

S-LSR 計画におけるビームモニター開発

藤本慎司^{A)}、竹内 猛^{B)}、野田 章^{A)}、白井敏之^{A)}、頓宮 拓^{A)}

^{A)} 京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設 〒611-0011 京都府宇治市五ヶ庄

^{B)} 放射線医学総合研究所 〒263-8555 千葉県千葉市稲毛区穴川 4-9-1

概要

京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設では、現在小型イオンストレージリングを開発、建設中である。このストレージリングは周長約 22.6[m] であり、プロトン、 Mg^+ 、 C^{6+} イオンを蓄積、冷却する目的がある。冷却装置として電子冷却装置とレーザー冷却装置を備える予定であり、将来的にはイオンビームの結晶化を目指すものである。

この目的に沿って種々のモニターが開発、研究されている。電子冷却効果を測定するための Micro Channel Plate (MCP) を用いたビームプロファイルモニター、電極を用いたビームポジションモニター、ショットキーモニター、そしてレーザー冷却観測用モニターである。現在開発中であるのは前 2 者である。ここではこの 2 つについてのべることにする。

1 電子冷却用プロファイルモニター

このモニターは MCP を用いた残留ガスイオン化型ビームプロファイルモニターであり、電子冷却によるイオンビームのプロファイル変化を測定するものである。しかし現在はこのモニターのテストのため京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設にある小型電子蓄積リング KSR に設置され、電子ビームのプロファイル測定に用いられている。電子ビームの残留ガスイオン化断面積は次の式(1)で与えられる[1]。

$$\sigma = 4\pi \left(\frac{\hbar}{mc} \right)^2 (M^2 x_1 + C x_2)$$

ここで

$$x_1 = \beta^{-2} \ln \left[\frac{\beta^2}{(1-\beta^2)} \right] - 1, \quad x_2 = \beta^{-2},$$

$$4\pi \left(\frac{\hbar}{mc} \right)^2 = 1.874 \times 10^{-20} [cm^2]$$

であり M^2 、 C は残留ガス固有の定数、さらに m は電子の質量である。

残留ガスイオンを、ビーム進行方向と垂直に高電圧 (~9[kV]) をかけ検出器である MCP に集める。このとき印加する高電圧は静電場であり、一様であるので残留ガスがイオン化された位置は保存される。図 1 はプロファイルモニターの概観図、図 2 はそのチャンバー内にある MCP Assembly、図 3 は MCP Assembly の概念図である。

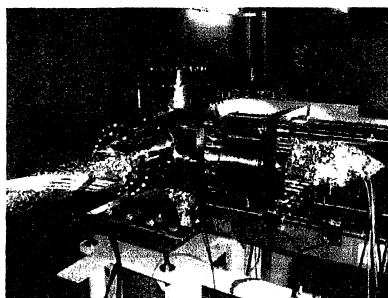


図 1 : ビームプロファイルモニター
右側にパルスモーターが見える。
MCP Assembly はこれにより可動である。

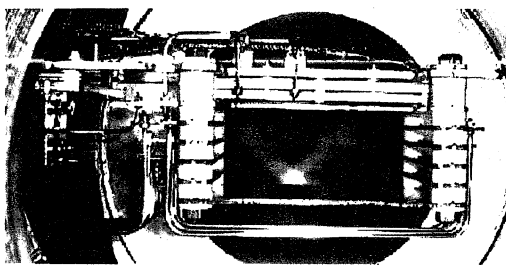


図 2 : MCP Assembly
ビームは紙面垂直に入射し、Horizontal 方向のビームプロファイルが測定される。Assembly aperture は 5[cm] × 12[cm] である。

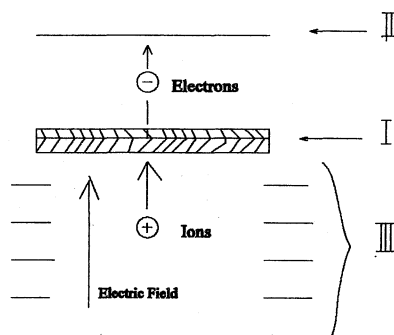


図 3 : MCP Assembly 模式図

紙面垂直に入射したビームが残留ガスをイオン化する。そのイオンは III の電極によって発生させた静電場によりイオン化された位置情報を保存したまま I の MCP に入る。MCP で光電子に変換、増幅されたのち II の抵抗板によって分割され、位置情報に変換される。

表1にKSRにおける残留ガスのイオン化数と現在S-LSRにおいて想定されているパラメータによる残留ガスイオン化数を比較している。この表1よりS-LSRにおいても十分このビームプロファイルモニターは運用可能であることがわかる。

表1：KSRとS-LSRとの残留ガスイオン化数比較
S-LSRにおける残留ガスイオン化数は参考文献[4]より見積もった。

	KSR	S-LSR
粒子	e^-	C^{6+}
Energy	100[MeV]	2[MeV/u]
Particle Number	2.15×10^7	$\sim 10^8$
Vacuum	1.0×10^{-7} [Pa]	$\sim 10^{-9}$ [Pa]
イオン化数	2.1×10^3 [1/sec]	$\sim 10^5$ [1/sec]

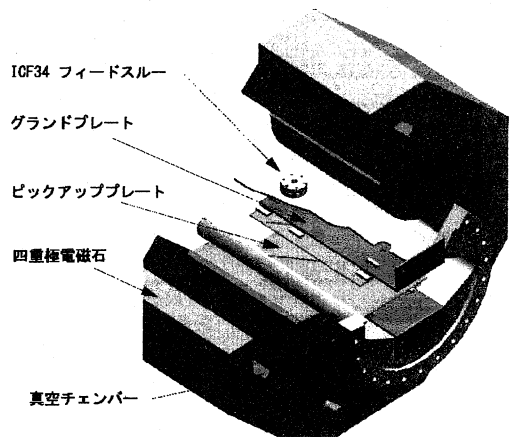


図4：Δ型静電ピックアップと四重極電磁石

ポジションモニターの位置較正を容易に行える

KSRにおける電子ビームプロファイル測定結果は蓄積電流 60[μA]でビームサイズ 678[μm]であった。これはβファンクションから予想されるビームサイズと Consistent であった。

また将来的には Vertical 方向の MCP Assembly も導入してこの方向のビームプロファイルも測定する予定である。

2 電極型ビームポジションモニター

2.1 設計コンセプト

S-LSRにおけるイオンビーム実験において、特にレーザー冷却実験においてはイオンビームのリングに対する絶対位置を把握する必要がある。S-LSR計画ではイオンビームとレーザーの直径は共に 1[mm]程度であると考えられているので、ビームとレーザーのオーバーラップを得るためのポジションモニターの位置分解能として 0.5[mm]以下は必要である。さらにはリングの COD 測定も行いたい。この目的に合致し、さらに構造がシンプルであるものとして電極型高感度ビームポジションモニターが提案された。このタイプのモニターはΔ型の静電ピックアップを用いたものであり、非常によく用いられている。このモニターについては参考文献[2]に詳しい。この論文で用いられているポジションモニターでは分解能 0.2[mm]程度を実現しており、先に述べた要求に十分こたえるものであるといえる。

2.2 電極デザイン

S-LSRは非常にコンパクトなイオン蓄積リングであり、チェンバーのディメンションも非常に制約のある設計になっている。ビームアパーチャーを確保するために電極は上下完全セパレート型にしている。さらにチェンバーにベースプレート片持ちのデザインにしている。現在の電極のデザインをチェンバーのサイズと共に図4、5に示す。

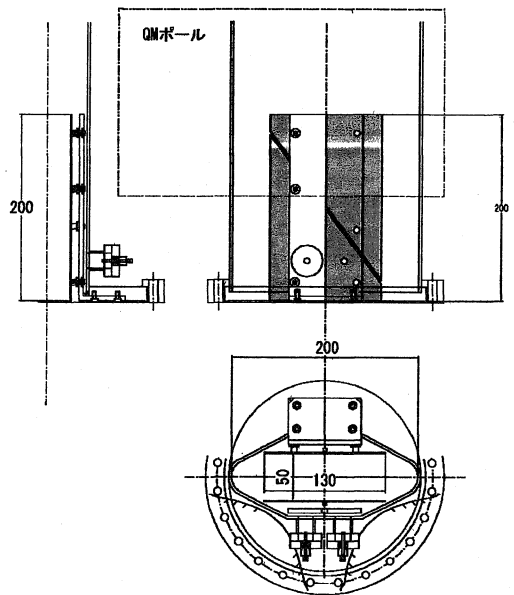


図5：静電型ピックアップ（黒く塗られた部分）

(上左) チェンバー断面。

点線はビーム進行方向

(上右) 真上から見たピックアップ。

(下) フランジ側から見た

静電型ポジションモニター

ピックアップの横幅は 130[mm]、奥行きは 200[mm]、ピックアップ間隔は 50[mm]である。横幅とピックアップ間隔はビームアパーチャーを最大限に確保した結果であるが、奥行きは未だ最適化の余地がある。

このデザインの利点はチェンバーによって制約されているビームアパーチャーを減少させることなく、さらに Δ 型静電ピックアップの左右の電圧出力差で Horizontal 方向の、上下出力差で Vertical 方向のビームポジションが測定できる点である。

また電極を四重極電磁石のすぐそばに設置しているため、ポジションモニターの較正を容易に行えることもチェンバー設置型であるこのデザインの利点である。

2.3 ヘッドアンプ

電極からの微弱信号を処理する際にヘッドアンプの選択は非常に重要である。微弱信号を処理するには複数のアンプをカスケードに接続していくが、アンプのゲインが十分に高ければシステムのSNを決めるのはほぼ初段のアンプの状態であるからである。SNはダイレクトにポジションモニターの分解能に関係している。参考文献[3]によれば、このタイプのポジションモニターの分解能 δx は次式で与えられる。

$$\delta x = \frac{D}{2} \sqrt{\frac{P_N}{P_S}} \quad (2)$$

ここで D は電極間の距離であり、 P_N 、 P_S はそれぞれヘッドアンプの入力抵抗による熱雑音のパワー、ビームによって電極上に誘起されるパワーである。

2.4 検討課題

ここで議論された電極型ビームポジションモニターは最小の構成要素から成っているため工作精度の誤差は最小に抑えることができる。その反面、構造から来る欠点もある。電極が片持ちになっているためベースプレートがあまりに長いとその重みからたわんでしまうのである。しかし、ベースプレートが短すぎると電極も小さくなってしまい、位置測定に必要な信号強度が得られなくなる。信号強度はまたヘッドアンプの入力インピーダンスとも密接に関係している。参考文献[2]によれば、ヘッドアンプの入力インピーダンスが大きいほうが信号出力は大きい、一般的には熱雑音が大きくなっていく。このことよりSNを決める要素としてヘッドアンプは注意深く検討する必要がある。

3 結論

残留ガスイオン化型ビームプロファイルモニターは現在KSRにてテスト中であるが、そのテスト結果からS-LSRに組み込んでも適用できるという確証が得られた。S-LSRにおいてはHorizontalだけでなくVertical方向も測定する予定である。電極型ポジションモニターは開発が始まったばかりであり、検討課題も多いが今冬にはプロトタイプでのテストを予定している。

参考文献

- [1] F.F.Rieke and W. Prepejchal, Phys. Rev. A 6, 1507 (1972).
- [2] T.Watanabe, Study of Beam Orbit and Development of High-Sensitivity Beam-Position Monitor for Orbit Correction at the Heavy Ion Cooler Synchrotron TARN II, KEK Report 98-15, February 1999, A
- [3] R.E.Shafer, "Beam Position Monitoring", In Proc. of The Physics of Particle Accelerators, No. 249 in AIP Conf. Proc., pp. 601-636, 1992.
- [4] B. Hochadel, et al., Nucl. Instr. and Meth. Sec.A, 343, 401 (1994).