

(19)日本国特許庁 (J P)

(12) 公開特許公報 (A)

(11)特許出願公開番号

特開2000-243309

(P2000-243309A)

(43)公開日 平成12年9月8日 (2000.9.8)

(51)Int.Cl. ⁷	識別記号	F I	テーマコード*(参考)
H 0 1 J 27/06		H 0 1 J 27/06	2 G 0 8 5
G 2 1 K 1/00		G 2 1 K 1/00	A 5 C 0 3 0
H 0 5 H 13/00		H 0 5 H 13/00	

審査請求 未請求 請求項の数4 O L (全 8 頁)

(21)出願番号 特願平11-40060

(22)出願日 平成11年2月18日 (1999.2.18)

(71)出願人 391012707

高エネルギー加速器研究機構長
茨城県つくば市大穂1番地1

(71)出願人 000004215

株式会社日本製鋼所
東京都千代田区有楽町一丁目1番2号

(72)発明者 森 義治

東京都田無市緑町3丁目2番1号 高エネ
ルギー加速器研究機構 田無分室内

(74)代理人 100091926

弁理士 横井 幸喜

最終頁に続く

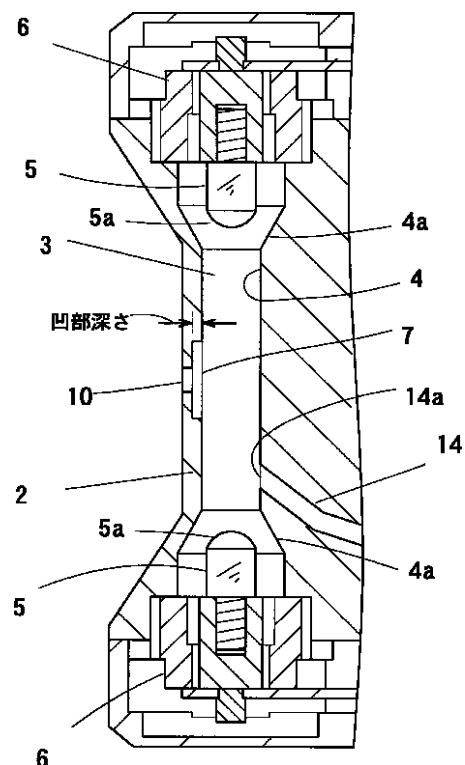
(54)【発明の名称】 サイクロトロン用内部負イオン源

(57)【要約】

【課題】 本発明はサイクロトロンの内部装着型負イオン源において、負イオン (H^- 、 D^-) を十分な量で安定して発生させる。

【解決手段】 放電室3からイオン取り出し口10に至る間の陽極2壁部に、低電子温度領域用凹部7を形成し、LaB₆焼結体からなる陰極5を放電室3とともに気密空間におく。

【効果】 上記負イオン源によれば、イオン、特に負イオンが十分な量で安定して得られ、また、優れた耐久性が得られる。



【特許請求の範囲】

【請求項1】筒状の陽極と、該陽極内空間で構成される放電室と、前記放電室の両端側に配置された2つの陰極と、放電室から外部にイオンを取り出すべく前記陽極に形成されたイオン取り出し口とを有するサイクロトロン用内部負イオン源において、放電室からイオン取り出し口に至る間の陽極壁部に、低電子温度領域用凹部が形成されていることを特徴とするサイクロトロン用内部負イオン源

【請求項2】筒状の陽極と、該陽極内空間で構成される放電室と、前記放電室の両端側に配置された2つの陰極と、放電室から外部にイオンを取り出すべく前記陽極に形成されたイオン取り出し口とを有するサイクロトロン用内部負イオン源において、陰極径が陽極内径よりも小さく、かつ陰極先端部が先端側ほど小径となるテーパ形状を有しているとともに、陰極先端部に近接する陽極端部が中側ほど内径が減少するテーパ形状を有していることを特徴とするサイクロトロン用内部負イオン源

【請求項3】筒状の陽極と、該陽極内空間で構成される放電室と、前記放電室の両端側に配置された2つの陰極と、放電室から外部にイオンを取り出すべく前記陽極に形成されたイオン取り出し口とを有するサイクロトロン用内部負イオン源において、2つの陰極は放電室を含む密閉空間内に配置されていることを特徴とするサイクロトロン用内部負イオン源

【請求項4】陰極がLaB₆。焼結体からなることを特徴とする請求項1～3のいずれかに記載のサイクロトロン用内部負イオン源

【発明の詳細な説明】

【0001】

【発明の属する技術分野】本発明は、核医学などに使用されるサイクロトロンにおいて内部で負イオンを発生させる内部負イオン源に関するものである。

【0002】

【従来の技術】サイクロトロンは、種々の核種を生成する装置として核医学などの多くの分野で利用されており、その一例を図6に基づいて以下に説明する。加速箱21は下部電磁石22上に設けられており、該加速箱21の外壁に、互いに対向する第1ターゲット23と第2ターゲット24が設けられている。また加速箱21内には、一対の共振器25a、25bに接続され、所要周波数の高周波電場を発生するために加速箱21の中央部において結合された一対の加速電極26a、26b（通称ディーと云う）が設けられており、共振器25aまたは、25bのいずれかに図示しない高周波電源が接続されている。さらに、加速箱21内には、加速電極26a、26bの結合点を中心としてストリッピングフォイル27a、27bが互いに対向配置されているとともに、加速箱21の中心部付近に内部型負イオン源30が配置されている。また、上記下部電磁石22上には、上

部電磁石28が昇降可能に配置されており、電磁石22、28によって加速箱21内に鉛直方向の磁場が形成されるように構成されている。

【0003】上記装置では、各電磁石22、28を閉状態とし、真空装置（図示せず）によって加速箱21および各ターゲット23、24直前までを真空下とした状態で、高周波電源より高周波電力を供給して加速電極26a、26bに高周波電場を発生させる。一方、内部型負イオン源30にて水素または重水素ガスより負イオン粒子を発生させてイオンビームとして供給する。負イオンは、磁場で封じ込められた状態で、加速電極26a、26bの各エツジ部において高周波電場により加速を受けつつ加速箱21内で回転し、加速箱21の最大半径に達すると、ストリッピングフォイル27a、27bに当たって電子がはぎとられ、陽子または重陽子となる。この陽子または重陽子は各ターゲット23、24に打ち込まれ、内部の標的物質と衝突して核反応を引き起こし、短寿命RIを生成する。

【0004】上記装置で短寿命RIを良好に生成するためには、その源となる負イオンを十分な量で安定して発生させることが必要であり、この観点から内部負イオン源には優れたビーム性能を有することが求められる。なお、イオンが安定しているという目安としては、ビーム出力の時間当たりの変動幅が数%以内で、しかも200時間程度持続あるいは断続して使えることが挙げられる。また、イオン源はサイクロトロンの中央部に設置されることから、大きさに対する制限があり、できるだけ小型化することが求められる。水平面の制限は、イオン源から引き出されたビームがはじめの一回転目にイオン源自身に衝突して失われないための大きさであり、またイオン源が対向（例えば間隙約5mm）する加速電極との間で放電を起こさないことも必要とされる。

【0005】従来、上記イオン源としては、コーン型やボックス型、PIG型等のいくつかの方式が提案、実施されているが、この中で、PIG型は、大電力イオン源に適しており、十分な量のイオンを取り出すことが可能である。このPIG型のイオン源を図7～図9に基づいて説明すると、銅等によって構成された筒材が陽極31とされ、該陽極31の両端部に、タンタル、タングステン等によって構成された陰極32、32が配置されており、これら陰極32、32は陰極支持材32aによって支持されている。上記陽極31の内部空間は放電室33を構成しており、この放電室33内のイオンを外部に取り出すための取り出しスリット34が陽極31の壁部に形成されている。なお、上記陽極31には、陽極を冷却する水冷管35と、放電室33にガスを供給するガス管36とが埋設されており、ガス管36の一端はガス供給口36aとして陽極壁に開口している。また、陰極32付近にも、水冷管37が配置されており、これら水冷管35、水冷管37、ガス管36は、それぞれ外部の冷却

水供給源（図示しない）およびガス供給源に接続されている。上記PIG型のイオン源では、放電室33内にガスを供給するとともに高電圧（アーク電圧と称する）を陽極31と陰極32、32との間に印加することによって放電室33内で放電を開始し、その後は、放電により発生したイオンが放電室33内において鉛直方向磁場に沿って上下に運動し、陰極32、32に衝突する衝撃によって熱電子を放出させる。そして、プラズマの発生によって得られたイオンは、イオンビームとして放電室33から取り出しスリット34を通して外部に引き出される。

【0006】

【発明が解決しようとする課題】しかし、従来のPIG型のイオン源は、前述した利点を有しているものの、以下に示す問題点を有している。すなわち、

(1) 電極の形状、配置、ガス圧力による放電状態の不安定さがあり、イオン、特に負イオンを安定して得ることが難しい。

(2) 放電を持続させるためのアーク電圧が比較的高いため（500V程度又はそれ以上）、イオン衝撃による電極形状の変化（陰極の損耗）に起因して陰極（カソード）の寿命が低下する（数10時間）。

(3) イオン源で消費される電力および誘導される高周波電流による熱を取り除く冷却機構が必要であり、大電力消費に対して複雑な冷却が必要となり装置の大型化を招く。

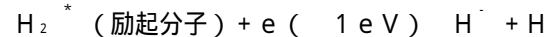
(4) ガス使用量が多い。ガス使用量が多いと、イオン源に供給されたガスが最終的には前記加速箱内に流れ出し真空度の悪化を招く。この真空度の悪化により、最大半径まで加速されるはずのイオンビームが加速中に途中の残留ガスと衝突して失われ、ビーム出力が不安定かつ減少する。本発明は、上記事情を背景としてなされたものであり、小型の構造によってイオン（特に負イオン）を十分な量で安定して供給することができ、また、耐久性にも優れた内部負イオン源を提供することを目的とする。

【0007】

【課題を解決するための手段】上記課題を解決するため、本発明のサイクロトロン用内部負イオン源のうち第1の発明は、筒状の陽極と、該陽極内空間で構成される放電室と、前記放電室の両端側に配置された2つの陰極と、放電室から外部にイオンを取り出すべく前記陽極に形成されたイオン取り出し口とを有するサイクロトロン用内部負イオン源において、放電室からイオン取り出し口に至る間の陽極壁部に、低電子温度領域用凹部が形成されていることを特徴とする。第2の発明は、筒状の陽極と、該陽極内空間で構成される放電室と、前記放電室の両端側に配置された2つの陰極と、放電室から外部にイオンを取り出すべく前記陽極に形成されたイオン取り出し口とを有するサイクロトロン用内部負イオン源にお

いて、陰極径が陽極内径よりも小さく、かつ陰極先端部が先端側ほど小径となるテーパ形状を有しているとともに、陰極先端部に近接する陽極端部が中側ほど内径が減少するテーパ形状を有していることを特徴とする。第3の発明は、筒状の陽極と、該陽極内空間で構成される放電室と、前記放電室の両端側に配置された2つの陰極と、放電室から外部にイオンを取り出すべく前記陽極に形成されたイオン取り出し口とを有するサイクロトロン用内部負イオン源において、2つの陰極は放電室を含む密閉空間内に配置されていることを特徴とする。第4の発明は、第1～第3の発明において、陰極がLaB₆焼結体からなることを特徴とする。

【0008】前述したように、PIG型のイオン源では、陰極（カソード）のPIGアーク放電により高温、高密度のプラズマが得られるが、高密度プラズマ中の負イオン生成の割合は、正イオンに比較して相対的に低い（5～15%）と云われている。そこで、第1の発明に示すように、放電室からイオン取り出し口に至る間の陽極壁部に、低電子温度領域用凹部を形成することにより、負イオンを安定して発生させることが可能になる。すなわち、放電室内では電子温度の高い放電領域が形成されるが、上記凹部では、電子温度が低い放電領域が形成され、放電領域が電子温度の高い領域と低い領域とに分けられることになる。この低電子温度領域では、以下の解離性付着反応が促進される。



上記反応により、イオン、特に負イオンが効率的に生成される。また、上記凹部では、その形状によって負イオンの生成量が大きく左右される。図5に、凹部の深さを変えた場合のD⁻イオンの生成量変化が示されているように、本発明者らの実験によれば、凹部の深さを2mm程度とすることによりイオンの生成量が大幅に増大することが確認されている。また、陰極間距離が40mmであるものでは、凹部が低電子温度領域として機能するためには、凹部高さを20mm以下にするのが望ましいことが確認されている。

【0009】なお、本発明のPIG型イオン源は、筒状の陽極とその両端部に配置される陰極とを有しており、陽極内部の空間が放電室に割り当てられている。したがって陽極は、少なくとも筒孔を有し、その孔壁が放電時の陽極として作用するものであればよく、必ずしも陽極自体が筒体で構成されていることが必須となるものではない。但し、放電室に生成されるプラズマは、鉛直方向磁場と同じく上下方向に長い円筒形状と考えられている。従って陽極壁を筒孔とすることは、プラズマ密度を高める点において有利であると考えられる。また、陽極の材質は本発明としては特に限定されるものではなく、従来と同様に銅等を用いることができる。但し、陽極の冷却が十分でなければ、材質として高融点金属材料（モリブデン等）を選択する必要もある。

【0010】また、PIG型のイオン源では、放電状態が不安定になるという欠点があるが、これは、陰極と陰極近傍の陽極との間で放電が不安定になることが原因になっている。そこで、第2の発明に示すように陰極と陰極近傍の陽極形状を工夫することにより放電の安定性が得られる。この場合、少なくとも陰極径を陽極内径（端部内径）よりも小さくすることが必要であり、望ましくは、陰極径を陽極端内径の80～85%程度とする。これにより、放電室に生成されるプラズマの水平方向の境界が陽極壁の内径より小さくなり、プラズマが陽極壁において消失する確率を少なくする。すなわち、高密度プラズマ生成が促進される。また、陰極の径と陰極間距離との間にも、イオン生成量において相関関係があり、実験に供したサイクロトロンの磁場強度（約1.4Wb）においては両者の比を約1：7とすることにより、イオン生成量を増大させることができる。これは放電室に生成されるプラズマの最適な空間形状は、磁場強度に依存し、最適な形状において高密度プラズマが得られ、イオン生成量が増すためと考えられる。

【0011】さらに、陰極の先端部形状は、先端側ほど小径となるテーパ形状を有しているとともに、陰極先端部に近接する陽極端部が内側ほど内径が減少するテーパ形状とするのが望ましい。上記テーパ形状には、径の減少率が一定で側面が傾斜した平面になるものは勿論のこと、曲面をなすものも含まれる。特に陰極先端部は、上記に従って球面形状とするのが望ましい。これら形状の選定により、陰極と陽極端部とがほぼ同間隔で対面することになり、陰極と陰極近傍の陽極との間の電場が一樣となるので局所的な放電の発生がなくなる。一方において、アーク放電は、筒状陽極壁の中心軸方向に発生し、その軸および軸の回りでの高密度プラズマ生成を促進する。すなわちプラズマが陽極壁において消失する*

* 確率が少なくなり放電開始の容易性、放電の安定性（経時変化が少なくなる）が得られる。

【0012】また、使用ガスを低減して、サイクロトロンの真空度をできるだけ悪化させないために、第3の発明に示すように、取り出し口以外からのガスのリークを減らす気密構造とするのが有効である。これにより、漏れたガスによってイオンビームが不安定になったり、イオン量が減少するのを防止できる。また、放電室を含む空間のガス圧力およびガス量が一定に保たれるので、放電が安定する。また、気密構造とすることにより、第1の発明に示す低電子温度領域にも安定してガスが供給され、前述した低電子温度領域における解離性付着反応を発生せしむるために必要な励起水素分子（ H_2^* ）の生成に寄与し、従って、負イオンの生成を促進する。

【0013】また、PIG型イオン源では、前述したように初期作動時を除いて、陰極へのイオンの衝撃による熱電子放出を利用するため、陰極には、イオン衝撃によってスパッタリングされにくい材質とする必要があり、従来は、タングステン、タンタル、モリブデン等が使われている。しかし、これら材料は使用温度が高いため、冷却手段への負担が大きく、また寿命の点でも問題がある。そこで、陰極としては第4の発明に示すように、仕事関数が小さく、熱電子放出特性に優れたLaB₆セラミック焼結体を採用するのが望ましい。この素材は仕事関数が小さいことから、使用温度が低く、蒸発による消耗を低く抑えることができる（表1）。そのため陰極の長寿命化が可能となる。またタングステン、タンタル、モリブデン等の高融点金属の熱陰極と比較して、アーク放電電圧が低くなるため、消費電力を小さくでき、冷却も容易になることからイオン源の小型化も可能となる。

【0014】

【表1】

	LaB ₆	W
仕事関数	2.7 eV	4.5 eV
使用温度	1400～1650℃	2000℃<
蒸発速度#	$2 \times 10^{-10} \text{g/cm}^2 \text{sec}$	$5 \times 10^{-8} \text{g/cm}^2 \text{sec}$

$2A/cm^2$ の電子電流密度（ J_{MAX} ）を得る温度での各々の蒸発速度

【0015】
【発明の実施の形態】以下に、本発明の一実施形態の負イオン源を説明する。上下方向に所定の間隔を有するようにイオン源支持材1、1が配置されており、該イオン源支持材1、1の先端部間に挟持されるように陽極部材2が取り付けられている。該陽極部材2には放電室3として、上下方向に貫通する筒孔が形成されており、該放電室3を囲む周囲壁部が陽極4に割り当てられている。また、放電室3の両端側には、放電室3と同軸にLaB₆焼結体からなる陰極5、5が互いに対向するように配置されており、該陰極5、5は、陽極4との絶縁性を確保するために絶縁材6を介在させて陽極部材2に固定さ

れており、この絶縁材6によって、陰極5が露出している空間と放電室3とからなる空間が気密にされている。なお、陰極5、5はその基部が陽極4の内径よりも小径（径：6mm）の円柱形状に形成されており、先端部5aは、先端側が小径となるように半球形状とされている。一方、陽極4の内面は、陰極5の基部の周囲では、陰極5外周壁と一定の間隔を有するように同一の径で形成されており、陰極5の先端部の周囲の陽極部材4aでは、内側に向かうに従って径が一定の比率で減少するテーパ面形状を有しており、さらにその内側は一定の内径（径：7mm）を有している。なお、陰極5、5は、電力導入端子11、11等を介して図示しない直流電源

の負極性出力に接続され、陽極4は、その電源の正極性（アース）に接続される。

【0016】また、放電室3の先端側中央部の陽極4には、陽極壁が先端側に窪んだ凹部7が2mmの深さで形成されており、該凹部7の先端側には陽極部材2の外部に開口するスリット状のイオン取り出し口10が形成されている。さらに、陽極部材2には、水冷管13が埋設されており、該水冷管13は、外部の冷却水供給源（図示しない）に接続されている。また、陽極部材2には、外部のガス供給源（図示しない）に接続されたガス管14が埋設されており、該ガス管14は、陽極4の内壁面に開口して放電室3に連通している。

【0017】以下に上記イオン源の動作について説明する。陽極部材2を水冷管13により冷却しつつ、ガス管14から放電室3内にガスを供給し、陽極4と陰極5、5間に高電圧の放電開始電圧を加えて放電を開始する。この放電により放電室3内でガスがイオン化し、このイオンが陰極5、5に衝突することにより熱電子が放出されて、放電室3内でガスがプラズマ化される。なお、陰極5の先端部と、陽極4の端部とは、その対向面がほぼ沿った形状を有しており、安定した放電がなされる。また、アーク放電は、筒状陽極壁の中心軸方向に発生し、その軸および軸の回りでの高密度プラズマ生成を促進する。すなわち、放電が一樣になされ、一層放電の安定性が得られる。上記放電室3では、高い電子温度での放電が生じており、高密度のプラズマが生じている。一方、陽極2に設けられた凹部7では、陰極5との直接の対面がなく、低い電子温度での放電領域を形成している。この領域では解離性付着反応が促進され、特に負イオンが多く生成される。上記イオン源で生成された負イオンを取り出し口10を通して放電室3外部に引き出す場合には、引き出された負イオンは図示しない加速電極により加速箱内で加速され、ストリップングフォイルとの衝突等を経てターゲットに照射される。

【0018】上記内部負イオン源によれば、イオンを十分にかつ安定して供給することができ、例えば、 H^- 、 D^- の負イオン粒子を安定して製造することができる。例えば、図3、図4に示すように、適切なアーク電流を設定することにより、 H^- で190 μA 、 D^- で70 μA の十分な量のイオンビームを得ることができ、医療用サイクロトロンとして必要十分な性能が得られる。また、放電室が気密な空間に置かれるので、ガスの使用量が少なく済み、例えば、 H^- 、 D^- の生成に際しては、5CC/分程度の原料ガスを供給することにより所望のイオンを発生させることができる。このため、加速箱へのガスの漏れも極めて小さく、加速中のビームを著しく減少させたり、内部の放射化を招くなどして真空度を悪化させることがない。また、アーク放電特性が安定しており、ビーム立ち上げ時および長時間運転においても優れた放電安定性が得られる。また、放電の安定性、

材質の選定から陰極の耐久性も大幅に向上しており、その寿命は200時間を優に超えている。

【0019】

【発明の効果】以上説明したように、本発明のサイクロトロン用イオン源によれば、放電室からイオン取り出し口に至る間の陽極壁部に、低電子温度領域用凹部を形成したので、解離性付着反応が促進され、イオンの生成量が增大する。また、陰極径を陽極内径よりも小さくし、かつ陰極先端部を先端側ほど小径となるテーパ形状にするとともに、陰極先端部に近接する陽極端部を中側ほど内径が減少するテーパ形状にすれば、陰極と陰極近傍の陽極との間の電場が一樣となるので、局所的な放電の発生がなくなる、またアーク放電は、筒状陽極壁の中心軸方向に発生し、その軸および軸の回りでの高密度プラズマ生成が促進される。すなわちプラズマが陽極壁において消失する確率が少なくなり、放電が安定し、十分な量で安定したイオンを発生させることができる。さらに、2つの陰極を放電室を含む密閉空間内に配置すれば、放電室が気密になり、イオン源外部に漏れるガス量を極力少なくでき、すなわち、イオンビーム加速中において、残留ガスとの衝突により損失するビームは低減され、安定したイオンビームが得られるとともに、第1の発明との組み合わせでは、凹部に確実かつ安定してガスを供給することができるので、凹部における解離性付着反応を発生せしむるために必要な励起水素分子(H_2^*)の生成に寄与し、従って十分な量の負イオンが安定して得られる。また、陰極をLaB₆焼結体で構成すれば、アーク放電電圧が低くなるため、より低い電力での放電が可能でかつ使用温度が低いため、冷却手段への負担が軽減できるとともに耐久性が大幅に向上するという効果がある。

【図面の簡単な説明】

【図1】 本発明の一実施形態におけるイオン源の断面図である。

【図2】 同じく拡大断面図である。

【図3】 同じく H^- イオン生成量を示すグラフである。

【図4】 同じく D^- イオン生成量を示すグラフである。

【図5】 陽極に設けた凹部の深さ変化におけるガス量とイオン生成量との関係を示すグラフである。

【図6】 従来のサイクロトロンを示す概略斜視図である。

【図7】 同じくPIG型イオン源の拡大断面図である。

【図8】 図7のVIII-VIII線断面図である。

【図9】 図7のIX-IX線断面図である。

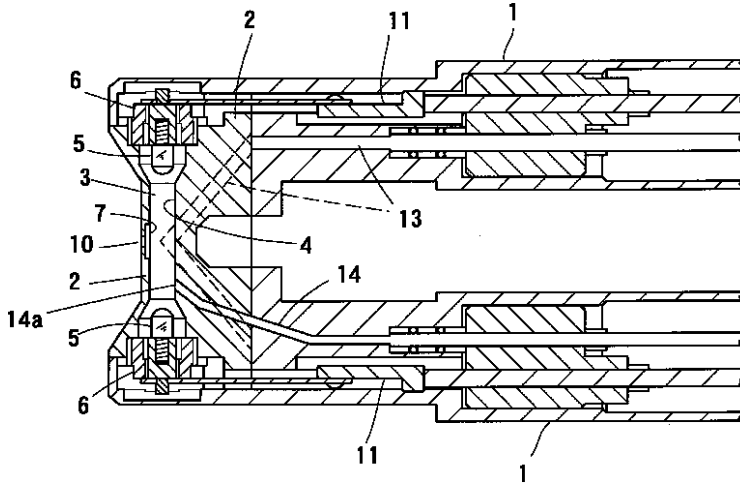
【符号の説明】

- 2 陽極部材
- 3 放電室

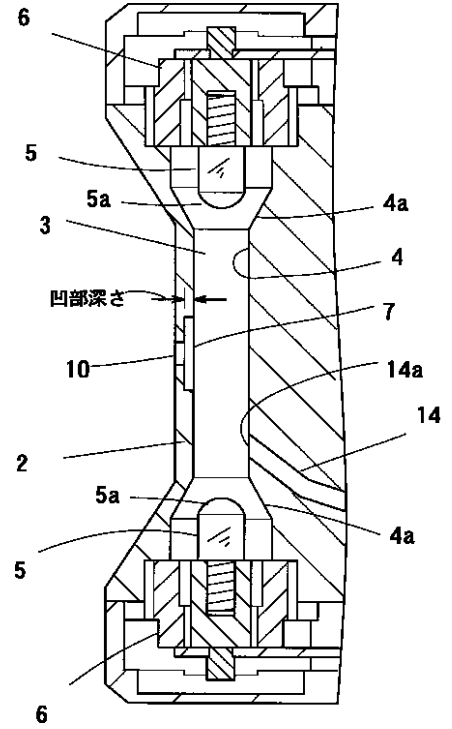
- 4 陽極
- 4 a 陽極端部
- 5 陰極
- 5 a 陰極先端部

- * 7 凹部
- 10 イオン取り出し口
- 13 水冷管
- * 14 ガス管

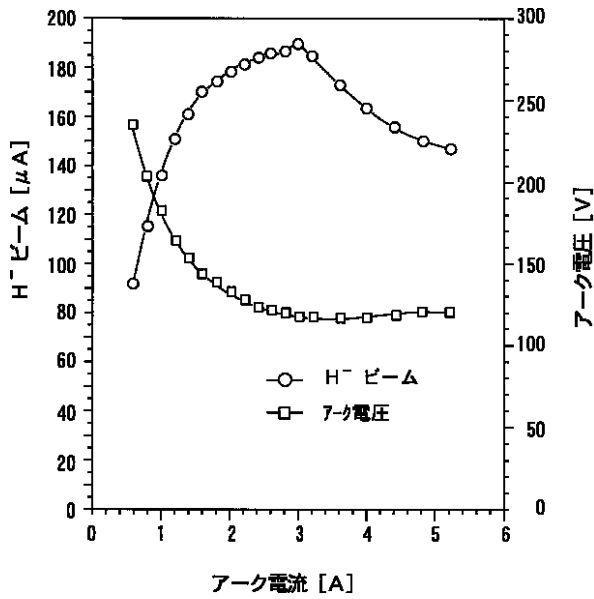
【図1】



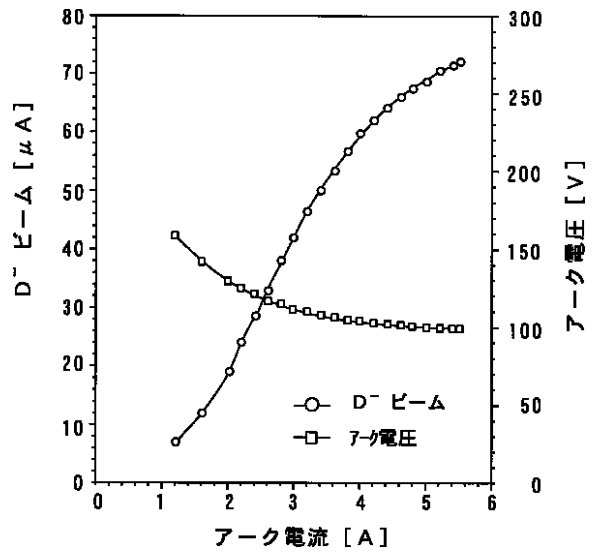
【図2】



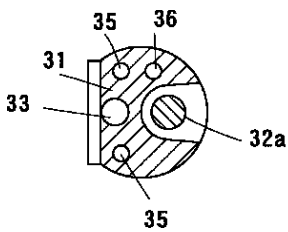
【図3】



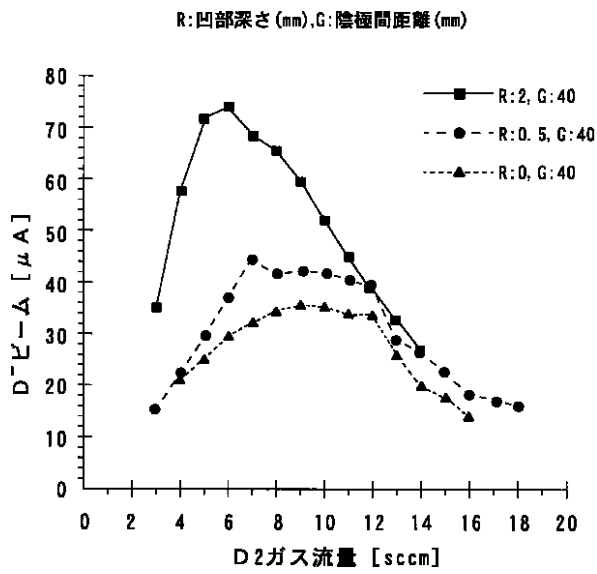
【図4】



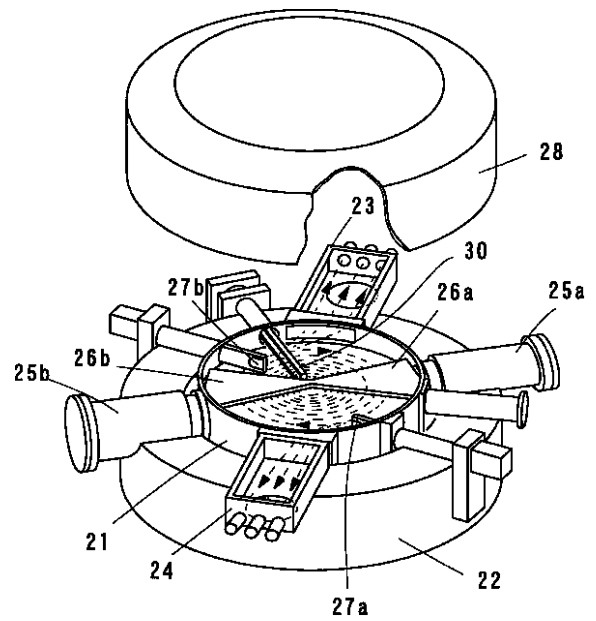
【図8】



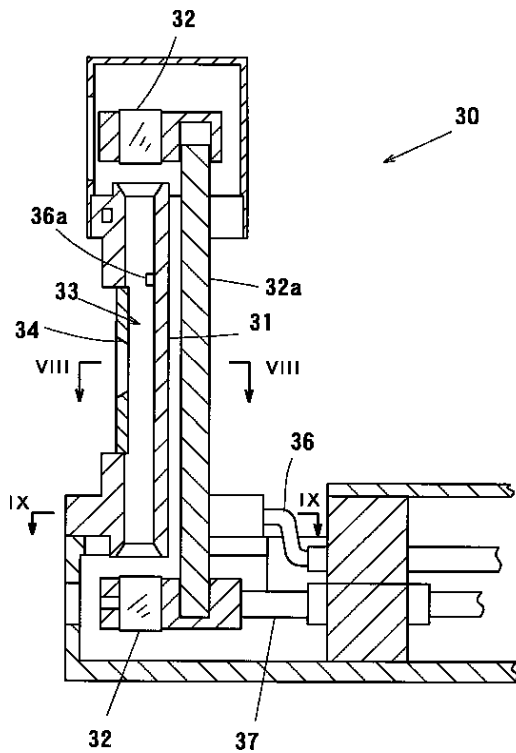
【図5】



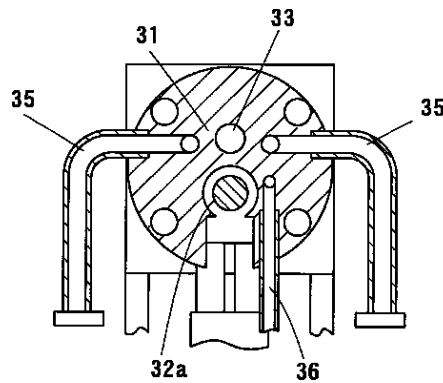
【図6】



【図7】



【図9】



フロントページの続き

(72)発明者 佐藤 庸夫
 東京都府中市日鋼町1番1 株式会社日本
 製鋼所内

(72)発明者 沢山 一英
 北海道室蘭市茶津町4番地 株式会社日本
 製鋼所内

(8)

特開2000-243309

Fターム(参考) 2G085 AA11 BA02 BB20 BE10 CA01
CA11 EA01
5C030 DD03 DE01 DG01 DG09