

(19) 日本国特許庁(JP)

## (12) 特許公報(B2)

(11) 特許番号

特許第6318447号  
(P6318447)

(45) 発行日 平成30年5月9日(2018.5.9)

(24) 登録日 平成30年4月13日(2018.4.13)

(51) Int.Cl.	F 1
H05H 1/54 (2006.01)	H05H 1/54
H05H 1/46 (2006.01)	H05H 1/46
F03H 1/00 (2006.01)	H05H 1/46 F03H 1/00

請求項の数 13 (全 16 頁)

(21) 出願番号	特願2014-107585 (P2014-107585)
(22) 出願日	平成26年5月23日 (2014.5.23)
(65) 公開番号	特開2015-222705 (P2015-222705A)
(43) 公開日	平成27年12月10日 (2015.12.10)
審査請求日	平成29年4月25日 (2017.4.25)

特許法第30条第2項適用 平成26年1月16日、「平成25年度 宇宙輸送シンポジウム」において、「電極加速型スラスター用 ヘリコンプラズマ源の性能評価」について公開した。

(73) 特許権者	000006208 三菱重工業株式会社 東京都港区港南二丁目16番5号
(73) 特許権者	504139662 国立大学法人名古屋大学 愛知県名古屋市千種区不老町1番
(74) 代理人	100205350 弁理士 狩野 芳正
(74) 代理人	100102864 弁理士 工藤 実
(74) 代理人	100117617 弁理士 中尾 圭策
(72) 発明者	山▲崎▼ 拓也 東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内

最終頁に続く

(54) 【発明の名称】 プラズマ加速装置及びプラズマ加速方法

## (57) 【特許請求の範囲】

## 【請求項 1】

プラズマ加速装置であって、

磁場生成体と、

前記磁場生成体の中央領域を横断するように配置される供給路であって、上流側から下流側に向けてプラズマを供給する供給路と、

前記磁場生成体よりも下流側に配置され、前記磁場生成体の下流側の磁束を集める磁束収集体と、

前記磁場生成体よりも下流側に配置されるカソードと、

前記カソードよりも上流側に配置されるアノードと、

前記カソードと前記アノードとの間に電圧を印加する電圧印加装置と、

を備え、

前記供給路は、上流管と下流管とを含み、

前記上流管の下流側端部は、前記磁場生成体の下流側端部より上流側にあり、

前記プラズマは、前記上流管において生成され、

前記磁場生成体は、前記磁場生成体の前記中央領域に軸方向磁場を生成するとともに、前記磁場生成体、及び、前記磁束収集体は、前記磁場生成体よりも下流側に径方向磁場を含む磁場を生成し、

前記電圧印加装置は、前記カソードと前記アノードとの間に、電場を生成し、

前記供給路を介して供給される前記プラズマは、前記カソードから放出される電子と

、前記径方向磁場と、前記電場との相互作用によって生成されるホール電場によって加速される

プラズマ加速装置。

【請求項 2】

請求項1に記載のプラズマ加速装置において、

前記磁場生成体及び前記磁束収集体によって、前記磁場生成体及び前記磁束収集体の下流側に、磁束密度が疎である領域が形成され、前記領域を通過する前記プラズマが下流側に向けて拡散される

プラズマ加速装置。

【請求項 3】

請求項1又は2に記載のプラズマ加速装置において、

前記磁束収集体は、複数の分割片で構成され、

前記複数の分割片は、前記供給路の周囲に等間隔で配置される

プラズマ加速装置。

【請求項 4】

請求項1乃至3のいずれか一項に記載のプラズマ加速装置において、

前記磁束収集体は、ヨークに取り付けられる

プラズマ加速装置。

【請求項 5】

請求項4に記載のプラズマ加速装置において、

前記ヨークは、前記磁束収集体よりも径外方向に延びる延設部を備える  
プラズマ加速装置。

【請求項 6】

請求項1乃至5のいずれか一項に記載のプラズマ加速装置において、

前記供給路の周囲に配置されるプラズマ生成アンテナを、更に備え、

前記プラズマは、前記軸方向磁場と前記プラズマ生成アンテナにより誘起される誘起電場との相互作用によって生成される無電極プラズマである

プラズマ加速装置。

【請求項 7】

請求項6に記載のプラズマ加速装置において、

前記プラズマ生成アンテナは、ヘリカルアンテナであり、

前記無電極プラズマは、ヘリコンプラズマである

プラズマ加速装置。

【請求項 8】

請求項6又は7に記載のプラズマ加速装置において、

前記磁場生成体と前記プラズマ生成アンテナとは、前記供給路の方向に、少なくとも一部がオーバーラップしている

プラズマ加速装置。

【請求項 9】

請求項6乃至8のいずれか一項に記載のプラズマ加速装置において、

前記供給路のうち、前記プラズマ生成アンテナが周囲に配置されている部分の直径は、20mm以上、100mm以下である

プラズマ加速システム。

【請求項 10】

請求項1乃至9のいずれか一項に記載のプラズマ加速装置において、

前記カソードは、微細孔を有するホローカソードである

プラズマ加速装置。

【請求項 11】

請求項1乃至10のいずれか一項に記載のプラズマ加速装置において、

前記下流管の直径は、前記上流管の直径よりも大きい

10

20

30

40

50

プラズマ加速装置。

【請求項 1 2】

請求項1 1に記載のプラズマ加速装置において、

前記アノードは、前記下流管に設けられる

プラズマ加速装置。

【請求項 1 3】

プラズマ加速装置を用いてプラズマを加速するプラズマ加速方法であって、

前記プラズマ加速装置は、

磁場生成体と、

前記磁場生成体の中央領域を横断するように配置される供給路であって、上流側から下流側に向けてプラズマを供給する供給路と、10

前記磁場生成体よりも下流側に配置され、前記磁場生成体の下流側の磁束を集める磁束収集体と、

前記磁場生成体よりも下流側に配置されるカソードと、

前記カソードよりも上流側に配置されるアノードと、

前記カソードと前記アノードとの間に電圧を印加する電圧印加装置と、

を備え、

前記供給路は、上流管と下流管とを含み、

前記上流管の下流側端部は、前記磁場生成体の下流側端部より上流側にあり、

前記プラズマは、前記上流管において生成され、20

前記プラズマ加速方法は、

電子を前記カソードから放出する工程と、

前記磁場生成体、及び、前記磁束収集体により生成される径方向磁場に前記電子を捕捉させて、ホール電流を形成する工程と、

前記ホール電流と前記径方向磁場との相互作用により生成されるホール電場によって、前記供給路を介して供給される前記プラズマを加速する工程と  
を備える

プラズマ加速方法。

【発明の詳細な説明】

30

【技術分野】

【0 0 0 1】

本発明は、プラズマ加速装置及びプラズマ加速方法に関する。

【背景技術】

【0 0 0 2】

宇宙で使用される推進装置として、プラズマを加速して後方に放出し、その反力で推力を得る装置が知られている。特許文献 1 には、アーク放電により形成されたプラズマを、ノズルから排出することで推力を得る電気推進機が開示されている。特許文献 2 には、放電により生成された荷電粒子を、スクリーン電極及び加速電極を用いて、選択的に加速するイオンエンジンが開示されている。40

【0 0 0 3】

また、推進装置として、ホール電流を利用したホールスラスターが知られている。図 1 に示されるように、ホールスラスターでは、カソードから供給される電子が、電場と磁場との相互作用により周方向にホール運動を行う（ホール電流を形成する）。このホール運動を行う電子が、推進剤を電離させて、プラズマを生成する。前記プラズマは電界により加速され、後方に放出される。

【0 0 0 4】

さらに、無電極プラズマ生成装置により生成された無電極プラズマを加速させる装置として、磁気ノズルによる加速装置、及び、回転電場又は回転磁場による加速装置（リサーチュ加速装置）が知られている。ここで、無電極プラズマ生成装置は、プラズマの生成過

40

50

程において、電極とプラズマとが直接接触することのないプラズマ生成装置と定義される。図2に示されるように、磁気ノズルでは、磁気コイルを用いて、プラズマを加速する。磁気コイルは、プラズマの熱エネルギーを、ノズル後方に向かう運動エネルギーに変換する。図3に示されるように、リサーチュ加速装置では、回転電場（又は回転磁場）を用いて、プラズマを周方向に回転させる。そして、周方向に回転するプラズマ（ホール電流）と、磁気コイルの発散磁場との相互作用（ローレンツ力）により、プラズマを加速する。

【先行技術文献】

【特許文献】

【0005】

【特許文献1】特公平5-45797号公報（特許第1836674号）

10

【特許文献2】特許第4925132号公報

【発明の概要】

【発明が解決しようとする課題】

【0006】

無電極プラズマを加速する際の課題について説明する。まず、磁気ノズルを用いて、無電極プラズマを加速する際の課題について説明する。無電極プラズマは、生成時に、数eV ~ 10eVの電子温度しか有していないため、電子温度すなわち熱エネルギーを運動エネルギーに変換しても、高い比推力が得られない。このため、無電極プラズマを加熱して、電子温度を上昇させることが考えられるが、エネルギー効率の観点から好ましくない。また、プラズマを加熱する際にプラズマを閉じ込めるために強力な磁場が必要になるとの課題もある。続いて、リサーチュ加速装置を用いて、無電極プラズマを加速する際の課題について説明する。リサーチュ加速装置においては、ホール電流を誘起する過程において、印加電場又は磁場をプラズマ中に十分浸透させる必要がある。しかし、プラズマの密度が高い場合、電場又は磁場は、プラズマの表面のみに印加され、プラズマの中心まで浸透せず、ホール電流を誘起することができない。よって、リサーチュ加速装置では、プラズマ密度を高くすることができず、結果として、大きな推力を得ることができない。

20

【0007】

したがって、本発明の目的は、大きな推力を得ることが可能なプラズマ加速装置及びプラズマ加速方法を提供することにある。

【0008】

30

この発明のこれらの目的とそれ以外の目的と利益とは以下の説明と添付図面とによって容易に確認することができる。

【課題を解決するための手段】

【0009】

以下に、発明を実施するための形態で使用される番号・符号を用いて、課題を解決するための手段を説明する。これらの番号・符号は、特許請求の範囲の記載と発明を実施するための形態との対応関係の一例を示すために、参考として、括弧付きで付加されたものである。よって、括弧付きの記載により、特許請求の範囲は、限定的に解釈されるべきではない。

【0010】

40

本発明の1つの観点において、プラズマ加速装置（100；200；300）は、磁場生成体（2）と、前記磁場生成体（2）の中央領域（Q）を横断するように配置される供給路（1）であって、上流側から下流側に向けてプラズマを供給する供給路（1）と、前記磁場生成体（2）よりも下流側に配置されるカソード（3）と、前記カソード（3）よりも上流側に配置されるアノード（4）と、前記カソード（3）と前記アノード（4）との間に電圧（V<sub>ac</sub>）を印加する電圧印加装置（5）と、を備える。前記磁場生成体（2）は、前記磁場生成体（2）の前記中央領域（Q）に軸方向磁場（B<sub>x</sub>）を生成するとともに、前記磁場生成体（2）よりも下流側に径方向磁場（B<sub>d</sub>）を含む磁場を生成する。前記電圧印加装置（5）は、前記カソード（3）と前記アノード（4）との間に、電場（E<sub>x</sub>）を生成する。前記供給路（1）を介して供給される前記プラズマは、前記カソード

50

(3) から放出される電子 ( $e^-$ ) と、前記径方向磁場 ( $B_d$ ) と、前記電場 ( $E_x$ ) との相互作用によって生成されるホール電場 ( $E$ ) によって加速される。

【0011】

上記プラズマ加速装置において、前記磁場生成体 (2) よりも下流側に配置される磁束収集体 (6) を、更に備えててもよい。また、前記磁場生成体 (2)、及び、前記磁束収集体 (6) によって、前記径方向磁場 ( $B_d$ ) が生成されてもよい。

【0012】

上記プラズマ加速装置において、前記磁場生成体 (2) 及び前記磁束収集体 (6) によって、前記磁場生成体 (2) 及び前記磁束収集体 (6) の下流側に、磁束密度が疎である領域が形成され、前記領域を通過する前記プラズマが下流側に向けて拡散されてもよい。

10

【0013】

上記プラズマ加速装置において、前記磁束収集体 (6) は、複数の分割片 (6-1 ~ 6-n) で構成されてもよい。また、前記複数の分割片 (6-1 ~ 6-n) は、前記供給路 (1) の周囲に等間隔で配置されてもよい。

【0014】

上記プラズマ加速装置において、前記磁束収集体 (6) は、ヨーク (60) に取り付けられてもよい。

【0015】

上記プラズマ加速装置において、前記ヨーク (60) は、前記磁束収集体 (6) よりも径外方向に延びる延設部 (61) を備えてもよい。

20

【0016】

上記プラズマ加速装置において、前記供給路 (1) の周囲に配置されるプラズマ生成アンテナ (13) を、更に備えてもよい。また、前記プラズマは、前記軸方向磁場 ( $B_x$ ) と前記プラズマ生成アンテナ (13) により誘起される誘起電場との相互作用によって生成される無電極プラズマであってもよい。

【0017】

上記プラズマ加速装置において、前記プラズマ生成アンテナ (13) は、ヘリカルアンテナであってもよい。また、前記無電極プラズマは、ヘリコンプラズマであってもよい。

【0018】

上記プラズマ加速装置において、前記磁場生成体 (2) と前記プラズマ生成アンテナ (13) とは、前記供給路 (1) の方向に、少なくとも一部分がオーバーラップしていてもよい。

30

【0019】

上記プラズマ加速装置において、前記供給路 (1) のうち、前記プラズマ生成アンテナ (13) が周囲に配置されている部分 (11) の直径は、20mm以上、100mm以下であってもよい。

【0020】

上記プラズマ加速装置において、前記カソード (3) は、微細孔を有するホローカソードであってもよい。

【0021】

上記プラズマ加速装置において、前記供給路 (1) は、上流管 (11) と下流管 (12) を含んでもよい。また、前記下流管 (12) の直径 ( $d_2$ ) は、前記上流管 (11) の直径 ( $d_1$ ) よりも大きくてもよい。

40

【0022】

上記プラズマ加速装置において、前記アノード (4) は、前記下流管 (12) に設けられてもよい。

【0023】

本発明の他の 1 つの観点において、プラズマ加速方法は、プラズマ加速装置を用いてプラズマを加速する方法である。プラズマ加速装置 (100; 200; 300) は、磁場生成体 (2) と、前記磁場生成体 (2) の中央領域 (Q) を横断するように配置される供給

50

路(1)であって、上流側から下流側に向けてプラズマを供給する供給路(1)と、前記磁場生成体(2)よりも下流側に配置されるカソード(3)と、前記カソード(3)よりも上流側に配置されるアノード(4)と、前記カソード(3)と前記アノード(4)との間に電圧( $V_{a-c}$ )を印加する電圧印加装置(5)と、を備える。また、プラズマ加速方法は、電子( $e^-$ )を前記カソード(3)から放出する工程と、前記磁場生成体(2)により生成される径方向磁場( $B_d$ )に前記電子( $e^-$ )を捕捉させて、ホール電流を形成する工程と、前記ホール電流と前記径方向磁場( $B_d$ )との相互作用により生成されるホール電場( $E$ )によって、前記供給路(1)を介して供給される前記プラズマを加速する工程を備える。

## 【発明の効果】

10

## 【0024】

本発明により、大きな推力を得ることが可能なプラズマ加速装置及びプラズマ加速方法を提供することができる。

## 【図面の簡単な説明】

## 【0025】

【図1】図1は、従来のプラズマ加速装置であるホールスラスタの構成を模式的に示す図である。

【図2】図2は、従来のプラズマ加速装置である磁気ノズルの構成を模式的に示す図である。

【図3】図3は、従来のプラズマ加速装置であるリサーデュ加速装置の構成を模式的に示す図である。

20

【図4】図4は、第1の実施形態のプラズマ加速装置の構成を模式的に示す図である。

【図5】図5は、第2の実施形態のプラズマ加速装置の構成を模式的に示す図である。

【図6】図6は、第3の実施形態のプラズマ加速装置の構成を模式的に示す図である。

【図7A】図7Aは、プラズマ生成アンテナの第1例を示す図である。

【図7B】図7Bは、プラズマ生成アンテナの第2例を示す図である。

【図7C】図7Cは、プラズマ生成アンテナの第3例を示す図である。

【図7D】図7Dは、プラズマ生成アンテナの第4例を示す図である。

【図7E】図7Eは、プラズマ生成アンテナの第5例を示す図である。

【図7F】図7Fは、プラズマ生成アンテナの第6例を示す図である。

30

【図8】図8は、図6のA-A矢視断面図であり、磁束収集体(第2強磁性体)の分割片の配置を示す図である。

【図9】図9は、第3の実施形態のプラズマ加速装置において、アノードの位置の変形例を示す図である。

## 【発明を実施するための形態】

## 【0026】

以下、本発明の実施の形態に係るプラズマ加速装置、及び、プラズマ加速方法について、添付図面を参照して説明する。

## 【0027】

## (座標系の定義)

40

図4、図5、及び、図6を参照して、座標系の定義を行う。X方向は、プラズマ加速装置100、200、300の中心軸であるX軸の方向であり、+X方向は、プラズマ加速装置100、200、300の後ろ方向、すなわち、プラズマが放出される方向を意味する。方向は、前記X軸まわりの回転方向であり、+方向は、+X方向にみて時計回りを意味する。

## 【0028】

## (重要な用語の定義)

本実施の形態において、+X方向の側を「下流側」と定義し、-X方向の側を「上流側」と定義する。また、「無電極プラズマ」は、無電極プラズマ生成装置で生成されたプラズマと定義する。「無電極プラズマ生成装置」は、プラズマの生成過程において、電極と

50

プラズマとが直接接触することのないプラズマ生成装置と定義する。

【0029】

(第1の実施形態)

図4を参照して、第1の実施形態に係るプラズマ加速装置について説明する。図4は、第1の実施形態のプラズマ加速装置の構成を模式的に示す図である。

【0030】

1. プラズマ加速装置100の構成

プラズマ加速装置100は、プラズマの供給路1、磁気コイル2、カソード3、アノード4、電圧印加装置5を備える。供給路1は、上流側から下流側に向かってプラズマを供給する流路である。供給路1の上流部は、例えば、プラズマ供給管によって構成される。なお、プラズマ供給管は、断面円形の管であることが好ましい。供給路1の下流部は、例えば、プラズマ供給管よりも下流側の空間である。また、供給路1を介して供給されるプラズマは、好ましくは、無電極プラズマ生成装置によって生成される無電極プラズマである。磁気コイル2は、供給路1を囲むように配置される。換言すれば、供給路1は、磁気コイル2の中央領域Qを横断する。ここで、磁気コイル2の中央領域Qとは、磁気コイル2の内径の内側の空洞領域(図4において破線で囲まれた領域)を意味する。なお、磁気コイルの中心軸Sは、X軸と一致することが好ましい。磁気コイル2は、コイルの中央領域Qに、コイルの中心軸Sに沿う軸方向磁場 $B_x$ を生成する。前記軸方向磁場 $B_x$ は、下流側で、前記中心軸Sから遠ざかる方向に拡散される。拡散された磁場は、前記中心軸Sから放射状に拡がる径方向磁場 $B_d$ を含む。なお、磁気コイル2は、軸方向磁場 $B_x$ 及び径方向磁場 $B_d$ を生成する第1強磁性体(図示せず)に置換することが可能である。磁気コイル2と第1強磁性体とは、磁場(軸方向磁場及び径方向磁場)を生成する磁場生成体(軸方向磁場及び径方向磁場生成体)であるといえる。カソード3は、電子を放出する。カソード3は、好ましくは、微細孔を備えたホローカソードである。アノード4は、カソード3の上流側に配置される。電圧印加装置5は、カソード3とアノード4との間に印加電圧 $V_{ac}$ を印加して、X軸方向の電場 $E_x$ を生成する。

【0031】

2. プラズマ加速装置100の作動原理

次に、プラズマ加速装置100の作動原理について説明する。

(1) 磁気コイル2を作動させることにより、磁気コイル2の中央領域Qには、軸方向磁場 $B_x$ が生成される。また、磁気コイル2を作動させることにより、磁気コイル2の下流側には、径方向磁場 $B_d$ を含む磁場が生成される。代替的に、軸方向磁場 $B_x$ 及び径方向磁場 $B_d$ は、第1強磁性体によって生成されてもよい。

(2) 電圧印加装置5による電圧印加により、カソード3とアノード4との間には、X軸方向の電場 $E_x$ が生成される。また、カソード3からは、電子 $e^-$ が放出される。

(3) 供給路1を介してプラズマが供給される。

(4) 供給路1を介して供給されるプラズマ(特に、陽イオン $P^+$ )は、カソード3から放出される前記電子 $e^-$ と、前記径方向磁場 $B_d$ と、前記電場 $E_x$ との相互作用により生成されるホール電場 $E$ によって、下流側に向かって加速される。なお、ホール電場 $E$ による加速のメカニズムの概要は下記(4a)(4b)(4c)のとおりである。

(4a) 径方向磁場 $B_d$ 及び電場 $E_x$ の存在する領域に向けて、カソード3から電子 $e^-$ が放出される。放出された電子 $e^-$ は、径方向磁場 $B_d$ に捕捉されて、ホール運動する。電子 $e^-$ のホール運動により、ホール電流が生成される。換言すれば、カソード3から放出される電子 $e^-$ は、径方向磁場 $B_d$ と電場 $E_x$ との相互作用により、ホール電流(例えば、中心軸Sのまわりを-方向に回転する電流)を生成する。

(4b) ホール電流と径方向磁場 $B_d$ との相互作用(ホール効果)によりホール電場 $E$ が生成される。

(4c) ホール電場 $E$ の存在下において、供給路1を介してプラズマが供給される。前記プラズマは、電離した陽イオン $P^+$ と電子 $e^-$ を含む。電離した電子 $e^-$ の一部は、アノード4に捕捉される。電離した電子 $e^-$ の一部は、径方向磁場 $B_d$ に捕捉されて、前記ホ

ール電流を強化する。電離した陽イオン  $P^+$  は、ホール電場  $E$  により、下流側に向けて加速される。なお、カソード 3 とアノード 4 との間に生成される X 軸方向の電場  $E_x$  も、プラズマ（陽イオン  $P^+$ ）の加速を補助する。

（5）加速された陽イオン  $P^+$  の一部は、カソードから放出される電子  $e^-$  の一部と衝突し、電気的に中和された状態で、プラズマ加速装置 100 の下流側に放出される。加速された陽イオン  $P^+$  の一部は、クーロン力により、カソードから放出される電子  $e^-$  の一部を引き付け、当該電子  $e^-$  を伴って、プラズマ加速装置 100 の下流側に放出される。

#### 【0032】

##### 3. 効果

プラズマ加速装置 100 の下流側に放出される粒子（陽イオン  $P^+$  と電子  $e^-$  との衝突により生成される粒子）又はプラズマは、電気的に中性の粒子又は電気的に中性のプラズマ（電子  $e^-$  とともに放出される陽イオン  $P^+$ ）である。よって、プラズマ加速装置 100 は、電気的に概ね中性の状態が維持されるため、空間電荷制限（ある電極間に電位差を加えてイオンを加速する場合、流すことのできる電流密度の上限）の影響を受けない。このため、第 1 の実施形態におけるプラズマ加速装置 100 は、大推力化が可能である。

#### 【0033】

また、第 1 の実施形態におけるプラズマ加速装置 100 は、リサーディュ加速装置のように、回転電場又は回転磁場を用いるものではない。よって、密度の高い無電極プラズマを供給路 1 を介して供給する場合であっても、無電極プラズマを有効に加速することが可能である。このため、第 1 の実施形態におけるプラズマ加速装置 100 は、大推力化が可能である。

#### 【0034】

##### （第 2 の実施形態）

図 5 を参照して、第 2 の実施形態に係るプラズマ加速装置について説明する。図 5 は、第 2 の実施形態のプラズマ加速装置の構成を模式的に示す図である。

#### 【0035】

第 2 の実施形態において、第 1 の実施形態と同じ構成要素については、同じ図番を用いている。第 2 の実施形態のプラズマ加速装置 200 は、第 2 強磁性体 6（磁束の通路を形成する磁気回路）を備える点で、第 1 の実施形態のプラズマ加速装置 100 と異なる。磁気コイル 2（又は第 1 強磁性体）の下流側に配置される第 2 強磁性体 6 の具体的な位置は任意である。なお、第 2 強磁性体 6 は、磁気コイル 2（又は第 1 強磁性体）の下流側に、磁気コイル 2（又は第 1 強磁性体）に隣接して配置されることが好ましい。ここで、「隣接」とは、磁気コイル 2（又は第 1 強磁性体）と第 2 強磁性体 6 とが接する状態（距離がゼロの状態）から、磁気コイル 2（又は第 1 強磁性体）と第 2 強磁性体 6 とが 100 mm 離間する状態までの範囲を意味する。また、第 2 強磁性体 6 は、供給路 1 の周囲に、環状（リング状）に配置されることが好ましい。

#### 【0036】

第 2 強磁性体 6 は、磁気コイル 2（又は第 1 強磁性体）の下流側の磁束を集め、強力な径方向磁場  $B_d$  を形成する。このため、第 1 の実施形態と比較して、形成されるホール電流、及び、ホール電場  $E$  が強化される。その結果、ホール電場  $E$  によるプラズマの加速が強化される。

#### 【0037】

本実施形態の作動原理は、第 1 の実施形態の作動原理と同様である。

#### 【0038】

本実施形態は、第 1 の実施形態と同様の効果を奏するのに加え、第 1 の実施形態のプラズマ加速装置と比較して、更なる大推力化が可能である。

#### 【0039】

##### （第 3 の実施形態）

図 6 を参照して、第 3 の実施形態に係るプラズマ加速装置について説明する。図 6 は、第 3 の実施形態のプラズマ加速装置の構成を模式的に示す図である。

10

20

30

40

50

## 【0040】

第3の実施形態において、第1の実施形態と同じ構成要素については、同じ図番を用いている。

## 【0041】

## 1. プラズマ加速装置300の構成

プラズマ加速装置300は、プラズマの供給路1、磁気コイル2（又は第1強磁性体）、カソード3、アノード4、電圧印加装置5、第2強磁性体6（磁束の通路を形成する磁気回路）を備える。

## 【0042】

## (プラズマの供給路1)

10

供給路1は、上流側から下流側に向かってプラズマを供給する流路である。供給路1の上流部は、例えば、上流管11によって構成される。供給路1の下流部は、例えば、下流管12によって構成される。上流管11及び下流管12は、断面円形の管であることが好ましい。上流管11の上流からは、推進剤（例えば、アルゴンガス、キセノンガス）が供給される。また、上流管11の周囲には、推進剤をプラズマ化するためのアンテナ13が配置されている。アンテナ13は、例えば、ヘリカルアンテナである。ヘリカルアンテナに高周波電流を流すと電場が誘起される。後述の磁気コイル2によって生成される軸方向磁場 $B_x$ と前記電場との相互作用によりヘリコン波が発生する。ヘリコン波を発生させるために、アンテナ13は、磁気コイル2の内部に挿入されていることが好ましい。換言すれば、前記磁気コイル2と前記アンテナ13とは、供給路1の方向（好ましくは、供給路1の方向とX軸の方向とは一致する。）に、少なくとも一部分がオーバーラップしていることが好ましい。ヘリコン波は、推進剤に作用して、ヘリコンプラズマを生成する。生成されたヘリコンプラズマは、下流管12に供給される。なお、上流管11及び下流管12は、絶縁材料で形成することが好ましい。絶縁材料としては、例えば、ホトペール（登録商標）を用いることができる。また、上流管11の内径 $d_1$ は、電界及び軸方向磁場 $B_x$ を作用させて、推進剤を電離させるために、20mm以上、100mm以下であることが好ましい。

20

## 【0043】

## (アンテナ13の例)

30

アンテナ13としては、種々の形態のアンテナを採用し得る。図7Aは、アンテナの第1例を示す。第1例のアンテナは、ループアンテナである。図7Bは、アンテナの第2例を示す。第2例のアンテナは、Boswellアンテナである。図7Cは、アンテナの第3例を示す。第3例のアンテナは、サドル型アンテナである。図7Dは、アンテナの第4例を示す。第4例のアンテナは、名古屋タイプ3型アンテナである。当該アンテナでは、4個のコイル電流間の位相を変えることにより複数のモードの選択が可能である。図7Eは、アンテナの第5例を示す。第5例のアンテナは、ヘリカルアンテナである。図7Fは、アンテナの第6例を示す。第6例のアンテナは、スパイラル型アンテナである。当該アンテナは、大口径のプラズマ供給路に適用可能である。

## 【0044】

## (磁気コイル2)

40

磁気コイル2は、供給路1を囲むように配置される。換言すれば、供給路1は、磁気コイル2の中央領域Qを横断する。ここで、磁気コイル2の中央領域Qとは、磁気コイル2の内径の内側の空洞領域（図6において破線で囲まれた領域）を意味する。なお、磁気コイル2の中心軸Sは、X軸と一致することが好ましい。好ましくは、磁気コイル2の内周面は、上流管11及び/又は下流管12の外周面に対向配置される。磁気コイル2は、支持部材21によって支持される。磁気コイル2は、コイルの中央領域Qに、中心軸Sに沿う軸方向磁場 $B_x$ を形成する。前記軸方向磁場 $B_x$ は、磁気コイル2及び第2強磁性体6の下流側で、前記中心軸Sから遠ざかる方向に拡散される。すなわち、磁気コイル2は、推進剤をプラズマ化するための軸方向磁場 $B_x$ を提供するとともに、ホール電場を形成するための径方向磁場 $B_d$ を提供する。なお、磁気コイル2及び第2強磁性体6の下流側で

50

磁場を拡散させるために、下流管12の内径d2は、上流管11の内径d1よりも大きいことが好ましい。なお、磁気コイル2は、軸方向磁場 $B_x$ 及び径方向磁場 $B_d$ を生成する第1強磁性体(図示せず)に置換することが可能である。

#### 【0045】

(第2強磁性体6(磁束の通路を形成する磁気回路))

第2強磁性体6は、磁気コイル2(又は第1強磁性体)よりも下流側に配置される。第2強磁性体6は、下流管12の周囲に配置される(下流管12を囲むように配置される)ことが好ましい。第2強磁性体6は、磁気コイル2(又は第1強磁性体)の下流側に、磁気コイルに隣接して配置されることが好ましい。また、第2強磁性体6は、供給路1の周囲に、環状(リング状)に配置されることが好ましい。第2強磁性体6は、磁気コイル2(又は第1強磁性体)及び第2強磁性体6の下流側の磁束を集め、強力な径方向磁場 $B_d$ を形成する。すなわち、第2強磁性体6は、磁束収集体であるといえる。このため、第1の実施形態と比較して、形成されるホール電流、及び、ホール電場Eが強化される。その結果、ホール電場Eによるプラズマの加速が強化される。なお、図8(図6のA-A矢視断面図)に示されるように、第2強磁性体6は、複数の分割片6-1、6-2、・・・、6-nで構成されてもよい。そして、複数の分割片6-1、6-2、・・・、6-nは、供給路1の周囲に等間隔で配置される。図8の例では、分割片の個数は16であるが、この例に限定されない。第2強磁性体6を複数の分割片で構成することにより、第2強磁性体6の製造コストが低減される。なお、第2強磁性体6は、例えば、ネオジム磁石である。

#### 【0046】

第2強磁性体6は、ヨーク60に取り付けられる。ヨーク60は、磁気コイル2(又は第1強磁性体)を支持する支持部材21に取り付けられる。ヨーク60の材質は、例えば、軟鉄である。前記ヨーク60は、第2強磁性体6よりも外方(径外方向)に延びる延設部61を備える。延設部61の形状は、例えば、平板リング形状である。延設部61を備えることにより、磁気コイル2(又は第1強磁性体)及び第2強磁性体6の下流側の磁束を、より強力に集めることができる。なお、延設部61の材質は、例えば、軟鉄である。

#### 【0047】

磁気コイル2(又は第1強磁性体)及び第2強磁性体6(磁気回路)によって、磁気コイル2(又は第1強磁性体)及び第2強磁性体6の下流側(より具体的には、ホール電流の円形の電流路の中央部)に、磁束密度が疎である領域(カスプ磁場)が形成される。

#### 【0048】

(カソード3)

カソード3は、電子を放出する。カソード3は、好ましくは、微細孔を備えたホローカソードである。ホローカソードは、化学物質であるインサートを備えていてもよい。このインサートをヒーターにより高温に熱すると、インサートは熱電子を放出する。放出された熱電子はホローカソード内に供給される作動ガスと電離衝突し、ホローカソード内でプラズマを発生させる。カソードの出口に、正電極を配置すると、プラズマの中から電子がカソード外に放出される。

#### 【0049】

(アノード4)

アノード4は、カソード3の上流側に配置される。前記アノード4は、前記磁気コイル2(又は第1強磁性体)の下流端よりも上流側に配置されてもよい。また、前記アノード4は、前記磁気コイル2(又は第1強磁性体)の上流端よりも下流側に配置されてもよい。なお、アノード4を配置する具体的な位置としては、下流管12の内側で下流管12の上流側端部が好ましい。すなわち、アノード4を、上流管11と下流管12との間の内径拡大部に設置することが好ましい。ただし、アノード4を設ける位置は、上記の例に限定されない。アノード4は、下流管12のどの位置に設けてもよい。例えば、図9に示されるように、下流管12の下流側端部に設けてもよい。また、アノード4の材質は、例えば、銅である。

#### 【0050】

10

20

30

40

50

## 2. プラズマ加速装置 300 の作動原理

次に、プラズマ加速装置 300 の作動原理について説明する。

(1) 磁気コイル 2 を作動させることにより、磁気コイル 2 の中央領域 Q には、軸方向磁場  $B_x$  が生成される。また、磁気コイル 2 を作動させることにより、磁気コイル 2 及び第 2 強磁性体 6 の下流側には、径方向磁場  $B_d$  を含む磁場が生成される。代替的に、軸方向磁場  $B_x$  及び径方向磁場  $B_d$  は、第 1 強磁性体及び第 2 強磁性体 6 によって生成されてもよい。

(2) 電圧印加装置 5 による電圧印加により、カソード 3 とアノード 4との間には、X 軸方向の電場  $E_x$  が生成される。また、カソード 3 からは、電子  $e^-$  が放出される。

(3) 上流管 11 に推進剤(例えば、アルゴンガス、キセノンガス)が供給される。 10

(4) アンテナ 13 に高周波電流を印加することにより電場が誘起される。磁気コイル 2 (又は第 1 強磁性体)により生成される軸方向磁場  $B_x$  と前記電場との相互作用により、ヘリコン波が発生する。

(5) ヘリコン波が、上流管 11 に供給された推進剤に作用することにより、推進剤がプラズマ化される。

(6) プラズマ化した推進剤(無電極プラズマ)は、上流管 11 から下流管 12 に向けて供給され、さらに、下流管 12 の下流側に放出される。

(7) 放出された無電極プラズマ(供給路 1 を介して供給される無電極プラズマ、特に、無電極プラズマを構成する陽イオン  $P^+$ )は、カソード 3 から放出される前記電子  $e^-$  と、前記径方向磁場  $B_d$  と、前記電場  $E_x$  との相互作用により生成されるホール電場  $E$  によって、下流側に向かって加速される。なお、ホール電場  $E$  による加速のメカニズムの概要是下記(7a) (7b) (7c) のとおりである。 20

(7a) 径方向磁場  $B_d$  及び電場  $E_x$  の存在する領域に向けて、カソード 3 から電子  $e^-$  が放出される。放出された電子  $e^-$  は、径方向磁場  $B_d$  に捕捉されて、ホール運動する。電子  $e^-$  のホール運動により、ホール電流(例えば、中心軸 S のまわりを- 方向に回転する電流)が生成される。換言すれば、カソード 3 から放出される電子  $e^-$  は、径方向磁場  $B_d$  と電場  $E_x$  との相互作用により、ホール電流を生成する。

(7b) ホール電流と径方向磁場  $B_d$  との相互作用(ホール効果)によりホール電場  $E$  が生成される。

(7c) ホール電場  $E$  の存在下において、供給路 1 を介して無電極プラズマが供給される。前記無電極プラズマは、電離した陽イオン  $P^+$  と電子  $e^-$  を含む。電離した電子  $e^-$  の一部は、アノードに捕捉される。電離した電子  $e^-$  の一部は、径方向磁場  $B_d$  に捕捉されて、前記ホール電流を強化する。電離した陽イオン  $P^+$  は、ホール電場  $E$  により、下流側に向けて加速される。なお、カソード 3 とアノード 4 との間に生成される X 軸方向の電場  $E_x$  も、プラズマ(陽イオン  $P^+$ )の加速を補助する。 30

(8) 加速された陽イオン  $P^+$  の一部は、ホール電流を形成する電子  $e^-$  と衝突し、電気的に中和された状態で、プラズマ加速装置 300 の下流側に放出される。加速された陽イオン  $P^+$  の一部は、クーロン力により、ホール電流を形成する電子  $e^-$  を引き付け、当該電子  $e^-$  を伴って、プラズマ加速装置 300 の下流側に放出される。

(9) なお、前記陽イオン  $P^+$  は、磁束密度が疎である領域(カスプ磁場)を通過するため、磁束による拘束から解放される。このため、陽イオン  $P^+$  は、プラズマ加速装置 300 の下流側に向けて、良好に拡散放出される。 40

## 【0051】

### 3. 効果

本実施形態は、第 1 の実施形態と同様の効果を奏するのに加え、以下の効果を奏する。第 1 に、第 2 強磁性体の存在によって、ホール電場が強化されるために、更なる大推力化が可能である。第 2 に、プラズマとして、ヘリコンプラズマを用いるので、プラズマの高密度化が可能である。このため、更なる大推力化が可能である。第 3 に、磁気コイル 2 (又は第 1 強磁性体)は、プラズマ生成用の軸方向磁場  $B_x$  を形成するとともに、ホール電流生成用の径方向磁場  $B_d$  を形成する。すなわち、1 つの磁気コイル 2 (又は第 1 強磁性 50

体)を用いて、プラズマの生成とプラズマの加速とを行うため、装置全体をコンパクトにすることができる。

【0052】

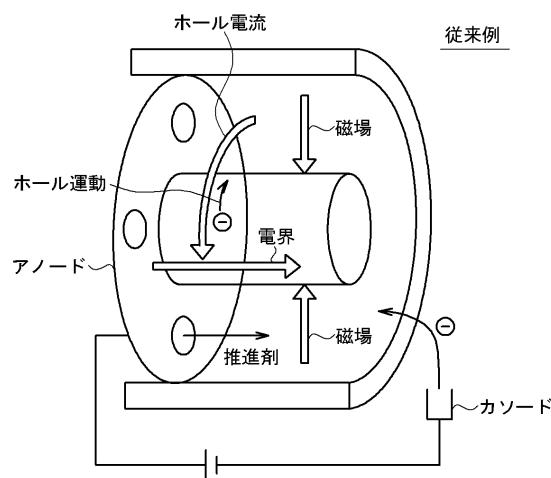
本発明は上記各実施の形態に限定されず、本発明の技術思想の範囲内において、各実施の形態は適宜変形又は変更され得ることは明らかである。また、各実施の形態で用いられる種々の技術は、技術的矛盾が生じない限り、他の実施の形態にも適用可能である。

【符号の説明】

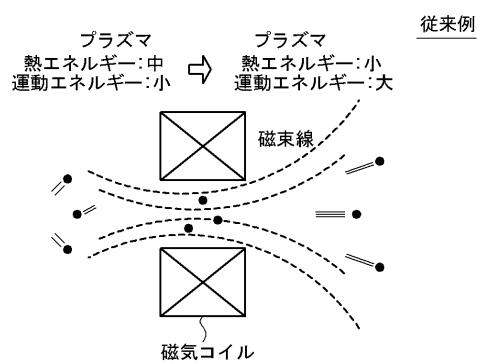
【0053】

1	： プラズマの供給路	
2	： 磁場生成体(磁気コイル)	10
3	： カソード	
4	： アノード	
5	： 電圧印加装置	
6	： 磁束収集体(第2強磁性体)	
6 - 1 ~ 6 - n	： 分割片	
1 1	： 上流管	
1 2	： 下流管	
1 3	： アンテナ	
2 1	： 支持部材	
6 0	： ヨーク	20
6 1	： 延設部	
1 0 0	： プラズマ加速装置	
2 0 0	： プラズマ加速装置	
3 0 0	： プラズマ加速装置	
B <sub>d</sub>	： 径方向磁場	
B <sub>x</sub>	： 軸方向磁場	
E	： ホール電場	
E <sub>x</sub>	： 電場	
Q	： 磁気コイルの中央領域	
S	： 磁気コイルの中心軸	30
V <sub>a c</sub>	： 印加電圧	
d 1	： 内径	
d 2	： 内径	
e <sup>-</sup>	： 電子	
P <sup>+</sup>	： 陽イオン	

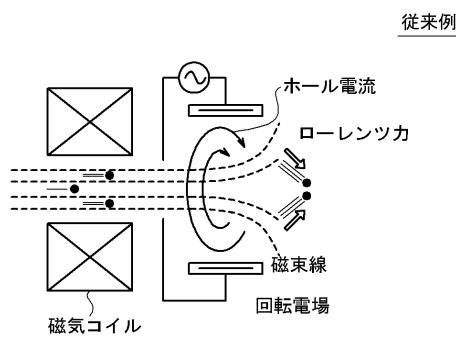
【図1】



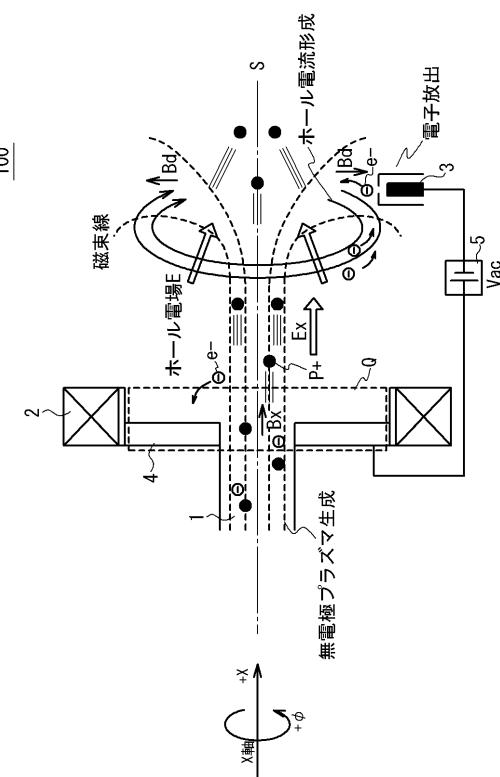
【図2】



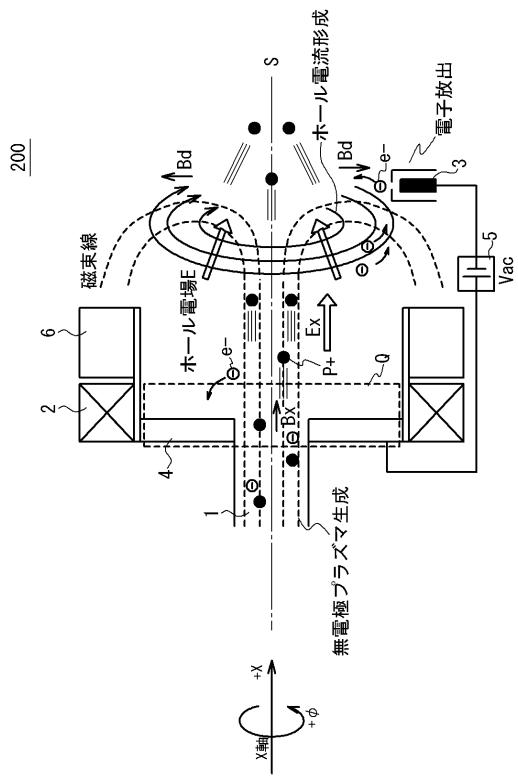
【図3】



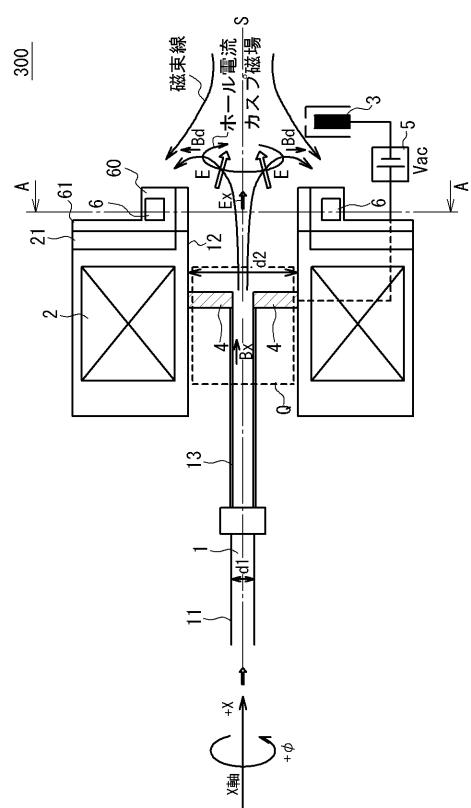
【図4】



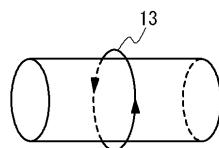
【図5】



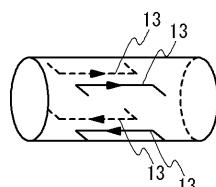
【図6】



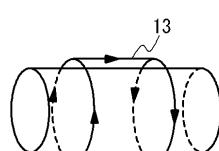
【図7 A】



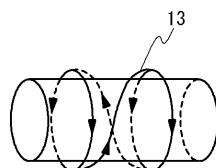
【図7 B】



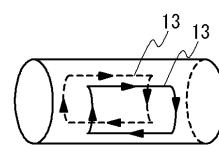
【図7 D】



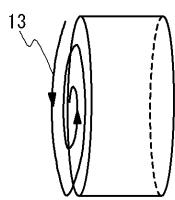
【図7 E】



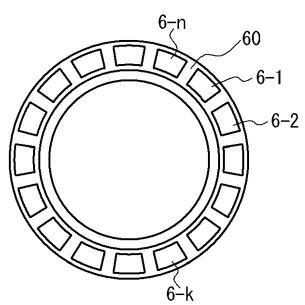
【図7 C】



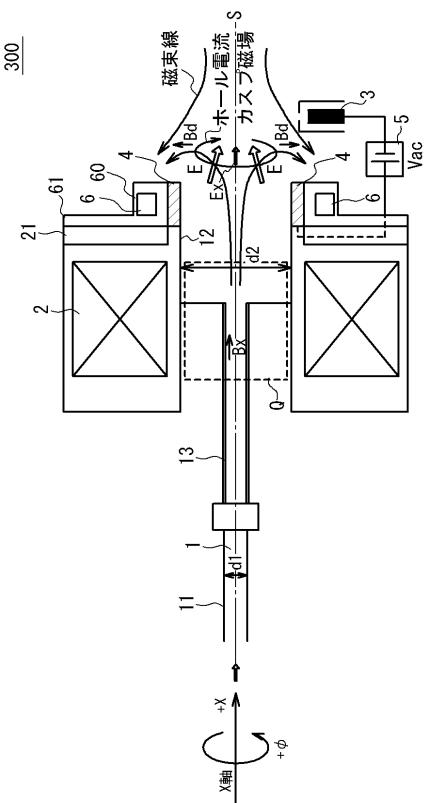
【図7F】



【図8】



【図9】



---

フロントページの続き

(72)発明者 清水 宏文  
東京都港区港南二丁目16番5号 三菱重工業株式会社内

(72)発明者 佐宗 章弘  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内

(72)発明者 横田 茂  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内

(72)発明者 原田 翔太  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内

(72)発明者 馬場 輝明  
愛知県名古屋市千種区不老町1番 国立大学法人名古屋大学内

審査官 右 高 孝幸

(56)参考文献 特表2002-516644 (JP, A)  
米国特許出願公開第2012/0217876 (US, A1)

(58)調査した分野(Int.Cl., DB名)

H 05 H	1 / 5 4
F 03 H	1 / 0 0
H 05 H	1 / 4 6