

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

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

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 of beam dynamics. S-POD can approximately reproduce the collective motion of a relativistic charged-particle beam observed in the center-of-mass frame. The strength of the space-charge effect depends on the phase-space density, namely, the trapped ion number and its temperature. In typical S-POD experiments, it is controlled with only the trapped ion number. The achieved tune depression is 0.85 with the maximum ion number of 1×10^7 . For making a more high density ion plasma, it is necessary to cool a trapped ion plasma. Buffer-gas cooling is a major cooling method of ion plasmas. We are now developing a cryogenic buffer-gas cooling system for S-POD experiments. We report on an overview of the design and progress.

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]。つまり、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実験的に研究することが可能である。広島大学では小型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” 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して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、パラメータの制御性が高く、その可変範囲も広い、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。特に線形ポールトラップ (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捕捉するイオン数で制御してきた。非中性プラズマトラップに LPT を採用した S-POD では、最大で 1×10^7 個の Ar^+ イオンを捕捉することができる。この時、空間電荷効果の強さを表す指標の一つであるチューンデプレッション η は 0.85 に達する。これは大概の円形加速器中を周回する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、S-POD の 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。そこで、捕捉したイオンプラズマを低温の He ガスと衝突させることで冷却 (バッファガス冷却) するシステムを製作中である。ここでは、その概要と進捗について報告する。

2. チューンデプレッション

まずは、空間電荷効果の強さが温度、イオン数にどの様に依存するかを示す。さて、外場が作る収束場により荷電粒子はベータトロン運動をしながら加速器中を伝播する。ここで、外場のみで決まる、すなわち空間電荷効果を無視した場合のベータトロンチューンを ν_0 とする。同符号の荷電粒子間にはクーロン斥力が働くので、ビームを構成する荷電粒子に作用する実効的な収束力は外場の作る収束力より小さくなる。そのため、実際のベータトロンチューン ν は ν_0 よりも小さくなる。クーロン相互作用はあるものの、個々の粒子が独立 (インコヒーレント) に運動するという考えに基づくと、各粒子の ν はある範囲で広がり持つため扱いづらい。そこで、rms エンベロープ方程式からもとまるチューン $\bar{\nu}$ を用いて rms チューンデプレッション η を次のように定義する。

$$\eta \equiv \frac{\bar{\nu}}{\nu_0} \quad (1)$$

η は低密度・高温の極限では 1 に、高密度・低温の極限では 0 となり、空間電荷効果の強さの指標として用いることができる。

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。

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

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。

* kzito@hiroshima-u.ac.jp

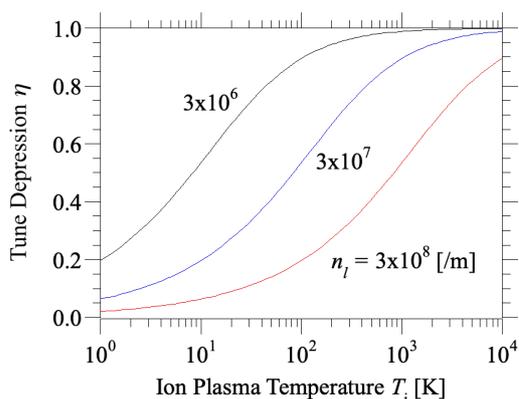


Figure 1: Tune depression estimated from Eq. (2) plotted against the plasma temperature.

Figure 1 に η の T_i と n_l に対する依存性を示す。 η は n_l 即ち捕捉イオン数の増加に伴い減少し、 T_i の低下に伴い単調に減少する。S-POD 実験のイオンプラズマの長さは典型的には 30 mm 程度であるので、 $n_l = 3 \times 10^8$ 個/m は 1×10^7 個のイオン数に相当する。S-POD に 1×10^7 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。このように、プラズマの低温化は高密度イオンプラズマの生成に有用である。

3. バッファガス冷却

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代表的なものにはレーザー冷却法とバッファガス冷却法である。

レーザー冷却法はイオンとレーザーの相互作用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に限られる。広島大学には 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 ($\eta = 0$) であるクーロン結晶化に成功している [3]。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難しい [4]。

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。ハドロン加速器で用いられる電子ビーム冷却とその原理は全く同じである。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^+ 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 (高密度化) が期待できる。なお、そ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。

Figure 2 に室温の He ガスを導入した場合の Ar^+ プラズマのチューンを実験的に測定した結果の例を示す。チューンは測定したイオン数とイオンプラズマの rms 半径から線密度と温度を決定し、Eq. (2) から求めている。He ガス圧の増加に伴いチューンデプレッションは減少

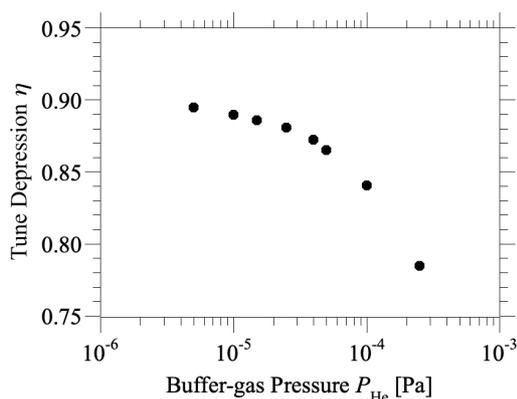


Figure 2: Dependence of the tune depression on the buffer-gas pressure with the ion number of $N_l = 2 \times 10^6$.

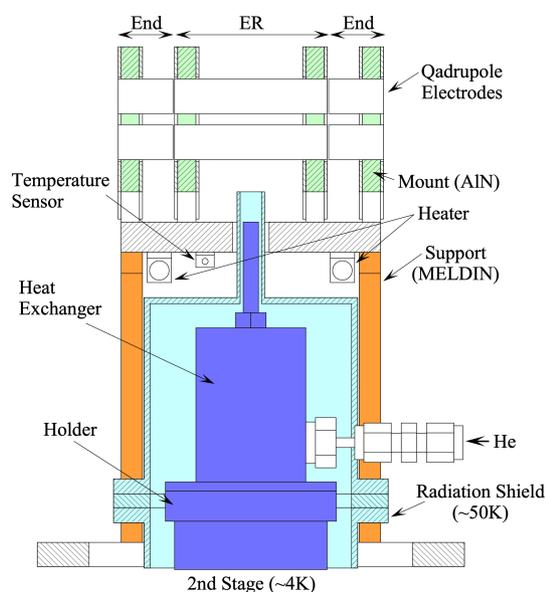


Figure 3: Schematic view of the ion trap and the cryogenic buffer-gas cooler.

し、 $P_{\text{He}} = 3 \times 10^{-4}$ Pa において $\eta = 0.78$ に到達する。また、冷却されたプラズマは寿命が伸び、捕捉イオン数はプラズマの寿命に大雑把には比例する。そのため捕捉イオン数を 1×10^7 からさらに増やすことにも成功している。このように、バッファガス冷却はチューンデプレッションの低下に有効である。

4. 低温バッファガス装置の開発

空間電荷効果をより強くするにはイオンプラズマの温度をできるだけ下げる、即ちより低温のバッファガスを導入する必要がある。開発中の低温バッファガス装置の模式図を Fig. 3 に示す。真空容器内に設置したクライオスタットの 4 K ヘッドに取り付けた熱交換器を通すことで低温 He ガスを生成する。以下では開発の進捗状況について記す。

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

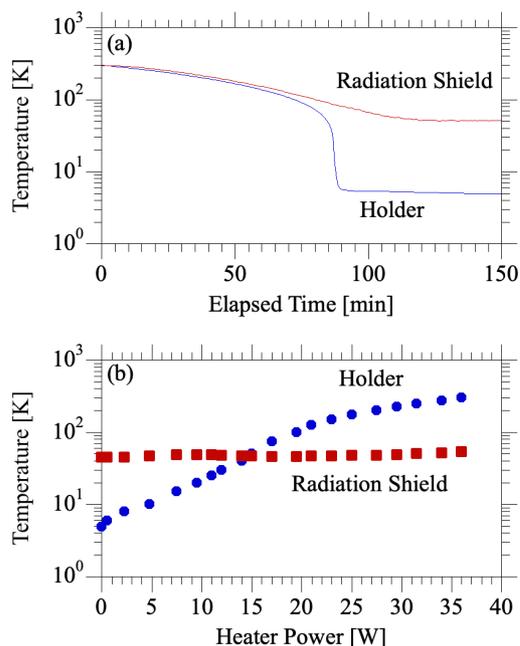


Figure 4: (a) Time evolution of the temperature of the holder and the radiation shield. (b) Dependence of the holder temperature on heater power.

温度コントローラー (Cryogenic Control System 社製) で構成されている。冷凍機の第2ステージにはホルダーと熱交換器が取り付けられている。ホルダーには温度制御用にヒーターと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冷凍機の第1ステージにつながっている。トラップ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 の円柱型で、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。

まずは、熱交換器と放射シールド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 4(a) にクライオスタット起動後の経過時間に対するホルダーと放射シールドの温度の変化を示す。この時、ヒーターはオフである。ホルダーはクライオスタット起動後およそ 100 分で 5 K に到達し、放射シールドは約 120 分で 50 K に到達した。到達温度、冷却にかかる時間共に実用的な値であり、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。

Figure 4(b) にヒーターへの投入電力に対するホルダーと放射シールドの温度の変化を示す。ホルダーの温度はヒーター電力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可能である。放射シールドはホルダーの温度にかかわらず、おおよそ 50 K であった。

Figure 5 に本研究用に製作した LPT を示す。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^+ イオンとする。LPT 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。



Figure 5: The constructed ion trap.

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場印加用の End 電極の長さは 18 mm である。ER 電極と End 電極は絶縁のために 0.5 mm の間隙を持って設置してある。

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い冷却効率が低下する。これを防ぐため、LPT も冷却する。さて、 Ar^+ は中性の Ar ガスを真空容器内に導入して電子ビーム衝撃法により生成する。Ar ガスの融点は 83.8 K であり、LPT の温度をこれより下げてしまうと Ar ガスが電極に氷着することになる。そこで、LPT と 50 K の放射シールドを熱伝導体で繋ぐことで冷却しつつ、LPT に設置したヒーターで加熱することで適切な温度に制御する。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、その表面を金でメッキしてある。四重極電極を保持するマウントは、絶縁体であるが熱伝導率が大きな窒化アルミで製作した。

LPT と放射シールドを繋ぐ熱抵抗が小さければ、LPT の到達温度は放射シールドの温度に近づくが、小さすぎると LPT を温めるのに大きな電力が必要になる。従って、適切な熱抵抗値を選ぶ必要がある。これを決定するために LPT への熱流入量を評価する。以下では簡単のために LPT 内部の温度は一樣であると仮定した。

LPT へのヒーター以外からの熱流入として放射伝熱、電極への給電のための電線からの熱伝導、LPT を支える支柱からの熱伝導がある。まずは放射による伝熱を評価する。放射伝熱を抑えるには、LPT の周りにも放射シールドを設置すれば良い。ただし、放射シールドで覆ってしまうと LPT へのアクセスが悪くなるので、今回はこれを設置しない方向で検討する。放射伝熱を正確に評価す

るには LPT と真空容器の形状を正確に考慮する必要がある。ここでは、簡単のために LPT の表面積と真空容器の表面積を大雑把に評価し、この表面積の同心球殻と考えて近似する。この場合、放射伝熱量は以下の式で表される [5]。

$$Q_{\text{rad}} = \sigma(T_1^4 - T_2^4)A_1 \frac{1}{\frac{1}{\varepsilon_1} + \frac{A_1}{A_2} \left(\frac{1}{\varepsilon_2} - 1\right)} \quad (3)$$

ここで、 σ はステファン - ボルツマン定数、 T は温度、 A は表面積、 ε は放射率である。添字の 1 は高温側、2 は低温側であり、それぞれ真空容器側、トラップ側となる。金属の放射率は温度依存性があり、多くの金属では $\varepsilon = CT^{0.67}$ と近似できる [6]。室温での放射率は LPT、真空容器ともに 0.04 とした [6]。

次に熱伝導による伝熱を考える。断面積が S 、長さが L 、熱伝導率が λ の材料の一端を高温 T_H 、反対側を低温 T_L としたとき、高温側から低温側への伝熱量は次式で表される [5]。

$$Q_{\text{cond}} = \frac{S}{L} \int_{T_L}^{T_H} \lambda(T) dT \quad (4)$$

従って伝熱量を抑えるには断面積を小さく、経路を長くし、熱伝導率の小さい材質を使う必要がある。Equation (4) の右辺の積分を $T_L = 4 \text{ K}$ として実行した結果 (熱伝導積分値) が、低温でよく使われる材料に関しては表として与えられている。これを用いると計算が簡単になる [5,6]。

さて、導線にはもちろん金属を用いる必要がある。一般に金属の電気伝導率と熱伝導率は比例関係にあるので、熱抵抗を大きくすると必然的に電気抵抗も大きくなる。LPT の場合、電極は真空中に絶縁されて設置してあり電流は僅かし流れないので、電気抵抗はある程度大きくても問題ない。直径 0.5 mm の SUS 線を導線として採用する。一方、支柱は LPT を支えるためにある程度の強度が必要であるが導電性は必要ない。今回は強度、耐寒性、価格の観点から、サバゴン社が販売するポリイミド系樹脂の MELDIN7001 を採用した。ただし、MELDIN7001 の熱伝導率は室温での値 (0.34 W/m·K [7]) しか公開されていないので温度依存性は無視して計算した。

Figure 6(a) に LPT への熱流入量を LPT の温度の関数として示す。この温度範囲においては LPT への伝熱は大きい方から、放射、支柱からの熱伝導、導線からの熱伝導である。合計伝熱量の最大値はおおよそ 0.3 W であり、冷凍機の 1st ステージの冷却能力に比べ十分に小さく抑えられている。

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 1st 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 に振動が伝わってしまう。これでは実験上、不具合が多い。そこで、振動が LPT に直接伝わらないように、LPT と放射シールドを断面積 1.25 mm²、長さ 150 mm の銅編線で接続する。Figure 6(b) に LPT に設置したヒーターへの入力電力に対する LPT の温度を示す。 N_c は銅編線の本数である。ヒーターには温度コントローラーから最

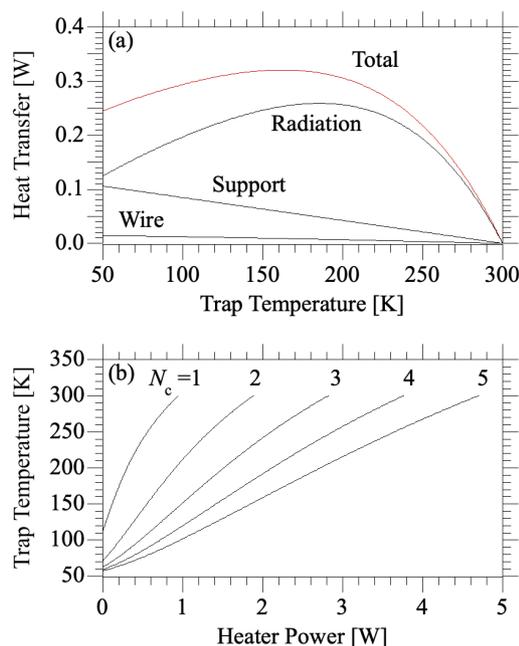


Figure 6: (a) Dependence of heat transfers into the trap on temperature. (b) Trap temperature vs. heater power. N_c indicates the number of the thermal conductor connected the trap to the thermal shield.

大 18 W まで電力を供給できる。銅網線の本数を 3 から 5 本程度にすれば、これよりも十分に少ない電力でトラップの温度を 60 K から 300 K の範囲で制御できる。

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。次世代加速器の研究のためにはより高密度なプラズマが必要であり、そのためには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プラズマ冷却法の一つである。現在、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中である。その進捗状況は以下の通りである。

1. 室温の He ガス導入実験により、バッファガス冷却で同じイオン数でもチューンデプレッションを小さくできることを確かめた。
2. バッファガス冷却の到達温度をさらに下げるために、クライオスタットを用いた低温 He ガス導入装置を製作中である。
 - (a) 熱交換器を 2nd ステージにマウントし、ヒーターで温度調整を行うことにより、その温度を 5K から 300K の範囲で制御できることを確かめた。
 - (b) トラップ本体も冷却するために、1st ステージに熱的に接続してヒーターで温度調整を行えるように製作した。設計上は、その温度を 60K から 300K の範囲で制御できる。

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 485, 244 (2002).
- [2] <https://beamphys.hiroshima-u.ac.jp>
- [3] K. Izawa, K. Ito, H. Higaki, H. Okamoto, J. Phys. Soc. Jpn. 79, 124502 (2010).
- [4] K. Ito, T. Masuda, H. Higaki, H. Okamoto, J. Phys. Conf. Ser. 1350, 0126 (2019).
- [5] 萩原宏康編, 低温工学概論, 東京電気大学出版局, 1999.
- [6] 低温工学協会編, 超伝導・低温工学ハンドブック, オーム社, 1993.
- [7] <https://www.saint-gobain.co.jp/jp/plastics/product/polymer>