

(12) 特許協力条約に基づいて公開された国際出願

(19) 世界知的所有権機関
国際事務局

(43) 国際公開日
2015 年 11 月 26 日(26.11.2015)



(10) 国際公開番号
WO 2015/177942 A1

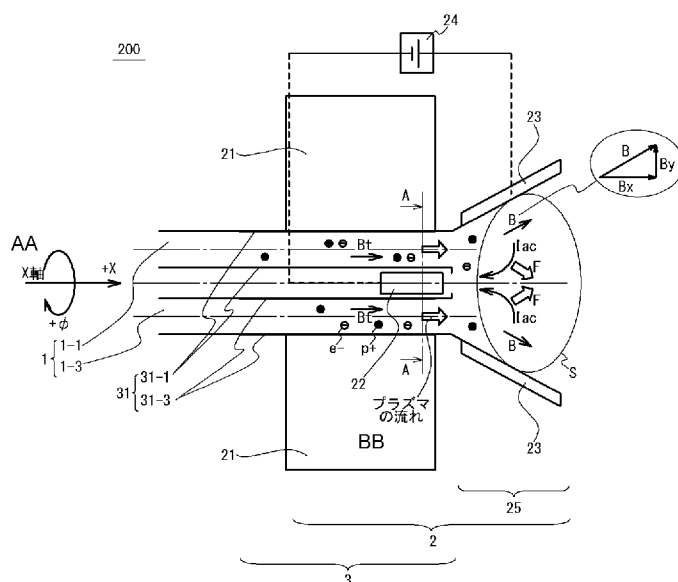
- (51) 国際特許分類:
F03H 1/00 (2006.01) *H05H 1/54* (2006.01)
- (21) 国際出願番号: PCT/JP2014/072147
- (22) 国際出願日: 2014 年 8 月 25 日(25.08.2014)
- (25) 国際出願の言語: 日本語
- (26) 国際公開の言語: 日本語
- (30) 優先権データ:
特願 2014-107583 2014 年 5 月 23 日(23.05.2014) JP
- (71) 出願人: 三菱重工業株式会社 (MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES, LTD.) [JP/JP]; 〒1088215 東京都港区港南二丁目 1 6 番 5 号 Tokyo (JP). 国立大学法人名古屋大学 (NATIONAL UNIVERSITY CORPORATION NAGOYA UNIVERSITY) [JP/JP]; 〒4648601 愛知県名古屋市千種区不老町 1 番 Aichi (JP).

- (72) 発明者: 山▲崎▼ 拓也 (YAMAZAKI Takuya); 〒1088215 東京都港区港南二丁目 1 6 番 5 号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP). 清水 宏文 (SHIMIZU Hirofumi); 〒1088215 東京都港区港南二丁目 1 6 番 5 号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP). 藤原 哲 (FUJIWARA Satoshi); 〒1088215 東京都港区港南二丁目 1 6 番 5 号 三菱重工業株式会社内 Tokyo (JP). 佐宗 章弘 (SASOH Akihiro); 〒4648601 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 Aichi (JP). 横田 茂 (YOKOTA Shigeru); 〒4648601 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 Aichi (JP). 原田 翔太 (HARADA Syota); 〒4648601 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 Aichi (JP). 馬場 輝明 (BABA Teruaki); 〒4648601 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 Aichi (JP).

[続葉有]

(54) Title: MPD THRUSTER FOR ACCELERATING ELECTRODELESS PLASMA, AND METHOD FOR ACCELERATING ELECTRODELESS PLASMA USING MPD THRUSTER

(54) 発明の名称: 無電極プラズマを加速するMPDスラスタ、及び、MPDスラスタを用いて無電極プラズマを加速する方法



AA X axis
BB Plasma flow

(57) Abstract: Electrodeless plasma is supplied to a space (S) between a cathode (22) and an anode (23) to lower the electrical resistivity in the space, and the electrodeless plasma is accelerated by Lorentz force induced by an axial magnetic field component (B_x) and a radial magnetic field component (B_y) generated in the space (S), and by an electric current (I_{ac}) flowing through the space (S).

(57) 要約: カソード(22)とアノード(23)の間の空間(S)に無電極プラズマを供給して、前記空間内の電気抵抗率を下げ、前記空間(S)に生成される軸方向磁場成分(B_x)及び径方向磁場成分(B_y)と、前記空間(S)を流れる電流(I_{ac})とによって誘起されるローレンツ力によって、前記無電極プラズマを加速する。

WO 2015/177942 A1



(74) 代理人: 工藤 実(KUDOH Minoru); 〒1400013 東京都品川区南大井六丁目 2 4 番 1 0 号カドヤビル 6 階 Tokyo (JP).

(81) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の国内保護が可能): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BN, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CL, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IR, IS, KE, KG, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PA, PE, PG, PH, PL, PT, QA, RO, RS, RU, RW, SA, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TH, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW.

(84) 指定国 (表示のない限り、全ての種類の広域保護が可能): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LR, LS, MW, MZ, NA, RW, SD, SL, ST, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), ユーロアジア (AM, AZ, BY, KG, KZ, RU, TJ, TM), ヨーロッパ (AL, AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MK, MT, NL, NO, PL, PT, RO, RS, SE, SI, SK, SM, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, KM, ML, MR, NE, SN, TD, TG).

添付公開書類:

— 国際調査報告 (条約第 21 条(3))

明 細 書

発明の名称：

無電極プラズマを加速するMPDスラスタ、及び、MPDスラスタを用いて無電極プラズマを加速する方法

技術分野

[0001] 本発明は、無電極プラズマを加速するMPDスラスタ、及び、MPDスラスタを用いて無電極プラズマを加速する方法に関する。

背景技術

[0002] 宇宙で使用される推進装置として、MPDスラスタ (Magnetoplasma-Dynamic thruster) が知られている。図1に、MPDスラスタの例を示す。例示のMPDスラスタは、アーク放電によって推進剤 (ガス) を電離することでプラズマを生成する。そして、スラスタの外周側に配置されたアノードと、中心側に配置されたカソードとの間に流れる電流と、その電流によって生成される磁場 (又は、予め印加された磁場) によってローレンツ力が発生する。前記ローレンツ力によって、生成されたプラズマは加速される。

[0003] 宇宙で使用される推進装置に関連する技術として、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、放電により形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。

先行技術文献

特許文献

[0004] 特許文献1：特公平5-45797号公報 (特許第1836674号)

特許文献2：特許第4925132号公報

発明の概要

[0005] 本発明におけるMPDスラスタは、推進剤から無電極プラズマを生成する

無電極プラズマ生成装置と、前記無電極プラズマを加速させる加速装置と、生成された前記無電極プラズマを、前記加速装置に供給する供給路と、を備える。また、前記加速装置は、磁気コイルと、カソードと、アノードと、前記カソードと前記アノードの間に電圧を印加する電圧印加装置と、を備える。さらに、前記供給路は、前記カソードと前記アノードの間の空間に前記無電極プラズマを供給する。また、前記磁気コイルは、前記空間内に、前記磁気コイルの中心軸の方向に沿う軸方向磁場成分及び前記中心軸に直交する径方向磁場成分を生成する。加えて、前記電圧印加装置は、前記空間内に電流を生成する。また、前記空間に供給される前記無電極プラズマは、前記軸方向磁場成分及び前記径方向磁場成分と、前記電流とによって誘起されるローレンツ力によって、前記無電極プラズマを加速する。

[0006] 本発明における無電極プラズマを加速する方法は、MPDスラスタを用いて無電極プラズマを加速する方法である。無電極プラズマを加速する方法は、カソードとアノードの間の空間に無電極プラズマを供給して、前記空間内の電気抵抗率を下げる工程と、前記空間内に、前記MPDスラスタの中心軸の方向に沿う軸方向磁場成分及び前記中心軸に直交する径方向磁場成分を生成する工程と、前記空間内に電流を生成する工程と、前記軸方向磁場成分及び前記径方向磁場成分と、前記電流とによって誘起されるローレンツ力によって、前記無電極プラズマを加速する工程とを備える。

[0007] 上記構成によって、供給電力を抑制し、電極損耗を低減し、推進効率を向上させることが可能なMPDスラスタが提供される。

[0008] この発明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。

図面の簡単な説明

[0009] 添付の図面は、実施形態の説明を助けるために本明細書に組み込まれる。図面は、本発明を、図示された例および説明された例に限定するものとして解釈されるべきではない。

[図1]図1は、従来のMPDスラスタの構成を模式的に示す断面図である。

[図2A]図2 Aは、本発明の第1の実施形態のMPDスラストの構成を模式的に示す断面図である。

[図2B]図2 Bは、図2 AのA－A矢視断面図である。

[図2C]図2 Cは、図2 AのC－C矢視断面図である。

[図3A]図3 Aは、本発明の第2の実施形態のMPDスラストの構成を模式的に示す断面図である。

[図3B]図3 Bは、図3 AのA－A矢視断面図である。

[図4]図4は、第2の実施形態のMPDスラストの斜視図であって、スラストの一部分を切り欠いた斜視図である。

[図5A]図5 Aは、アンテナ（プラズマ生成アンテナ）の第1例を示す図である。

[図5B]図5 Bは、アンテナ（プラズマ生成アンテナ）の第2例を示す図である。

[図5C]図5 Cは、アンテナ（プラズマ生成アンテナ）の第3例を示す図である。

[図5D]図5 Dは、アンテナ（プラズマ生成アンテナ）の第4例を示す図である。

[図5E]図5 Eは、アンテナ（プラズマ生成アンテナ）の第5例を示す図である。

[図5F]図5 Fは、アンテナ（プラズマ生成アンテナ）の第6例を示す図である。

[図6]図6は、本発明の第2の実施形態において、アンテナの作動装置の一例を示す機能ブロック図である。

[図7]図7は、本発明の実施形態において、供給路、カソード、アノードの位置関係、及び、供給路、アンテナ、磁気コイルの位置関係について示す模式図である。

[図8]図8は、本発明の実施形態において、供給路の変形例を示す断面図であって、X軸に垂直な断面図である。

発明を実施するための形態

[0010] 以下、本発明の実施形態に係るMPDスラストに関して、添付図面を参照して説明する。

以下の詳細な説明においては、実施形態の包括的な理解を提供するために、説明の目的で多くの詳細な特定事項が開示される。しかし、一又は複数の実施形態は、これらの詳細な特定事項なしで実行可能であることが明らかである。また、周知の構造又は周知の装置は、図面を簡潔なものとするために概要のみが示されている。

[0011] (座標系の定義)

図2A、図3Aを参照して、座標系の定義を行う。X方向は、MPDスラスト100、200の前後方向であり、+X方向は、MPDスラスト100、200の後ろ方向、すなわち、ノズル側の方向を意味する。 ϕ 方向は、MPDスラスト100、200の中心軸であるX軸まわりの回転方向であり、+ ϕ 方向は、+X方向にみて時計回りを意味する。

[0012] (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。

[0013] (第1の実施形態)

図2A乃至図2Cを参照して、第1の実施形態に係るMPDスラストについて説明する。図2Aは、第1の実施形態のMPDスラスト100の構成を模式的に示す断面図である。また、図2B、図2Cは、それぞれ、図2AのA-A矢視断面図、図2AのC-C矢視断面図である。

[0014] 1. MPDスラスト100の構成

MPDスラスト100は、無電極プラズマを供給する供給路1と、加速装置2と、無電極プラズマ生成装置(図示せず)を備える。

[0015] (供給路 1)

供給路 1 は、例えば、4 つの供給管 1-1、1-2、1-3、1-4 で構成される。なお、供給管の数は 4 つに限定されず、任意である。また前記供給管の内径は 20 mm 以上、100 mm 以下であってもよい。また、供給管を複数配置する場合には、前記供給管を、後述のカソード 22 の周囲に等間隔で配置することが好ましい。なお、カソード 22 と前記供給管との間は接することがない程度に離間してもよい。供給路 1 内には推進剤が供給される。推進剤は、例えば、アルゴンガス、キセノンガス等のガスである。そして、供給路 1 に供給された推進剤は、無電極プラズマ生成装置によって、陽イオン P^+ と電子 e^- とに電離され（プラズマ化され）、無電極プラズマが生成される。なお、無電極プラズマ生成装置は、無電極プラズマを生成する装置であればどのような装置であってもよい。代替的に、無電極プラズマ生成装置で予め生成された無電極プラズマが、供給路 1 に供給されるようにしてもよい。供給路 1 内の無電極プラズマは、加速装置 2 に供給される。より詳細には、無電極プラズマは、カソード 22 とアノード 23 の間の空間 S に供給される。

[0016] (加速装置 2)

加速装置 2 は、磁気コイル 21、カソード 22、アノード 23、電圧印加装置 24 を備える。磁気コイル 21 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 21 の中央領域を横断する。ここで、磁気コイル 21 の中央領域とは、磁気コイル 21 の内径の内側の空洞領域を意味する。磁気コイル 21 の中心軸は、X 軸に一致していることが好ましい。磁気コイル 21 は、カソード 22 とアノード 23 の間の空間 S に、磁場 B を発生させる。磁場 B は、磁気コイル 21 の中心軸（X 軸）に沿う成分である軸方向磁場成分 B_x と、中心軸（X 軸）に直交する成分である径方向磁場成分 B_y を含む。カソード 22 は、電子を放出する。カソード 22 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 23 は、カソードの下流側に配置される。アノード 23 は、ノズル 25 の内面の少なくとも一部を

構成するプレートで構成することが好ましい。なお、アノード 23 は、複数の部分に分割された分割体の組み合わせによって構成されてもよい。また、ノズル 25 は、下流側に向かって拡開する傾斜内面を有するノズルであることが好ましい。電圧印加装置 24 は、カソード 22 とアノード 23 の間に電圧を印加し、カソード 22 とアノード 23 の間に、すなわち、空間 S に、電流 I_{ao} を発生させる。なお、図 2A において、電圧印加装置 24 とカソード 22 とを接続する配線、及び、電圧印加装置 24 とアノード 23 とを接続する配線は、説明をわかりやすくするために便宜的に記載したものである。よって、実際の配線の配置は、図 2A の配置に限定されず、適宜設計される事項である。前記電流 I_{ao} は、ホローカソードを用いない場合には、放電電流である。前記電流 I_{ao} は、ホローカソードを用いる場合には、ホローカソードから放出される熱電子の流れに基づく電流である。加速装置 2 は、前記磁場 B 及び前記電流 I_{ao} により誘起されるローレンツ力によって、供給路 1 から供給される無電極プラズマを、下流側に向けて加速する。

[0017] 加速装置 2 のカソードが、ホローカソードである場合について、より詳細に説明する。ホローカソードは、化学物質からなるインサートを備える。このインサートを例えば加熱装置により加熱すると、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。カソードの作動前には加熱装置を用いてインサートを加熱するが、一旦カソードが作動すると、プラズマが発生する熱によって電子を放出することが可能である。

[0018] 2. MPD スラスタ 100 の作動原理

次に、MPD スラスタ 100 の作動原理について説明する。

(1) 供給路 1 から、カソード 22 とアノード 23 の間の空間 S に、無電極プラズマ（陽イオン P^+ 及び電子 e^- ）が供給される。当該供給により、カソード 22 とアノード 23 の間の空間 S の電気抵抗率は低下する。

(2) 磁気コイル 21 を作動させることにより、空間 S に、軸方向磁場成分 B_x と径方向磁場成分 B_y とを含む磁場 B が生成される。

(3) カソード 22 とアノード 23 との間に電圧及び電力が印加され、空間 S に電流 I_{ac} が流れる。当該電流 I_{ac} は、カソード 22 とアノード 23 との間の放電電流であってもよいし、ホローカソードから放出される熱電子の流れに基づく電流であってもよい。空間 S の電気抵抗率は低下しているため、印加する前記電圧及び電力を、従来の MPD スラスタと比較して、小さくすることが可能である。なお、上記 (1)、(2)、(3) の工程を開始する順番は任意である。また、上記 (1)、(2)、(3) の工程を同時に開始してもよい。

(4) 空間 S に存在する電子 e^- (カソード 22 から放出される電子、及び、無電極プラズマに含まれる電子) の一部は、アノード 23 によって捕捉される (電流 I_{ac} を担う)。また、空間 S に存在する電子 e^- の一部は、ローレンツ力により、下流に向かって加速され、ノズル 25 から下流側に向けて放出される。なお、前記ローレンツ力による加速のメカニズムの概要は下記 (4a) (4b) のとおりである。

(4a) 前記電流 I_{ac} の径方向成分 (X 軸に向かう成分) と、前記軸方向磁場成分 B_x とによって誘起されるローレンツ力により、電子 e^- は、磁気コイル 21 の中心軸 (X 軸) まわりに $+\phi$ 方向に回転する。

(4b) 前記回転により、 $-\phi$ 方向の電流が流れる。 $-\phi$ 方向の電流と、前記径方向磁場成分 B_y とによって誘起されるローレンツ力により、電子 e^- は、 $+X$ 方向に加速される。なお、上記 (4a) (4b) は、実際には、同時並行的に進行する現象である。

(5) $+X$ 方向、すなわち、下流側に向かって加速される電子 e^- は、クーロン力によって、陽イオン P^+ を牽引し、陽イオン P^+ を下流側に向かって加速させる。そして、前記陽イオン P^+ は、ノズル 25 から下流側に向けて放出される。前記放出に伴う反力により、MPD スラスタ 100 は推力を得る。

(6) なお、前記アノード 23 と、ノズル 25 から放出された電子 e^- との間

には、電場勾配が存在する。よって、陽イオン P^+ は、前記電場勾配によっても、下流側に向かって加速される。

[0019] 供給路1から供給される無電極プラズマは、プラズマの生成過程において、電極とプラズマとが直接接触することなく生成されたプラズマである。このような無電極プラズマは、電極とプラズマとが接触しない加速装置を用いて加速されることが一般的である。これに対し、本実施形態は、無電極プラズマを、プラズマと接触する電極（アノード及びカソード）を備えた加速装置2によって加速するものである。

[0020] 3. 効果

本実施形態では、空間Sに無電極プラズマが供給され、空間Sの電気抵抗率が低下される。このため、カソードとアノードとの間に印加する電圧及び電力を、従来のMPDスラスタと比較して小さくすることが可能である。その結果、MPDスラスタの作動効率が向上する。また、前記電力を小さくすることにより、MPDスラスタの温度上昇を抑制することができる。その結果、MPDスラスタを長時間作動させることができる。

[0021] 本実施形態のカソードとして、ホローカソードを用いた場合には、付加的に、次の効果を奏する。第1に、放電によるカソードの損耗が抑制されるため、電極を長寿命化することができる。第2に、ホローカソードによって放出される熱電子の量を制御することで、上述のローレンツ力の強さを制御することが可能となる。

[0022] 本実施形態では、無電極プラズマを用いる。無電極プラズマの陽イオン密度は、アーク放電によって生成されるプラズマの陽イオン密度と同程度以上のものが得られるだけでなく、後者では陽光柱と呼ばれるごく限られた領域にのみ高密度領域が得られるのに対して、前者ではほぼ全放電領域に渡って高密度領域を形成することができる。このため、生成できる陽イオンの割合はアーク放電の100倍程度にすることも可能で、その結果、MPDスラスタの大推力化が可能である。

[0023] 本実施形態では、無電極プラズマは、供給路1から供給される。このため

、加速装置内で、アーク放電又は熱電子を用いて推進剤をプラズマ化する工程が不要である。その結果、MPDスラストの推進効率が向上する。

[0024] また、実施形態におけるMPDスラストによれば、次のような課題を克服することが可能である。

[0025] (電力又は熱に関する課題)

MPDスラストは、プラズマ生成のためにアーク放電を用いる場合がある。アーク放電を発生させるためには、大きな電力が必要となる。また、大きな電力を投入するため、スラスト自体の温度が高温になりやすい。このため、MPDスラストは、定常的な作動を実現することが難しい場合がある。よってMPDスラストは、推進効率が低く、電力供給量及び排熱量に制約のある宇宙機への適用が難しい場合がある。

[0026] (電極損耗に関する課題)

MPDスラストでは、アーク放電によって、スラストのカソードが損耗する場合がある。このため、作動寿命を長くすることが難しい。作動寿命を長くするために、カソードとして、ホローカソードを用いることが考えられる。しかし、ホローカソードを用いる際には、推進効率に関する課題が存在する場合がある。

[0027] (推進効率に関する課題)

効率的に推進力を得るためには、電子に比べて質量の大きい陽イオンの密度を上げることが考えられる。しかし、上記ホローカソードからは、陽イオンは僅かしか出力されない場合がある。このため、ホローカソードから放出される熱電子を推進剤ガスに衝突させることにより、陽イオンの密度を上げることが考えられる。しかし、熱電子を生成して、推進剤ガスに衝突させることは、効率的ではない。よって、ホローカソードを用いた場合であっても、推進効率を向上させることが難しい場合がある。

[0028] (第2の実施形態)

図3A乃至図6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。

[0029] 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。

[0030] 1. MPDスラスタ200の構成

MPDスラスタ200は、無電極プラズマを供給する供給路1と、加速装置2と、無電極プラズマ生成装置3を備える。

[0031] (無電極プラズマ生成装置3)

図3A乃至図6を参照して、無電極プラズマ生成装置3について説明する。図3Aは、第2の実施形態のMPDスラスタ200の構成を模式的に示す断面図である。図3Bは、図3AのA-A矢視断面図である。図4は、第2の実施形態のMPDスラスタ200の斜視図であって、スラスタの一部を切り欠いた斜視図である。また、図5A乃至図5Fは、アンテナ（プラズマ生成アンテナ）の第1例乃至第6例を示す図である。図6は、アンテナの作動装置の一例を示す機能ブロック図である。

[0032] 無電極プラズマ生成装置3は、磁気コイル21及びアンテナ31を含む。磁気コイルは、加速装置2の構成要素であるとともに、無電極プラズマ生成装置3の構成要素でもある。アンテナ31は、複数のアンテナ31-1、31-2、31-3、31-4を含むことが好ましい。複数のアンテナ31-1、31-2、31-3、31-4は、複数の供給管1-1、1-2、1-3、1-4の周囲に、それぞれ配置される。また、磁気コイル21は、供給管1-1、1-2、1-3、1-4及びアンテナ31-1、31-2、31-3、31-4を囲むように配置される。換言すれば、アンテナが周囲に配置された供給管1-1、1-2、1-3、1-4は、磁気コイル21の中央領域を横断する。なお、図3Bには、4つの供給管、及び、4つのアンテナが記載されている。しかし、供給管の数、及び、アンテナの数は、4つに限定されず、任意である。図4に示されるように、アンテナ31が周囲に配置された供給路1（又は供給管）は、支持機構32、33、34によって支持される。支持機構32は、下流側支持機構であり、支持機構33は、中央支持機構であり、支持機構34は、上流側支持機構である。各支持機構32、3

3、34は、各供給路1（又は各供給管）とカソード22とを離間させて支持するスペーサとしての機能も有している。

[0033] アンテナ31は、高周波アンテナである。高周波アンテナにより誘起される電場、及び、磁気コイル21により生成される軸方向磁場 B_z （図3Aを参照。）の相互作用により、ヘリコン波が発生する。ヘリコン波は、供給路1に供給される推進剤に作用して、推進剤をプラズマ化する。その結果、無電極プラズマであるヘリコンプラズマが生成される。ヘリコンプラズマは、高密度で生成することが可能であるため、無電極プラズマとしてヘリコンプラズマを採用することが好ましい。

[0034] アンテナ31としては、種々の形態のアンテナを採用し得る。図5A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5B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5C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5D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5E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5F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。

[0035] 図6に示されるように、アンテナの作動装置は、アンテナ31-1、31-2、31-3、31-4、インピーダンス整合器35、電源装置36を備えていてもよい。インピーダンス整合器35は、電源装置36側の入力インピーダンスと、アンテナ31-1、31-2、31-3、31-4側の負荷インピーダンスとを整合させるためのものである。本実施形態では、1つの電源装置36が、インピーダンス整合器35を介して、複数のアンテナ31-1、31-2、31-3、31-4を駆動する。なお、電源装置36は、1つであることが好ましいが、1つであることには限定されない。

[0036] 2. MPDスラスタ200の作動原理

次に、MPDスラスタ200の作動原理について説明する。本実施形態におけるMPDスラスタ200の作動原理は、第1の実施形態におけるMPDスラスタ100の作動原理と比較して、無電極プラズマの生成に、磁気コイル21及びアンテナ31を用いることが特定されている点で異なる。

(1) 供給路1に推進剤が供給される。

(2) アンテナ31によって誘起される電場、及び、磁気コイル21により生成される軸方向磁場 B_z の相互作用により、無電極プラズマが生成される。

(3) 生成された無電極プラズマは、供給路1から、カソード22とアノード23の間の空間Sに供給される。空間Sに無電極プラズマが供給された後の作動原理については、第1の実施形態の作動原理と同様である。

[0037] 3. 効果

本実施形態では、加速装置2の磁気コイル21を用いて、無電極プラズマを生成する。すなわち、加速用の磁場と、無電極プラズマ生成用の磁場とを、同一の磁気コイル21を用いて生成している。このため、MPDスラスタの重量を低減することができる。また、磁気コイルの作動に必要な電力を低減することができる。その結果、MPDスラスタの推進効率が向上する。

[0038] 本実施形態において、ヘリコンプラズマを生成する場合には、陽イオンの密度を更に高くすることが可能である。その結果、MPDスラスタの大推力化が可能である。

[0039] 本実施形態において、一つの電源装置で複数のアンテナを駆動する場合には、スラスタの重量が低減される。

[0040] (供給路1、カソード22、アノード23の位置関係)

図7を参照して、本発明の実施形態における、供給路1、カソード22、アノード23の位置関係の具体例について説明する。供給路1の出口7の位置は、アノード23の位置よりも上流側であることが好ましい。また、カソード22の位置は、アノード23の位置よりも上流側であることが好ましい。

。供給路 1（各供給路の中心）と磁気コイル 2 1 の中心軸（X 軸）との距離 L_2 は、カソード 2 2（カソード 2 2 の中心）と磁気コイル 2 1 の中心軸（X 軸）との距離 L_1 より大きいことが好ましい。なお、カソード 2 2（カソード 2 2 の中心）と磁気コイル 2 1 の中心軸（X 軸）との距離 L_1 はゼロであり、カソード 2 2 は、前記中心軸に沿って配置されることが好ましい。また、供給路 1（各供給路の中心）と磁気コイル 2 1 の中心軸（X 軸）との距離 L_2 は、アノード 2 3（アノード 2 3 のうち、コイルの中心軸に一番近い部分）と磁気コイル 2 1 の中心軸（X 軸）との距離 L_3 より小さいことが好ましい。

[0041] 上述の位置関係を採用することにより、磁気コイル 2 1 の中心軸の方向に沿う軸方向磁場成分 B_x 及び前記中心軸に直交する径方向磁場成分 B_y が好適に生成される。また、MPD スラスタの装置構成をコンパクトにすることができる。

[0042]（供給路 1、アンテナ 3 1、磁気コイル 2 1 の位置関係）

次に、図 7 を参照して、供給路 1 の周囲にアンテナ 3 1 を配置する場合において、供給路 1、アンテナ 3 1、磁気コイル 2 1 の位置関係の具体例について説明する。アンテナ 3 1 と磁気コイル 2 1 とは、少なくとも一部が磁気コイル 2 1 の中心軸方向（X 軸方向）にオーバーラップして配置されることが好ましい。例えば、磁気コイル 2 1 の中心軸方向全長にわたって、アンテナ 3 1 と磁気コイル 2 1 とがオーバーラップするように配置される。

[0043] 上述の位置関係を採用することにより、アンテナ 3 1 の位置に対応する供給路 1 の内部に、軸方向磁場 B_z が好適に生成され、無電極プラズマの生成効率が向上する。

[0044]（供給路 1 の変形例）

図 8 は、供給路 1 の変形例を示す断面図であって、X 軸に垂直な断面図である。図 8 に示されるように、無電極プラズマの供給路 1 として、カソード 2 2 の周囲に複数の供給路を配置する代わりに、断面リング状の供給路を配置することが可能である。

- [0045] 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。
- [0046] 本出願は、2014年5月23日に出願された日本国特許出願第2014-107583号を基礎とする優先権を主張し、当該基礎出願の開示の全てを引用により本出願に取り込む。

請求の範囲

[請求項1]

M P D スラスタであって、
推進剤から無電極プラズマを生成する無電極プラズマ生成装置と、
、
前記無電極プラズマを加速させる加速装置と、
生成された前記無電極プラズマを、前記加速装置に供給する供給路と、
を備え、
前記加速装置は、
磁気コイルと、
カソードと、
アノードと、
前記カソードと前記アノード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、前記カソードと前記アノードの間の空間に前記無電極プラズマを供給し、
前記磁気コイルは、前記空間内に、前記磁気コイルの中心軸の方向に沿う軸方向磁場成分及び前記中心軸に直交する径方向磁場成分を生成し、
前記電圧印加装置は、前記空間内に電流を生成し、
前記空間に供給される前記無電極プラズマは、前記軸方向磁場成分及び前記径方向磁場成分と、前記電流とによって誘起されるローレンツ力によって、前記無電極プラズマを加速する
M P D スラスタ。

[請求項2]

請求項1に記載のM P D スラスタにおいて、
前記供給路と前記磁気コイルの前記中心軸との距離は、前記カソードと前記中心軸との距離より大きく、前記アノードと前記中心軸と

の距離より小さい

M P D スラスト。

[請求項3]

請求項 1 又は 2 に記載の M P D スラストにおいて、

前記カソードは、前記磁気コイルの前記中心軸に沿って配置される

M P D スラスト。

[請求項4]

請求項 1 乃至 3 のいずれか一項に記載の M P D スラストにおいて、

前記無電極プラズマ生成装置は、

前記供給路の周囲に配置されるアンテナ

を備え、

前記無電極プラズマ生成装置は、前記アンテナにより誘起される電場と、前記磁気コイルにより生成される磁場との相互作用により、前記推進剤をプラズマ化する

M P D スラスト。

[請求項5]

請求項 4 に記載の M P D スラストにおいて、

前記供給路は、複数の供給管を含み、

前記複数の供給管は、前記カソードの周囲に等間隔で配置され、

前記無電極プラズマ生成装置は、前記アンテナを複数備え、

前記複数の供給管の各々の周囲には、複数の前記アンテナのうちの 1 つが配置される

M P D スラスト。

[請求項6]

請求項 5 に記載の M P D スラストにおいて、

前記無電極プラズマ生成装置は、

1 つの電源装置と、

インピーダンス整合器と、

を更に備え、

前記 1 つの電源装置は、前記インピーダンス整合器を介して、複数の前記アンテナを駆動する

M P D スラスト。

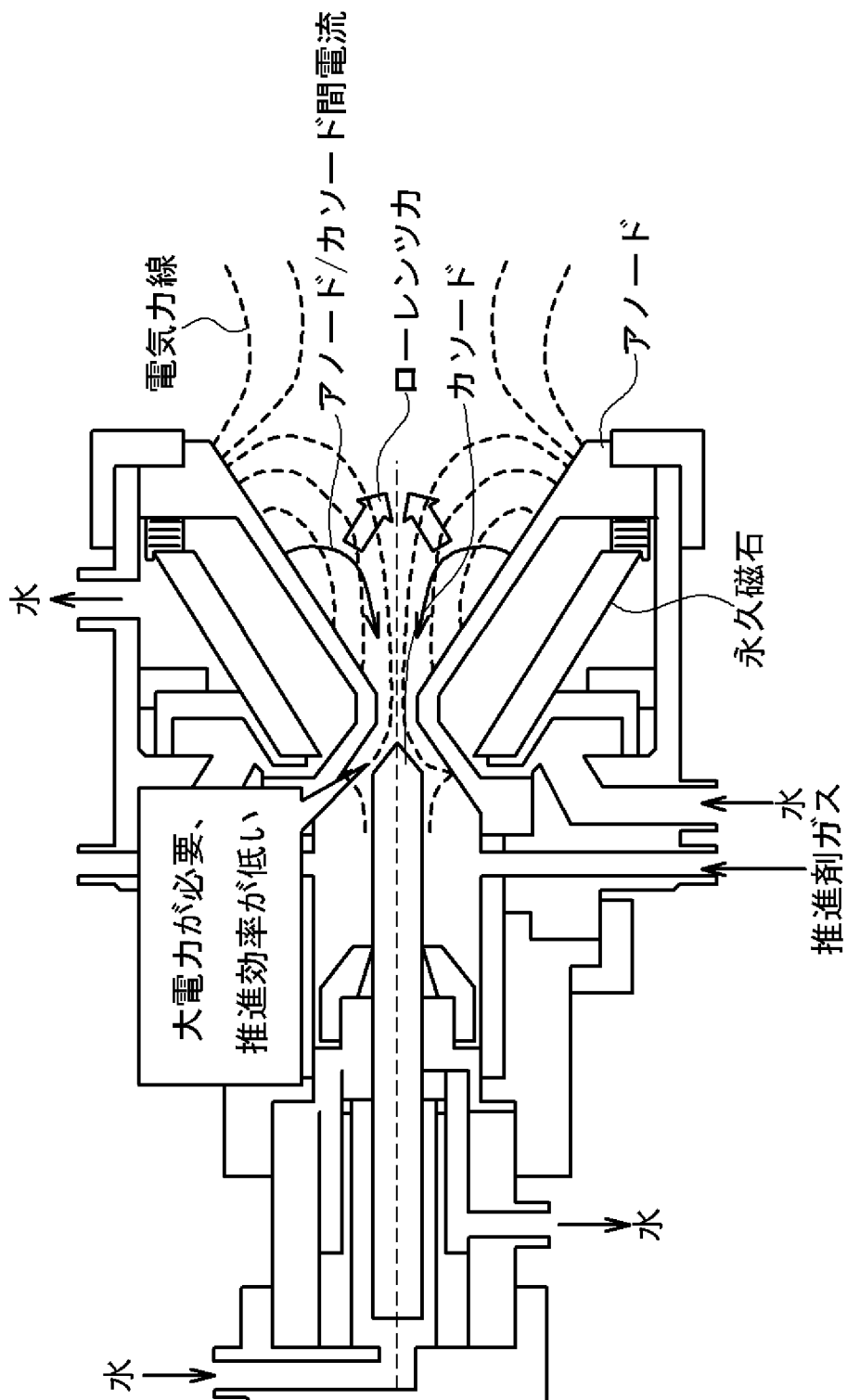
[請求項7] 請求項4乃至6のいずれか一項に記載のM P D スラストにおいて、
前記アンテナは、ヘリカルアンテナであり、
前記無電極プラズマは、ヘリコンプラズマである
M P D スラスト。

[請求項8] 請求項1乃至7のいずれか一項に記載のM P D スラストにおいて、
前記カソードは、ホローカソードである
M P D スラスト。

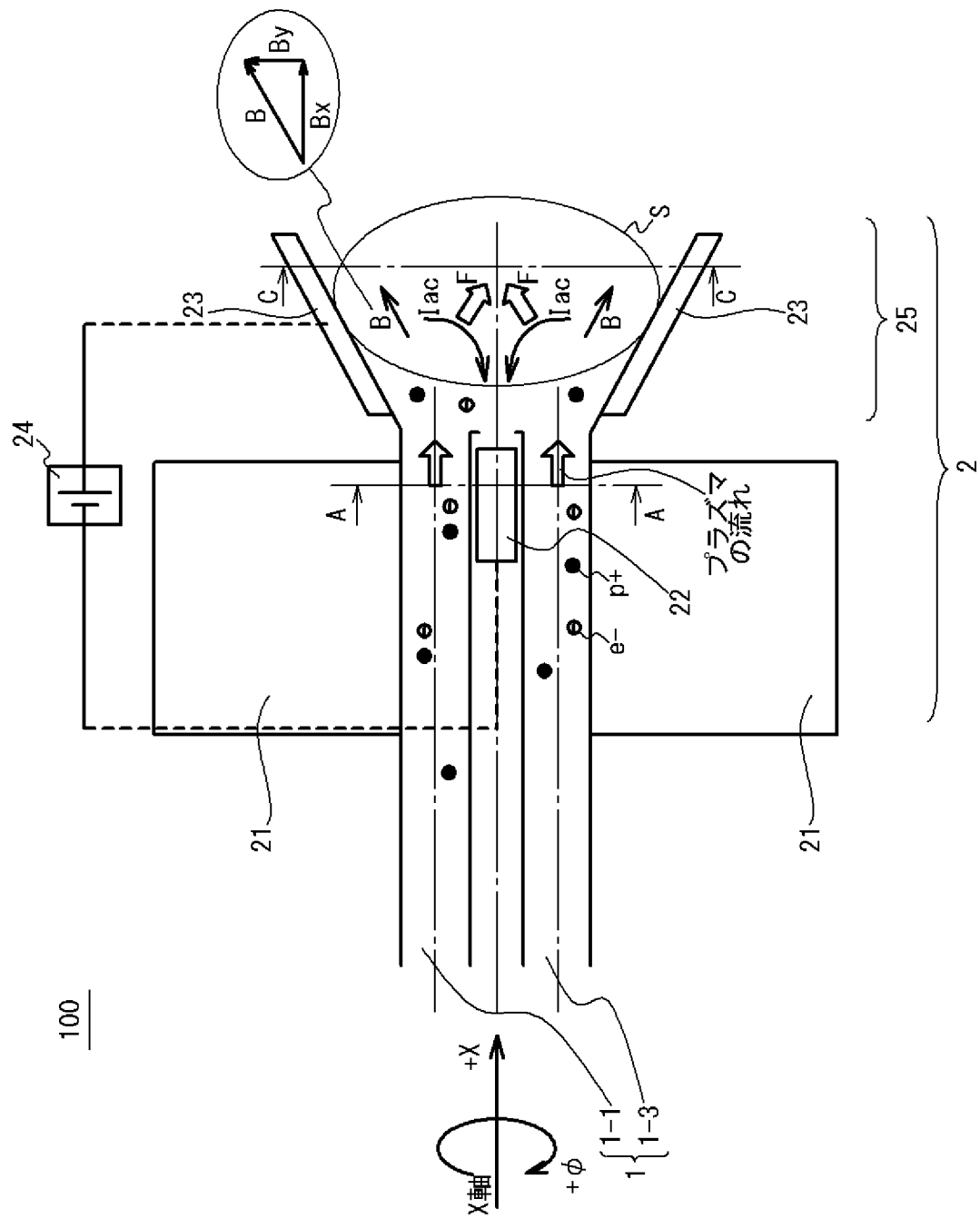
[請求項9] 請求項1乃至8のいずれか一項に記載のM P D スラストにおいて、
前記無電極プラズマを放出するノズル
を更に備え、
前記アノードは、前記ノズルの内面の少なくとも一部を構成する
M P D スラスト。

[請求項10] M P D スラストを用いて無電極プラズマを加速する方法であって、
カソードとアノードの間の空間に無電極プラズマを供給して、前
記空間内の電気抵抗率を下げる工程と、
前記空間内に、前記M P D スラストの中心軸の方向に沿う軸方向
磁場成分及び前記中心軸に直交する径方向磁場成分を生成する工程と
、
前記空間内に電流を生成する工程と、
前記軸方向磁場成分及び前記径方向磁場成分と、前記電流とによ
って誘起されるローレンツ力によって、前記無電極プラズマを加速す
る工程と
を備える方法。

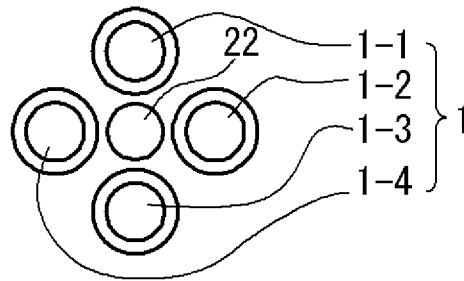
[図1]



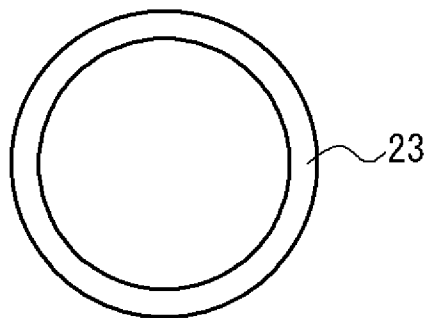
[図2A]



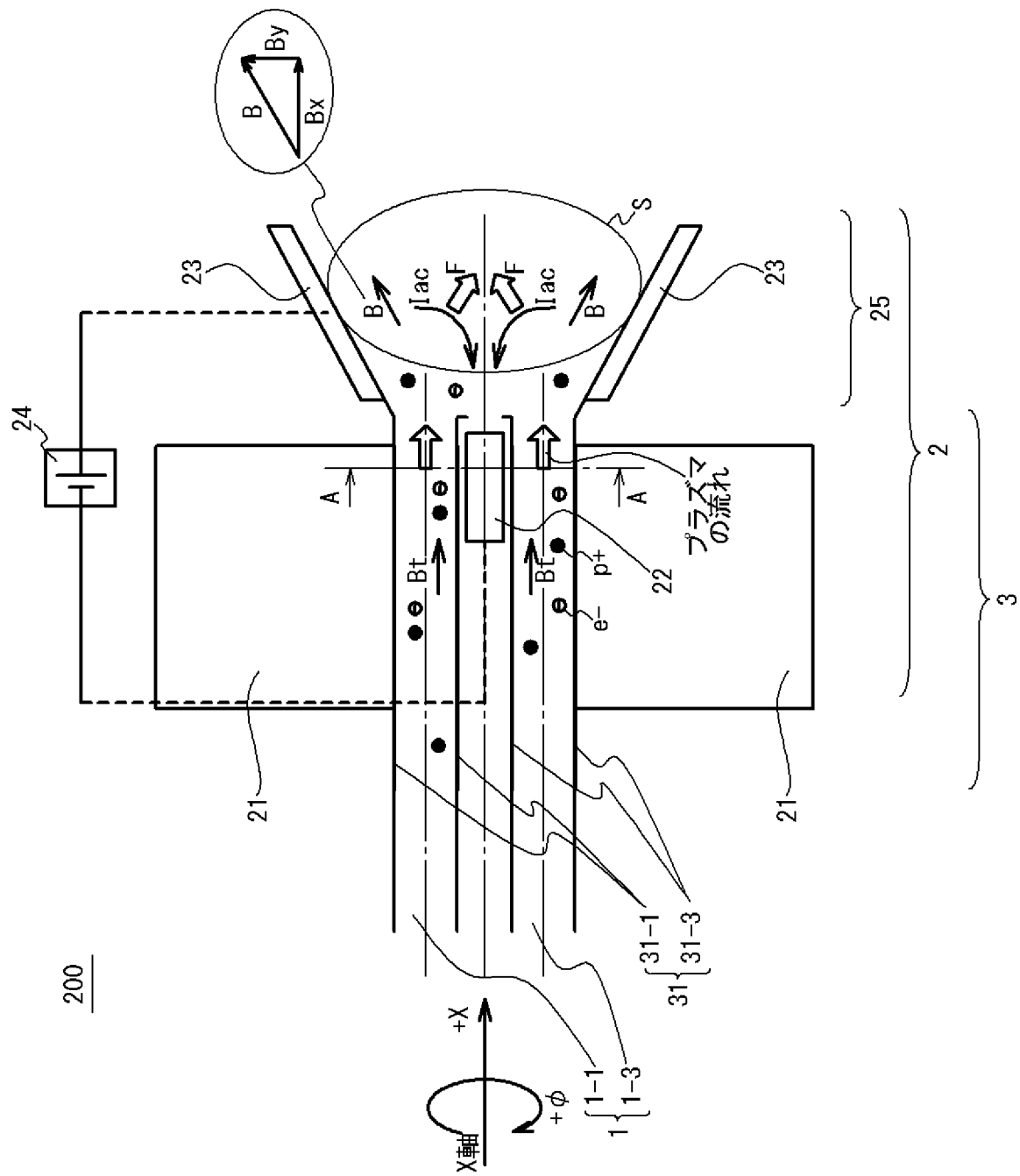
[図2B]



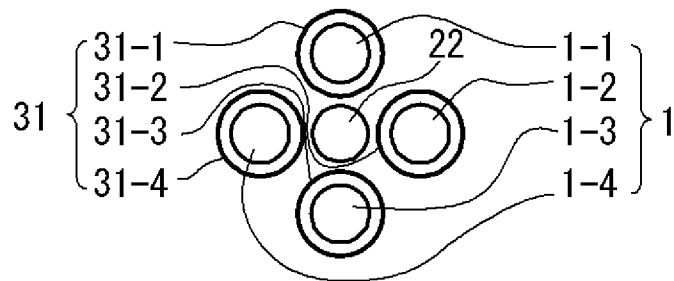
[図2C]



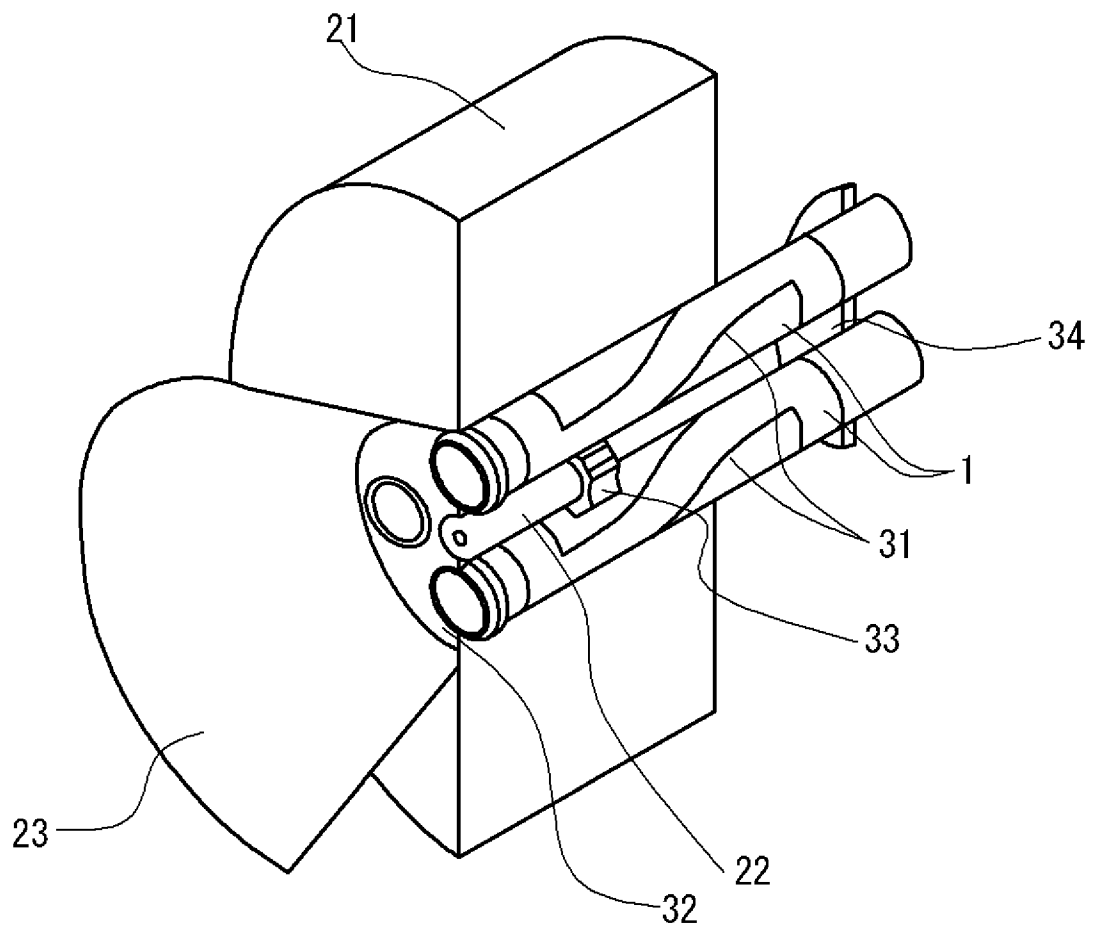
[図3A]



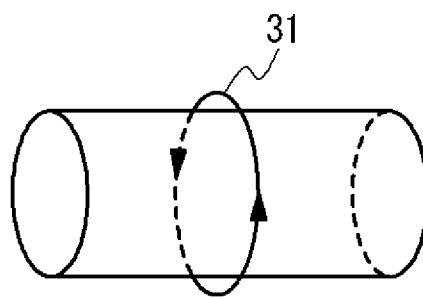
[図3B]



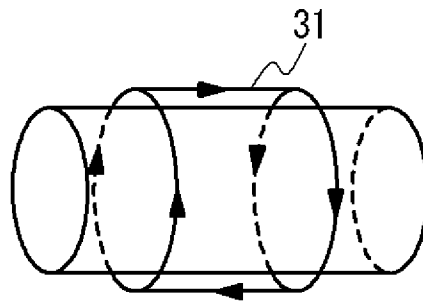
[図4]



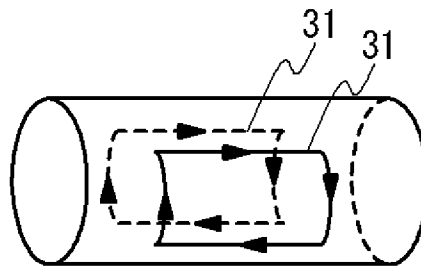
[図5A]



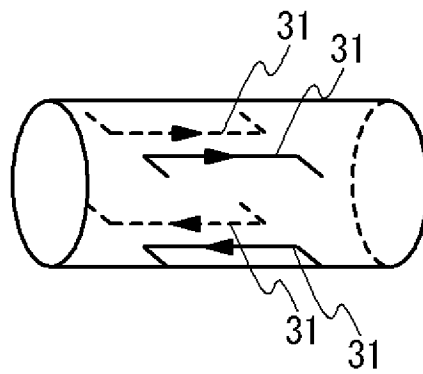
[図5B]



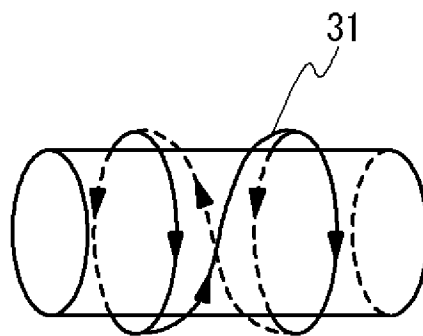
[図5C]



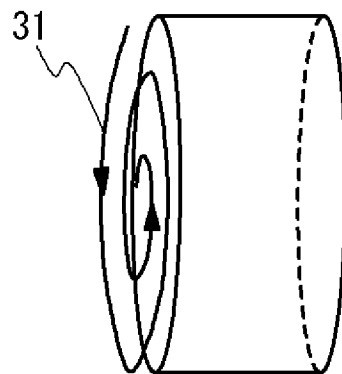
[図5D]



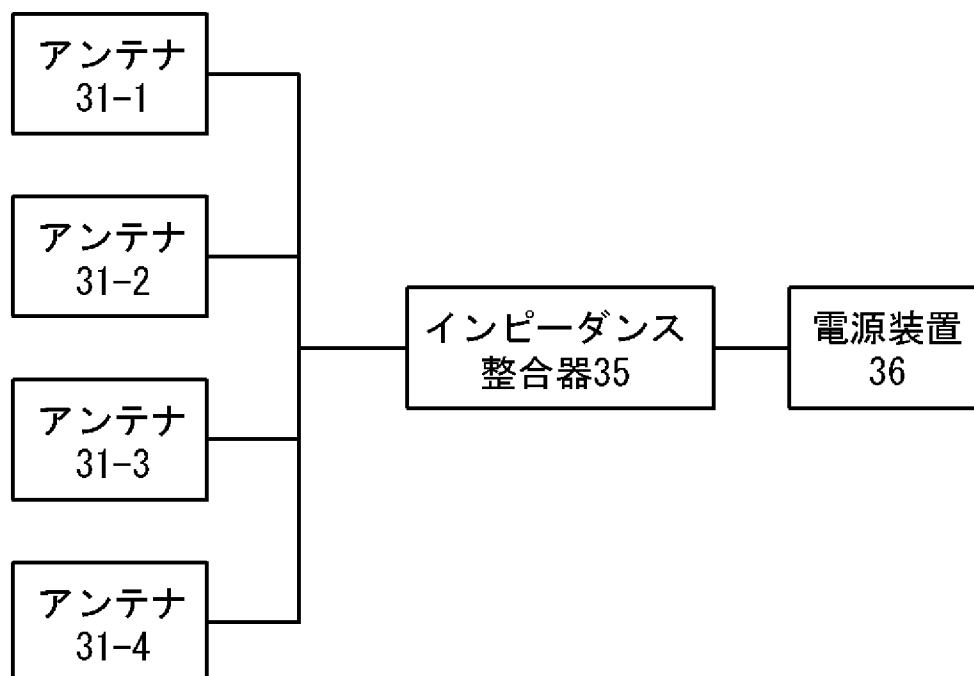
[図5E]



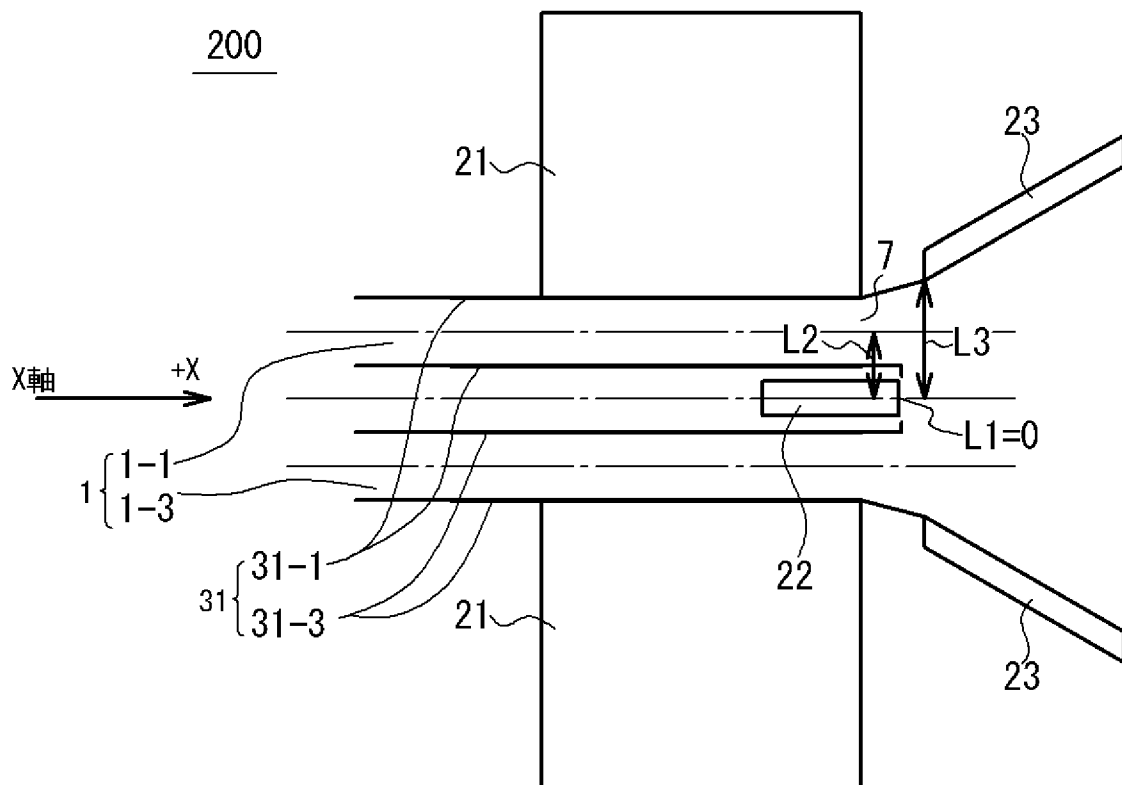
[図5F]



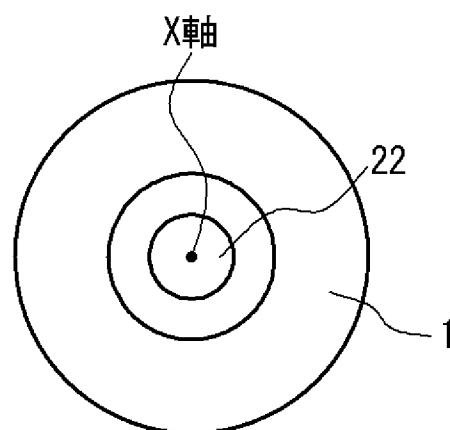
[図6]



[図7]



[図8]



INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/072147

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

F03H1/00(2006.01) i, H05H1/54(2006.01) i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

F03H1/00, H05H1/54

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Jitsuyo Shinan Koho 1922-1996 Jitsuyo Shinan Toroku Koho 1996-2014

Kokai Jitsuyo Shinan Koho 1971-2014 Toroku Jitsuyo Shinan Koho 1994-2014

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
X Y A	Akira ANDO, "4. The Challenge of High Power Plasma Thruster for Manned Space Exploration (Fusion Technology Pioneers New Fields in Space Exploration, Front Runner)", Journal of Plasma and Fusion Research, 25 March 2007 (25.03.2007), vol.83, no.3, pages 276 to 280	1, 3, 10 4, 7-9 2, 5-6
Y A	Kazuaki MIYAMOTO, "Characterization of a helicon plasma thruster using multipole magnetic field", The Institute of Electrical Engineers of Japan Kenkyukai Shiryo PST-12-049 to 067, The Institute of Electrical Engineers of Japan, 08 August 2012 (08.08.2012), pages 63 to 67	4, 7 2, 5-6



Further documents are listed in the continuation of Box C.



See patent family annex.

* Special categories of cited documents:

"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance

"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date

"L" document which may throw doubts on priority claim(s) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)

"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means

"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed

"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention

"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone

"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art

"&" document member of the same patent family

Date of the actual completion of the international search

07 November, 2014 (07.11.14)

Date of mailing of the international search report

18 November, 2014 (18.11.14)

Name and mailing address of the ISA/

Japanese Patent Office

Authorized officer

Facsimile No.

Telephone No.

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/JP2014/072147

C (Continuation). DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
Y	Shunjiro SHINOHARA, "Helicon Plasma-gen no Kaihatsu to Oyo -Koiki Plasma Kagaku eno Tenkai", Nippon Butsuri Gakkaishi, 05 July 2009 (05.07.2009), vol.64, no.7, pages 519 to 526	7
Y A	Tomoya SUZUKI, "Research and Development of High-Power Permanent-Magnet Applied-Field MPD Thrusters with Multi-Hollow Cathodes", Dai 57 Kai Proceedings of Space Sciences and Technology Conference, The Japan Society for Aeronautical and Space Sciences, 09 October 2013 (09.10.2013), pages 1 to 6	8 5-6
Y	Kenji MIYAZAKI, "Dai Denryoku MPD Thruster no Jikkenteki Kenkyu", Heisei 25 Nendo Space Plasma Kenkyukai · Koenshu, Japan Aerospace Exploration Agency, 27 February 2014 (27.02.2014), pages 1 to 4	9
A	US 6334302 B1 (THE UNITED STATES OF AMERICA AS REPRESENTED BY THE ADMINISTRATOR OF THE NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION), 01 January 2002 (01.01.2002), abstract; fig. 1 (Family: none)	1-10
A	US 3191092 A (BAKER, William R.), 22 June 1965 (22.06.1965), fig. 1 (Family: none)	1-10
A	Naoya KINOSHITA, "27pA08P Experimental Study on ICRF Heating For A Plasma Propulsion System", Dai 18 Kai The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, The Japan Society of Plasma Science and Nuclear Fusion Research, 20 November 2001 (20.11.2001), page 44	6

A. 発明の属する分野の分類（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. F03H1/00(2006.01)i, H05H1/54(2006.01)i			
B. 調査を行った分野 調査を行った最小限資料（国際特許分類（I P C）） Int.Cl. F03H1/00, H05H1/54			
最小限資料以外の資料で調査を行った分野に含まれるもの 日本国実用新案公報 1 9 2 2 - 1 9 9 6 年 日本国公開実用新案公報 1 9 7 1 - 2 0 1 4 年 日本国実用新案登録公報 1 9 9 6 - 2 0 1 4 年 日本国登録実用新案公報 1 9 9 4 - 2 0 1 4 年			
国際調査で使用した電子データベース（データベースの名称、調査に使用した用語）			
C. 関連すると認められる文献			
引用文献の カテゴリー*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号	
X Y A	安藤 晃, 4. 有人宇宙探査に向けた大電力プラズマ推進機開発への挑戦(新たな宇宙開発を拓く核融合技術, 研究最前線), プラズマ・核融合学会誌, 2007. 03. 25, 第 83 巻, 第 3 号, p. 276-280	1, 3, 10 4, 7-9 2, 5-6	
Y A	宮本和明, 多極磁場を利用した無電極ヘリコンスラスターの特性評価, 電気学会研究会資料 PST-12-049~067, 一般社団法人電気学会, 2012. 08. 08, p. 63-67	4, 7 2, 5-6	
☒ C 欄の続きにも文献が列挙されている。 ☐ パテントファミリーに関する別紙を参照。			
* 引用文献のカテゴリー 「A」特に関連のある文献ではなく、一般的技術水準を示すもの 「E」国際出願日前の出願または特許であるが、国際出願日以後に公表されたもの 「L」優先権主張に疑義を提起する文献又は他の文献の発行日若しくは他の特別な理由を確立するために引用する文献（理由を付す） 「O」口頭による開示、使用、展示等に言及する文献 「P」国際出願日前で、かつ優先権の主張の基礎となる出願日の後に公表された文献 「T」国際出願日又は優先日後に公表された文献であって出願と矛盾するものではなく、発明の原理又は理論の理解のために引用するもの 「X」特に関連のある文献であって、当該文献のみで発明の新規性又は進歩性がないと考えられるもの 「Y」特に関連のある文献であって、当該文献と他の 1 以上の文献との、当業者にとって自明である組合せによって進歩性がないと考えられるもの 「&」同一パテントファミリー文献			
国際調査を完了した日 0 7 . 1 1 . 2 0 1 4		国際調査報告の発送日 1 8 . 1 1 . 2 0 1 4	
国際調査機関の名称及びあて先 日本国特許庁（I S A / J P） 郵便番号 1 0 0 - 8 9 1 5 東京都千代田区霞が関三丁目 4 番 3 号		特許庁審査官（権限のある職員） 志水 裕司 電話番号 0 3 - 3 5 8 1 - 1 1 0 1 内線 3 3 4 1	3 D 9 5 2 8

C (続き) . 関連すると認められる文献		
引用文献の カテゴリ*	引用文献名 及び一部の箇所が関連するときは、その関連する箇所の表示	関連する 請求項の番号
Y	篠原俊二郎, ヘリコンプラズマ源の開発と応用—広域プラズマ科学への展開, 日本物理学会誌, 2009.07.05, 第64巻, 第7号, p. 519-526	7
Y A	鈴木智也, マルチホローカソードを用いた永久磁石磁場印加型大電力MPDスラスタの開発研究, 第57回宇宙科学技術連合講演会講演集, 一般社団法人日本航空宇宙学会, 2013.10.09, p. 1-6	8 5-6
Y	宮崎 兼治, 大電力 MPD スラスタの実験的研究, 平成25年度スペースプラズマ研究会・講演集, 独立行政法人宇宙航空研究開発機構, 2014.02.27, p. 1-4	9
A	US 6334302 B1 (THE UNITED STATES OF AMERICA AS REPRESENTED BY THE ADMINISTRATOR OF THE NATIONAL AERONAUTICS AND SPACE ADMINISTRATION) 2002.01.01, 要約, 図1 (ファミリーなし)	1-10
A	US 3191092 A (BAKER, William R.) 1965.06.22, 図1 (ファミリーなし)	1-10
A	木下直哉, 27pA08P 無電極プラズマ推進に関する基礎実験, (社)プラズマ・核融合学会第18回年会予稿集, 社団法人プラズマ・核融合学会, 2001.11.20, p. 44	6