

**科学研究費助成事業 研究成果報告書**

平成 27 年 6 月 16 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011～2014

課題番号：23654085

研究課題名(和文)短パルスレーザープラズマのRF位相直接入射による革新的高性能イオン源

研究課題名(英文)Novel Laser Ion Source by Synchronized Injection to RF Bucket

研究代表者

岩下 芳久(Iwashita, Yoshihisa)

京都大学・化学研究所・准教授

研究者番号：00144387

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：短パルスレーザーの物質照射によって発生するプラズマから、RF加速に適した時間構造にバンチ化したイオンを直接取り出せるとRFQでのバンチャー部等、ビームが低速で空間電荷の影響を受けやすい構造を省くことが出来、イオン加速器の高性能化に結びつく。

照射標的選択や測定方法の開発が課題であったが、照射標的に関しては、当初取り扱いが簡単なため固体を検討したが、生成プラズマの密度が高すぎて有意な結果が得られず、パルスガス弁によるガスジェットに変更した。ガスを照射するレーザーパルスのタイミングと印加RF電場の位相関係を適切に選ぶことにより、バンチ化したイオンを発生点直近に置いた探針で観測し、原理検証に成功した。

研究成果の概要(英文)：Initially bunched ions extracted from short-pulse-laser induced plasma that is synchronized with the RF acceleration phase can eliminate the buncher section of an RFQ and useful for an advanced accelerator design.

Among subjects to be solved, the selection of the irradiation target and R&D on the measurement method were the key issues. As to the irradiation target, solid targets, which are easy for handling, produced plasmas with too high densities and no useful results were obtained. Gas jet target was finally chosen and pulse gas valve using a piezoelectric element was fabricated for the experiments.

With a proper phase relation between laser shot timing and the RF electric field phase, we could observed bunched ions with a probe located close to the production point and succeeded to prove the principle.

研究分野：加速器物理・ビーム物理

キーワード：イオン源 RF レーザーイオン源 加速器 RF位相直接入射 短パルスレーザー RFQ アナログ信号スキャナー

### 1. 研究開始当初の背景

イオン加速器は、素粒子・原子核研究の分野にとどまらず、近年では粒子線癌治療やハイブリッドカーに使用される大電流 IGBT 製造まで、広範な応用分野で利用されるようになってきた。このため、物理研究用の大型且つ複雑な構成を持つ構造からシンプルでより扱い易い汎用加速器への進展が強く望まれている。

レーザーアブレーションプラズマには多価イオンが高密度で含まれており、これによるイオン源開発は I T E P (ロシア) や C E R N (スイス) で大型の予算を組んで行われてきた (Developments at the CERN laser ion source, RSI 69, 2 Feb. 1998, Laser Source of Highly Charged Ions for ITEP Terawatt Accumulator Facility, Proc. EPAC2000, Vienna, Austria, p.551)。現在実用化されているレーザーイオン源は、ナノ秒程度のパルス幅のレーザーにより電場の無い空間でプラズマを生成し、そのまま引き出し領域まで自由膨張させながらドリフトさせる。このプラズマは引出領域に侵入した段階で引出電場により電子が除去され、イオンビームとなる (図 1 参照)。ここで得られるイオンビームの時間構造はプラズマの自由膨張速度と引き出し領域までの距離で決定され、通常数マイクロ秒程度である。

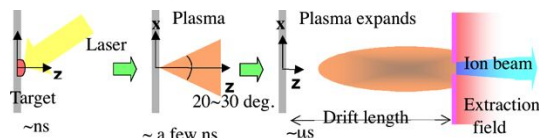


図 1 : 実用化されているレーザーイオン源

現在はこれをそのまま RFQ 型加速管に入射する。RFQ 型加速管はその名の通り、高周波 (RF) で加速を行うので、加速されるビームはバンチ化されている必要がある。一方、前述のレーザーイオン源を含め、ほぼ全ての従来のイオン源はこの高周波周期に比べるとほぼ直流なので、ビームをバンチ化する部分が加速の前段階で必要となる。そのため、RFQ 型加速管はその機能上、上流からマッチング、バンチング、加速セクションの三つの機能部分に分けられる。バンチングから加速への遷移はビームの品質を保つために断熱的に行う必要がある。RFQ のビーム軸上の電場成分は入射部分ではマッチングのために集束にもっぱら使われて横方向が主である。バンチングのためは徐々に軸方向成分を増やし、発散を伴う加速に連続的に振り分ける必要がある。RFQ 加速器中のイオンは低エネルギーであるため、空間電荷交換の影響も大きく、この遷移部分は RFQ の設計を複雑にしている。

イオン源から生成されるビームが既にバンチ化されていれば、バンチングセクションが不要になり、RFQ 加速器の小型化や加速効率の向上が見込める。ここで注目すべきは、上図中のプラズマ発生初期の状態である。こ

ではプラズマは十分短バンチなので、これをそのまま RF の周期と同期して加速できれば RFQ の加速セクションに直接ビームを入射して加速することができる (図 2)。

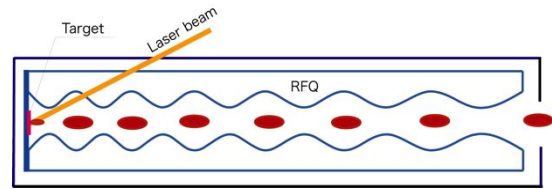


図 2 : LaPRIS(Laser Plasma Rf Ion Source)

### 2. 研究の目的

本研究では、全く新しい概念に基づくイオン発生、及び、加速方法の研究開発を行い、加速器システム全体のコストダウン、小形化を目指す。これは信頼性の向上にも繋がり、大型装置では施設の稼働率向上に有効な手段となる。

背景に述べたように短パルスレーザーの照射によって発生させたプラズマから、RF 加速に有効な時間幅にバンチ化されたイオン群が取り出せれば、RFQ などのバンチングセクションが不要となり、この目的に近づくことが出来る。このため、上記のようにバンチ化されたイオン群が取り出せるかを実験的に検証し、実用化に向けた検討を進めるのが本課題の目的である。

### 3. 研究の方法

実用化には、このプラズマバンチを連続的に発生させてパルストレーンを形成する必要があり、また、必要なレーザーの波長や、パルス幅、エネルギー、ターゲット (固体またはガス) 等の条件も最適化する必要がある。しかし、今回提案している手法は全く新しい試みであるため、まず単パルスによる検証を行い、素過程での検証に注力することにした。次に、得られた条件を基に、原理実証に必要な高周波共振空洞の設計を行い、この共振空洞を製作し、発生したイオンビームパルスが高周波加速位相に捕獲される事を実験的に確認する事までを目標とする。

京大化研に設置されている T6 レーザーは、パルス幅が 100 フェムト秒以下で本実験に要求されるレーザーパルス幅に合致しているため、これを用いて実験を行った。一時期改修のため、T6 レーザーが使えないときもあったため、KEK の同様なレーザーを用いて、共振空洞によるレーザー照射レイアウトの確認、イオン検出、イオンバンチ捕獲等の予備実験を行った。

### 4. 研究成果

現在実用化されているレーザーイオン源ではより数ナノ秒程度の長いパルス幅のレーザーを用いるため、本研究で使用する短パルスレーザーと比較してターゲットとの相互作用時のレーザーエネルギー密度が大きく異なり、プラズマの拡散速度、角度分布、電

荷数分布が異なることが予想された。そのため、これらの特性を調べるため真空容器中に固体ターゲットを設置してレーザー照射を行った。プラズマ中に含まれるイオンの分析には、限られた空間に設置可能でイオン価数分布の測定が可能なマルチストリップタイプの電荷収集検出器とそのストリップを30 MHzでアナログスキャンする読み出し回路を開発した。この検出器を用いて発生するプラズマの拡散速度と含まれるイオンの価数分布などの測定をレーザーパワーを変化させながら試みた(図3, 4参照)。

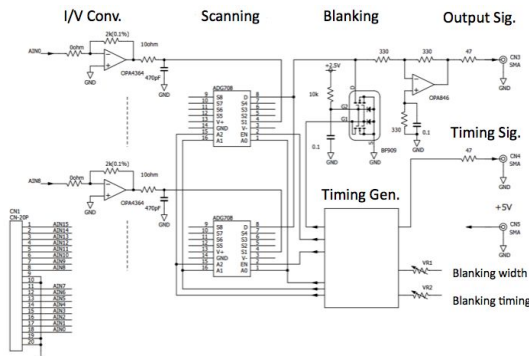


図 3：多電極電荷収集検出器用多重化回路



図 4：マルチストリップ電極

実験の結果、レーザーのパルス幅が大きく異なるため、生成されるプラズマの性質が大きく異なることは判ったが、固体ターゲットではプラズマ密度が高すぎてイオンと電子が充分分離できないせいか、有意な結果が得られず、更なる改良が必要である事が判った。この過程で、レーザービーム径を広げるなどのレーザーのピーク強度低減がデータの取得に有効である事が判った。いっぽう、この回路系は30 MHzと言う高速で16チャンネルの信号を切り替えてアナログスキャンできるため、ビームモニターなどへの応用も可能で、現在理研に貸し出し、その検証が進められている。

高いプラズマ密度に対応するためには、高電界を使ってイオンと電子を分離することが有効であると考え、プラズマ生成領域に高周波電場を印加できる共振空洞の設計に進んだ。周波数は、放電を起こさない程度の電界勾配の半周期で初速ゼロから加速して充分ギャップ長を抜けてくる必要があることから、ギャップ長を1~2 mmとして、50 MHz程度にした。実用上の簡便さや、実験の便宜を考えて充分コンパクトな共振空洞とすることにし、まず、3次元電界シミュレーションコードを用いて、形状を設計した(図5)。

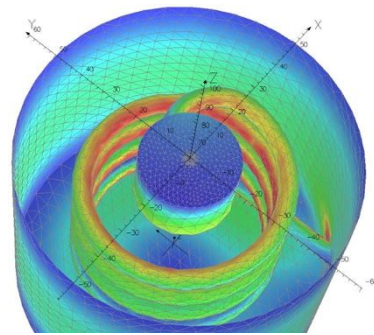


図 5：スパイラル型共振空洞の3次元電磁場コードによる設計(下流からの表示)

図6、図7のような空洞を製作した。共振空洞による高い電場により、イオン、電子の分離を可能ならしめ、かつ高周波電場により高い時間分解能を確保することが出来る。ひいては発生初期段階でイオンを捕獲できるかどうかの直接的検証が可能になる。

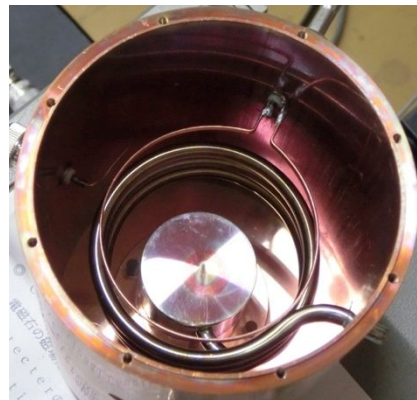


図 6：スパイラル型共振空洞(上流より) 手前より、カプリンググループ、共振空洞コイルターゲット支持ブロックが見える。加速ギャップは1~2 mm、共振周波数は53 MHz。

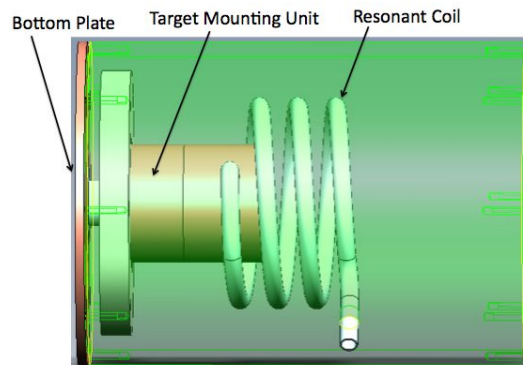


図 7：共振空洞の内部構造。左側が加速ギャップ

短パルスレーザーでは原発振にモードロックレーザーを使うが、多くの短パルスレーザーの周波数は70~80 MHzである。KEKのものは53 MHzであり、同期を取ることが可能なため、予備実験ではこれを使った。実験ではまず、取り扱いの簡便さから、固体の炭素ターゲットを用いることにし、共振空洞内部に設置してレーザー照射によるプラ

ズマを生成し、ファラデーカップにて分析を試みた。電場が掛かっているところにプラズマを発生させるため、放電を誘発することが当初から懸念されていたが、適切なレーザーエネルギー領域では位相の選択により、放電が誘発されない条件がある事も判った。また、レーザーの照射タイミングと同期させた高周波電場の位相をスキャンすることで、ファラデーカップで検出される信号が位相により異なることが判った。しかしながら、レーザー照射に寄るターゲットの消耗が激しいこと、及び、上流へ加速される電子がターゲット側に戻り、ターゲット表面に衝突する際に誘発するためと推定される放電が頻繁に起こり、高周波電場で捕獲されたイオンの有意な検出には至らなかった。固体ターゲットのレーザー照射によるプラズマでは密度が非常に大きいため、電子とイオンの分離が容易ではないことも要因の一部であろう。この結果を踏まえ、水素ガスターゲットを用いた実験へと移行した。ターゲットを気体にする事で、ターゲットの消耗の問題を解消できるほか、ガスの供給量の調整によりプラズマ生成量及び、密度をコントロールことが可能となった。高周波共振空洞は、炭素ターゲットを用いた実験において使用したものにピエゾガス弁を取り付ける改造を行った。(図8)

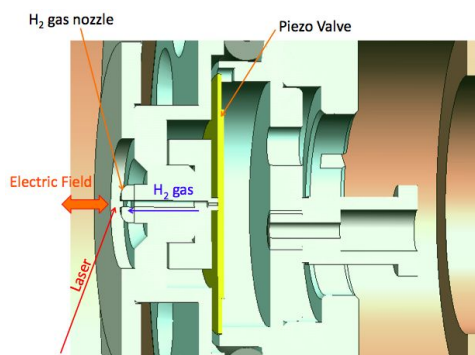


図8：ガス供給ユニットの内部構造

ガスの供給をパルスガスバルブでコントロールすることで不要なガスの供給を避けた。レーザーは焦点位置で数十ミクロンまで絞られガスをプラズマ化させるが、ほとんどそのまま通り過ぎるため、どこかで壁面に当たる。焦点位置から近いところで当たるとそのエネルギー密度が高いため、壁面の物質をプラズマ化させるので、充分離れたところまで導く必要がある。そのため、ノズル先端に切り欠きを設けた(図9)。

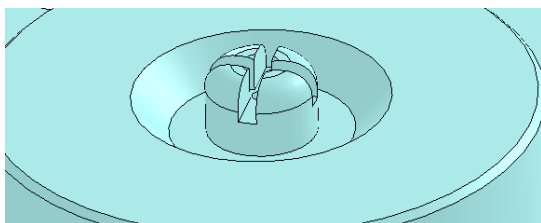


図9：切り欠きを設けたノズル

この構造は、上流へ向かう(逆流する)電子が電場の強い領域で壁面と衝突することを回避させ、放電の抑制を図る事が出来る。本実験においては、共振空洞の共振周波数とT6レーザーの原発振周波数が合わないため、同期をとって照射位相タイミングを制御することは断念し、RF波形とレーザーパルスで同時計測し、非同期で複数回レーザー照射を行った。これにより、RF波形とレーザーパルスの計測データから位相関係は導出できる。共振空洞から放出されたビームはギャップ直下流約2mm下流に置いた電流プローブにより時間変化を測定した。多数回の非同期ショットによる測定を繰り返して、データをRF波形とレーザーパルスの計測データから求めた位相差の順に並び替えることにより、数ナノ秒程度の時間構造を持ったイオンビームの信号が得られた(図10)。横軸が照射時刻からの経過時間、縦軸がRF位相とレーザーパルスの位相差であり、電流値を色で表示してある。

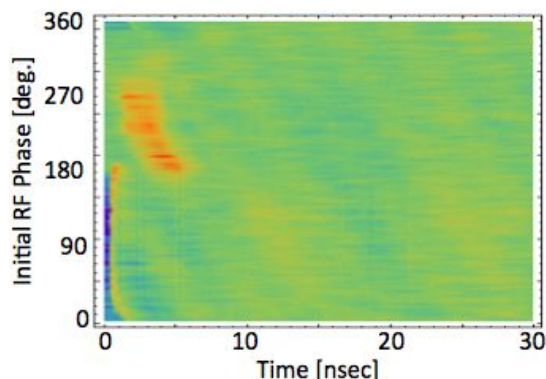


図10：ビーム電流波形のRF位相依存性測定結果。赤の部分が正の電流、青の部分が負の電流、緑の部分が電流が無い状態に対応している。

電子は軽いので、短時間で加速、引き出しが完了して観測に掛かる。左下のショット直後に観測される負の電流は電子が引き出される位相にレーザーがショットされているものと考えられる。高周波周期の半分の期間には負の電圧が掛かるため、この領域がほぼ180度の領域を占めている事からもこれが確認出来る。この領域では多くの場合、放電が起こり、測定器で設定している範囲を超える電流が観測されている。これらの電子は壁に当たりまたプラズマを発生するので、周期を超えた場所にも信号が観測される結果となっていると解釈できる。

一方、位相差にして180度を超えたところから現れる暖色の領域では正の電流を観測しており、イオンが観測されているものと解釈できる。ギャップ間に発生している電場の周波数は53MHzであり、四半周期は約5ナノ秒になるため、この幅以内の領域で電流が観測されているところから、これらのイオンはバンチ化されていると言える。位相差が

減るに従って電流値のピーク位置が遅れていくが、この傾向は1次元のシミュレーションでも確認されている(図 11)。

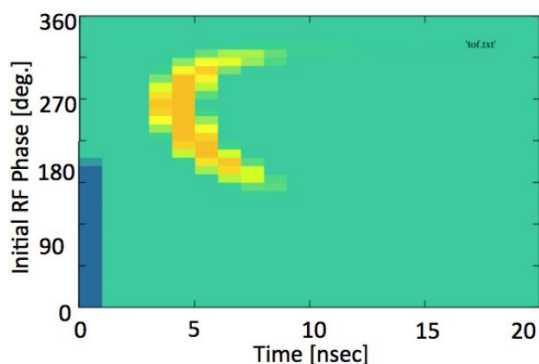


図 11：1次元シミュレーションの結果

電場の無い領域でプラズマを生成した場合、プラズマはプローブに到達するまでにマイクロ秒程度の時間幅まで存在し、膨張する。ギャップ間の高周波電場によりレーザー照射で出来たプラズマが迅速にイオンと電子に分離されず同空間に留まり続ければ次の周期にもイオンが観測されるはずであるが、これも観測されていない(横軸20~30ナノ秒の領域)。生成されたプラズマは高周波電場により一掃され、分離されたイオンは高周波の一周期内に限定的に捕獲されたと結論づけることができる。

これらのことから、レーザーを連続で打ち続ければこれに応じて連続したバンチ化イオンが得られることが期待できる。共振空洞の電場発生ギャップやノズル形状、ガス密度、バルブの開閉性能、レーザー集光システム、レーザーエネルギーなどの最適化を行うことにより、バンチャーを省いたRFQ等の初段加速管の実現が可能となる。

## 5. 主な発表論文等

[学会発表](計 4件)

Y. Fuwa, Y. Iwashita, H. Tongu, S. Inoue, M. Hashida, S. Sakabe, M. Okamura, Y. Yamazaki,  
RF acceleration of ions produced by short pulse laser,  
IPAC2015, Richmond, VA, USA (2015.5.6)

Y. Fuwa, Y. Iwashita, M. Okamura,  
Multi-Strip Current Monitor for Pulsed Laser Plasma Diagnostics, IPAC2013, Shanghai, China (2013.5.13)  
<http://epaper.kek.jp/IPAC2013/papers/mopme029.pdf>

Y. Fuwa, S. Ikeda, M. Kumaki,  
D. Cinquegrau, M. Romanelli, M. Sekine, N. Munemoto, Q. Jin, T. Kanetsue, M. Okamura, Y. Iwashita  
Comparison of Graphite Materials for Targets of Laser Ion Source

15th International Conference on Ion Sources  
千葉県千葉市 幕張メッセ (2013.9.12)

不破 康裕  
短パルスレーザープラズマのRF位相直接入射によるイオン源の開発  
日本物理学会第67回年次大会  
兵庫県西宮市 関西学院大学 西宮上ヶ原キャンパス(2012.3.27)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

岩下 芳久 (IWASHITA Yoshihisa)  
京都大学・化学研究所・准教授  
研究者番号：80332245

### (2) 研究分担者

阪部 周二 (SAKEBE Shuji)  
京都大学・化学研究所・教授  
研究者番号：80332245

岡村 昌宏 (OKAMURA Masahiro)  
独立行政法人理化学研究所・客員研究員  
研究者番号：80332245

### (3) 連携研究者

頓宮 拓 (TONGU Hiromu)  
京都大学・化学研究所・技術職員  
研究者番号：10397523

橋田 昌樹 (HASHIDA Masaki)  
京都大学・化学研究所・准教授  
研究者番号：50291034

時田 茂樹 (TOKITA Shigeki)  
大阪大学・レーザーエネルギー学研究センター・講師  
研究者番号：20456825

### (4) 研究協力者

山崎 淳 (YAMAZAKI Atsushi)  
井上 峻介 (INOUE Shunsuke)  
不破 康裕 (FUWA Yasuhiro)