

令和 6 年 6 月 10 日現在

機関番号：15401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2021～2023

課題番号：21H03737

研究課題名(和文) 高品位ビームの実験的研究への応用を目指した低温イオンプラズマの実現

研究課題名(英文) Production of cold ion plasma for studying dynamics of high quality beams

研究代表者

伊藤 清一 (Ito, Kiyokazu)

広島大学・先進理工系科学研究科(先)・助教

研究者番号：70335719

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 13,100,000円

研究成果の概要(和文)：線形ポールトラップ(LPT)に捕捉されたイオンプラズマと加速器の四重極収束系を伝播するビームとは空間電荷効果まで含めても物理的に等価なシステムである。従って、LPTに捕捉したイオンプラズマを用いてビームの諸問題に関する系統的な実験を行うことができる。ただし、次世代加速器で実現が期待される空間電荷効果が支配的なビームの挙動を調べるには、イオンプラズマの位相空間密度を今よりも高くする必要があり、そのためにはイオンプラズマの冷却が必須である。本課題ではイオンプラズマ冷却用の低温ヘリウムガス導入装置付きのLPTシステムを開発し、実際にイオンプラズマが冷却されることを確かめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

荷電粒子を加速したいわゆるビームは基礎科学分野以外にも医療や産業応用などの幅広い分野で利用されており、現代の生活を支える重要な基盤ツールの一つとなっている。様々な分野における次世代技術の開発のためにはより高性能な(=高位相空間密度の)ビームが必要とされている。ビームの高性能化のためには系統的な実験によりその挙動をより深く理解する必要がある。しかし、加速器は非常に高価であり、おいそれと実験することはできない。本課題で製作した実験装置を用いて得られる空間電荷効果が支配的なビームの挙動に関する知見は、次世代・次々世代の高性能加速器設計に関する重要な指針を与える。

研究成果の概要(英文)：A charged particle beam traveling in a quadrupole focusing channel is physically almost equivalent to an ion plasma confined in a linear Paul trap (LPT). Its means that we can conduct a systematic experimental study of beam stability with the LPT. The density in the phase-space of an ion plasma in S-PODs is lower than that of beams in advanced linear accelerators. To study dynamics of these space-charge dominated beams, a high phase-space density ion plasma is required. Ion cooling is absolutely essential for creating a high density 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. It is desirable to use the low temperature buffer-gas to produce a high phase-space density ion plasma. The S-POD system with a buffer gas cooling system have been developed in this study. It is also experimentally verified that the ions are cooled further by cold buffer gas.

研究分野：ビーム物理

キーワード：荷電粒子ビーム イオンプラズマ 空間電荷効果 バッファガス冷却

1. 研究開始当初の背景

加速した荷電粒子を局所化したものが荷電粒子ビーム(以下、ビーム)であり、元々は基礎物理実験用のツールとして開発された。しかし、現在では化学、工学、生物学、医学等の幅広い分野で利用されており、科学技術はもとより生活を支えるための重要な基盤ツールの一つとなっている。ビーム利用の多くの分野では、狭い空間に運動量の揃った多量の荷電粒子を集中させる、即ち、より低温で高密度なビームが望まれている。しかし、低温・高密度を追求すると位相空間密度が高くなり、クーロン相互作用に起因する様々な非線形現象(空間電荷効果)が顕在化する。一般的に空間電荷効果はビームを不安定化する方向に働く。つまり、ビームの高品位化を目指すには、空間電荷効果がビームの安定性を与える影響を深く理解する必要がある。しかし、実際の加速器を用いてビームの挙動を広いパラメータ領域に渡り系統的に実験することは、様々な制約から困難である。また、ビームが従う方程式系は非常に複雑であり、解析的に自己無撞着な解を得ることは実質的に不可能である。そのためこの種の研究はコンピューターを駆使した数値計算に頼らざるを得ないのが現状である。しかしながら、計算機の性能による制限のためにある種の近似を導入せざるをえず、その精度には自ずと限界がある。

ビームと同様に単一の荷電粒子で構成される系に非中性プラズマがある。非中性プラズマは、通常、電場または磁場により荷電粒子トラップ中に捕捉する。荷電粒子トラップに捕捉した非中性プラズマの運動と重心系で観測したビームの運動は空間電荷効果まで含めて物理的に等価である[1]。従って、荷電粒子トラップを用いると加速器を使わずにビーム物理、特にビーム伝送路においてビームの安定性を阻害する可能性のある主要な現象のいくつかについて、の実験的研究が可能となる。荷電粒子トラップを用いた実験には、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。これまでに研究代表者等は線形ポルトラップ(以下、LPT)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。

加速器分野で使われる空間電荷効果の強さを表す指標の一つにチューンデプレッション η がある。これは外場が作る閉じ込め力とクーロン斥力により相殺された実効的な閉じ込め力の比の関数であり、高温・低密度の極限では1に、低温・高密度の極限では0となる。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。通常の 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する。これまでの実験では最大で 1×10^7 個の Ar^+ イオンを捕捉し、このとき η は 0.85 に達する。これは現存する円形加速器中を周回するビームよりもはるかに小さい(位相空間密度が高い)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(位相空間密度が低い)。従って、これらの位相空間密度が高いビームの挙動を調べるには、より位相空間密度の高い非中性プラズマを LPT に生成・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極めて困難である。一方、S-POD の Ar^+ プラズマの温度は典型的には $T_i = 3,000 \text{ K}$ 程度と高いので、冷却による高密度化が期待できる。1次元の理論では、イオンプラズマの温度を T_i 、線密度を n_e とすると η は次式で表される[1]。

$$\eta = \sqrt{1 - \frac{1}{1 + \frac{2k_B T_i}{n_e R_p M_i c^2}}}$$

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 はイオンの質量である。図に S-POD にイオンを捕捉した場合の T_i と η の関係を示す。ここで、イオンプラズマの軸方向長さは 30 mm と仮定した。 $N_i = 1 \times 10^7$ 個のイオンを捕捉した場合は、室温程度まで冷却できれば $\eta = 0.3$ となり、現存するいかなる加速器よりも位相空間密度の高い状態を達成できる。

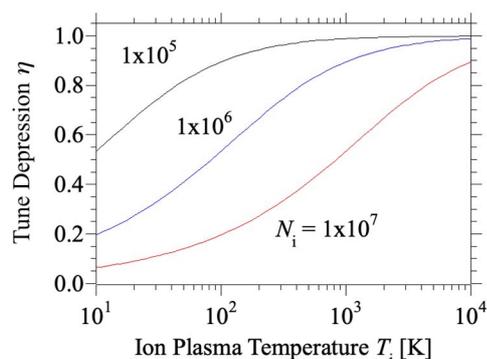


図 1: イオン温度とチューンデプレッションの関係

2. 研究の目的

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。イオンプラズマの代表的な冷却法の一つに「バッファガス冷却法」がある[2]。これはイオンとイオンよりも質量の軽い低温のガス(バッファガス)を混合し、衝突を介して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。原理的にはバッファガスの温度程度までイオンプラズマの温度を下げる事が可能である。従って、液体 He 温度に近い冷たい He ガスをバッファガスとして用いればイオンプラズマの温度を 300 K 以下まで冷却することも可能であると考えられる。

そこで、本課題では、以下の2点を主たる目的とした。

- (1) 10K 付近まで冷却した低温の He ガスをバッファガスとして導入できる装置を装備したイオントラップシステムを開発する。
- (2) 低温の He ガスを導入した状態でイオンプラズマの特性を測定し、冷却効果を確認する。

3. 研究の方法

位相空間密度の高いイオンプラズマを生成するにはイオンプラズマの温度を出来るだけ下げる必要があり、そのためにはバッファガスの温度は出来るだけ低い方が良い。そのためにに本課題で設計したバッファガス冷却系と LPT の模式図を図 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。

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、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。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。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、LPT は 100 K 程度までしか冷却しなくて良く、放射シールド (~50 K) と適切な太さの柔らかい銅編線で接続することで冷却する。LPT のベースにはヒーターと白金測温体を設置してあり、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、電極はアルミニウム製とし、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する。

生成した Ar⁺イオンを LPT 内に任意の時間捕捉した後、LPT の軸方向外側に設置したマイクロチャンネルプレート (MCP) へと排出し、イオン数を計測する。LPT 中に残存したイオン数からイオンプラズマの安定性がわかる。理想的には、Ar ガスはイオン生成時のみ、He ガスは冷却時のみ真空容器に導入するのが良い。しかし、本課題で製作した S-POD はガス流量 (真空圧力) を手動バルブで制御しているため、このような制御は困難である。そこで、本課題ではイオン生成から測定まで同じ流量のガスを導入している。

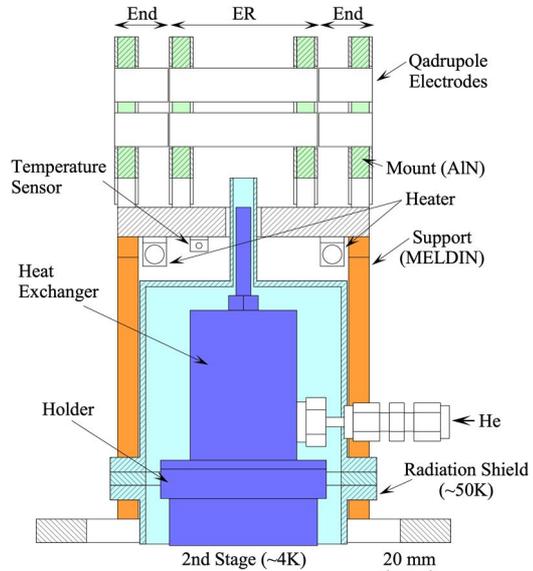


図 2: バッファガス冷却器付き LPT

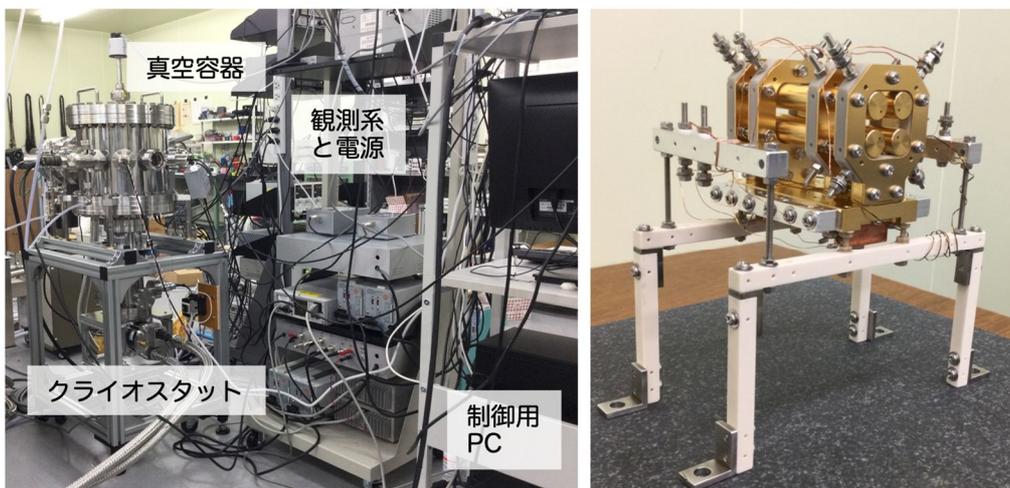


図 3: 製作した S-POD と LPT

4. 研究成果

(1) 低温バッファガス導入装置付き S-POD の製作と特性試験[3, 4]

図3の左パネルに本課題で開発したバッファガス冷却機付き 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で排気する。ベース圧力はベキングなしで 3×10^{-8} Pa である。図3の右パネルは製作した LPT である。前述のように LPT は放射シールドと熱的に接続することで冷却するが, LPT への熱流入が大きいと到達温度を低くできない。LPT への熱流入の最大の経路は LPT を保持する支柱である。当初, この支柱を熱伝導率の小さなカプトン系の樹脂で製作した。その断熱性能は十分であったが, 反面, ガス放出が多くベース真空圧力が下がらなかった。試行錯誤の結果, 最終的には強度が必要な部分はセラミックスの中でも熱伝導率が比較的小さなマセライトで作成し, 強度が必要でない部分を PEEK で断熱する構造とした。この構造では, クライオスタットを動作させると熱交換器は 100 分程で 4.6 K に, LPT は 450 分程で 85 K を達する。これは本課題で目標とした仕様を十分に満たしている。

図4(a)に熱交換器に設置したヒーターへの投入電力 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 以下の精度で制御できることを確認した。この間, 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 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 の温度変化を図4(b)に示す。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, その間, 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。

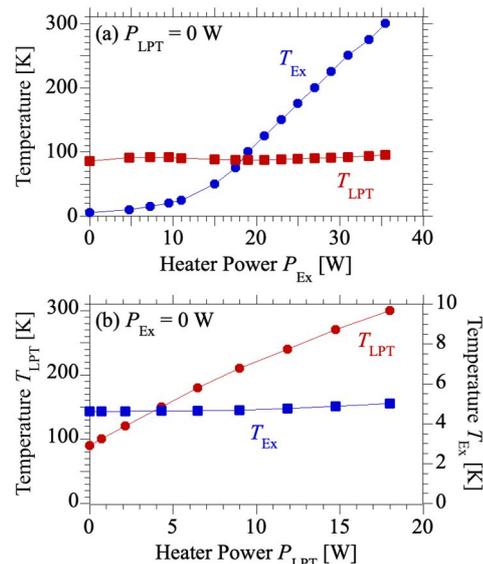


図4: 投入電力による温度調整範囲

(2) バッファガス導入時のイオンプラズマの閉じ込め特性

イオンプラズマが冷却されたかどうかを確かめる最も簡便な方法は閉じ込め時間 ($1/e$ 寿命) を測定することである。一般に, イオンプラズマの温度が下がると実空間広がりも小さくなり, また個々の粒子の運動エネルギーも減るために衝突による軌道変化は小さくなる。そのため電極にしようとする確率が下がり, 閉じ込め時間は長くなる。

図5にLPTに捕捉したイオン数の時間変化の一例を示す。記号は測定条件の違いを表している。バッファガスを導入していない場合に比べ, バッファガスを導入した場合は時間経過によるイオン数の減少は少ない。また熱交換器とLPTの温度を下げるとその減少はより緩やかになる。単純にはイオン数は時間と共に指数関数的に減少すると予想されるが, 本実験では途中で傾きが変わっており, 複数の時定数が存在することを示唆している。もっとも簡単な二つの指数関数の和と考え, 次の式によりフィッティングを行なった結果を図中に実線で示している。

$$N_i(t) = N_S \text{Exp}\left(-\frac{t}{\tau_S}\right) + N_L \text{Exp}\left(-\frac{t}{\tau_L}\right)$$

ここで, 添字 S は短い時間成分を, 添字 L は長い時間成分を表している。フィッティングの結果は実験データとよく一致しており, 上式は妥当である。なお, 短い時間成分はイオン捕捉領域の端部でイオン化されて捕捉された粒子による速い損失と考えられるので, 以下では主に長い時間成分について考える。

図6(a)に熱交換器, LPT ともに室温における閉じ込め時間 τ の He ガス圧依存性を示す。フィッティングの標準誤差は非常に小さく, エラーバーとして図中に記入してあるが記号に埋もれている。 τ_S は P_{He} によらずほぼ一定である。一方, $P_{He} = 0$ Pa での τ_L は 4.6 s であるが, P_{He} の増加に伴い τ_L は長くなり, $P_{He} = 2 \times 10^{-5}$ Pa で最長の 12.5 s となる。すなわち He ガス導入前により τ_L は 2.7 倍に伸びており, バッファガスによる冷却を明確に

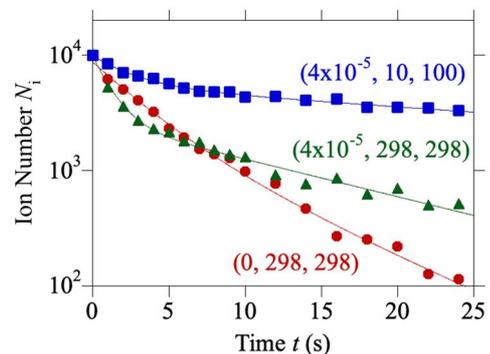


図5: 捕捉イオン数の時間変化。括弧内の数字は測定条件であり, それぞれ He ガス圧 P_{He} [Pa], 熱交換器温度 T_{Ex} [K], LPT 温度 T_{LPT} [K] である。いずれの実験も Ar ガス圧は $P_{Ar} = 1 \times 10^{-5}$ Pa である。

確認できた。

図 6(b)には熱交換器を 10 K に、LPT を 100 K とした時の閉じ込め時間の He ガス圧依存性を示す。数点を除いて、フィッティングの標準誤差は非常に小さい。この場合も τ_s は P_{He} によらずほぼ一定であるが、熱交換器と LPT が室温の時に比べ、2 倍程度に伸びている。一方、 τ_L は P_{He} の増加に伴い単調に増加していき $P_{\text{He}} = 8 \times 10^{-5}$ Pa では 81.8 s に達する。これは、熱交換器、LPT とともに室温でバッファガス導入なし(即ち、従来の S-POD 実験と同条件)の τ_L の実に 18 倍である。このことから冷却した He ガスを用いた方がイオンプラズマの冷却効果は明らかに大きいことが確認できる。

(3) 問題点とその改善、今後

前述のように従来の S-POD 実験では LPT に捕捉できるイオン数の最大値は 1×10^7 個であった。しかし本課題で新たに製作した LPT では、サイズや構造はもちろん電源や測定系の構成などクライオスタット周辺を除いて従来の LPT と同一であるのに、当初は、 1×10^4 個程度のイオンしか蓄積することができなかった。本課題の根幹は高い位相空間密度のイオンプラズマを作ることであり、イオン数が 3 桁も少ないのは非常に大きな問題であった。様々な手を尽くした結果、最終年度の終わりごろによようやく改善に成功し、現在は 1×10^7 個のイオンを蓄積できるようになった。

このため、当初の目的の一つであったイオンプラズマの集団振動の励起実験と集団振動によるビーム不安定化条件の調査を行うことはできなかった。しかし、上述のように低温バッファガス導入装置付き S-POD の製作とその効果は確認することができた。本課題で製作した装置を用いて、今後も高位相空間密度ビームの安定性に関する詳細な実験的研究を続ける予定である。

(4) まとめ

研究代表者等はこれまでに LPT に捕捉したイオンプラズマを用いた加速器ビームの実験的シミュレーターを開発してきた。最先端の大強度線形加速器や次世代加速器においては今以上に位相空間密度が高まり空間電荷効果もより強く発現しその挙動は複雑化する。そのためイオンプラズマによるビームの実験的シミュレーションは今以上に重要性を増すと考える。ただし、このような高位相空間密度のイオンプラズマを生成・捕捉するにはイオンプラズマの冷却が必須である。本課題ではイオンプラズマ冷却用の低温 He ガス導入装置付きの LPT システムを開発した。以下に結果をまとめる。

He ガス冷却用熱交換器の到達温度は 4.6 K を、LPT の到達温度は 85 K を達成した。これは本課題で要求する性能を十分に満たしている。

熱交換器と LPT 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することができる。その安定性は 0.01 K 以下であり、十分な安定性を有している。

イオンプラズマの閉じ込め時間は室温の He ガスを導入すると 2.7 倍に伸びた。これは He ガスによりイオンプラズマが冷却されたことを示している。

10 K のヘリウムガスを導入すると、閉じ込め時間は 18 倍に増加した。冷却した He ガスを用いた方がイオンプラズマの冷却効果が大きいことを確認した。

本課題で開発・実現した低温 He ガス導入装置付きの LPT システムと冷却イオンプラズマを用いた系統的な実験と理論・数値計算との定量的な比較から空間電荷効果がビームの挙動に及ぼす影響を明らかにすることが期待される。

<引用文献>

- [1] H. Okamoto, Y. Wada, R. Takai, Nucl. Instrum. Method Phys. Rev. Sect. A 485 (2002), p.244.
- [2] P. K. Ghosh, Ion traps (Oxford University Press, Oxford, 1995).
- [3] 伊藤清一, 第 19 回日本加速器学会年会プロシーディングス。
- [4] 伊藤清一, 第 20 回日本加速器学会年会プロシーディングス。

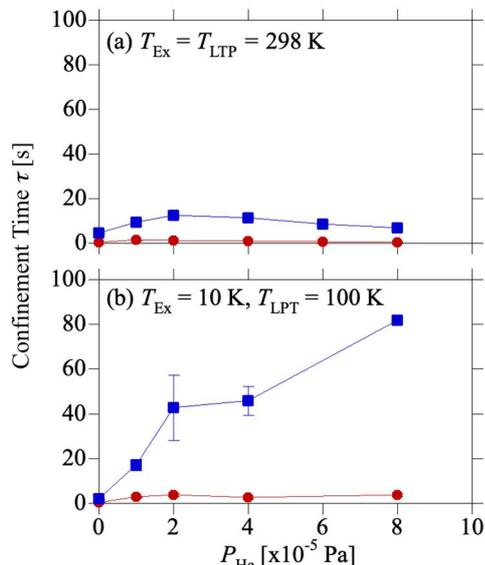


図 6: He ガス導入によるイオンプラズマ閉じ込め時間の変化。丸は τ_s で、四角は τ_L である。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計6件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 伊藤清一
2. 発表標題 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
3. 学会等名 第20回日本加速器学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤清一, 川田恵梨乃, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 ビーム物理研究用イオントラップへのバッファガス冷却システムの導入
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 川田恵梨乃, 伊藤清一, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 大強度ビーム実験に向けたイオンプラズマのバッファガス冷却実験
3. 学会等名 日本物理学会 第78回年次大会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤清一, 川田恵梨乃, 檜垣浩之, 岡本宏己
2. 発表標題 低温バッファガスによるイオンプラズマ冷却実験
3. 学会等名 第40回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2023年

1. 発表者名 伊藤清一
2. 発表標題 パuffa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
3. 学会等名 第19回日本加速器学会年会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 伊藤清一
2. 発表標題 イオントラップ用低温パuffaガスシステムの開発
3. 学会等名 第39回プラズマ・核融合学会年会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------