

J- PARC用セシウム不使用負水素イオン源の開発

池上 清^{1,A)}、上野 彰^{A)}、近藤 恭弘^{B)}

A) 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
〒305-0801 茨城県つくば市大穂1-1

B) 日本原子力研究所 大強度陽子加速器施設開発センター
〒319-1195 茨城県那珂郡東海村白方白根2-4

概要

J-PARC(Japan Proton Accelerator Research Complex)用LINACの運転が平成17年度末から開始される。運転開始から数年(第一期)は、初段加速器としてJHF(Japan Hadron Facility)計画用に開発された設計ビーム電流30mAのRFQ[1](以下30mA-RFQと略)が使用される為、負水素イオン源に要求されるピーク・ビーム電流は、33mA以上である。負水素イオン源内にセシウムを添加することにより、ビーム強度を数倍に出来ることが実証されており、稼働中の加速器用負水素イオン源の殆どで、セシウムが使用されている。セシウムの添加が、イオン源の引き出し、及び、加速ギャップやRFQでの放電(1時間に1回程度)を引き起こすことも観測されている。J-PARC用加速器では、従来の加速器と比較し、ビーム損失率を1桁以上改善しなければならないが、上記の放電によるビームの不安定性がこの要求達成の妨げとなることが危惧されている。加速器安定運転を目的に、KEKで行われてきたセシウム不使用負水素イオン源の開発状況を報告する。J-PARC用LINAC第一期に要求される仕様の内、ピーク・ビーム電流は達成し、ビーム・デューティも8割程度に到達した。

1. イオン源の構造

図1にイオン源の概略寸法図を示す。プラズマ真空容器は、内径100mm、長さ約120mmの円筒形で、円筒上に18本のSmCo系磁石(100mm長10mm幅15mm高)を配置しプラズマ閉じ込め用カスプ磁場を形成している。円筒の上流側に設置されるフランジ(以下、天板と略)にも放射状に6本のSmCo系磁石(40mm長5mm幅20mm高)を配置しプラズマを閉じ込めている。天板には、フィラメント電流導入ポート、水素ガス導入ポート、覗き窓が設置される。LaB6フィラメントは、円筒軸(ビーム軸と一致)上に1つ設置される。無酸素銅で製作したプラズマ真空容器を長期使用した後、ビーム強度が再現しない現象が観測され、内面の酸化が一因と判断された為、内面にNiメッキを施した。Niメッキ後、ビーム強度は再現可能となったが、フィラメントの最適化等も同時に行った為、Niメッキの有効性の証明には至っていない。

プラズマ電極は、天板と平行に下流側に配置され、プラズマ真空容器とは厚さ4mmのセラミック板で電気絶縁されている。

フィルター磁場は、軸対称位置のカスプ磁場用磁石にNdFeB系磁石を磁気力で接着させることにより形成した。

接地電極と引き出し電極間に約-42kV、引き出し電極とプラズマ電極間に約-8kV印加することにより、30mA-RFQに必要な50keVの負水素イオン・ビームを生成する。引き出し電極内には、4本の電子抑制磁石(NdFeB系:40mm長4mm幅7mm高)が配置される。電子抑制磁場は、電子を引き出し直後に電極表面に衝突させ、水素イオンを電子と同方向への偏向と逆方向への曲げ戻しを行う用設計されている。引き出し電極は無酸素銅製であるが、電子衝突部には、Mo部品を銀ロー付けし損傷が低減されている。接地電極はSUS316製である。引き出し電極、接地電極とも水冷されている。

接地電極の下流に、電子抑制磁場によるビームの出射角を補正する電磁石、ビームを集束するソレノイド電磁石、ビーム強度測定用ファラデー・カップ[1]が設置される。出射角補正電磁石は、30mA-RFQへの入射誤差補正の為に設置されたが、イオン源単体の試験では、電磁石電流を高めることにより、漏れ電子電流とビームとの分離を可能にしている。

アーク・パルス電源の設計容量により、最大アーク幅600 μ s、最大繰り返し25Hz、最大アーク電流設定値300Aである。

2. フィラメントの最適化

LaB6フィラメントには、KEK-PSイオン源用に開発された二重螺旋型の(株)デンカ製ベータプラスを使用している。当初、KEK-PSイオン源用と同型(外径15mm内径10.5mm長さ32mm)のものを使用した(1)フィラメントを電流導入端子へ取り付けの部品(BN製部品で固定したTa製のブラケットにMo製ネジで固定した部品)のMo製ネジからのアーキングの頻発、(2)1パルス内でアーク・インピーダンスの急激な低下が発生するアーク電流の閾値(150A以上での運転不可)の存在、の2つの問題が発生した。前者については、取り付け部品数減(各足にMo製15mmブラケットとMo製ネジ2組の

¹ E-mail: kiyoshi.ikegami@kek.jp

み)とブラケットをセラミック材で囲う対策により解決した。後者については、フィラメントの大型化(外径20mm内径15mm長さ35mm)により、アーク電流300Aの運転が可能となった。

但し、長時間運転によるフィラメントの低温両端部への不純物の付着によるインピーダンスの上昇、及び、これに伴う定期的なコンディショニング(運転を停止しフィラメントの高電流通電等)の必要性の問題が残っている。図2に、両端部に不純物の付着した使用後のフィラメントの写真を示す。

3. フィルター磁場等の最適化

フィルター磁場を軸対称位置のカスプ磁場用磁石にNdFeB系磁石を磁気力で接着させることにより形成した。フィルター磁場用磁石の大きさや接着されるカスプ磁場用磁石の数を変更し、ビーム引き出しを行いビーム強度を最高にするフィルター磁場用磁石配置を決定した。40mm長15mm幅38mm高のNdFeB系磁石を1対配置した場合、最高のビーム強度が得られた。但し、フィルター磁場用磁石の大きさに応じて、天板側にも磁石(20mm長10mm幅40mm高)を2対、フィルター磁場と逆極性の磁場ができる様に追加し、フィラメント位置での磁場強度の増大を防ぐと同時に、プラズマ閉じ込めの効率化も行った。

ビーム強度が最高の磁石配置で、天板を外し下流側から軸上にホール素子を導入して測定したフィルター磁場、及び、電子抑制磁場の強度の測定結果を図3に示す。横軸は、プラズマ電極のビーム取り出し側表面を基準とした位置を示し、縦軸が中心軸を横切る磁場強度である。今後、幅の薄い磁石等を用意し、フィルター磁場用磁石の軸方向位置の最適化、フィラメント位置の磁場補正用下流側磁石の大きさや位置の最適化等を行う予定である。

4. プラズマ電極の最適化

プラズマ電極は、当初、下流側金属面に直接ネジ止めされていたが、厚さ2mmのセラミック板を介してネジ止めすることにより、約2割のビーム強度増加に成功した。セラミックス板の熱絶縁効果によるプラズマ電極温度の違いによるものと判断している。プラズマ電極表面温度の測定を開始した所で、フィラメント輻射のみにより二百数十、プラズマ生成時には、四百以上に上昇することが確認された。今後、プラズマ電極温度とビーム強度の関係を測定する予定である。

ビーム引き出し孔径7mmと9mmの2種のプラズマ電極(厚さ2mm)で、可能な限り運転条件を一致させビーム強度の比較を行った結果、20mAと26mAであった。プラズマ電極孔径のみを変更するとビーム発散角が異なり、ビーム強度の測定結果に影響する為、各々異なる孔径(6mmと7.72mm)の引き出し電極を使用した。尚、引き出し電極の形状によ

るビームの発散角等は、計算コードBEAMORBT[2]を使用して評価した[3]。測定されたビーム強度の比率は、期待した孔面積比ではなく、孔径比、即ち、孔周長比と一致した。この結果から、負水素イオンの生成がプラズマ電極表面で行われている可能性が高いと判断された為、プラズマ電極形状の違いによるビーム強度の違いの測定を行った。

2mm、4mm、6mm、10mmと厚さの異なる引き出し孔径9mmのプラズマ電極の各々の場合に得られたピーク・ビーム強度の測定結果を図4に示す。横軸が、プラズマ電極厚さで、縦軸がアーク電流は300Aの場合のピーク・ビーム強度である。尚、全てのプラズマ電極のプラズマ側引き出し孔は、45°の傾きで加工されている。負水素イオンが表面で生成される場合、運転開始迄の真空排気時間やプラズマ電極の表面状態等がビーム強度に対して影響する為、30mA-RFQ等の後段加速器の試験運転など多くの運転で得られたピーク・ビーム強度データがプロットされている。この図からプラズマ電極厚さを増し、ビーム引き出し孔付近の表面積を増加させることによりビーム強度の増加に成功したと判断される。今後、さらに厚い電極での試験を行う予定である。図5には、プラズマ電極厚さ10mmの場合に、現アーク・パルス電源で可能なアーク電流300A、最大デューティ(600 μ s \times 25Hz)で運転した場合のビーム波形、アーク電流波形、アーク電圧波形を示す。ビーム・パルス幅400 μ sで、34mA以上を達成している。J-PARC用LINAC第一期に要求されるパルス幅500 μ sの8割である。パルス内のビーム強度の変動を減少させることが今後の課題であるが、フィラメントの更なる大型化とアーク・パルス電源容量の増加により改善されることが期待される。

5. まとめ

セシウム不使用負水素イオン源のフィラメント、フィルター磁場、プラズマ電極を実験的に最適化することにより、J-PARC第一期に要求されるピーク・ビーム強度を達成した。特に、プラズマ電極形状変更によるビーム強度増加は報告例の無い重要な結果である。ビーム・デューティも8割程度に到達した。本文中で述べた様に、各項目に対し、更なる最適化を行って行く予定であり、より正確な実験結果を次の機会に報告する[4]。さらに、要求ビーム・デューティ(500 μ s \times 25Hz)、及び、寿命500時間の達成、パルス内のビーム強度の変動対策、プラズマ電極表面へのフィラメント材の蒸着の影響の解明等を今後の課題として開発を進める予定である。

参考文献

- [1] A. Ueno et. al., "Beam Test of a Front-end System for the JAERI-KEK Joint (JKJ) Project", Proceedings of LINAC2002, URL: <http://epaper.kek.jp/102/PAPERS/TU423.PDF>.
- [2] Y. Ohara, Japan Atomic Energy Research Institute Report, JAERI-M 6757 (1976)
- [3] Y. Yamazaki(eds), KEK Report 2002-13, 2.1.2
- [4] The 10th International Conference on ION SOURCES, JINR, Dubna, Russia, September 8-13, 2003に投稿予定

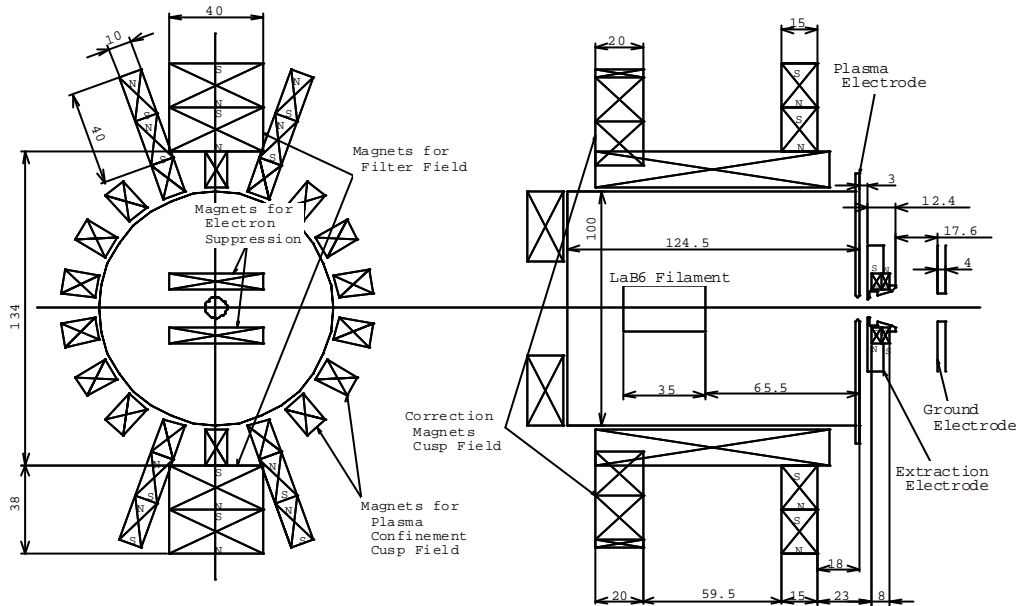


図1 イオン源の概略寸法図

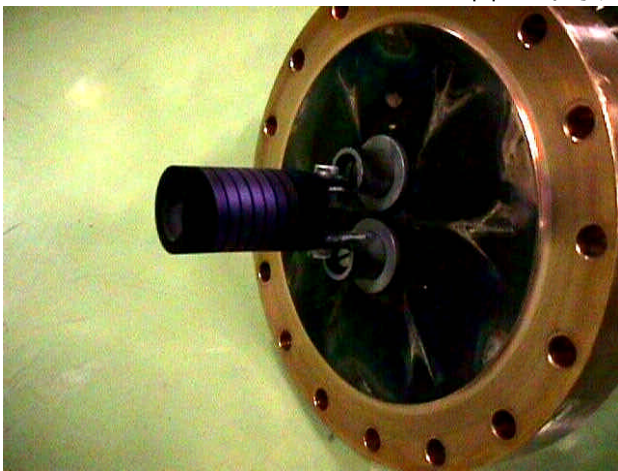


図2 使用後のLaB6フィラメントの写真

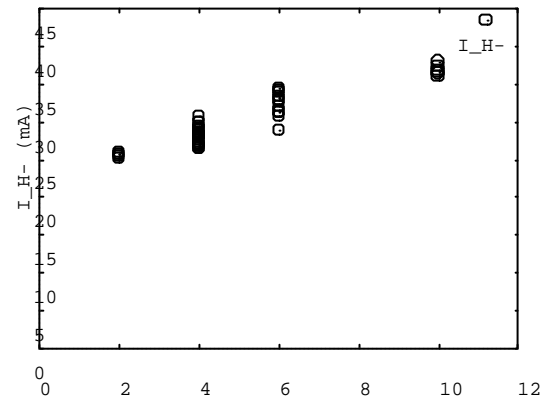


図4 プラズマ電極厚さとビーム強度の関係

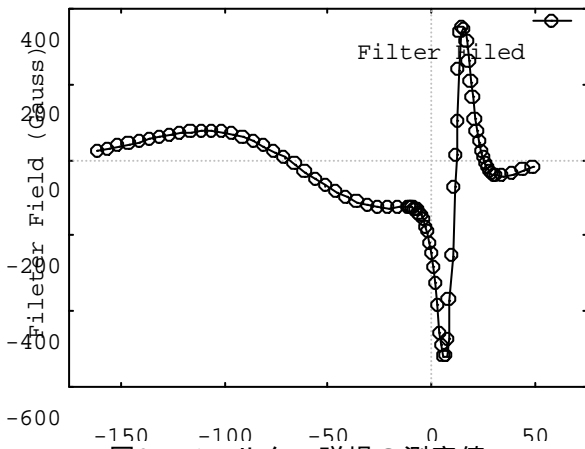


図3 フィルター磁場の測定値

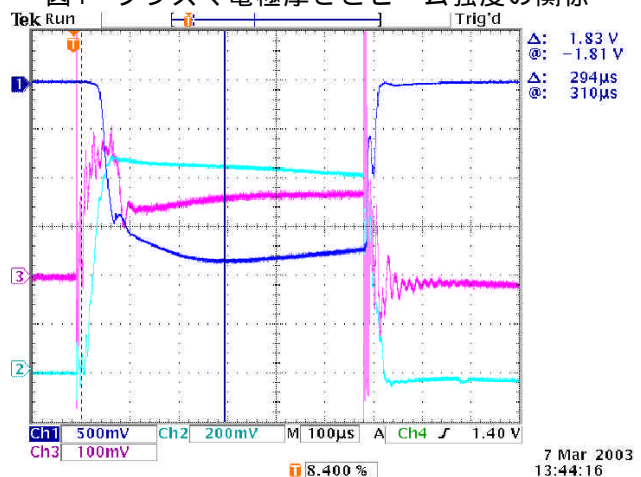


図5 ビーム波形 (No.1:10mA/Div.)、アーク電流波

形 (No.2:60A/Div.) とアーク電圧波形 (No.3: 80V/Div.) * 運転条件: アーク幅=600 μ s、繰り

返し=25Hz、フィラメント電圧&電流=5.74V& 94.1A、水素ガス流量=12.5sccm、プラズマ電

極バイアス=-15V、引出電圧=-8kV、加速電圧

=

-43kV、ソレノイド電磁石電流=540A