

ELECTRON COOLING EXPERIMENTS AT ION STORAGE RING, S-LSR

Toshiyuki Shirai^{1,A)}, Mikio Tanabe^{A)}, Hikaru Soda^{A)}, Shinji Fujimoto^{A)}, Masahiro Ikegami^{A)}, Hiromu Tongu^{A)}, Akira Noda^{A)}, Koji Noda^{B)}, Shinji Shibuya^{C)}, Tetsuya Fujimoto^{C)}, Soma Iwata^{C)}, Atsushi Takubo^{C)}, Takeshi Takeuchi^{C)}, Manfred Grieser^{D)}, Hicham Fadil^{D)}, Igor Meshkov^{E)}, Evgeny Syresin^{E)}, Igor A. Seleznev^{E)}, Alexander V. Smirnov^{E)},

^{A)} Institute for Chemical Research, Kyoto University, Gokasho, Uji, 611-0011 Kyoto, Japan

^{B)} NIRS, Chiba, 263-8555 JAPAN

^{C)} AEC, Chiba, JAPAN

^{D)} MPI Kernphysik, Saupfercheckweg, Heidelberg, Germany

^{E)} JINR, Dubna, 141980 RUSSIA,

Abstract

The new ion cooler ring, S-LSR has an electron cooler and a laser cooling system. The electron cooler for S-LSR was designed to maximize the effective cooling length in the limited drift space of the ring. The construction of S-LSR was finished in September 2005. After the beam test of the ring, the commissioning of the electron cooling was started from November 2005. In the first day of the commissioning, the cooling of 7MeV proton beam was observed successfully. The maximum cooling force was 0.12 eV/m with the electron current of 56 mA.

In order to search the 1-dimensional ordering of the proton beam, the momentum spread was measured with reducing the particle number. The attainable lowest momentum spread of protons was 4×10^{-6} at 2000 protons after the improvement of the cathode power supply of the electron gun.

イオン蓄積リングS-LSRにおける電子ビーム冷却実験

1. はじめに

我々ビーム冷却共同研究グループは、京都大学化学研究所に、イオン蓄積・冷却リングS-LSRの建設をおこなってきた [1]。これは、周長22.557mの小型リングで、加速器の蓄積ビームに対する、電子ビーム冷却およびレーザー冷却技術の開発と応用を研究するとともに、超低温イオンビームやビーム結晶化の実現をはかる目的で建設されたものである。S-LSRと電子ビーム冷却装置の主なパラメータを表1に示す。この電子冷却装置のパラメータは、7MeV陽子ビーム冷却時の典型的なものである。また、図1には電子ビーム冷却装置の断面図を示している。

この電子ビーム冷却装置は、限られたリングのドリフトスペース(1.86m)において、可能な限り冷却領域を長くするために、3次元磁場計算コードTOSCAをもちいて、最適化がおこなわれた。その結果、ソレノイド磁場の一様性が $\pm 2 \times 10^{-4}$ 以下である実効的な冷却領域長は、440mmになった。

S-LSRは、2005年9月に最終アセンブリが終了し、真空排気、ベーキングをおこなった。その結果、真空度が 10^{-8} Pa台まで低下することが確認されたので [2]、同年10月より、7MeV線形加速器から陽子ビームを入射して、蓄積リングのビームコミッショニングを開始した [3]。蓄積電流は、マルチターン入射に

表1 S-LSRと電子ビーム冷却装置の
主なパラメータ

リング (S-LSR)	
周長	22.557 m
直線部ドリフト長	1.86 m
周期数	6
平均真空度	10 nPa (typ.)
電子ビーム冷却装置 (for 7MeV p ⁺)	
電子エネルギー	3.842 keV
電子ビーム電流	107 mA (typ.)
電子ビーム径	50 mm (dia.)
電子ビーム密度	9.2×10^6 e ⁻ /cm ³
中心ソレノイド磁場	500 Gauss
断熱膨張係数	3
冷却ソレノイド長	800 mm
有効冷却領域長	440 mm

よって200 μ A程度であった。これに引き続き、同年11月からは、7MeV陽子ビームに対する電子ビーム冷却のコミッショニングを開始した [4]。

¹ E-mail: shirai@kyticr.kuicr.kyoto-u.ac.jp

2. 電子ビーム冷却力測定

最初の電子ビーム冷却テストは、7MeV陽子ビームを30μA蓄積し、107mAの電子ビームを流すことによっておこなった。図2は電子ビーム冷却をおこなう前と後での陽子ビームを示している。RF電圧は印加しておらず、連続ビームである。運動量広がりにはショットキーモニターによって[5]、周回周波数(1.61MHz)の29倍高調波である46.69MHz近辺のスペクトルを測定して、算出している。ビームサイズは、陽子ビームによってイオン化された残留ガスを、静電場によって収集し、MCPによってプロファイル測定して、計算している[6]。これらの測定により、運動量広がり、 2×10^{-4} に、ビームサイズが1.2mmまで減少していることがわかる。これは、電子ビーム冷却力とIntra-Beam Scattering (IBS)による拡散力が平衡状態になることによって決まり、BETACOOl[7]の計算から予測されるものとよく一致している。

次に、電子ビーム冷却装置の冷却能力を評価するために、誘導加速器をもちいて冷却力の測定をおこなった[8]。これは、冷却したイオンビームに誘導加速器によって1秒間程度加速力を印加し、加速力と冷却力が平衡した状態をつくることで、冷却力を直接的に測定するものである。電子電流が56mA(電子密度 $4.8 \times 10^6 \text{ e/cm}^3$)のときの結果を図3(a)に示す。このとき、表1にもあるように断熱膨張係数は3にとっている。横軸はイオンビームと電子ビームの相対速度であり、縦軸は冷却力である。この冷却力は、冷却領域の長さ(0.44m)で規格化している。これから、相対速度が3500m/s付近のときに、冷却力は最大値0.12eV/mをもつことがわかる。この冷却力が最大となる相対速度は、電子ビームの進行方向温度による速度広がりに対応しており、仮に電子ビームの速度広がりが3500m/sであれば、進行方向電子ビーム温度は、35μeV(0.4K)になる。この電子温度は、設計上は以下の式で与えられ、

$$k_B T_{e||} = \frac{(k_B T_{cath})^2}{2eU} + C \frac{e^2 n_e^{1/3}}{4\pi\epsilon_0}$$

この式に具体的な値をあてはめると、46μeVとなり、上記の冷却力測定から求められる値に近いものになっている。

図3(b)は、電子ビーム電流を増やしながらか冷却力測定をおこない、その冷却力の最大値をプロットしたものである。これから、電子電流が150mA程度までは、冷却力は電子電流に比例して増加していき、電子ビーム冷却の理論とよく一致しているが、200mA付近では比例関係からずれが生じることがわかる。これは、電子密度が上昇することで、空間電荷効果が強くなり、特に電子銃付近において電子温度が予想以上に増加しているためと考えられる。この電子ビーム冷却装置の最大定格電子電流は400mAであるが、この結果から、7MeV陽子ビームに対応する3.8keVの電子エネルギーのときには、効果的に使用できる電子電流は200mA以下であることがわかる。

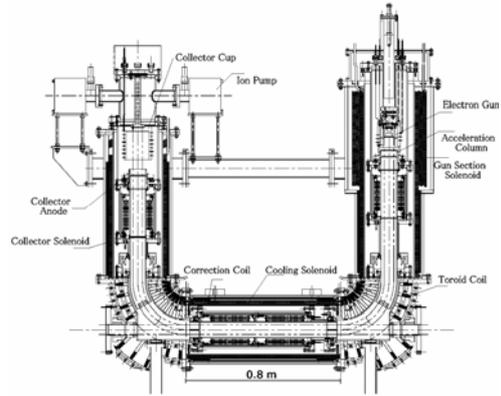


図1：電子ビーム冷却装置断面図

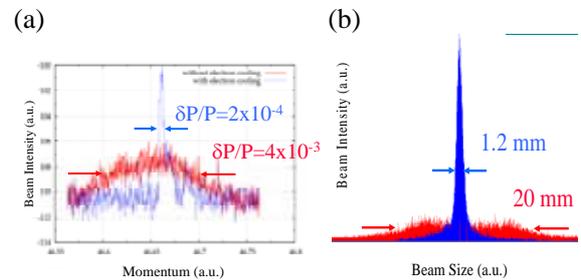


図2：電子ビーム冷却をおこなう前後での、7MeV陽子ビームの運動量広がり(a)と水平方向ビームサイズ(b)。運動量はショットキーモニターで、ビームサイズはMCPを用いた残留ガスイオン化モニターで測定している。

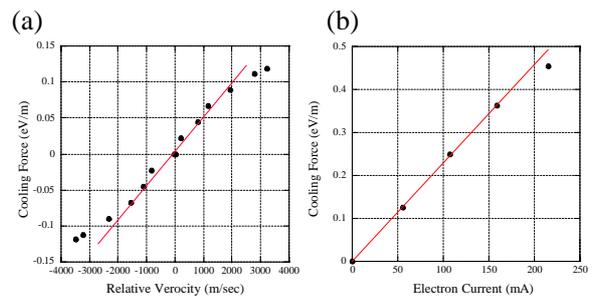


図3：(a) 誘導加速器をもちいて測定した電子ビーム冷却力。横軸はイオンと電子の相対速度で、縦軸は冷却長(440mm)で規格化した冷却力。このときの電子電流は56 mA(電子密度 $4.8 \times 10^6 \text{ e/cm}^3$)である。(b) 電子電流と冷却力の最大値の相関。

3. 1次元ビームOrdering

前節で述べたように、イオンビームの温度は、冷却力とIBSがバランスすることによって決まるが、IBSが小さくなった極限では、イオンビームの温度は、電子ビームの温度と等しくなり、それがビーム

温度の下限値を与えることが予測される。その極限では、イオンのエミッタンスや運動量広がり、下記の式で与えられる。

$$k_B T_{e\perp} \approx m_i c^2 \beta_i^2 v_{H,V} \frac{\epsilon_{H,V}}{R}$$

$$k_B T_{e\parallel} = m_i c^2 \beta_i^2 \left(\frac{\delta p_i}{p_i} \right)^2$$

前節の進行方向電子温度35μeVを代入すると、予想される7MeV陽子ビームの最小運動量広がり、 2×10^{-6} となる。

ところで、重イオンの冷却実験においては、この最低温度に到達する以前にイオンビームが1次元のOrderingをおこし、運動量広がりやエミッタンス広がりの急激な低下が報告されている[9]。ただし、この現象はC⁶⁺よりも軽い原子核、特に陽子ビームでは報告されていないため、S-LSRにおいて、7MeV陽子ビームをもちいて、どの程度までビーム温度が低下するか、および1次元のOrderingが見られるかどうかを実験的に検証した。

IBSの影響を小さくして、ビーム温度を下げるために、陽子数を減少させながらショットキーモニターを用いて、運動量広がりを測定した結果が図4である。図4(a)の電子電流は50mAで、(b)では3種類の電子電流で測定をおこなっている。図4(a)は、電子銃のカソード電源リップルが 2×10^{-4} (p-p)のときの測定結果であり、(b)はそれを 2×10^{-5} (p-p)以下にまで低下させたときのものである。(a)の図では、陽子の運動量広がりが途中で飽和していることから、最終的なビーム温度が、電源リップルなどの外的要因によって決まる電子温度に強く影響されることがわかる。現在は(b)のように飽和することはなくなり、運動量広がり 4×10^{-6} まで低下しているが、Orderingとみられる相転移は観測されていない。

ただ、図5は図4(b)と同じ測定時にショットキー電力と粒子数の相関を見たものであるが、電子電流が25mA、粒子数が数千個のときに、直線から離れている点が見られる。現時点ではこれが1次元のOrderingを意味するのかがどうか明確ではないが、この周辺に何らかの特異点が存在する可能性がある。

4. まとめと今後について

S-LSRの電子ビーム冷却装置は順調に稼動しており、いくつかのビーム冷却実験が進行しつつある[10,11]。1次元Orderingの実験においては、陽子ビームの粒子数を減らして、2000個にしたときに、冷却により運動量広がりを 4×10^{-6} まで小さくすることが可能となった。明確な1次元のOrderingは観測されていないが、数千個のあたりで、ショットキー電力に特異点が見られるようになっており、この周辺の精査を今後おこなう予定である。

5. 謝辞

電子ビーム冷却装置の製作に際しては、(株)東芝の電子ビーム冷却グループの方々、多大な協力

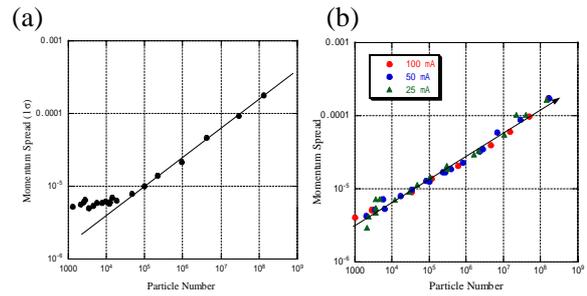


図4：電子ビーム冷却された陽子ビームの運動量広がり、と陽子粒子数の相関。(a):電子銃のカソード電源リップルが 2×10^{-4} のとき。(b):リップルが 2×10^{-5} 以下のとき。

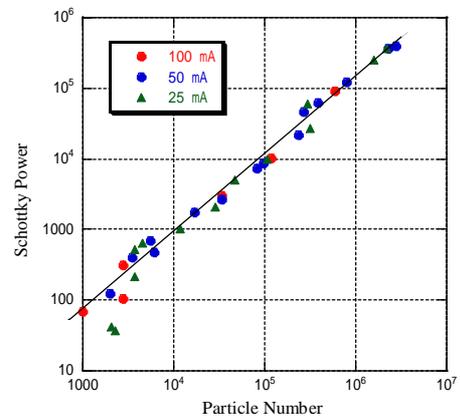


図5：図4(b)と同じ測定データにおける、ショットキー電力と粒子数の相関。

をいただきました。ここに感謝いたします。本研究は先進小型加速器事業の一環としておこなわれ、また京都大学21世紀COEプログラム「物理学の多様性と普遍性の探求拠点」の支援を受けました。

参考文献

- [1] A. Noda et al., Proc. of Symposium on Accel. Sci. and Tech. (2001) 125.
- [2] H.Tonguu et al., Proc. of this Meeting.
- [3] T. Shirai et al., Proc. of EPAC06, Edinburgh (2006).
- [4] H.Fadil et al., Proc. of this Meeting.
- [5] H.Yonehara et al., INS University of Tokyo report No. *INS-NUMA-49*.
- [6] S. Fujimoto et al., Proc. of 36th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, NANOBEAM 2005.
- [7] <http://lepta.jinr.ru/betacool.htm>.
- [8] Ch. Ellert et al., 1992 Nucl. Instrum. Methods A, **314** 399.
- [9] M. Steck et al., Nucl. Instrum. Methods A, **532** 357.
- [10] S.Fujimoto et al., Proc. of this Meeting.
- [11] T.Fujimoto et al., Proc. of this Meeting.