

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 DEVELOPMENT OF AN ION TRAP SYSTEM WITH A BUFFER-GAS COOLER FOR BEAM DYNAMICS STUDIES II

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 rms tune depression due to the space-charge effect of an ion plasma in S-PODs is less than that of beams in almost all accelerators, but it is greater than that of beams in advanced linear accelerators. To study dynamics of these intense beams, a more high phase-space density ion plasma is required. Ion cooling is absolutely essential for creating it. Buffer-gas cooling is a major method to cool ions confined in ion traps. This cooling technique can be applied to S-POD experiments. The achieved ion temperature is roughly equal to temperature of the buffer-gas. 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 an overview of this system.

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等価な系である [1]。従って、非中性プラズマを用いると巨大な加速器を使用せずにビームの挙動を再現することができ、大学の実験室レベルでビーム物理の実験的研究が可能となる。広島大学では非中性プラズマ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]。非中性プラズマを用いた実験には、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、放射化の心配が無い、安価である等の多くの利点がある。荷電粒子トラップの一種である線形ポルトラップ (LPT) は四重極高周波電場により断面方向にイオンプラズマを捕捉するが、その原理は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。

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。これまでの S-POD 実験では、空間電荷効果の強さをイオン数で制御してきた。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。これは大概の加速器ビームよりも小さい (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)。このような大強度ビームの挙動を調べるためには、S-POD にさらに高密度のイオンプラズマを捕捉す

る必要がある。

しかし、S-POD で捕捉粒子数をこれ以上増加させることは現状では困難である。一方、空間電荷効果の強さを決めるのは位相空間密度であるので、温度を下げることもによっても η を小さくすることができる。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 、 R_p 、 c はボルツマン定数、古典粒子半径、光速であり、 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 に捕捉した Ar^+ プラズマの温度は典型的には 3,000 K 程度と高いので、冷却による高密度化が期待できる。S-POD 実験で捕捉されるプラズマの長さは典型的には $\ell \approx 30$ mm であるので、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、Eq. (1) によれば、 $T_i = 800$ K で $\eta = 0.5$ 、 $T_i = 300$ K で $\eta = 0.3$ を得ることができる。このように、より強い空間電荷効果を得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レーザー冷却法とバッファガス冷却法がその代表である [3]。

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 程度と非常に低いが、適用できるイオン種が限られる。広島大学には $^{40}\text{Ca}^+$ イオン用のレーザー冷却系が装備されている 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 [4]。この状態での η はおおよそゼロである。ただし、大量の Ca^+ イオンを再現性よく捕捉し冷却する

* kzito@hiroshima-u.ac.jp

ことはいくつかの理由から難しい [5]。

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だ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原理的にはバッファガスの温度程度である。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 [6]、最近、所望の性能を実現することに成功した。その概要について報告する。

2. 要求性能

最初に、開発する装置に要求する性能について明確にしておく。バッファガスの温度は低ければ低いほど、イオンプラズマの到達温度は低くできる。バッファガスには、沸点が低く、軽い元素で取り扱いも容易なヘリウムを採用する。Equation (1) によれば、 $N = 1 \times 10^7$ の場合 $T_i < 100 \text{ K}$ では η の変化は小さい。従って、ガス冷却部の目標到達温度をこれよりも十分に低い 10 K 以下とする。これは比較的安価に手に入る 2 段 GM 型冷凍機で十分に達成できる温度である。

バッファガスは導入後、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、せっかく冷やしたバッファ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。S-POD 実験では、中性の Ar ガスを真空容器内に導入し、これに電子ビーム照射することで Ar^+ を生成する。Ar ガスの融点は 83.8 K であるので、LPT の温度をこれより下げてしまうと Ar が電極に氷着することになる。従って、これより温度を下げる必要はないので、目標到達温度は 100 K 以下とする。この程度の到達温度であれば、冷凍機の第 1 ステージ (~ 20 K) またはこれに接続された放射シールド (~ 50 K) [6] を介して冷却すれば達成可能である。

我々の目標は系統的な実験であるので、イオンプラズマを常に極限まで冷却すれば良いわけではなく、その温度を制御しなければならない。そのためにはヘリウムガスの温度を制御する必要がある。一方、LPT の温度もイオンプラズマに影響を与える可能性がある。そのため、熱交換器と LPT の温度をそれぞれの到達温度から室温の範囲で独立に制御できる必要がある。通常の S-POD 実験では、Shot-by-Shot のイオン数安定性が 1% 程度であるので、温度の安定性もその程度あれば十分である。従って、温度の変動は $\pm 0.1 \text{ K}$ 以下が望ましい。物性実験に一般的に用いられるクライオスタットの温度安定性は $\pm 0.001 \text{ K}$ 程度であるので、この程度の安定性は容易に得られる。

前述のように S-POD 実験では、真空容器内に導入した

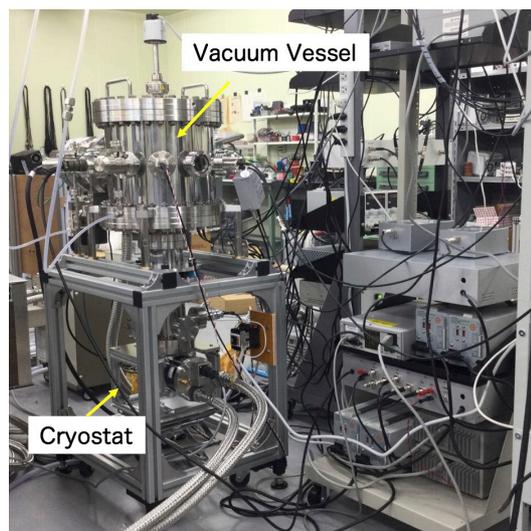


Figure 1: An exterior of new S-POD with the cryogenic buffer-gas cooler.

中性の Ar ガスを電子ビームで叩くことで Ar^+ を生成・捕捉している。この時、真空容器内に Ar 以外の残留ガスがあると、これらもイオン化して捕捉してしまう。これらの Ar^+ 以外のイオンが多量に存在すると、実験で何を見ているかわからなくなってしまふ。典型的な S-POD 実験では 10^{-6} Pa から 10^{-5} Pa 程度の Ar ガスを導入するので、ベース圧力はこれより十分に低い 10^{-8} Pa 台を目標とする。なお、 He^+ と Ar^+ は M/e が大きく異なるので、動作点を Ar^+ に合わせた LPT に He^+ が捕捉されることはない。冷凍機はその構造上ベーキングできないので、ベーキングなしでこのベース圧力を達成する必要がある。最近のターボ分子ポンプを使い、真空容器内に入れる装置の構造と材料に気をを使えば、その達成は難しくはない。

以上をまとめると、本装置に要求する性能は以下の通りである。

1. ヘリウムガス冷却部の到達温度は 10 K 以下。
2. LPT の到達温度は 100 K 以下。
3. それぞれの温度を到達温度から室温の範囲で独立に、かつ変動が $\pm 0.1 \text{ K}$ 以下で制御できる。
4. ベーキングなしでベース圧力が 10^{-8} Pa 台である。

3. 低温バッファガス導入装置つき S-POD

Figure 1 に今回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 の排気ポートが 1 個設置されている。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

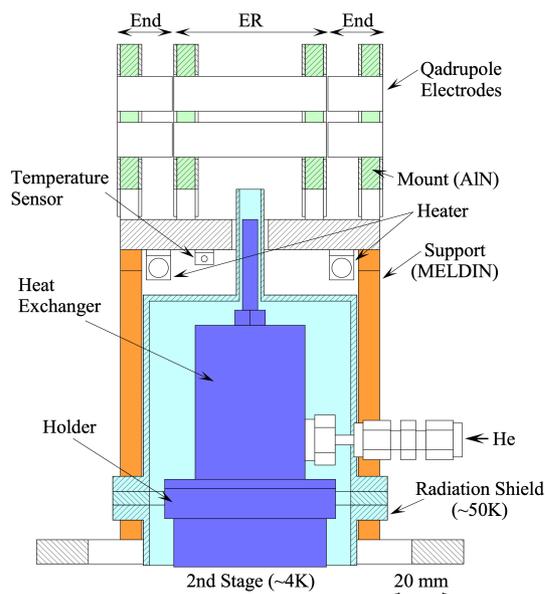


Figure 2: Schematic view of the LPT and the cryogenic buffer-gas cooler.

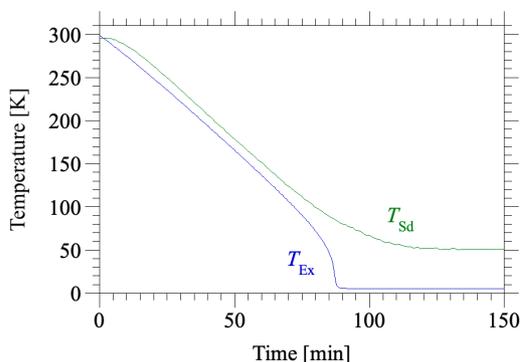


Figure 3: Time evolution of temperatures on the heat exchanger (T_{Ex}) and the radiation shield (T_{Sd}) without the LPT.

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 およびヘリウムガス冷却系の模式図を Fig. 2 に示す。真空容器に設置したクライオスタットの第 2 ステージに純銅製の熱交換器を設置し、冷却した熱交換器に 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・導入する。He ガス導入のための配管から熱交換器への熱流入を抑制するため、配管には 1/8 インチの SUS 管を使用している。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。第 2 ステージと熱交換器を囲う放射シールドは純アルミ製で冷凍機の第 1 ステージに接続されている。

最初に、ガス導入系の配管を接続した熱交換器と放射シールドのみを設置した状態でクライオスタットの性能試験を行った。Figure 3 にクライオスタット起動後の経過時間に対する熱交換器と放射シールドの温度の変化を示す。この時、熱交換器のヒーターはオフである。熱交換器はクライオスタット起動後およそ 100 分で 4.6 K に

Table 1: Thermal Conductivity of Typical Insulators

名前	λ [W/m·K]	名前	λ [W/m·K]
窒化アルミ	~200	PEEK	~0.5
アルミナ	~20	テフロン	~0.3
マセライト	~2	ポリイミド	~0.2

到達し、放射シールドは約 120 分で 50 K に到達した。熱交換器の到達温度は十分に低く、冷却にかかる時間も実用的であり、本実験のために十分な性能を有することが確かめられた。

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。イオンを捕捉する ER 領域の電極の長さは 50 mm で、その両端に設置した軸方向閉じ込め電圧印加用の End 電極の長さは 18 mm である。ER 電極と End 電極は電気的な絶縁のために 0.5 mm の間隙を空けて設置している。

LPT の目標温度は 100 K であるので、LPT を放射シールド (50 K) に熱的に接触させることで冷却する。また、LPT のベースにはヒーターと白金測温体 (Pt 100) を設置してあり、これらを用いてその温度を制御する。LPT の温度をできるだけ均一にするために、電極は熱伝導率が高く、熱容量の小さいアルミニウム製とした。ただし、アルミニウムは酸化しやすいので、その表面には金メッキが施してある。四重極電極を保持するマウントは、絶縁体であるが高い熱伝導率を持つ窒化アルミで製作した。今回採用した GM 冷凍機は少なからず振動がある。従って、放射シールド (冷凍機の第 1 ステージに固定されている) と LPT を剛体的に固定してしまうと LPT にもその振動が伝わってしまう。これは実験に悪影響を与える可能性がある。そこで、LPT は真空容器に固定し、LPT と放射シールドを適切な太さの柔らかい銅編線で接続することで振動を伝えずに冷却する。

LPT の到達温度を下げるためには、LPT への熱流入をできるだけ少なくする必要がある。LPT への熱流入は大きく分けて、放射による伝熱、電極へ電圧を印加するための配線からの伝熱、固定する支柱からの伝熱である。大雑把な評価によれば、この中で寄与がもっとも大きいのは支柱からの伝熱である [6]。支柱からの伝熱を少なくするには支柱の熱抵抗をできるだけ大きくする、即ち支柱の断面積はできるだけ小さく、かつ長さをできるだけ長くし、熱伝導率ができるだけ小さい材料を使用することである。一般的には、金属よりも絶縁体の方が熱伝導率は小さくなる。Table 1 に超高真空中で使える代表的な絶縁体の熱伝導率を示す。資料により値にばらつきがあるので、ここではおおよその値を記している。左側はセラミック材で右側は樹脂材である。今回はサバゴン社が販売するポリイミド系樹脂の MELDIN7001 を採用し、断面積 44.5 mm^2 ($6.35 \text{ mm} \times 7 \text{ mm}$)、長さ 120 mm の支柱 4 本で LPT を支持する。この場合、LPT と放射シールドを断面積 1.25 mm^2 、長さ 120 mm の銅編線 4 本で接続すれば、LPT を 60 K まで冷却できると予想された [6]。

製作した LPT を放射シールドに接続し熱交換器と

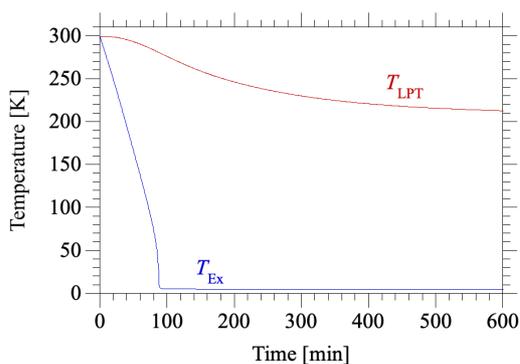


Figure 4: Time evolution of temperatures on the heat exchanger (T_{Ex}) and the LPT (T_{LPT}) at the first version.

LPT の温度変化を測定した。Figure 4 にクライオスタット起動後の経過時間に対する熱交換器と LPT の温度の変化を示す。この時、熱交換器および LPT に設置したヒーターはオフである。LPT 設置前と比べて熱交換器の冷却にかかる時間と到達温度に大きな変化はなかった。一方、LPT の到達温度は 210 K で予想ほど低下しなかった。また、LPT を設置する前の真空度が 10^{-8} Pa 台であったのに対し、LPT 設置後は 10^{-5} Pa 台と大幅に悪化してしまった。

4. 装置の改良

前述の構成では LPT の到達温度が Ar の融点に比べはるかに高く、また到達真空度も非常に悪いという二つの問題があった。まずは S-POD 実験においてより本質的な問題となる真空度悪化の改善を行った。これまでの S-POD においてはそのベース圧力は 10^{-8} Pa 台であったことから、今回初めて導入した材料である MELDIN が真空度悪化の原因であると予想された。そこで、MELDIN 製の支柱を取り除いた LPT を設置して真空排気したところ、到達真空度は 10^{-8} Pa 台へと大幅に改善した。この結果から、MELDIN が真空度悪化の原因であることは明らかである。

MELDIN はカプトンと同じポリイミド樹脂であり、カプトンシートには超高真空中での使用実績が多数ある。従って、MELDIN もシートであれば超高真空中でも使えた可能性が高い。一方、今回使用したのは MELDIN の板材であった。販売店に確認したところ、これは多数のシートを重ね融着させることで製作されているとのことであった。このことから、板材においてはその製作過程でシートの層間にガスが封じられており、そのためガス放出が増加し真空度が悪化したと考えられる。

十分に時間をかけて排気を行い MELDIN からの脱ガスを枯らせれば、超高真空を達成できたかもしれない。しかし確証がないので、超高真空中での十分な使用実績のあるマセライト製の支柱を製作し直すことにした。ただし、Table 1 に示したように、マセライトの熱伝導率はセラミックとしては小さいが MELDIN に比べると 8 倍程度高い。また製作の都合上、断面を 8 mm 角の正方形としたので、その断面積は 64 mm^2 であり、先に製作した MELDIN 製の支柱に比べると 1.4 倍ほど大きくなる。

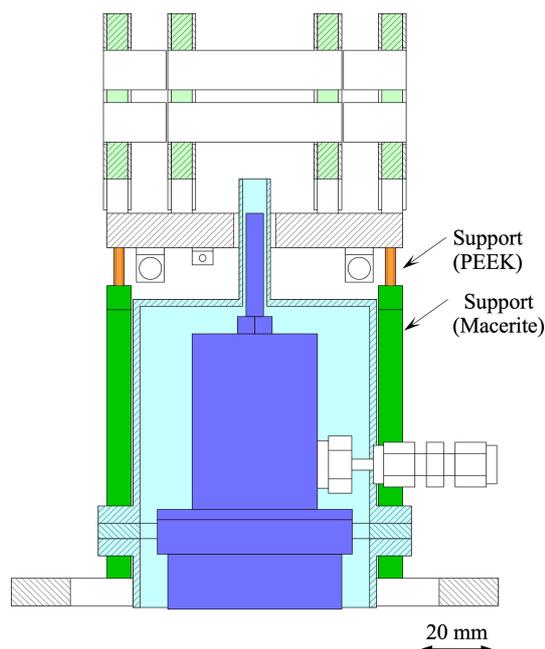


Figure 5: Schematic view of the final version.

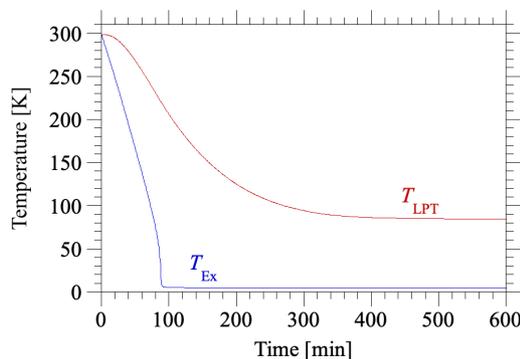


Figure 6: Time evolution of temperatures on the heat exchanger (T_{Ex}) and the LPT (T_{LPT}) at the final version.

従って、MELDIN 製の支柱に比べ熱流入は 10 倍程度大きく、到達温度がさらに高くなることが予想された。

何度かの試行錯誤による変更を経て決定した構成を Fig. 5 に示す。前述のように支柱はマセライト製とし、呼び径 M3 の PEEK 製のネジを使って LPT を支柱から 10 mm 浮かすことにより支柱からの熱流入を抑制した。一方、真空容器底面からトラップ中心軸までの高さは決まっているので、支柱の長さは 10 mm 短くし、110 mm とした。また、LPT と放射シールド間の熱伝導を向上するために、銅編線の断面積 5.5 mm^2 、長さ 110 mm とし、これを 10 本接続した。

この構成での熱交換器と LPT の温度変化を Fig. 6 に示す。改良前と比べて熱交換器の冷却にかかる時間と到達温度に大きな変化はない。一方、LPT の温度はおよそ 8 時間で 85 K に達しており、Ar の融点 83.8 K と同程度の温度まで冷却することに成功した。到達温度、冷却にかかる時間ともに S-POD 実験には十分な性能である。

Figure 7(a) に熱交換器に設置したヒーターへの投入電

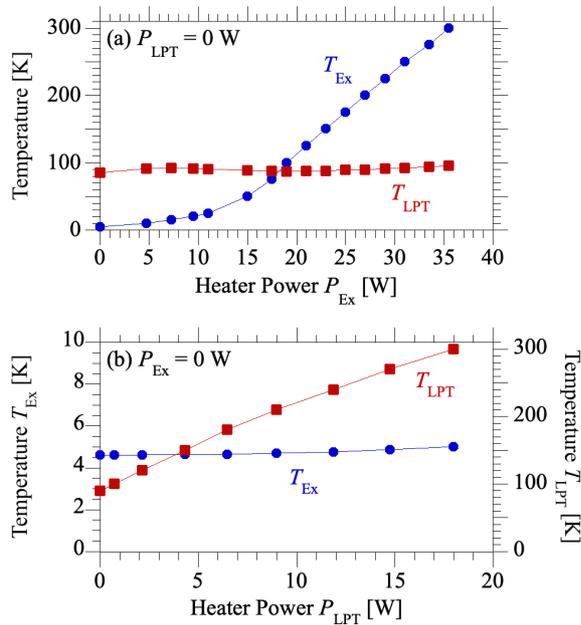


Figure 7: (a) Dependence of temperatures on power of the heater installed in the heat exchanger. (b) Temperatures vs. power of the heater attached to the LPT.

力 P_{Ex} に対する熱交換器と LPT の温度変化を示す。熱交換器の温度は P_{Ex} をフィードバック制御することで 5 K から室温の広い範囲で、 ± 0.01 K 以下の精度で制御することが出来た。一方で、LPT の温度は P_{Ex} によらずおおよそ 85 K で一定であった。同様に Fig. 7(b) には LPT に設置したヒーターへの投入電力 P_{LPT} に対する熱交換器と LPT の温度変化を示す。この場合は、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。一方で、熱交換器の温度は 4.6 K で一定であった。以上の結果より、このシステムで熱交換器の温度と LPT の温度をそれぞれの到達温度から室温の範囲で独立に制御できることが確かめられた。

5. 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なっている。次世代加速器等のより強い空間電荷効果が作用するビーム研究のためには、より位相空間密度の高いイオンプラズマが必要であり、そのためにはイオンプラズマの低温化が必須である。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程度である。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。以下に今回開発したシステムの特徴をまとめる。

1. ヘリウムガス冷却用の熱交換器の到達温度は 4.6 K である。
2. 線形ポルトラップの到達温度は 85 K である。
3. 熱交換器と線形ポルトラップの温度はそれぞれの

到達温度から室温の範囲で独立に制御できる。またその安定性は ± 0.01 K 以下である。

4. 真空容器内のベース圧力は 10^{-8} Pa 台である。

これは、想定している S-POD における Ar^+ プラズマの冷却実験には十分な性能である。

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] P. K. Ghosh, *Ion Traps* (Oxford University Press, Oxford, 1995).
- [4] K. Izawa, K. Ito, H. Higaki, H. Okamoto, J. Phys. Soc. Jpn., Vol. 79, 124502 (2010).
- [5] K. Ito, T. Masuda, H. Higaki, H. Okamoto, J. Phys. Conf. Ser., Vol. 1350, 0126 (2019).
- [6] 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.