

## 1. はじめに

KEKと原研の統合計画である大強度陽子加速器計画では、400 MeV 陽子リニアックからのビーム出力としてピーク電流50 mA、デューティファクター2.5%が要求されている。またリニアックに続く3 GeVシンクロトロンへのビーム入射効率の向上のために、加速粒子は負イオンである必要である。そのため本計画で使用するイオン源では、ビーム強度60 mA以上の負水素イオン引き出しが必須となる。

大強度陽子加速器計画は、日本の他に米国のSNS (Spallation Neutron Source) 計画、欧州のESS (European Spallation Source) 計画がそれぞれ予定されている。各計画の負イオン源の要求性能の詳細を表1に示す。また世界の主要加速器施設で実用機として稼働中の負イオン源の性能を表2に示す。このように稼働中のイオン源で大強度陽子加速器用負イオン源に必要な大電流&高デューティビーム引き出しを行っている装置は無く、現在、各計画でイオン源の開発が精力的に行われている。

表2に掲載したイオン源の運用方法についていくつか紹介すると、高エネルギー加速器研究機構 (KEK) の12 GeV 陽子シンクロトロン施設で稼働中の表面生成型負イオン源は、ソースプラズマ生成用のカソードとして二重らせん構造ホウ化物陰極 (LaB<sub>6</sub>フィラメント) を使用し、約7,000時間の連続運転を実現している[1]。またセシウム使用量は10g/(1~1.5年) であり、定常運転中はコンバーター電極に連続的にスプレー供給している。セシウム補充は6,000~9,000時間に1回であり、フィラメント交換作業時に補充作業を行っている。

米国ロスアラモス研究所の陽子加速器施設 (LANSCE) で稼働中の表面生成型負イオン源は、ピーク電流16 mA、デューティ12%にて4週間の連続運転を行っている[2]。また加速器の稼働率を上げるために、バックアップイオン源とその専用のテストスタンドを準備し、常時バックアップイオン源を待機させることにより、イオン源の交換を24時間以内で行える体制を整備している。

表1 世界で計画されている大強度陽子加速器計画用負イオン源の要求性能  
(カッコ内の数値は、将来のビームパワー増強時の要求性能)

使用施設	SNS (米国)	ESS (欧州)	KEK-JAERI Joint Project (日本)
ピーク電流 (mA)	35 (70)	70	>60
エネルギー (keV)	65	50	50
パルス長 (msec)	1.0	1.2	0.5 (0.5-3.0)
繰り返し率 (Hz)	60	50	50
デューティ (%)	6.0	6.0	2.5 (2.5-15.0)
rms エミッタンス ( $\pi$ mm.mard)	0.15 (0.20)	0.10	~0.20
寿命 (hour)	700		500

表2 稼働中の主要な加速器用負イオン源の性能

施設	KEK-PS [1]	LANL -LANSCE [5]	RAL-ISIS [5]	DESY-HERA [5]		TRIUMF [5]
負イオン生成方式	表面生成	表面生成	ペニング	マグネトロン	体積生成 (RF)	体積生成
ピーク電流 (mA)	20 - 40	16	35	60	40	20
エネルギー (keV)	750 (C-W)	80	18	18	18	25
デューティ (%)	0.24 - 0.48	12	2.5	0.05	0.05	100
エミッタンス ( $\pi\text{mm.mrad}$ )	0.4 - 0.5 (rms)	0.53 (90%)	0.3 (90%)	0.98 (90%)	0.4 (90%)	0.75 (90%)
セシウム	10g / 1~1.5年	480 mg/day	使用	2.5 mg/day	未使用	未使用
連続運転時間	約7,000時間	720時間	平均28日間 (672時間)	7,224時間	7,000時間	500時間

本稿では、負イオン源、特に体積生成型負イオン源について簡単に述べた後、統合計画用負イオン源開発の最新の状況と他施設の開発の状況について解説する。イオン源の基本原理や加速器用イオン源の一般論については過去のOHO加速器セミナーのテキストで詳しく述べられているので、そちらを参照して頂きたい[3][4]。

## 2. 負イオン源の基礎

### 2.1. 負イオンの生成方法

負イオンの主な生成方法として、表面生成法と体積生成法が挙げられる。表面生成法とは、セシウムで覆って仕事関数を低くした金属表面に正イオンや中性粒子が入射すると、入射粒子自身または吸着している粒子が表面で電子を受けとって負イオンの形で反射されることとした負イオン生成法である。一般的に表面生成の場合、負イオンが金属表面から飛び出す

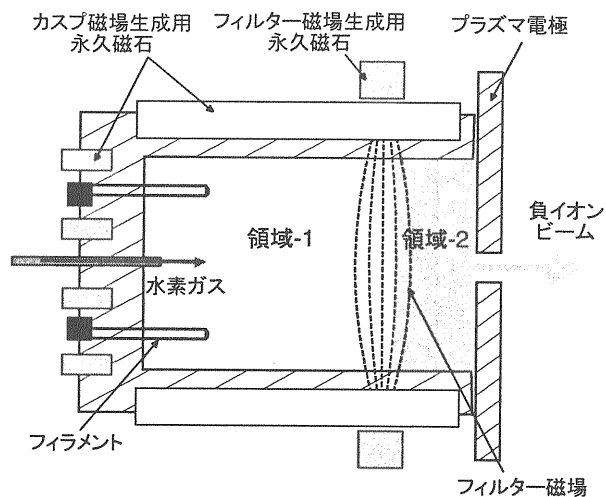
際に横方向のエネルギーを持つことから、本質的に得られるビームの収束性はあまり良くない。

体積生成法は、放電プラズマ中の衝突過程などにより生成されるプラズマ中の負イオンを引き出す方法で、ビームの収束性が良い、構造が簡単である、表面生成型に比べて使用するセシウムの量が少ない、正イオン源で培われた技術が応用できる等の利点があり、最近の負イオン源開発の主流となっている。

### 2.2. 体積生成型負イオン源

#### 2.2.1. 負イオン生成メカニズム

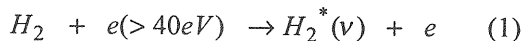
体積生成型負イオン源の構造を図1に示す。体積生成型負イオン源では、負イオンは次の2段階の過程によって生成されると考えられている。まず、主に以下に示す反応によって振動励起状態の水素分子が生成される。



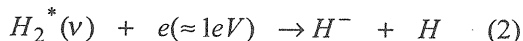
\* 領域-1: 高電子温度領域  
 $H_2 + e (>40 \text{ eV}) \rightarrow H_2^*(v) + e^-$

\* 領域-2: 低電子温度領域  
 $H_2^*(v) + e^- (<1 \text{ eV}) \rightarrow H^- + H$

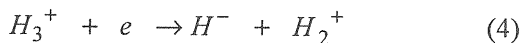
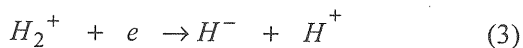
図1 体積生成型負イオン源の構造



ここでは $v$ は励起レベルを表し、反応断面積は $v=7\sim 9$ で最大となる。次に振動励起された水素分子に低速の電子が衝突して解離性付着反応により負水素イオンが生成される。



負イオン生成にはこれ以外にも以下に示す分子イオンを経由する解離再結合反応として



があるが、(2)式の解離性付着反応が負イオン生成の重要な役割を果たしているをLeungらが実験的に示した[6]。

彼らは水素とキセノンの混合ガス放電を行い、放電電圧を水素の電離電圧(13.6 eV)以下に下げ、水素の正イオンの存在しないプラズ

マを作った。図2の(a)の二つのスペクトルに示すように、水素の正イオンが存在しない状態でも負イオンが存在し、正イオンを経由しないプロセスが負イオン生成の主要であることが明らかになった。図2で負イオンが変化しているのは、放電パワーに伴ってプラズマ生成室内の電子の量が変化するからである。

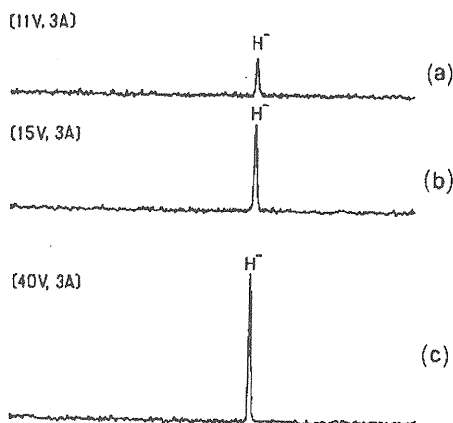
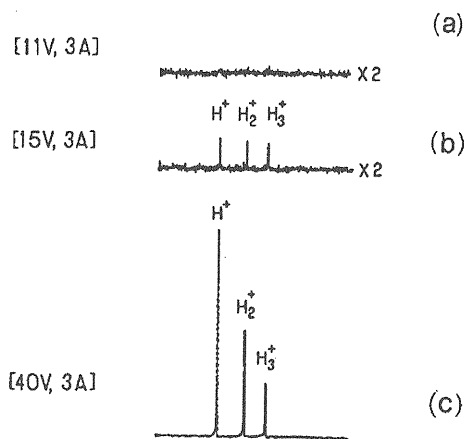
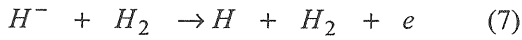
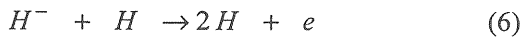


図2 水素-キセノン混合ガス放電実験結果。上の図は水素の正イオンのスペクトル、下の図は上にそれぞれ対応した負イオンのスペクトル [6]。

負イオンの結合エネルギーは約0.75 eVと低いので、付着した余分の電子は容易にはぎ取られてしまい、負イオンは消滅してしまう。負イオンの消滅は以下に示すような過程が考えられる。



(5)式の過程は、2~3 eV以上の電子に対してその衝突断面積が急激に大きくなる。負イオンの消滅を抑えるには電子温度は1 eV以下に低くする方が望ましい。

### 2.2.2. 磁気フィルター

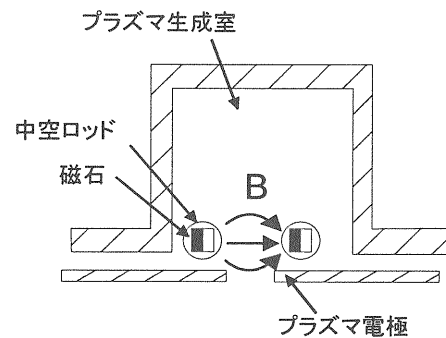
上述したように負イオンの生成過程と消滅過程はいずれも電子との衝突過程であるが、それぞれ異なった電子エネルギー依存性を持ち、その最適値は大きくずれている。負イオン密度を高める方法として、イオン源のプラズマ領域を温度の高い電子領域と低い電子領域に分離し、それぞれの領域で(1)式および(2)式の二段階の過程の生成過程が最適になるように電子温度を最適化することである。この方法をタンデム方式といい、体積生成型負イオン源でのほとんどがこの方式を用いている。

電子の温度領域を二分化するために、局在したシート状の横磁場（磁気フィルターと呼ぶ）をプラズマ生成室に設ける。磁気フィルターには、図3に示すように、ロッドフィルター、外部フィルターおよびPGフィルターの3種類が主に用いられる。

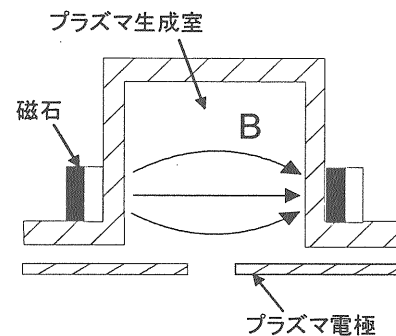
ロッドフィルターはプラズマ中に中空の金属（ロッド）を通し、ロッドの中に永久磁石を入れて磁気フィルターを生成する。必要な場所に比較的強い磁場を発生できるが、ロッド自体がプラズマ中に存在することになり、ここでプラズマが損失する恐れがある。

外部フィルターは、プラズマ容器の外側にフィルター用の磁石を並べる方法であり、プラズマ中に障害物が存在しないという利点があるが、プラズマ容器が大きくなると、磁気フィルター強度が弱くなる。

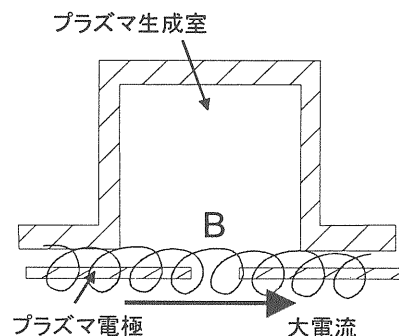
PGフィルターはプラズマグリッド（PG：ビーム引き出し系においてプラズマに接した第1電極）に電流を流して横磁場を作る方法であり、広範囲のビーム引き出し面にわたって一様な磁気フィルターを発生することができ、核融合用NBI装置に用いられている[7]。また電流値を変えるだけでフィルター強度の最適化を容易に行えるという利点も持つ。しかし大電流電源



(1) ロッドフィルター方式



(2) 外部フィルター方式



(3) PGフィルター方式

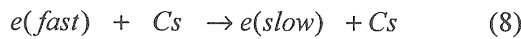
図3 体積生成型負イオン源の磁気フィルターの種類

を高電圧に浮かせる必要があり、イオン源電源システムが大規模となるので、加速器用のイオン源には不向きである。

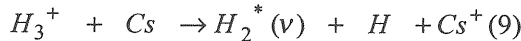
### 2.2.3. セシウム効果

体積生成型負イオン源におけるセシウム添加によるビーム強度増加については、幾つかの理由が考えられる。まず放電容器による体積生成として、

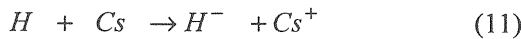
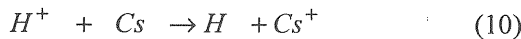
○低速電子密度の増加



○水素分子イオンとセシウムによる励起水素分子の生成

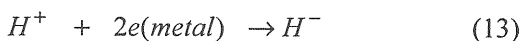
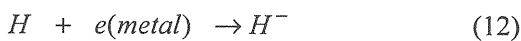


○水素イオンおよび水素原子とセシウムによる負水素イオンの生成

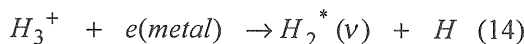


が考えられる。また放電容器による表面生成としては、

○壁表面での負水素イオン生成



○壁表面での励起水素分子生成



が考えられる。

体積生成と表面生成のどちらの寄与が大きいか、Morishitaらが実験的に確かめた[8]。彼らはまず、プラズマ生成室壁を加熱して積極的に生成室内のセシウム密度を増加させ、セシウム密度とプラズマパラメータの相関を調べた。そ

の結果、セシウム密度を上げても電子温度やイオン飽和電流密度がほとんど変化しないことが分かった。次にプラズマグリッドの温度を上げて、負イオンビーム電流とプラズマグリッド表面の仕事関数の変化を調べたところ、グリッド温度に対する両者の変化の仕方が一致することも分かった(図4)。以上の実験結果から、セシウム効果の主たる原因はプラズマグリッドでの表面効果と結論された。

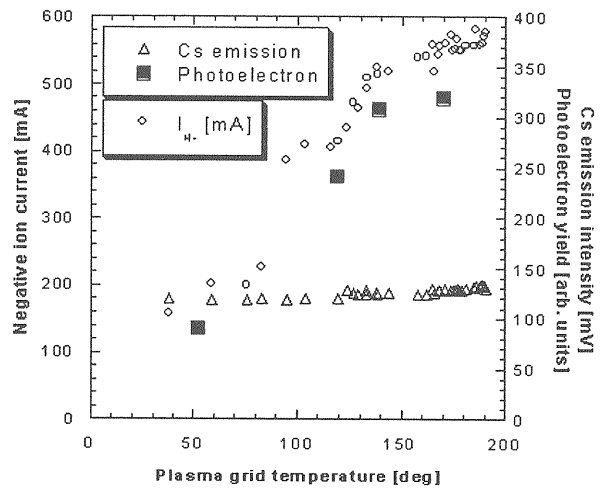


図4 プラズマグリッド温度の変化に伴う負イオン電流、グリッド表面からの光電子発生量、セシウム発光強度の変化[8]。セシウム発光強度はセシウム密度に比例する[8]。

### 2.3. 負イオン引き出し

負イオン源の典型的なビーム引き出し系の構造を図5に示す。負イオンとともに引き出される電子の処理は、まず最初に引出電極に数kVの正電圧を印加して負イオンと電子を一旦引き出し、引出電極中に埋め込んだ小型の永久磁石がつくる磁場によって電子の軌道を曲げ、引出電極に当てて行う方法が一般的である。さらに抑制効果を高めるために、電子抑制電極と呼ばれる電極を引出電極の下流に設置し、引出電極で反射した電子または発生した二次電子をここで捕捉・処理することも有効である。

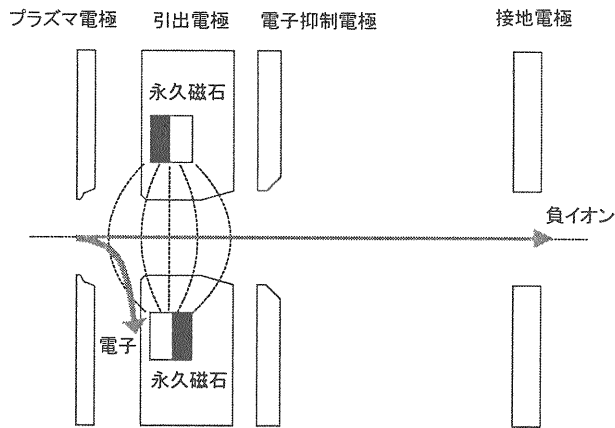


図5 負イオン源ビーム引き出し系の概念図

実際には、電子の曲がる方向は紙面に対して垂直である。

電子抑制磁場の形状の最適化実験が Okumuraらによって行われている。その実験結果を図6に示す[9]。図6の上のグラフは、引出電極内のいろいろな磁石配置に対するビーム軸上の磁束密度分布である。一点鎖線の分布は、磁石の磁極の向きをビーム進行方向に向けたとき(図7の(a)の配置)のもので、それ以外の分布は磁極の向きをビーム方向と垂直に向けている(図7の(b)配置)。図6の下グラフは、それぞれの磁束密度分布に対応した電子抑制効果の引出電圧依存性を示しており、縦軸は電子抑制係数と呼ばれ、値が小さいほど抑制効果が高いことを示す。実験結果から分かるように一点鎖線の磁束密度分布、つまり磁石の磁極の向きをビーム進行方向に向けた方が抑制効果が高い。これは、この磁石配置の方が引出電極の上流部の磁場が高くなり、引出電極の上流部当たりの電子の量が多いからである。またこの磁束密度分布だと、負イオンはプラズマ電極と引出電極の間で偏向を受けるが、引出電極を通過した後は反対方向にもう一度偏向を受けることになるので、ビーム軌道の補正を行うことができるという利点もある。また図6の下グラフの点線のデータは、一点鎖線の磁束密度分布でさらに電子抑制電極に2 kVのバイアス電圧を

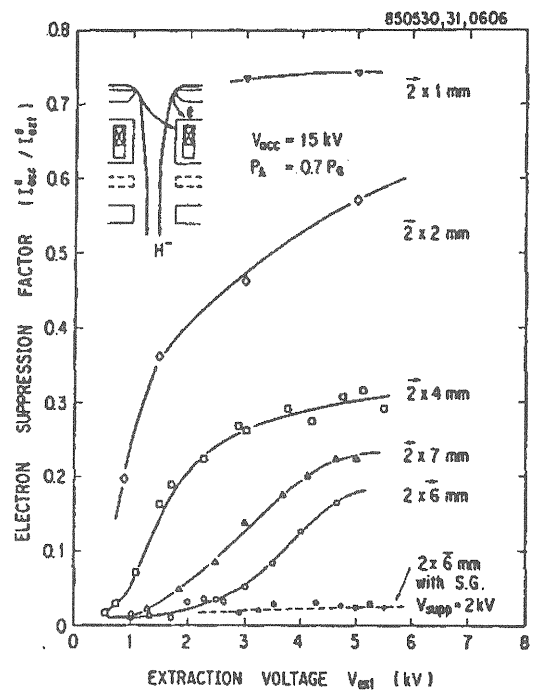
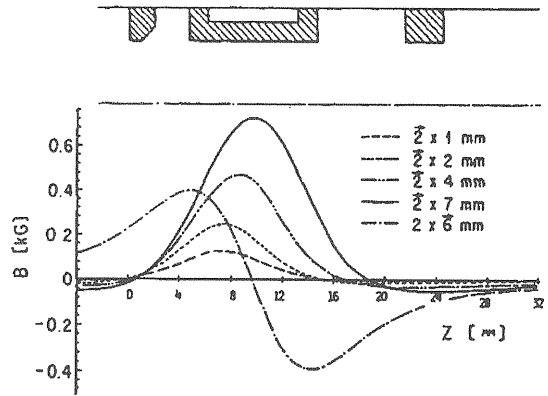
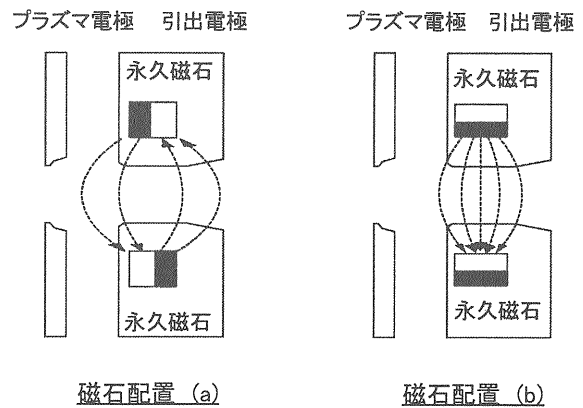


図6 引出電極中の磁石配置と電子抑制効果の関係 [9]



磁石配置 (a)

磁石配置 (b)

図7 電子抑制用磁石の配置方法

印加したときの結果である。このように電子抑制電極に電圧を印加する事で、さらに電子抑制効果を高めることが出来る。

### 3. 統合計画用負イオン源の開発現状

現在、原研とKEKにおいてそれぞれ統合計画用負イオン源の開発を行っている。原研ではセシウム添加による大強度の負イオンビーム引き出し実験を1999年より継続して行っている[10]。KEKではセシウム未添加でのビーム引き出し実験を行っており、また、イオン源の長寿命化が期待できるRFアンテナによる高周波放電の本格的な実験をまもなく開始する予定である。この章では、原研およびKEKの負イオン源開発の現状について述べる。

### 3.1. 大強度負イオンビーム引き出し実験

#### 3.1.1. 負イオン源の構造

現在、原研で開発中の体積生成型負イオン源の構造を図8に示す。本イオン源は本計画用イオン源のプロトタイプという位置づけであり、負イオン生成効率を上げるための詳細なパラメーターサーベイが行えることを重視した設計となっている。具体的には、プラズマ生成室をインシュレーターの外側に設置し、プラズマ生成室の磁石配置を容易に変えることが出来る構造となっている。その代償としてイオン源ビーム引き出し孔からイオン源取り付けフランジ間の距離が長くなり、このドリフトスペースで空間電荷効果によりビームが拡がる恐れがある。実機では、プラズマ生成室はインシュレーター間に落とし込み、ビーム孔とイオン源取り付けフランジ間のドリフトスペースを極

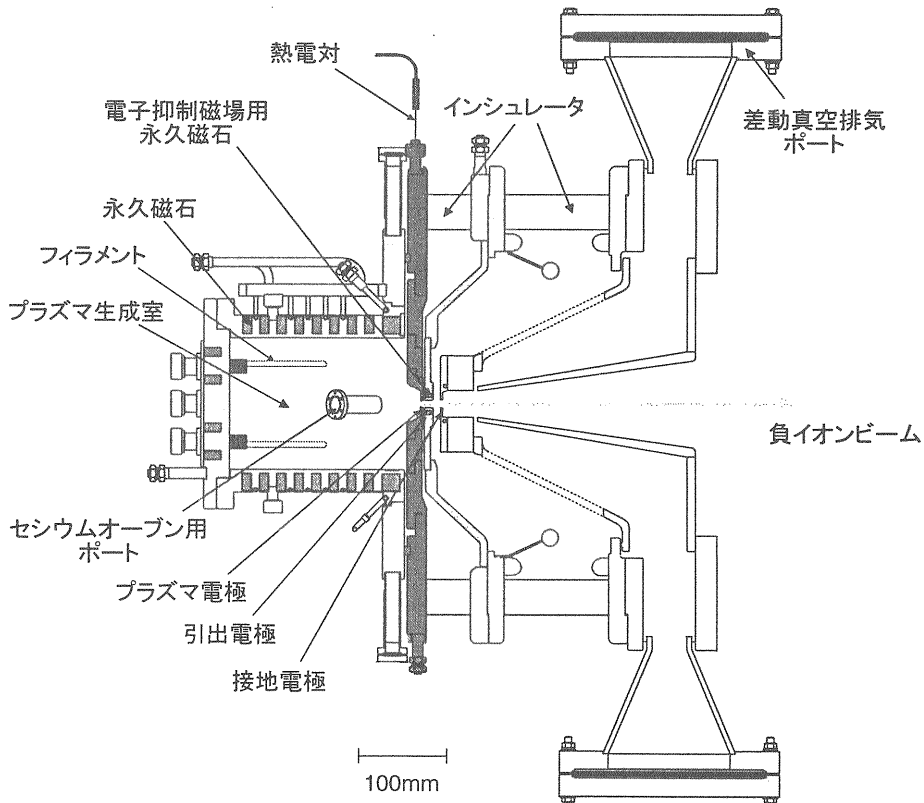


図8 原研で開発中の負イオン源構造図

力短くする構造を採用する予定である。

イオン源プラズマ生成室の形状は、直径200 mm、長さ150 mmの円柱型で、材質は無酸素銅である。ソースプラズマ生成は、直径1.5 mmのタングステンフィラメントを2本を用いてアーク放電にて行っている。プラズマ生成室の磁石配置の詳細を図9に示す。永久磁石は生成室の側壁と上蓋に並べられており、ソースプラズマ閉じ込め用のマルチカスプ磁場と体積生成方式に必要なフィルター磁場を生成している。磁気フィルターは外部フィルター方式である。ビーム軸方向のプラズマ生成室中心の磁気フィルター磁束密度分布を図10に示す。磁気フィルターの強度は、プラズマ生成室中心のフィルター磁束密度をビーム軸方向にプラズマ電極表面からフィラメント先端位置まで積分した値 (BL) で与えることが多い。図10に示す磁束密度分布の場合は、フィラメント先端位置はプラズマ電極表面から74 mmなので、フィルター磁場強度BLは約465 Gauss.cmである。

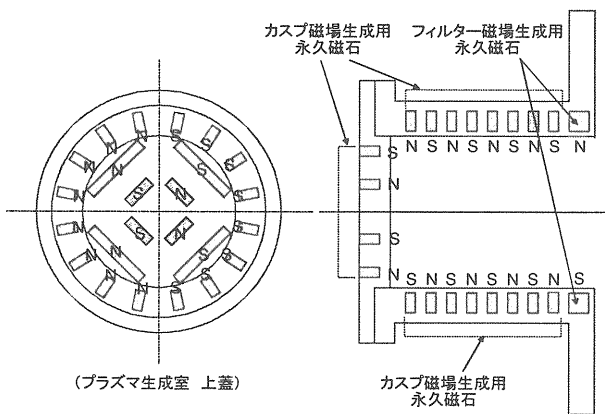


図9 プラズマ生成室の永久磁石の配置図

左図は生成室上蓋の磁石配置、右図は生成室側面の磁石配置である。

本実験ではプラズマ生成室側面にセシウムオープンを設置し、プラズマ生成室内にセシウム蒸気を添加した。セシウムオープンは、リザ

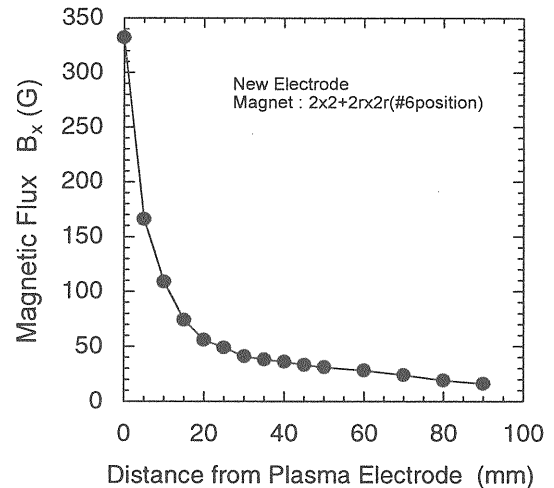


図10 プラズマ生成室中心の磁気フィルター磁束密度分布

バー、高温バルブおよびセシウム導入口を備えたチューブで構成され、それぞれの場所にシースヒーターと熱電対が取り付けられている。実験では高温バルブとチューブを300°C、リザーバーを250°C程度に保ち、温度が定常になった後にバルブを手動操作にて一定時間開放して、プラズマ生成室内にセシウム蒸気を添加した。

ビーム引き出し系はプラズマ電極 (PE)、引出電極 (EXE) および接地電極 (GE) の3枚で構成されており、プラズマ電極のビーム引き出し孔口径は8 mmφである。ギャップ長は、PE-EXE間が2.2 mm、ESE-GE間が8.4 mmにそれぞれ調整している。

プラズマ電極は2.0 mm厚のモリブデン製である。セシウム効果はプラズマ電極温度に依存するので、熱電対を電極に取り付け、運転中に温度をモニターしている。引出電極は10 mm厚の無酸素銅製である。電子抑制磁場発生用の磁石配置は図7の(a)の方式である。電子抑制電極は設けず、その代わりに引出電極の上面から6 mmの位置にビーム軸方向の長さ2 mm、直径10 mmの溝を設け、ここで電子の最終的な処理を



行っている。接地電極は3 mm厚の無酸素銅製である。

イオン源から引き出されたビームの残留ガスによる中性化損失を低減するために、イオン源のビーム引き出し系の真横に差動真空排気装置を設置し、イオン源内の残留ガスを積極的に真空排気している。

### 3.1.2. 負イオン生成効率

セシウム添加前 (Pure Volume) と添加後 (Cs Seeded) の負イオン電流および引出電流のアーカ放電パワー依存性を図 11にそれぞれ示す。引出電流とはイオン源の引出電極に流れ込む電流で、この場合は電子電流に相当する。図 11に示すとおり、セシウム未添加の状態ではアーカ放電パワー52 kWに対して負イオン電流は14 mAであり、またアーカパワーの増加に対して飽和傾向にある。しかしセシウムを添加するとビーム電流値はアーカ放電パワーにほぼ比例して増加し、55 kWにて72 mAに達している。電極のビーム引き出し孔の口径は8 mm φであるから、72 mAの電流値を電流密度に換算すると144 mA/cm<sup>2</sup>に相当する。セシウム添加時のイオン源への水素ガス流量は13 SCCMである。

また引出電流は、セシウム添加により大幅に減少している。電子/負イオン比は、セシウム未添加時は21 (@アーカパワー52 kW)、セシウム添加時は0.6 (@アーカパワー50 kW) である。大電流かつ高デューティの運転を行うイオン源では、引出電流が大きいと引出電極に多大な熱負荷が加わり電極が熱破損する恐れがあるため、引出電流は出来るだけ低い方が望ましい。

本実験では、負イオンビーム電流測定はファラデーカップを使用した。イオン源接地電極からファラデーカップまでの距離は約600 mmである。負イオン電流測定を行うときに注意が必要なのは、負イオンビームと一緒に引き出される電子を負イオンと同時に測定して、負イオン

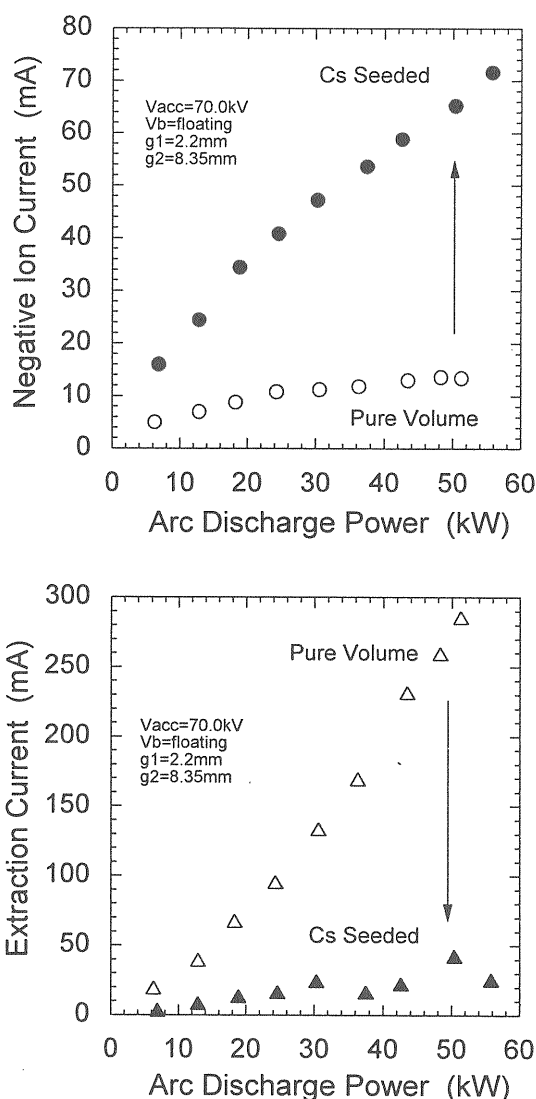


図11 セシウム添加による負イオン電流 (上) と引出電流 (下) のアーカ放電パワー依存性の変化

電流値を過大評価しないことである。2.3章で述べたように、イオン源のビーム引き出し系内の磁場で電子の大部分は取り除かれるが、抑制効果が十分で無いときは、電子の一部はそこからリークし、負イオンビームと同等のエネルギーを得てイオン源外に引き出される可能性がある。

ファラデーカップに電子が流れ込んでいないことを確認するために、水素ガスの代わりにヘリウムガスをイオン源内に導入し、ヘリウム

プラズマを生成した。ヘリウムは水素と異なりふつう、負イオンは存在しないので、ヘリウムプラズマを生成した状態でイオン源に負の高電圧を印加しても引き出される可能性があるのは電子だけである。よってこの状態でファラデーカップに信号が出力されなければ、イオン源の電子抑制機能は十分機能しており電子はファラデーカップに流れ込んでいないことが証明できる。ヘリウムプラズマ生成実験の結果を図 12に示す。グラフの縦軸はファラデーカップの出力信号で、横軸は引出電流である。引出電流が200 mAの時のファラデーカップ信号は0.4 mA程度であり、引出電流電子量の0.2%である。図 11に示したようにセシウム添加時の引出電流量は50 mA以下なので、ファラデーカップへの電子の流れ込みは0.1 mA程度であり、これは負イオンビーム電流量に比べて無視できる量である。よってファラデーカップの出力信号は全て負イオンビーム電流値であると結論できる。

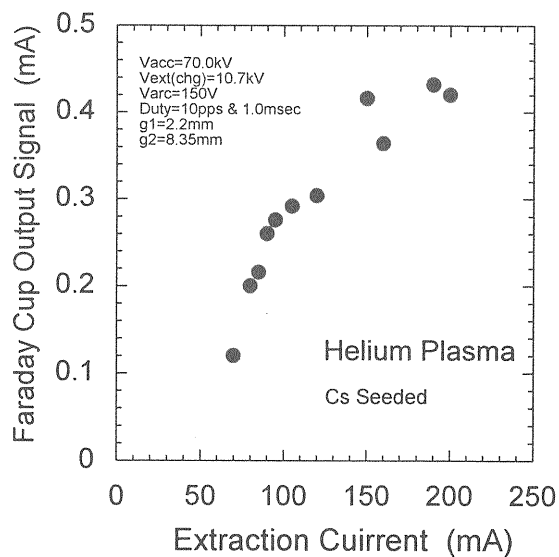


図12 ヘリウムプラズマ生成実験結果

図 13に負イオンビーム電流72 mA、パルス長1.0 msecのビーム電流波形（上）およびその時のアーク電流波形（下）を示す。横軸は200  $\mu\text{sec}$  / divである。1.0 msecのパルス長ビームにおけるビームの立上り時間は200  $\mu\text{sec}$ 、立下り時間は100  $\mu\text{sec}$ である。

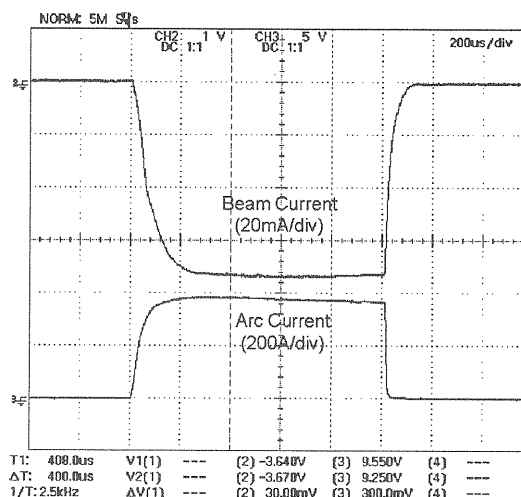


図13 ビーム電流およびアーク電流波形  
ビーム電流は20 mA/div、アーク電流は200 A/divである。

負イオン電流と引出電流の磁気フィルター強度依存性を図 14に示す。本測定ではアーク放電パワーは30 kW一定としている。磁気フィルターを強くしていくと負イオン電流が増大するのは、フィルター磁場とともに負イオン生成室の電子温度が下がり、(2)式の反応により負イオンが増大することに起因する[11]。フィルター磁場が強過ぎると負イオン生成室のプラズマ密度が低下し、負イオン電流は逆に減少することになる。本イオン源では400から500 Gauss.cmのときにビーム電流値が最大となる。

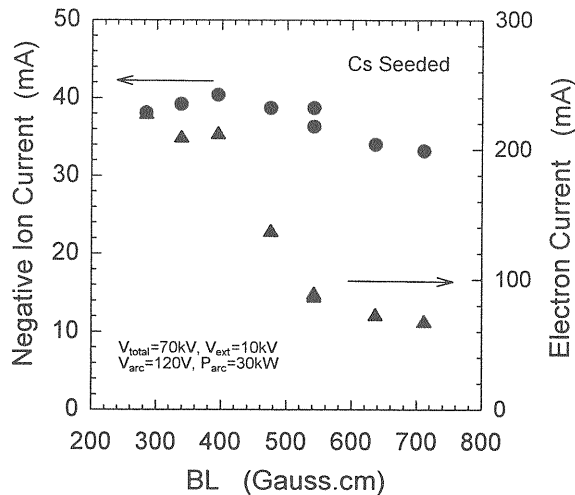


図14 負イオン電流と引出電流のフィルター磁場強度依存性（アークパワーは30 kW一定）

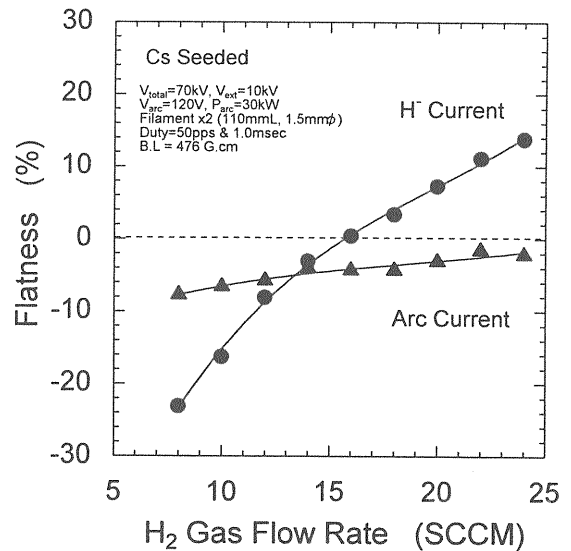


図15 ビーム電流波形およびアーク電流波形フラットネスのガス流量依存性

### 3.1.3. 負イオンビーム波形のガス流量依存性

加速器でビームを加速する場合、ビーム波形の平坦度は重要なファクターとなる。なぜなら加速器では収束磁石などビーム電流値に依存するパラメータが存在し、ビームの平坦度が悪くパルス内でビーム電流が変化すると、マッチングの取れないビームが加速器を通過し、加速器内でビームロスを引き起こすことになるからである。

ビームの平坦度を (15) 式で定義し、ガス流量に対するビーム電流波形およびアーク電流波形の平坦度の変化の様子を図 15 に示す。

$$F = \frac{I(0.8ms) - I(0.3ms)}{I(0.3ms)} \times 100 \quad [\%] \quad (15)$$

ビーム波形は、ガス流量が低いときは時間とともに減少し、ある流量ではフラットになり、それ以上の流量では逆に時間とともに増加している。またアーク電流波形はビーム電流波形に比べてガス流量の依存性が小さい。ビーム波形が 1.0 msec のマクロパルス時間内で変化する理由は、アーク放電開始直後にプラズマ生成室金

属表面に水素原子が吸着するため、生成室内のガス圧が一時的に下がることが原因と考えられる。図 16 にビームパルス内のある時間に着目したときのガス流量に対するビーム電流値の変化の様子を示す。負イオン電流が最大となるガス流量が存在するのは、生成室内の圧力が変化することで負イオン生成に主要な役割を

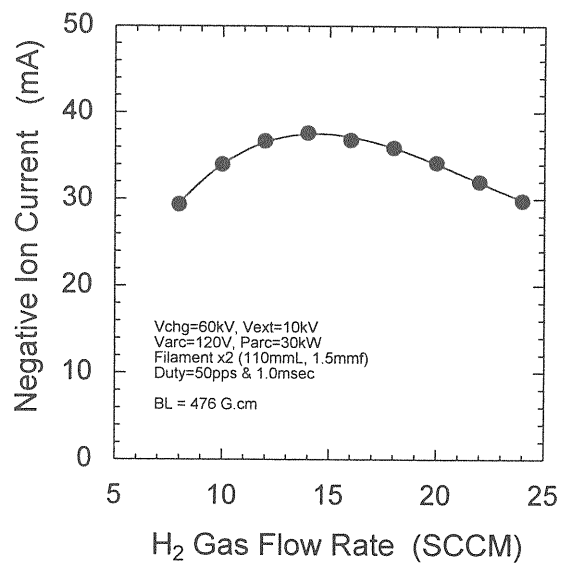


図16 負イオン電流のガス流量依存性

果たす低速電子と、負イオンを消滅させる水素原子および水素分子の量が変化するためである。ビーム波形の変化は、図 16の現象がマクロパルス時間内に起きるために生じると考えられる。

### 3.1.4. エミッタンス

ダブルスリット型エミッタンススキャナーを使用してエミッタンス測定を行った。エミッタンススキャナーのスリットの寸法は、前方、後方とも幅90 mm、ギャップ長0.1 mmである。またスリット間距離は100 mmである。スキャナーの取り付け位置は、イオン源の接地電極から約500 mm下流である。

現在までに測定されているエミッタンス図を図 17(電子抑制磁場と垂直方向)および図 18(電子抑制磁場と水平方向)にそれぞれ示す。それぞれの方向のRMS規格化エミッタンスは、 $0.13 \pi \text{mm.mrad}$ 、 $0.19 \pi \text{mm.mrad}$ であり、RFQのRMSアクセプタンスの大きさである $\sim 0.25 \pi \text{mm.mrad}$ と比較して低い値である。本イオン源は、ビーム引き出し孔とイオン源取り付けフランジ間の距離が長く、この間でビームが大きく発散してしまうことが懸念されたが、予想に反して良好なエミッタンスが得られている。

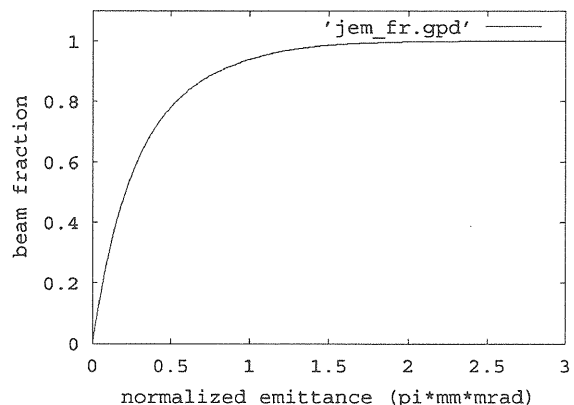
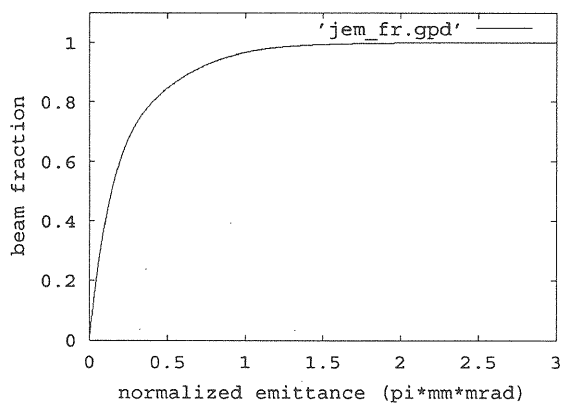
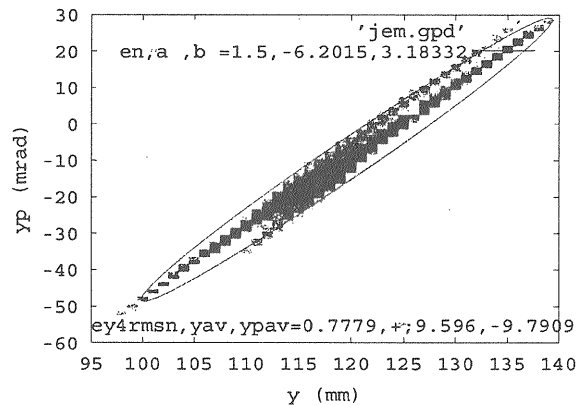
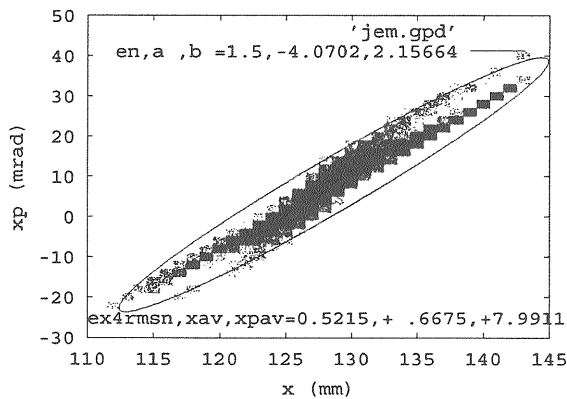


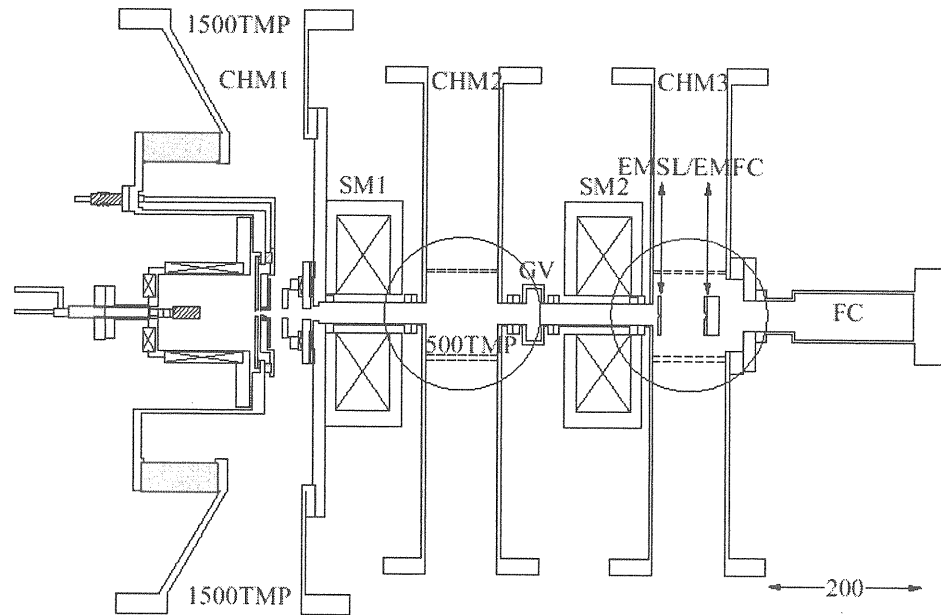
図17 エミッタンス測定結果  
(電子抑制磁場と垂直方向)  
ビームエネルギー : 70 keV  
ビーム電流 : 53 mA

図18 エミッタンス測定結果  
(電子抑制磁場と水平方向)  
ビームエネルギー : 70 keV  
ビーム電流 : 60-56 mA

### 3.2. 高周波放電型イオン源の開発

KEKでは、長寿命運転を目指した負イオン源の開発が行われている。開発中のイオン源の全体構成図とプラズマ生成室の詳細図を図19に示す[12]。イオン源のプラズマ生成室は、イオン源ビーム引き出し孔からソレノイド電磁石

(SM1)までの距離を極力短くするため、インシュレーターの内側に配置している。プラズマ生成室は、直径100 mm、長さ122.5 mmの円柱型で、材質は無酸素銅である。ソースプラズマ生成はRFアンテナを用いた2 MHz高周波放電を使用する。RFアンテナは水冷可能な管方式を採用し、材質は石英管で覆ったチタンを予定



CHM:vacuum chamber, SM:solenoid electromagnet, GV:gate valve, FC:Faraday-cup  
 EMSL:movable slit for emittance measurement, TMP:1500or500l/s turbo molecular pump  
 EMFC:movable Faraday-cup with slit for emittance measurement

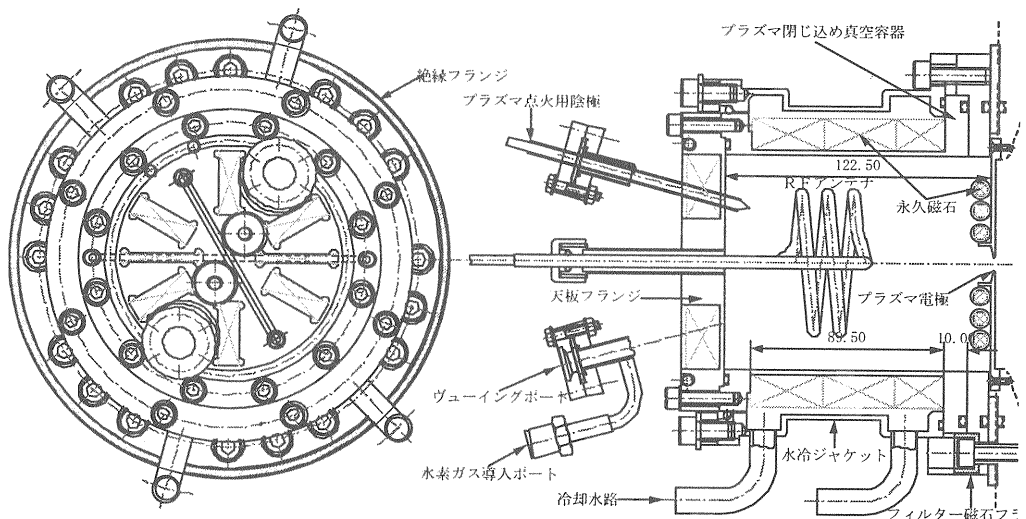


図19 KEKで開発中の負イオン源の構造図。上の図は全体構成図、  
 下の図はプラズマ生成室の詳細図

している。高周波放電の場合、放電の種となる電子を供給する必要がある。本イオン源では、電子の供給方法として、冷陰極放電方式または2 MHz高周波の他に30 MHzの高周波を連続的に投入する方式 (Dual frequency operation) を予定している。後者の方式は、最近、米国LBNL研究所で実験が開始された方法であり、従来のフィラメント方式やフラッシュランプ方式に代わる方式として期待されている[13]。

現在、高周波放電実験を行うために必要な機器を準備中であり、まもなく試験を開始する予定である。

#### 4. 他施設の負イオン源開発の現状

##### 4.1. 米国SNS用負イオン源

米国の中性子源計画SNS用の負イオン源は、米国のLBNL (ローレンスバークレー研究所)で行われている。現在開発中の負イオン源の構造図を図20に示す[14]。負イオン生成方式は体積生成型で、プラズマ生成室の寸法は、直径100 mm  $\phi$ 、長さ100 mmである。磁気フィルターは

ロッドフィルター方式を採用している。ソースプラズマは、porcelain皮膜加工を施した銅パイプ水冷アンテナをプラズマ生成室内に入れ、2 MHzの高周波電力 (最大65 kW) により生成している。ビーム引き出し系のビーム孔口径は7 mm  $\phi$ である。

セシウムはセシウムゲッターワイヤーと呼ばれるセシウムを含浸したワイヤーをカラーと呼ばれる筒状の金属に数本差し、カラーをプラズマ電極に取り付けてヒーターで加熱する。そしてワイヤーから蒸発したセシウムがビーム孔周辺に付着してセシウム効果を生み出す[14]。セシウムカラーの構造図を図21に示す。負イオンと同時に引き出される電子は、引出電極で除去するのが一般的な方法であるが、本イオン源では引出電極は用いずに、プラズマ電極に強力な永久磁石を設け、負イオンと同時に引き出された電子をこの磁場で180度偏向させ、再びプラズマ電極に戻す方法を採用している。この方法だと電子はほとんど加速を受けないため、プラズマ電極に大きな熱負荷が加わらず破損のおそれがない。電子を180度偏向するほど高い磁場を発生させるので、これによる負イオンの偏向も無視できない。これを補正する方

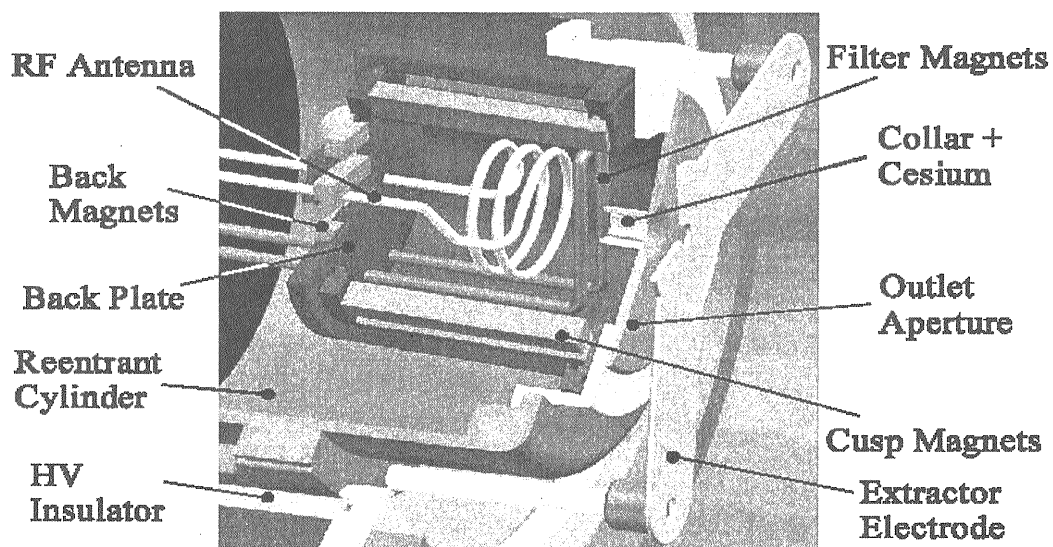


図20 SNS負イオン源の構造図

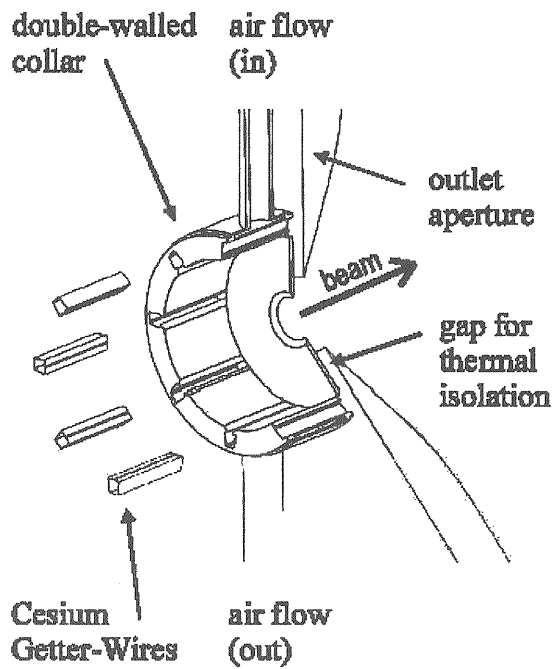


図21 SNS負イオン源セシウム導入機構

法として、図 22に示すようなチルトシステムを用いて電極に傾きを与え、この結果生ずる偏向電場により負イオンビームの補正を行うことにしている[15]。

現在、ビーム電流50 mA、デューティー6 %のビーム引き出しを達成しており、RFQのビーム試験を開始している[16]。またエミッタンスの測定も行われており、LEBT出口で0.3  $\mu\text{mm.mrad}$  (rms)程度である。

またLBNLでは、イオン源に使用するRFアン

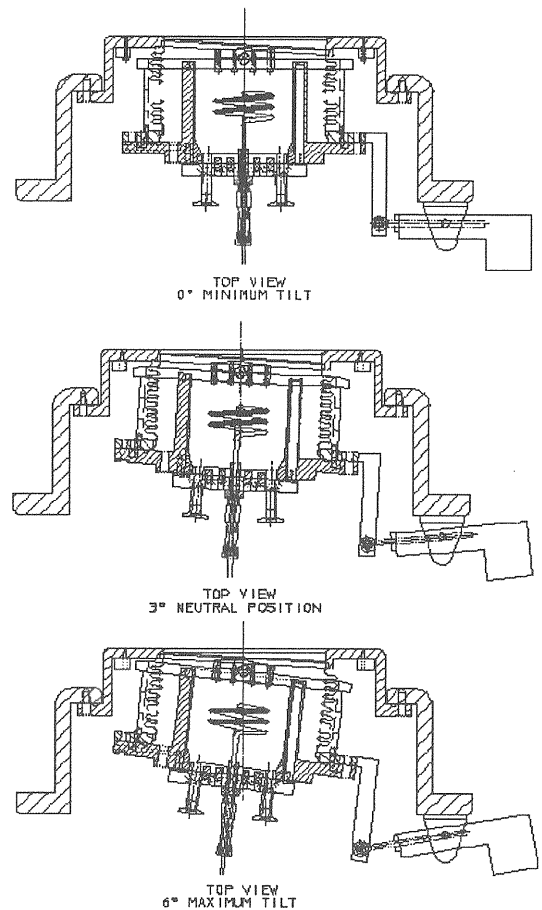


図22 SNS負イオン源のビーム引き出し系チルトシステム

テナの構造および材料についての研究開発を行っている。前述したように、SNS用負イオン源では現在、porcelain皮膜加工された銅パイプアンテナを使用しており、低デューティーパル

表3 LBNLで行われたRFアンテナの性能試験結果

Antenna type	Lifetime	Characteristics
(a) Porcelain-coated copper coil	Months in low duty factor pulsed $\text{H}_2$ plasma operation, low power cw operation with $\text{H}_2$ or inert gas plasmas	Does not survive in high power cw, $\text{O}_2$ or other corrosive gas operations
(b) Copper coil between ceramic and quartz pipe	Lifetime is limited by metallic coating on quartz surface	Source efficiency reduced and is not suitable for multi-turn antenna
(c) Copper coil inside boron nitride casing	Over 100 h in cw $\text{H}_2$ discharge operations	Expensive to make; takes long time to outgas; difficult to make multi-turn antenna
(d) Wires inside quartz tubing	Over 100 h in $\text{H}_2$ and over 80 h in $\text{O}_2$ low power cw discharge operations	Inexpensive to fabricate but ion source will expose to water if quartz tube breaks
(e) Ti or stainless-steel tube inside quartz tubing	Over 500 h in $\text{H}_2$ for 2 kW cw discharge operations	Safer than type (d) quartz antenna, air gets into source before water

ス運転での寿命は1か月程度であるが、高デューティー運転時の寿命は短い。LBNLでは様々なアンテナ材料をテストした結果、現状では石英チューブの中にチタンまたはSUSチューブを通したアンテナが性能的かつ機能的に最も優れていることが分かった[17]。LBNLで今まで行った種々のアンテナの性能試験結果を表3に示す[18]。

#### 4.2. 欧州ESS用負イオン源

欧州の中性子源計画ESSで使用する負イオン源の開発は、フランクフルト大学で行われている。開発中のイオン源の構造を図23に示す[19]。本イオン源の種類も体積生成型で、太さ1.8 mm φのタングステンフィラメント4本を使用したアーク放電にてソースプラズマを生成している。ビーム引き出し孔は10 mm φである。

ビーム引き出し系は2枚だけの電極で構成されており、電子を抑制するための引出電極は備

えていない。電子は負イオンビームと同等の加速を受けてイオン源外に取り出されるが、イオン源出口にステアリング磁石を設置し、電子だけを曲げて専用の電子ビームダンプに導いて処理する。この方式だと電子ビームダンプが接地電位に有るので、取り扱いが簡単である。

現在、アーク電力47.5 kWにて120 mAという大電流の負イオンビーム引き出しに成功している。

#### 5. まとめと今後の課題

大強度陽子加速器計画用の負イオン源の現状性能を、他の計画のイオン源の現状性能とあわせて表4にまとめる。どの計画のイオン源も、ピーク電流は要求性能を満足するレベルに到達している。ただし、大電流ビーム引き出しの達成にはセシウム添加を必要としているが、最近の陽子加速器ではRFQの使用が主流であり、イオン源からのセシウム蒸気の流れ出しはRFQに放電の誘発などの悪影響を及ぼすため、

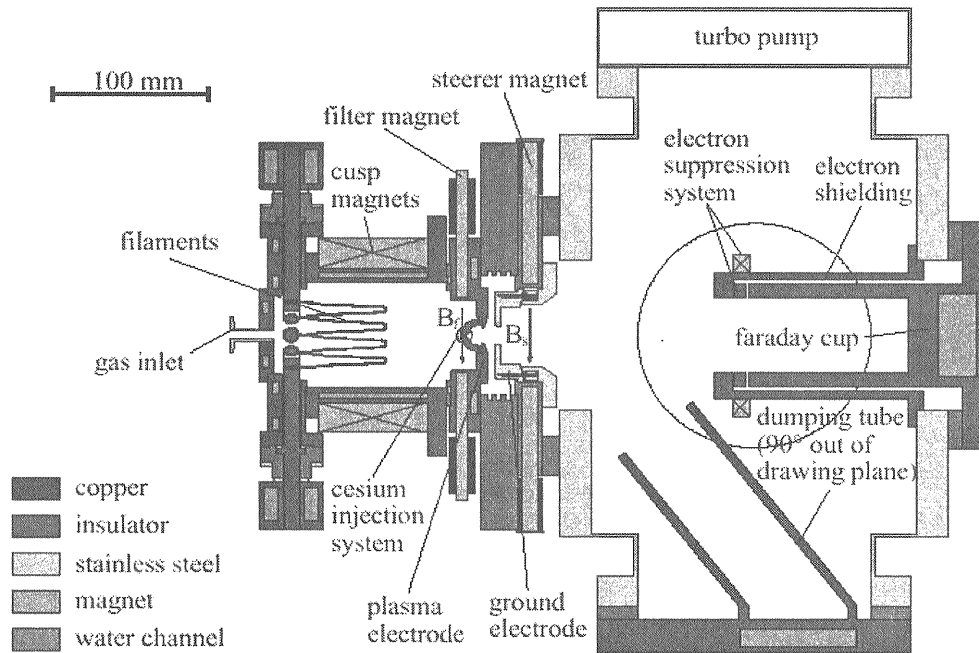


図23 ESS負イオン源の構造図



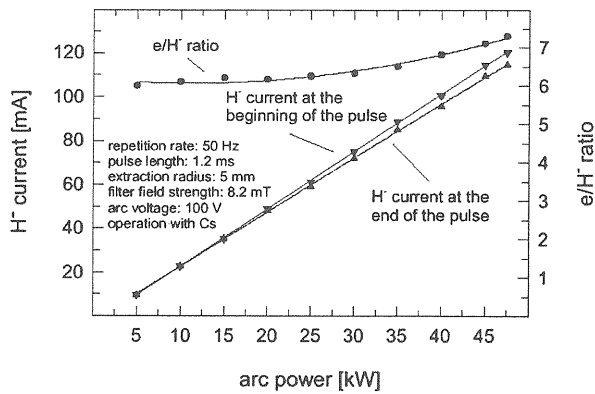


図24 ESS負イオン源の負イオン電流および電子/負イオン比のアークパワー依存性

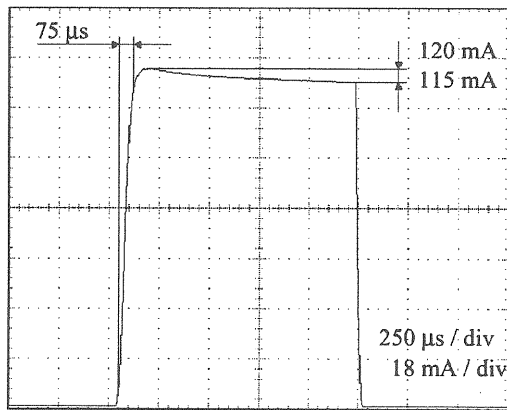


図25 ESS負イオン源のビーム波形

セシウムの使用量は可能な限り少なくする必要がある。

寿命については、どの負イオン源も未測定または評価中である。統合計画の加速器は1サイクル3週間の連続運転が計画されているので、イオン源の寿命は500時間以上であることが必須となる。イオン源の寿命を決定する部品の代表的なものが、ソースプラズマ生成用のフィラメントである。原研とフランクフルト大学でそれぞれ開発中のイオン源では、フィラメント材料として最も実績のあるタングステンを使用している。原研のイオン源では未だ測定は行っ

ていないが、正イオン源開発の経験からその寿命は100時間程度と予想している。一方、フランクフルト大学で開発中のイオン源は、使用中のフィラメントの消耗率から400時間と予想しているが、まだ実証はされていない。

一方、LBNLやKEKで開発中のイオン源ではフィラメントではなくアンテナを使用しており、LBNLでは前述したようにRFアンテナ構造や材質の開発を積極的に行っている。SNS用イオン源としての目標である連続1か月の運転実績はまだないが、今後フィラメントに代わるプラズマ生成方法として注目される。

正イオン源の分野では、大電流ビーム引き出しが可能でかつ長寿命が期待できるECRイオン源の使用が最近主流であるが、これを負イオン源に応用しようという試みがある[20][21][22]。ECRイオン源の場合、アーク放電方式や高周波放電方式のようにホットプラズマ中にプラズマ生成部品が存在しないので、イオン源の寿命が従来の負イオン源と比較して飛躍的に伸びる可能性があり、大いに期待できる。

大強度負イオン源の開発は着実に前進している。これからもイオン源の実験を継続して行い、統合計画用負イオン源としての基本性能を達成するとともに、寿命や安定性など実用化に向けた開発を行っていききたい。

表4 大強度陽子加速器計画で開発中の負イオン源の現状性能

使用施設	SNS	ESS	KEK-JAERI Joint Project
負イオン生成方式	体積生成	体積生成	体積生成
ピーク電流 (mA)	50	120	72
電流密度 (mA/cm <sup>2</sup> )	130	153	144
エネルギー (keV)	65	33	70
デューティ (%)	6.0	6.0	2.0-5.0
RMS エミッタンス ( $\pi$ mm.mrad)	0.3 (X), 0.33 (Y) @50 mA, 65 keV	0.06 estimation	0.13 (X), 0.19 (Y) @53 mA, 70 keV : X @60-56 mA, 70 keV : Y
電子/負イオン比		7	<1
プラズマ生成方式	RF	ARC	ARC
入力電力 (kW)	30-35 @40 mA	47.5	52
ガス流量 (SCCM)	20-30 @40 mA		13
セシウム添加	○	○	○
加速器入射	○	×	×

## 参考文献

---

- [1] A. Takagi, Private Communication (1999)
- [2] W. B. Ingalls et al., Proc. 1996 Linear Accelerator Conference, Geneva (1998) 704
- [3] 森義治、OHO'89 高エネルギー加速器セミナー (1989) p I-1
- [4] 高木昭、OHO'96 高エネルギー加速器セミナー (1996) p I-1
- [5] J. Peters, Rev. Sci. Instrum. 71 (2000) 1069
- [6] K. N. Leung and W. B. Kunkel, Phys. Rev. Lett. 59, 787 (1987)
- [7] Y. Okumura et al.; Rev. Sci. Instrum. 71 (2000) 1219
- [8] T. Morishita et al., Jpn. J. Appl. Phys. 40 (2001) 4709
- [9] Y. Okumura et al., Proc. 11th Symp. on Fusion Engineering, Austin (1985) 113
- [10] H. Oguri et al., Rev. Sci. Instrum. 71 (2000) 975
- [11] 奥村義和、核融合研究第60巻第5号 (1988) p329
- [12] A. Ueno et al., Proc. 2000 Linear Accelerator Conference, Monterey (2000)
- [13] J. Staples et al., Proc. 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, IL (2001)
- [14] M.A. Leitner et al., Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, New York (1999) 1911
- [15] S. K. Mukherjee et al., Proc. 1999 Particle Accelerator Conference, New York (1999) 1914
- [16] R. Keller et al., Proc. 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, IL (2001)
- [17] J. Reijonen et al., Rev. Sci. Instrum. 71 (2000) 1134
- [18] Ka-Ngo Leung, Rev. Sci. Instrum. 71 (2000) 1064
- [19] K. Volk et al., Proc. 1998 Linear Accelerator Conference, Chicago, IL. (1998) 896
- [20] A. Takagi et al., Rev. Sci. Instrum. 71 (2000) 1042
- [21] R. Gobin et al., Proc. 2000 Linear Accelerator Conference, Monterey (2000)
- [22] Y. Okumura, Private Communication (2001)