

DEVELOPMENT OF A BEAM DYNAMICS SIMULATOR “S-POD”

Ryota Takai¹

High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki, 305-0801

Abstract

A non-neutral plasma trap system, which is called “S-POD (Simulator for Particle Orbit Dynamics)”, has been developed to investigate various collective effects in space-charge-dominated beams. S-POD is designed and constructed on the basis of the idea that a charged-particle beam propagating through a periodic magnetic lattice is physically almost equivalent to a single-species plasma confined in a radio-frequency quadrupole trap (Paul trap). The main components of this tabletop apparatus include a “multi-section” Paul trap, AC and DC power supplies, an ultrahigh-vacuum system, an ion source, plasma diagnostic systems, and a laser cooler for the control of plasma density. In the present paper, brief descriptions are given of these components, how S-POD works, and a recent result of coherent resonance experiments.

ビーム物理研究用プラズマトラップシステム “S-POD” の開発

1. はじめに

近年、加速器で生み出される荷電粒子ビームの利用分野は、既に長い歴史を持つ基礎物理や医療分野に留まらず、拡大の一途を辿っている。それに伴い、ビームの強度や質に対する要求も高まってきた。このようなビームの大強度化・高品質化が進むと、ビームを構成している粒子間のクーロン相互作用が顕著になり、ビーム全体の挙動に影響を及ぼすようになる。“空間電荷効果”と総称されるこの複雑な非線形集団現象は、古くから加速器物理における研究テーマのひとつとして認識されているが、その性質上、系統的な研究が難しい厄介なテーマでもある。実際のビームを用いて実験的に研究するのが理想であるが、相対論的な速度で運動しているビームを精度良く観測すること自体が難しい上に、加速器やビームの基本パラメータを広範囲に調整するのは不可能と言える。また、予期せぬビームロスにより加速器コンポーネントを放射化してしまう恐れもある。それゆえ、この種のテーマの研究には、多粒子シミュレーションのような数値実験的手法が多用される。しかしながら、粒子間相互作用の厳密な計算には膨大な時間を要するため、常にある種の近似的なモデルを導入せざるを得ない。空間電荷効果に関するより信頼性の高い情報を得るには、これら従来のアプローチとは本質的に異なる、新たな研究手法の開発が必須なのである。

そこで提案されたのが“高周波四重極プラズマトラップ（線形ポールトラップ）”を用いたビーム物理研究である^[1,2]。高周波四重極プラズマトラップとは、互いに平行に配置した4本の円柱状電極（四重極電極）に高周波電圧を、それらの両端に配置した2枚の板状電極（端板電極）それぞれに直流電圧を印加することにより、限られた空間内に多数個の

イオン（非中性プラズマ）を捕獲する装置である。次章で示すとおり、このトラップ中に捕獲した非中性プラズマは、重心系で観測した荷電粒子ビームと物理的にほぼ等価な集団運動を示す。したがって、プラズマトラップを駆使すれば、巨大で高価な加速器に頼らずとも、荷電粒子ビームの集団運動を実験的に研究できる可能性がある。以下では、この斬新な実験コンセプトを中心に、開発したシステムの概要、最近の実験結果などについて述べる。

2. 荷電粒子ビームと非中性プラズマ

ここでは簡単のため、進行方向に一様分布した2次元な連続ビームを例に採り、荷電粒子ビームと非中性プラズマの物理的等価性を示す。空間電荷のクーロンポテンシャルを ϕ とすると、線形輸送系中を伝播する荷電粒子ビームのハミルトニアンは

$$H_{\text{beam}} = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2} + \frac{1}{2}K(s)(x^2 - y^2) + \frac{q}{my^3(\beta c)^2}\phi \quad (1)$$

と書ける。ここで、 m と q は構成粒子の質量と電荷、 c は光速、 β と γ はローレンツ因子である。独立変数は設計軌道に沿って測った距離 s であり、 $K(s)$ は四重極磁石の磁場勾配に比例する周期関数である。横方向運動量 (p_x, p_y) は基準粒子の運動量によってスケールされている。 ϕ は良い近似で次の2次元ポアソン方程式を満足する。

$$\left(\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} \right) \phi = -\frac{q}{\epsilon_0} \iint f dp_x dp_y \quad (2)$$

ϵ_0 は真空の誘電率である。粒子間のクーロン衝突が無視できる場合、4次元位相空間における分布関数 f は、次のブラソフ方程式に従う。

¹ E-mail: ryota.takai@kek.jp

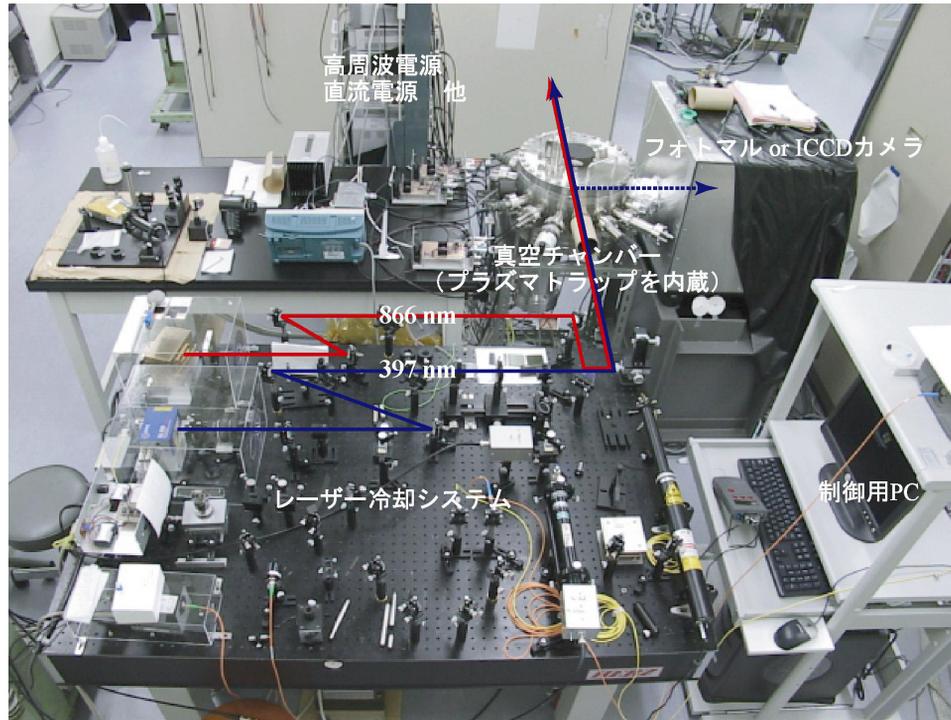


図1 : S-PODの全景

$$\frac{\partial f}{\partial s} + [f, H_{\text{beam}}] = 0 \quad (3)$$

式中の[,]はポアソンの括弧式を表す。式(1)～(3)は閉じた方程式系を成しているため、これらを連立して解くことにより、ビームが示す様々な集団運動を自己充足的に調べることができる。

一方、高周波四重極トラップに捕獲された非中性プラズマの集団運動は、次のハミルトニアンで記述される。

$$H_{\text{plasma}} = \frac{p_x^2 + p_y^2}{2} + \frac{1}{2} K_{\text{rf}}(\tau)(x^2 - y^2) + \frac{q}{mc^2} \phi \quad (4)$$

プラズマはトラップの軸方向に一様分布していると仮定し、独立変数は $\tau = ct$ とした。 $K_{\text{rf}}(\tau)$ は四重極電極に印加された高周波電圧の振幅に比例する周期関数である。式(4)は、荷電粒子ビームに対するハミルトニアン(1)と係数を除いて全く同じ形をしている。加えて、プラズマのクーロンポテンシャル ϕ はポアソン方程式から導かれ、分布関数 f はやはりブラソフ方程式を満足する。したがって、これら2つの力学系は、物理的にほぼ等価であると結論することができる。

荷電粒子ビームが示す集団運動を、トラップ中の非中性プラズマで再現できることの意義は極めて大きい。これまで、その建設に広大な土地と巨費を要する加速器を用いて行わざるを得なかった研究の一部が、研究室単位で製作・維持できるプラズマトラップシステムで可能になるわけである。その際、ラティス構造やチューンといった加速器の基本パラメータは、四重極電極に印加する高周波電圧のバ

ターンや振幅を変えることにより、自由に設定できる。また、非中性プラズマの冷却法として既に確立された技術である“ドップラーレーザー冷却法^[3]”を導入すれば、想定するビームの位相空間密度(エミッタンス)をほぼフルレンジでコントロールすることができるだけでなく、冷却の過程でプラズマから等方的に放出される光子(レーザー誘起蛍光)を利用した高精度・高分解能な非破壊観測も可能になる。当然ながら、捕獲した粒子の運動は非相対論的であるため、粒子損失による機器の放射化や被曝の可能性も全くない。プラズマトラップは、あくまで重心系におけるビームを模擬するものであるから、重心の運動が不可欠な“航跡場効果”や“放射光生成”といった現象まで取り扱うのは困難であるが、冒頭で述べたような空間電荷効果の研究に対しては非常に強力な研究手段となり得る。

3. S-PODの概要

このようなアイディアに基づき、ビーム物理研究専用の非中性プラズマトラップシステムを設計・製作した^[4,5]。図1にシステムの全体写真を示す。このシステムは“S-POD (Simulator for Particle Orbit Dynamics)”と呼ばれ、主に次のような要素から構成されている。現在は同様の構成の実験システムがもう1組稼働しており、計2組で並行して各種実験を行っている。

3.1 機能分離型線形ポールトラップ

システムの中心である線形ポールトラップの写真と概念図を図2に示す。電極のサイズや形状は、実験パラメータの可変範囲や形成される閉じ込めポテ

ンシャルの様子、プラズマの冷却効率などを考慮して最適化してある。このトラップの構造上の特徴は、プラズマの捕獲領域が“イオン化領域 (IS)”と“実験領域 (ER)”の2つに分割されていることである。IS領域内で生成したプラズマを一旦ER領域に輸送してから実験に使用することで、イオン化システム周りのノイズから観測対象となるプラズマを切り離せるだけでなく、捕獲イオン種の単一化や多重入射によるプラズマの集積が可能となる。2つの捕獲領域をつなぐゲート電極の構造は、トラップの詳細な3次元構造まで考慮し得る粒子軌道シミュレーションの結果を踏まえて設計されており、ほぼ100%のプラズマ輸送効率を実現している。捕獲粒子数としては、IS領域だけで 10^7 個を記録した。これは、ビーム密度の指標である“チェーン降下率”の値に換算するとおおよそ0.8であり、空間電荷効果の実験には十分なレベルと言える。

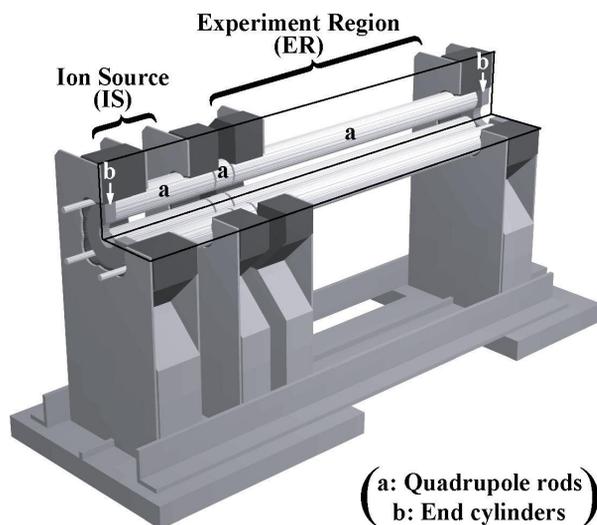
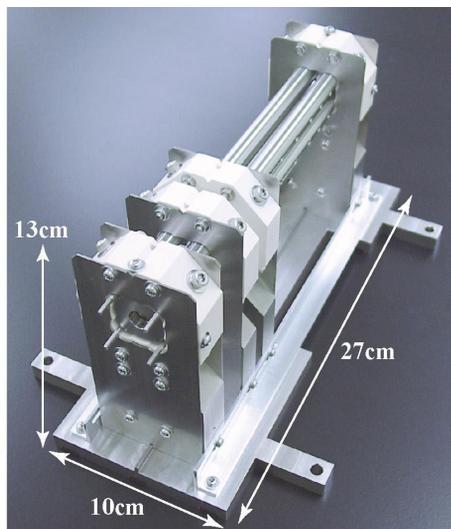


図2：機能分離型線形ポールトラップ

3.2 高周波電源

トラップの特性評価実験などでは、四重極電極に正弦波状の高周波電圧が印加されたが、ビームダイナミクスの研究を念頭に置いた実験では、加速器のラティス構造を模したパルス状の高周波電圧が印加される。S-PODは、既に任意のラティス構造を再現できる高周波電源を備えている。例として、FODOラティスを模した場合の出力電圧波形を図3に示す。

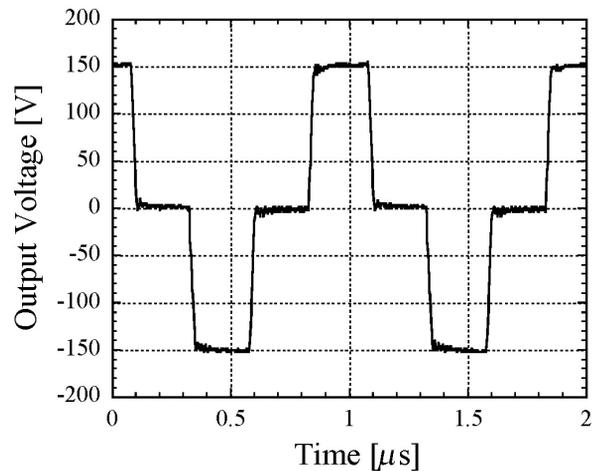


図3：FODOラティスに対応する電圧波形

3.3 電圧制御系

四重極電極に印加する高周波電圧や軸方向のプラズマ閉じ込めに使用する直流電圧の大きさ、およびスイッチングのタイミングを制御する。特に最近では、計測データの取得を含めた一連の実験シーケンスが自動化され、より精密な実験が短時間で遂行可能となっている。

3.4 レーザー冷却システム

前章でも述べたように、捕獲したプラズマの位相空間密度 (エミッタンス) を広範囲にわたって制御するためには、“ドップラーレーザー冷却法”の導入が不可欠である。S-PODには、一価のカルシウムイオン ($^{40}\text{Ca}^+$) の冷却に必要な2台の外部共振器型半導体レーザーと、それらからの光を重ねてトラップ内のプラズマまで導くための光学系が備えられている (図1参照)。レーザー発振の中心波長はそれぞれ397 nmと866 nmであり、スペクトル幅、波長可変範囲、長時間安定度、光強度ともレーザー冷却に必要なレベルをクリアしている。

3.5 超高真空排気系

ポールトラップやイオン化システム、プラズマ検出器などの構成要素は、内径40 cm、高さ20 cmの円筒型をした真空チャンバー内に設置されている。主排気ポンプには、除振対策を施した磁気浮上型のターボ分子ポンプを使用している。長時間のベキングと内容物の材質・構造に対する配慮の結果、

チャンパー内は常に 3×10^{-8} Pa程度の超高真空状態に保たれている。図4に真空チャンパー内の典型的なセットアップを示す。

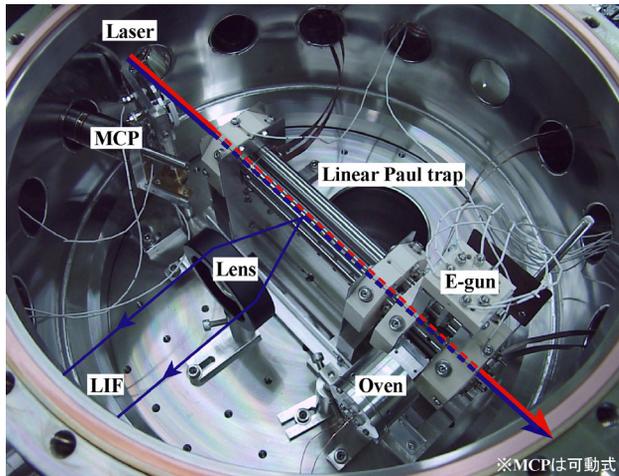


図4：真空チャンパー内セットアップ

3.6 イオン化システム

小型の原子オープンで生成した中性のカルシウム原子ビームと、熱電子放出型の電子銃で得られた電子ビームをIS領域内で交差させ、電子衝撃によりイオンを生成する(図5参照)。必要ならば、ポールトラップが持つ質量選別機能を利用してイオン種の単一化を図る。レーザー冷却の必要がない実験では、真空チャンパー内に窒素ガスやアルゴンガスを所定の圧力になるまで導入し、電子銃のみを動作させることでイオンを生成している。

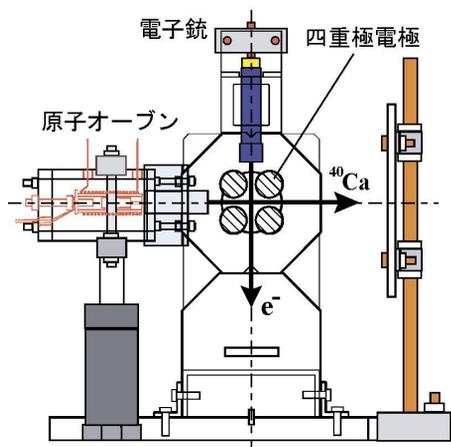


図5：イオン化システムの概念図

3.7 プラズマ計測システム

S-PODでは、2種類のプラズマ計測法を併用している。ひとつは、レーザー冷却の過程で個々のイオンが等方的に発する蛍光を利用したもので、“レーザー誘起蛍光法(LIF法)”^[6]と呼ばれている。蛍

光は、ER領域の側面に設置した平凸レンズで集光され、真空チャンパー外部の光電子増倍管あるいはICCDカメラを使って計測される(図4参照)。レーザーの周波数や入射位置を掃引することにより、捕獲プラズマの運動量分布や空間分布を非破壊的に計測することができる。もうひとつの計測法は、トラップの前後に配置したマイクロチャンネルプレート(MCP)やファラデーカップ(FC)により、捕獲していたイオンの総量を直接的に計測するものである。各検出器の位置やトラップとの間に設置する静電シールドの大きさなどは、3次元粒子軌道シミュレーションの結果を基に最適化されている。最近では、MCP付きの蛍光面を利用し、プラズマの横方向空間分布を計測する手法も取り入れられている^[7]。

4. 最近の実験から

S-PODは現在も改良が進められ、着実にその性能を上げている。ここでは、最近得られた実験結果の中から、“コヒーレント共鳴不安定性”によるストップバンドの観測結果を簡単に紹介する。詳細は、文献[8]を参照していただきたい。

“コヒーレント共鳴”とは、自己クーロン場の影響でビーム全体が示すコヒーレントな振動と、周期的に加えられる外部集束力との間の共鳴現象である。1次元ブラソフ理論によると、コヒーレント共鳴が起こる条件は次のように書ける^[9]。

$$v_0 - C_m \Delta v \approx N_{sp} \cdot \frac{n}{2m} \quad (5)$$

ここで、 v_0 はチューンの設計値、 Δv はインコヒーレントチューンシフト、 C_m は1より小さい正数、 N_{sp} は想定するリングの超周期数、 n と m はそれぞれ任意の正数と共鳴の次数(コヒーレント振動のモードナンバー)である。図6は、実際に図2で示したトラップに一価のアルゴンイオン($^{40}\text{Ar}^+$)からなる非中性プラズマを捕獲して行った、いわゆる“チューンサーベイ”の結果である。この実験では、ラティス周期性の効果を調べるため、 $N_{sp} = 12$ となる基本集束波に $N_{sp} = 3$ となる摂動波を重畳した高周波電圧が使用された。グラフの縦軸は、FCで計測した1ms蓄積後の残存イオン数を表す。式(5)によれば、チューン v_0 が0.75、1.5、2、3の付近で比較的強い低次のコヒーレント共鳴が起こると予測される。実験結果を見ると、確かにこれらの動作点近傍に鋭い不安定領域(ストップバンド)が存在しているのが分かる。イオン損失の発現位置が一樣に右方向へずれているのは、イオン間のクーロン斥力によるチューンシフトの影響である。詳しい解析によると、このチューンシフトの量は、観測されたストップバンドごとに微妙に異なっていることが判明した。これは、式(5)の左辺に含まれている C_m の値が共鳴の次数 m によって異なることを示唆しており、その傾向は理論的な予想と定性的に一致している。

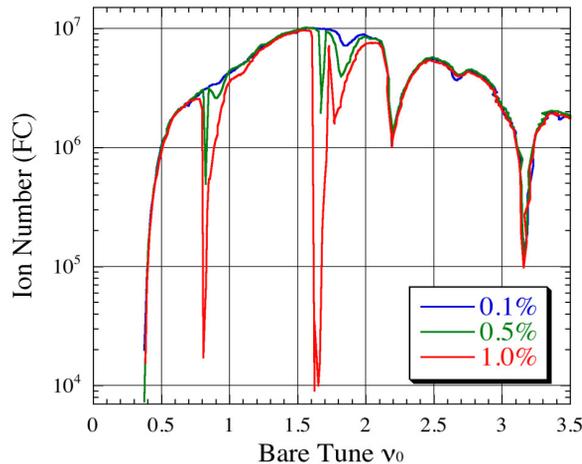


図6：コヒーレント共鳴不安定性の観測結果（図中の凡例は、基本集束波に付加した摂動波の割合を表す）

最後に、最近の特筆すべき成果として、レーザー冷却技術の修得を挙げておく。図7は、S-PODにおいてドップラーレーザー冷却が正しく行われた結果、数mKのオーダーまで冷却されたカルシウムイオンプラズマの2次元画像である。この程度まで熱的な運動が抑制されると、イオン間のクーロン斥力と外部からの集束力が釣り合い、もはや各イオンの位置関係が入れ替わらなくなる。このような状態に至った非中性プラズマは“クーロン結晶”と呼ばれており、原理的にはエミッタンスがゼロの究極の高品質状態である。今後、修得したレーザー冷却技術は、当初の目的通り捕獲プラズマの集積や密度コントロールに利用される他、クーロン結晶化したビームである“クリスタルビーム^[10]”の安定性に関する実験的研究や、小型の線形ポールトラップを用いたナノイオンビーム源の研究開発^[11]に利用されることになる。

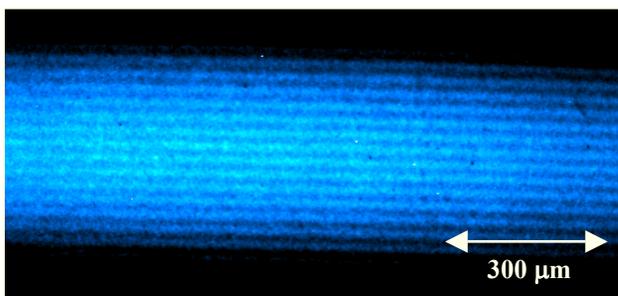


図7：数千個のカルシウムイオンからなるクーロン結晶（ICCDカメラにより撮影）

5. まとめ

荷電粒子ビームと非中性プラズマの物理的等価性に基づき、ビーム物理研究に最適化した非中性プラズマトラップシステム“S-POD”を開発した。S-PODは、言わば「数値シミュレーションの自由度を備えた実験的ビームシミュレータ」であり、その有

用性は十分に検証済みである。今後も、このシステムから“コヒーレント共鳴不安定性”や“ビームハロー形成”といった空間電荷効果の理解に資する情報が続々と発信されることを期待している。

謝辞

S-PODの開発は、私が広島大学ビーム物理研究室に在籍していたときに一貫して手がけたテーマです。同研究室の皆さんには、公私にわたって大変お世話になりました。特に、この実験の発案者であり、私の指導教官でもあった岡本宏己先生には、日々の実験から論文の執筆に至るまで、本当に多岐にわたりお世話になりました。伊藤清一先生には、実験で使用する電子回路の設計・製作をはじめ、直接的なご指導を数多くいただきました。現在のS-POD実験で主力となっている猪澤健二君、大坪俊介君には、最近の開発状況や実験データを把握する上で色々のご協力いただきました。

また、研究室外部の方々にも大変お世話になりました。京都大学化学研究所の岩下芳久先生には、高周波電源の設計・製作において、多大なご助力をいただきました。大阪大学大学院の占部伸二先生、豊田健二先生、ならびに名古屋大学大学院の荒巻光利先生には、レーザー冷却システムを構築する上で大変多くのご指導・ご助言をいただきました。高エネルギー加速器研究機構の飛山真理先生、吉本伸一先生には、3次元電磁場解析コードを使用するにあたって大変お世話になりました。同機構の小林幸則先生には、この賞へ応募するきっかけを与えていただきました。

この場を借りて、皆様に心から感謝の意を表します。

参考文献

- [1] H. Okamoto and H. Tanaka: Nucl. Instrum. Meth. A **437** (1999) 178.
- [2] H. Okamoto, Y. Wada and R. Takai: Nucl. Instrum. Meth. A **485** (2002) 244.
- [3] D. J. Wineland and H. Dehmelt: Bull. Am. Phys. Soc. **20** (1975) 637.
- [4] R. Takai, K. Ito, Y. Iwashita, H. Okamoto, S. Taniguchi and Y. Tomita: Nucl. Instrum. Meth. A **532** (2004) 508.
- [5] R. Takai, H. Enokizono, K. Ito, Y. Mizuno, K. Okabe and H. Okamoto: Jpn. J. Appl. Phys. **45** (2006) 5332.
- [6] K. Muraoka and M. Maeda: *Laser-Aided Diagnostics of Plasmas and Gases* (Institute of Physics Publishing, Bristol, 2001), and references therein.
- [7] K. Ito, K. Nakayama, S. Ohtsubo, H. Higaki and H. Okamoto: Jpn. J. Appl. Phys. **47** (2008) 8017.
- [8] S. Ohtsubo, M. Fujioka, H. Higaki, K. Ito, K. Izawa, M. Kuriki, H. Okamoto and K. Tanaka: Proc. of this conference, WPBDA09.
- [9] H. Okamoto and K. Yokoya: Nucl. Instrum. Meth. A **482** (2002) 51.
- [10] 岡本宏己: *高速イオンビームの結晶化* (現代物理最前線 1, 共立出版, 2000).
- [11] K. Izawa, K. Ito, H. Higaki and H. Okamoto: Proc. of this conference, FPPSA07.