

バッファガス冷却器を備えたビーム物理研究用イオントラップシステムの開発 III DEVELOPMENT OF AN ION TRAP SYSTEM WITH A BUFFER-GAS COOLER FOR BEAM DYNAMICS STUDIES III

伊藤清一 *

Kiyokazu Ito *

AdSE, Hiroshima Univ.

Abstract

The compact non-neutral plasma trap systems named “S-POD” have been developed at Hiroshima University as an experimental simulator for beam dynamics study. S-POD can approximately reproduce some space-charge effect of a relativistic charged-particle beam observed in the center-of-mass frame. The phase-space density of an ion plasma trapped in S-PODs is higher than that of beams in circular accelerators, but it is lower than that of beams in high intensity linear accelerators. To study the dynamics of these intense beams, a more high phase-space density ion plasma is required. Ion cooling is absolutely essential to densify an ion plasma. Buffer-gas cooling is a major method to cool ions confined in ion traps. The achieved ion temperature is roughly equal to temperature of the buffer-gas. Therefore, it is desirable to use the low temperature buffer-gas to produce a more high phase-space density ion plasma. We are now developing a cryogenic buffer-gas cooling system for S-POD experiments. We report on preliminary results of ion cooling experiments.

1. 序論

加速器中を伝搬するビームと荷電粒子トラップに捕捉した非中性プラズマは物理的にはほぼ等価な系である [1]。荷電粒子トラップは加速器に比べると遥かに小型・安価であり、放射化の心配も無い。従って、非中性プラズマを用いれば大学の研究室レベルでビーム物理の実験的研究が可能となる。非中性プラズマを用いた実験にはこの他にも、パラメーターの制御性が高くその可変範囲も広い、再現性が非常に高い、現象が眼前で進行するので観測が容易である等の多くの利点がある。広島大学では荷電粒子トラップを用いた加速器ビーム模擬システム “S-POD” (Simulator of Particle Orbit Dynamics) を開発し、主に空間電荷効果がビームの挙動に与える影響という観点からビーム物理の諸問題に関する実験的な研究をおこなっている [2]。

荷電粒子トラップの一種である線形ポールトラップ (LPT) は四重極高周波電場によりイオンプラズマを断面方向に捕捉するが、その原理は加速器の強収束の原理と全く等価である。従って、強収束型の加速器中を伝播するビームと LPT に捕捉されたイオンプラズマの断面方向の運動は直接的に対応づけることが可能である。一般的な LPT は捕捉領域の長さ \gg 半径であり、これに捕捉されたイオンプラズマもまた軸方向の長さ \gg 半径となる。これは円形加速器中を周回する長バンチのビームと対応する。これまで S-POD では主に長バンチビームを想定した実験を行ってきた。もちろん、捕捉領域の長さ \sim 半径である LPT を作成することで、軸方向の長さと同程度サイズのイオンプラズマを捕捉することも可能である。これは高周波線形加速器でみられる短バンチのビームに対応する。最近、このような短バンチのイオンプラズマを使って、ドリフトチューブライナックを想定した実験も開始した [3-5]。

イオンプラズマにおいても空間電荷効果の強さは位相空間密度、すなわち捕捉するイオン数とその温度に依存する。これまでに S-POD 実験では、装置や手法の改善を行うことで捕捉イオン数増やして来た。LPT を採用した S-POD では、最大で 1×10^7 個の Ar^+ イオンの捕捉に成功している。この時、空間電荷効果の強さを表す指標の一つである rms チューンデプレッション η は 0.85 に達する。これは世の中の円形加速器中のビームに比べれば遥かに小さい (高密度) が、最先端の大強度線形加速器や次世代計画で想定されている加速器に比べると大きい (低密度)。このような相空間密度が高いビームの挙動を調べるためには、S-POD にも相当の相空間密度を持つイオンプラズマを捕捉する必要がある。

しかしながら、S-POD で捕捉粒子数を今よりも劇的に増加させることは現状では困難である。一方で S-POD に捕捉した Ar^+ プラズマの温度は数千 K 程度と高いので、冷却による高位相空間密度化が期待できる。参考文献 [1] によれば 1 次元モデルにおいてイオンプラズマの η は次式で表すことができる。

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \frac{2k_B T_i}{n_\ell R_p M_i c^2}}} \quad (1)$$

ここで、 k_B はボルツマン定数、 R_p は古典粒子半径、 c は光速、 M_i はイオンの質量、 T_i と n_ℓ はイオンプラズマの温度と線密度である。S-POD 実験で捕捉されるイオンプラズマの長さは典型的には $\ell \approx 30$ mm である。従って Eq. (1) によれば、全粒子数 $N = n_\ell \times \ell = 1 \times 10^7$ 個のイオンを捕捉した場合には、 $T_i = 800$ K で $\eta = 0.5$ 、 $T_i = 300$ K で $\eta = 0.3$ を得ることができる。これは最先端の大強度線形加速器に匹敵するチューンデプレッションである。このように、空間電荷効果を強くするのにイオンプラズマの冷却は効果的である。

さて、LPT に捕捉されたイオンプラズマは衝突を無視すれば保存系である。即ち、温度を下げるには何らか

* kzito@hiroshima-u.ac.jp

の散逸力を導入する必要がある。イオンプラズマの冷却法はいくつかあるが、代表的な手法にレーザー冷却法とバッファガス冷却法がある [6]。

レーザー冷却法はイオンが光子を吸収・放出する過程を利用してイオンを冷却する手法である。到達温度は mK 程度と非常に低く強力な手法であるが、適用できるイオン種に限られる。広島大学には $^{40}\text{Ca}^+$ イオン用のレーザー冷却系を装備した S-POD もあり、イオン数が比較的少数の場合には低温の極限状態であるクーロン結晶化に成功している [7]。この状態での η はおおよそゼロであり、ある意味究極の高密度状態とも言える。ただし、大量の Ca^+ イオンを再現性よく捕捉し冷却することはいくつかの技術的な理由から難しい [8]。

バッファガス冷却法は対象とするイオンにそれよりも質量が軽く低温の中性ガス（バッファガス）を衝突させ、イオンの運動エネルギーをバッファガスへと移すことでイオンを冷却する方法である。その原理はハドロン加速器で用いられる電子ビーム冷却と全く同じである。バッファガス冷却はシステムが比較的簡便でほとんどのイオン種に適用可能である。もちろん、 Ar^+ を用いた S-POD 実験にも適用でき、簡便で再現性が高い等の Ar^+ プラズマ実験の利点はそのままに低温化が期待できる。

バッファガス冷却におけるイオンの到達温度は、当たり前であるがバッファガスの温度より下がることはない。従って、空間電荷効果をより強く、即ちイオンプラズマの温度をできるだけ下げるには、より低温のバッファガスを導入する必要がある。そこで、クライオスタットで冷却したヘリウムガスをバッファガスとして S-POD に導入するシステムの開発を進めてきた [9, 10]。最近、冷却バッファガスを使用した実験を開始したので初期的な結果について報告する。

2. 低温バッファガス導入装置つき S-POD

Figure 1 に開発したバッファガス冷却機付 S-POD の外観を示す。LPT やクライオスタットを内蔵する真空容器は内径 294 mm、高さ 280 mm の円筒型で、上底と下底は ICF 356 になっている。側面には ICF 70 ポートが 9 個と ICF 203 の排気ポート 1 個が設置されている。これを排気速度 480 L/s のターボ分子ポンプ（エドワーズ社製）で排気する。クライオスタットは仁木工芸株式会社製で、UHV 仕様の 2 段 GM 型冷凍機と圧縮機（いずれも住友重機製）と温度コントローラー（Cryogenic Control System 社製）で構成されている。取り合いと設置の都合上、クライオスタットは容器下側から上向に設置してある。これは通常の用法とは逆向きであるが、問題なく動作することを確認してある。

LPT、イオン生成のための電子銃、イオン計測系を真空容器内に設置した様子を Fig. 2 に示す。写真ではわかりづらい箇所もあるので、Fig. 3 に LPT システムの模式図を合わせて示す。写真には写っていないが、下方より挿入した冷凍機の第 2 ステージには純銅製の熱交換器が設置してあり、これに He ガスを通すことで LPT に近い場所で低温のバッファガスを生成・導入できる。熱交換器には温度制御用のヒーターと較正済みのシリコン温度センサーが埋め込まれている。これにより、熱交換器の温度を 5 K から室温 (298 K) の範囲で ± 0.01 K 以下の精

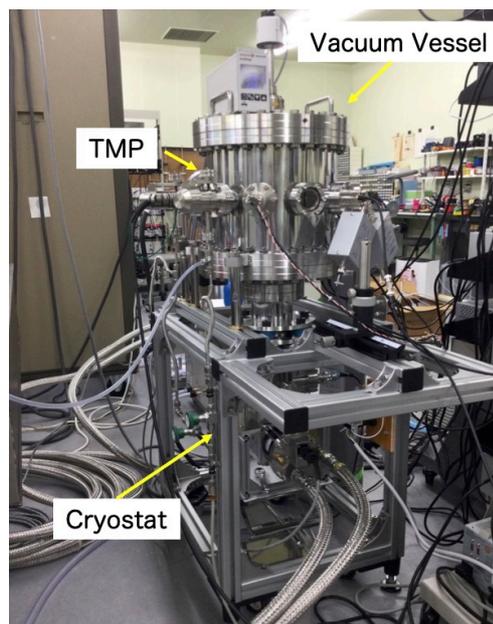


Figure 1: An exterior of new S-POD with the cryogenic buffer-gas cooler.

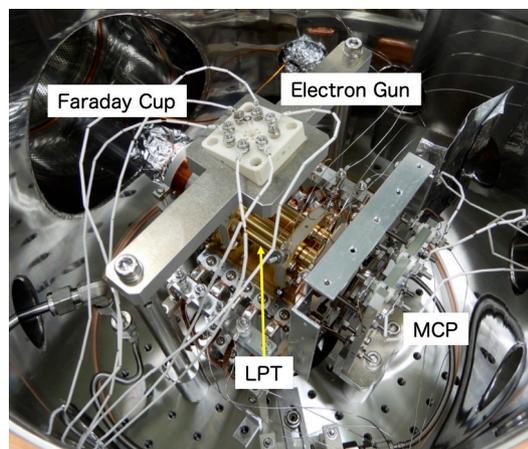


Figure 2: A photo of the LPT system adapted for cooling experiments.

度で制御できる。

LPT に捕捉するイオン種はこれまでの S-POD 実験と同様に Ar^+ イオンとし、そのサイズもこれまでと同様に、内接円半径を 5 mm、円柱電極の半径を 5.75 mm とした。今回は話を単純化するために 2 次元の近似が適用でき、かつ実験手順も簡便な長バンチのイオンプラズマでテストを行う。そのため、イオンを捕捉する ER 領域の電極の長さも従来の長バンチビーム実験用 S-POD と同じ 50 mm とした。その両端には軸方向閉じ込めの直流電圧印加用に長さ 18 mm の End 電極が設置してある。なお、ER 電極と End 電極の間には電気的な絶縁のために 0.5 mm の間隙を設けている。

S-POD におけるバッファガス冷却実験の典型的な手順は以下のとおりである。

1. 真空容器内に中性の Ar ガスと冷却した He ガスを

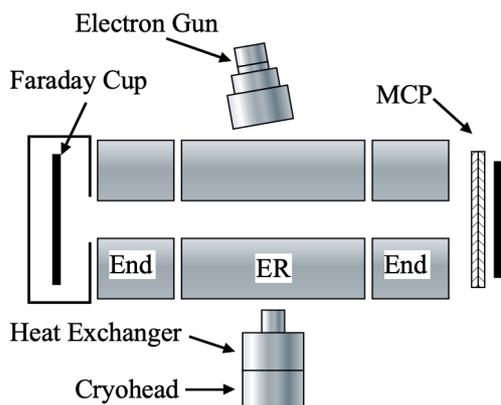


Figure 3: Schematic view of the LPT system with the cryogenic buffer-gas cooler.

導入する。

2. LPT の各電極に適切な閉じ込め電圧を印加する。
3. 電子銃からの電子ビームを LPT の中心部に向けて入射し Ar⁺ イオンを生成・捕捉する。
4. 電子ビームを止め、所定の時間捕捉する。場合によっては捕捉電圧を変化させる。
5. イオンを Faraday Cup または Microchannel Plate (MCP) へと排出しイオン数を測定する。

He ガスが冷却されているのに対し、Ar ガスは室温のまま導入している。そのため Ar ガスはイオンや He ガスを加熱してしまう可能性がある。本来なら電子ビームを止めるのと同時に Ar ガスの導入も止めるべきであるが、本 S-POD のガス導入系には手動のバルブしかついていないので今回の実験中は Ar、He ガス共に導入し続けることとした。

He ガスは導入後、すぐに排気されるわけではなく、しばらく真空容器内に留まる。そのため LPT が温かいと、せっかく冷やした He ガスも温まってしまう冷却効率が低下する。これを抑制するため、LPT も冷却する。Ar ガスの融点は 83.8 K であり、LPT の温度をこれより下げると Ar が電極に氷着してしまう。従って、これより温度を下げる必要はないので、冷凍機の第 1 ステージに接続された放射シールド (~ 50 K) [9] を介して冷却する。また、LPT のベースにはヒーターと白金測温体 (Pt 100) が設置してある。これにより、LPT の温度を 85 K から室温の範囲で ±0.01 K 以下の精度で制御できる。

3. イオンプラズマの寿命測定

イオンプラズマの温度を測る方法はいくつかあるが、本研究ではイオンプラズマの寿命を測定することで間接的に冷却の効果を確認した。加速器ビームと同じく、荷電粒子トラップに捕捉されたイオンは時間と共にその数を減らしていく。その主な原因は、イオン-イオンの衝突やイオン-中性粒子の衝突による軌道の変化や荷電交換反応である。イオンプラズマの温度が下がると、個々のイオンの持つ平均的なエネルギーも小さくなる。そのため、実空間の広がりは小さくなり、また衝突による軌道の変化も小さくなる。その結果、衝突したイオンが捕捉領域から溢れて損失する可能性は低くなり、イオン

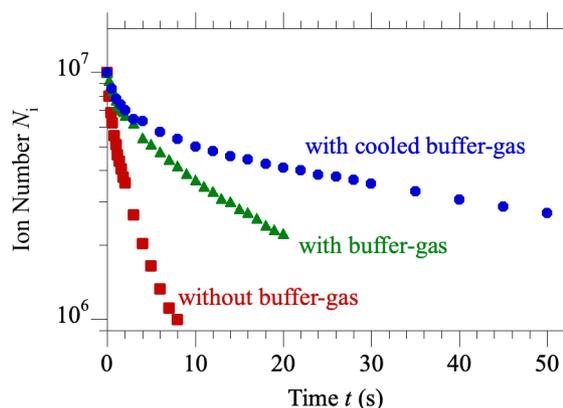


Figure 4: Time evolutions of ion numbers. The initial ion number is 1×10^7 and the pressure of Ar gas is 1×10^{-5} Pa in all the cases.

プラズマの寿命は長くなる。

Figure 4 に捕捉イオン数の時間変化の例を示す。導入している Ar ガスの圧力は $P_{Ar} = 1 \times 10^{-5}$ Pa で、時刻 $t = 0$ におけるイオン数は $N_{i0} = 1 \times 10^7$ 個である。これは S-POD 実験においては最も高い P_{Ar} と N_{i0} である。前述のようにプラズマが損失するのはイオン同士や中性ガスとの衝突である。従って、もっとも寿命が短い場合である。付け加えるならば、イオン数が多く分布が広がっているため衝突による加熱効果が大きく、また冷却した He ガスを室温の Ar ガスが暖めてしまうので、もっとも冷却が効きにくい場合でもある。

赤四角は He ガスを導入しておらず、かつ熱交換器と LPT の温度はいずれも室温 ($T_{Ex} = T_{LPT} = 298$ K) の場合である。緑三角は $T_{LPT} = 298$ K で、 $T_{Ex} = 298$ K の熱交換器を通した、即ち室温の He ガスを $P_{He} = 8 \times 10^{-5}$ Pa 導入した場合である。青丸は $T_{LPT} = 100$ K で、 $T_{Ex} = 10$ K の熱交換器を通した、即ち冷却した He ガスを $P_{He} = 8 \times 10^{-5}$ Pa 導入した場合である。He ガスを導入していない場合がイオンの減少が一番速く、室温の He ガスを導入した場合、冷却したバッファガスを導入した場合と遅くなっている。このことから、冷却した He ガスを用いるとイオンプラズマをより冷却できることが確かめられた。

いずれの場合も最初の数秒はイオンの減少が速く、その後はゆっくりになる。S-POD では LPT の断面方向から電子ビームを入射してイオンを生成・捕捉している。そのため、初期状態ではイオンプラズマは断面方向にかなり広がって分布している。最初の速い減少は、捕捉領域の端の方に捕捉された損失しやすいイオンの損失が原因である。

非常に単純化したモデルでは、イオン数は指数関数的に減少する。この場合は、その時定数をもってイオンプラズマの寿命 (プラズマ分野では閉じ込め時間) を定義できる。しかし実際には前述のようにイオンの損失過程は複数あるため、その時定数も複数ある。そこで今回は単純にイオン数が初期値から $1/e$ まで減少するのにかかった時間を寿命として定義する。ただし、その時間のデータがちょうどあるとは限らないので、測定データを

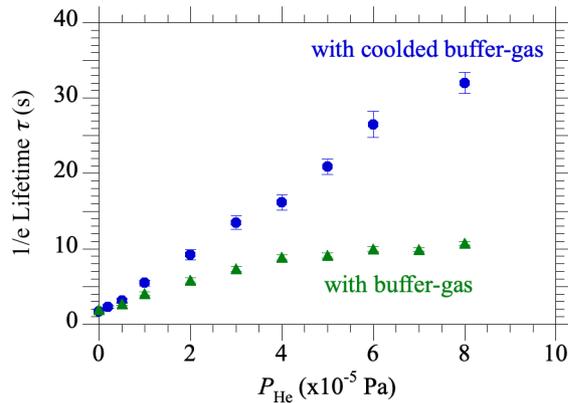


Figure 5: Dependence of lifetimes on the pressure of He gas.

以下の式でフィッティングして 1/e 降下時間を算出した。

$$N(t) = N_1 \exp\left(-\frac{t}{\tau_1}\right) + N_2 \exp\left(-\frac{t}{\tau_2}\right) \quad (2)$$

この方法によれば、He ガス無しの場合の寿命は 2 s、室温の He ガスを導入した場合は 11 s、冷却した He ガスを導入した場合は 32 s となる。冷却した He ガスを導入することで、He ガス無しの場合に比べて寿命は 16 倍も長くなる。

イオンプラズマ寿命の He ガス圧 P_{He} に対する依存性を Fig. 5 に示す。 P_{He} 以外の実験条件は Fig. 4 と同じである。本実験では P_{He} の最大値を 8×10^{-5} Pa とした。これは、イオン数の測定に使用している MCP の動作可能圧力の上限 ($P < 1 \times 10^{-4}$ Pa) によって決まっている。エラーバーは標準誤差であり、フィッティングにより決定した各パラメータの標準誤差から誤差伝播速により求めた。いずれの場合もエラーバーは小さく、寿命を精度良く評価できている。

室温の He ガスを導入した場合は、 $P_{\text{He}} \leq 4 \times 10^{-5}$ Pa では P_{He} の増加に伴い寿命は伸びていくが、 $P_{\text{He}} > 4 \times 10^{-5}$ Pa では寿命の変化は小さくなる。冷却した He ガスを導入した場合は室温の He ガスを導入した場合に比べて、測定した範囲においてほどの P_{He} においても寿命は伸びている。また、 $P_{\text{He}} \leq 8 \times 10^{-5}$ Pa においては、 P_{He} の増加に伴い寿命は一次関数的に増加する。以上の結果は冷却した He を使った方がより効果的にイオンプラズマの冷却を行えることを明確に示している。

4. まとめ

広島大学では線形ポルトラップを用いたビーム物理研究を行っている。大強度線形加速器等のより強い空間電荷効果が作用するビームのダイナミクスを研究するためには、より位相空間密度の高いイオンプラズマが必要である。そのようなイオンプラズマを実現するためにはイオンプラズマを低温化することが必須となる。バッ

ファガス冷却法は代表的なイオンプラズマ冷却法の一つであり、S-POD 実験にも適用することが可能である。バッファガス冷却による到達温度は導入するバッファガスの温度より低くなることはない。そこで、クライオスタットにより冷却した He ガスをバッファガスとして導入するシステムを開発した。本研究では、イオンプラズマの寿命を測定することで間接的に低温バッファガス導入による冷却効果を検証した。

1. イオンプラズマの寿命はバッファガス無しでは 2 s であったが、室温のバッファガスを導入すると 11 s に伸び、冷却したバッファガスを導入すると更に伸びて 32 s となった。
2. 室温の He ガスを導入すると、 $P_{\text{He}} \leq 4 \times 10^{-5}$ Pa までは P_{He} の増加に伴い寿命は伸びていくが、 $P_{\text{He}} > 4 \times 10^{-5}$ Pa では寿命の伸びは少なくなる。
3. 冷却した He ガスを導入した場合、 $P_{\text{He}} \leq 8 \times 10^{-5}$ Pa においては、 P_{He} の増加に伴い寿命は一次関数的に増加する。また、どの P_{He} においても、室温の He ガスを導入した場合に比べて寿命は長くなる。
4. 一般に、イオンプラズマの温度が下がるとその寿命は長くなる。本研究の結果より、冷却した He を使った方がより効果的にイオンプラズマの冷却を行えることを明確に確認した。

謝辞

本研究は JSPS 科研費 JP21H03737 の助成を受けたものです。

参考文献

- [1] H. Okamoto, Y. Wada, R. Takai, Nucl. Instrum. Methods A, Vol.485, 244 (2002).
- [2] <https://beamphys.hiroshima-u.ac.jp>
- [3] M. Goto, K. Ito, K. Kojima, H. Okamoto, J. Phys. Soc. Jpn. Vol.90, 094501 (2021).
- [4] M. Goto, C. Ichikawa, K. Ito, K. Kojima, H. Okamoto, Phys. Rev. Accel. Beams Vol.25, 054201 (2022).
- [5] M. Kuroda, A. Kasagaki, H. Okamoto, K. Ito, Phys. Rev. Accel. Beams 27, 054201 (2024).
- [6] P. K. Ghosh, *Ion Traps* (Oxford University Press, Oxford, 1995).
- [7] K. Izawa, K. Ito, H. Higaki, H. Okamoto, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 79, 124502 (2010).
- [8] K. Ito, T. Masuda, H. Higaki, H. Okamoto, J. Phys. Conf. Ser., Vol. 1350, 0126 (2019).
- [9] 伊藤清一, “バッファガス冷却機を備えたビーム物理研究用イオントラップシステムの開発”, Proc. PASJ2022, Kitakyusyu (Online meeting), Japan, Oct. 2022, pp. 494-498.
- [10] 伊藤清一, “バッファガス冷却機を備えたビーム物理研究用イオントラップシステムの開発 II”, Proc. PASJ2022, Funabashi, Japan, Aug. 2022, pp. 255-259.