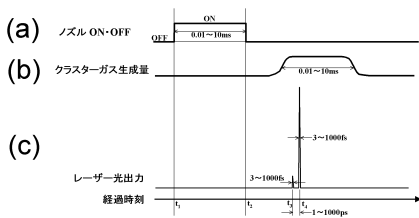
30

40

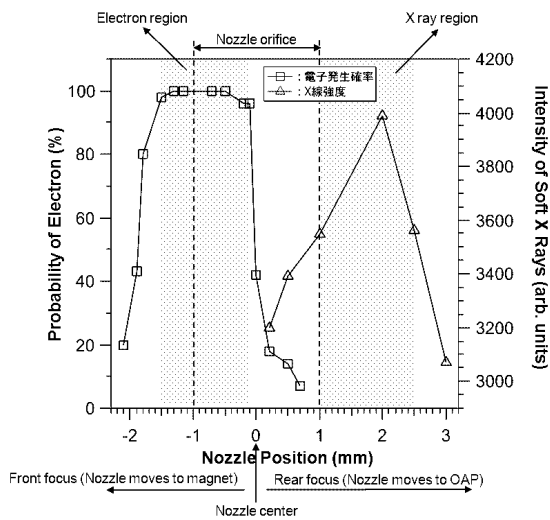
50

- 3 0 クラスタースガス (ターゲット)
- 3 1 水素 (H₂) 分子
- 3 2 C O₂ クラスタース
- 4 0 ノズル
- 5 0 イオンビーム
- 5 1 炭素 (C) イオン
- 5 2 酸素 (O) イオン
- 5 3 水素 (H) イオン

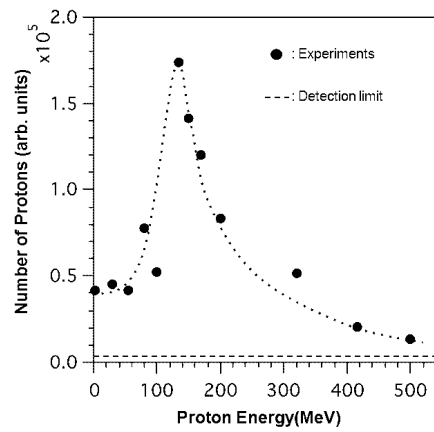
【 図 2 】



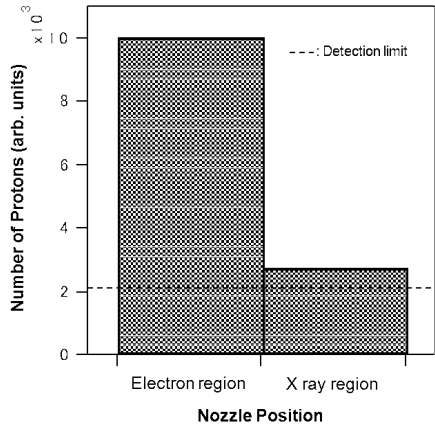
【 図 4 】



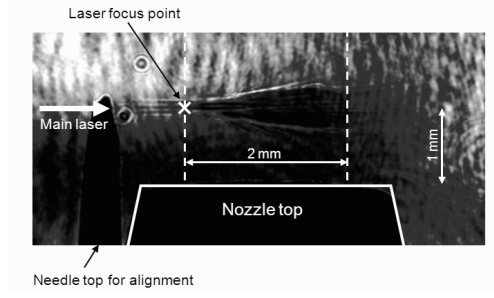
【 図 5 】



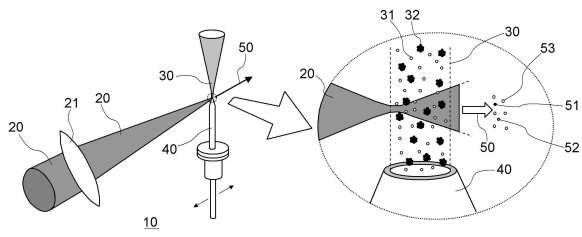
【 図 6 】



【 図 3 】



【 図 1 】



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7号 独立行政法人日本原子力研究開発機構 関西光科学研究所
内

審査官 遠藤 直恵

(56)参考文献 特開2012-119065(JP,A)

特表2003-505867(JP,A)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H01J 27/00 - 27/26, 49/00 - 49/48

G01N 27/60 - 27/70