

令和 5 年 4 月 26 日現在

機関番号：82401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2022

課題番号：20K20111

研究課題名(和文) 高輝度短パルス中性子ビーム生成に向けた、高速パルスECRイオン源の開発研究

研究課題名(英文) Development of pulsed ECR ion source for generation of short pulse neutron beam

研究代表者

池田 翔太 (Shota, Ikeda)

国立研究開発法人理化学研究所・光量子工学研究センター・特別研究員

研究者番号：10845746

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,200,000円

研究成果の概要(和文)：本研究では、短パルス中性子ビーム生成に向けた、高速スイッチパルス高圧電源を使ったパルスビーム引き出し法により、ECRプラズマからマイクロ秒オーダーの短パルス陽子ビームの生成試験をおこなった。高速スイッチパルス高圧電源として、高速スイッチング電源と直流高圧電、パルスジェネレータによる電源システムを構築し、既存のECRイオン源と組み合わせて、パルス電圧のイオン源への印加試験や、パルスイオンビーム生成試験を実施した。また、生成したイオンビームの立ち上がり時間やイオン種比率等の測定・評価をおこなった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は陽子線形加速器分野においてビームチョッパー等を用いないで数十 mA・1~10 マイクロ秒の陽子ビームを生成する唯一の方法となり、学術的に大きな意義がある。中性子回折や中性子散乱等では、熱・冷中性子を用いたTime of flight計測をおこなうが、陽子線形加速器駆動小型中性子源では中性子の飛行距離が3~5 m程度と短いため波長分解能の不足が課題となっている。そのため、短パルス陽子ビームを中性子発生に利用することで、中性子ビームの短パルス化が実現し、波長分解能が向上することが期待される。

研究成果の概要(英文)：In this study, a pulsed beam extraction method using a fast-switching pulsed high-voltage power supply was verified for the generation of short pulsed proton beams in the order of microsec from ECR plasmas. A power supply system consisting of a fast switching pulse high voltage power supply, a DC high voltage power supply, and a pulse generator was constructed as a fast switching pulse high voltage power supply. The rise time of ion beam and ion species ratio were measured and evaluated.

研究分野：加速器工学

キーワード：短パルス陽子ビーム 小型加速器中性子源 ECRイオン源

## 様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

### 1. 研究開始当初の背景

近年、加速器駆動中性子源は、利用目的を絞り、研究室単位で設置・利用ができる、小型中性子源が望まれるようになってきた。国内では北海道大学の HUNS(35 MeV 電子線形加速器+重金属ターゲット)や理化学研究所の RANS(7MeV 陽子線形加速器+ベリリウムターゲット)がその先駆けとなっており、学術利用に限らず産業界においても次世代の分析装置として小型パルス中性子源が注目されている。特に陽子線形加速器型は、電子線形加速器に比べ加速器部分をはじめシステム全体が比較的コンパクトであるといった利点が挙げられるが、イオン源や高周波増幅器の構造的な制約により、数  $\mu\text{sec}$  のパルス幅で陽子ビームを供給することが困難である。特に、ECR イオン源はプラズマ中におけるイオンの電離過程が逐次的であり、プラズマ点火直後(100 $\mu\text{sec}$ 未満)は陽子比率が少ない状態であるため、CW(Continues Wave)運転をすることで陽子比率の高いビームを生成する方法がとられている。一方、パルスマイクロ波をパルス発信にすることでパルスビームを生成する、ECR イオン源は日立製作所や Saclay 研究所が研究開発しているが、陽子比率 90 %以上に到達するために数百  $\mu\text{sec}$ ~数 msec のプラズマ加熱時間が必要となる。

### 2. 研究の目的

ECR イオン源に関する先行研究では、プラズマ分光やプラズマプローブによる計測により、引き出し電圧を印加していない状態における ECR プラズマ中の陽子比率は、引き出し電圧を印加した状態に比べ 1.5 倍程高くなり、プラズマ加熱時間 10  $\mu\text{sec}$  程度で陽子比率が十分に高くなるといった結果が得られている。しかし、プラズマ加熱途中からビーム引き出しをおこなった実績は皆無であり、イオンビームとして引き出した際のビーム特性は明らかになっていない。

そこで申請者は、ECR プラズマを加熱した後に数  $\mu\text{sec}$  パルス電場でイオンビームを ECR プラズマから引き出すことで、従来の ECR イオン源より短い加熱時間において高い陽子比率で短パルス大電流ビームの生成が実現可能ではないかと考えた。

本研究の目的は、高速スイッチパルス電源を用いたビーム引き出しをおこなうことにより、ビーム引き出し条件(引き出しタイミング・引き出し時間・引き出しビーム電流量)に対する、引き出されたイオンビーム特性への関係性を解明し、短パルス( $\mu\text{sec}$ オーダーの)ビームの発生を実証することである。

### 3. 研究の方法

本研究では、高速スイッチパルス電源によるイオンビーム引き出し方を採用した、短パルスイオン源を開発及び原理実証をおこない、短パルスビーム生成・イオン種分析測定を実施することで、パルスイオンビーム生成における高速パルス引き出しの特性を明らかにする。

そのため、短パルスイオン源システムの開発をおこなった。具体的にはパルス高圧電源の構築、おこなった。まず、3次元静電場・静磁場シミュレーションソフトウェア及び、ビームシミュレーションソフトウェアにより設計したプラズマチェンバー・引き出し電極系の配置からプラズマチェンバーと真空容器間の静電容量を見積もることで、引き出し電圧の立ち上がり時間 50 nsec 以内を満たすために必要な高速スイッチパルス電源のピーク電流量を概算した。概算結果より、高速スイッチパルス電源に要求される仕様はピーク電流量:50 A、耐電圧:40 kV、最小パルス幅:1  $\mu\text{sec}$  とし、この要求を満たすスイッチング電源として BELKE, HTS441-10-GSM を選定した。今回構築した、高速スイッチパルス電源システムの概略図を図 1 に示す。電源システムの構成は直流高圧電源、スイッチング電源、パルスジェネレータとなっている。直流高圧電源は本研究に使用した ECR イオン源用の直流高圧電源(松定プレジジョン製、HBB-40P50-L)であり、最大 40 kV の電圧を印加可能である。しかし、負荷側に流せる電流量は最大 50 mA であり、スイッチング電源へ流すピーク電流量の 1/1000 程度であり、イオン源の引き出し電圧の立ち上がり時間が長くなってしまふ。そのため、イオン源から引き出されたイオンビームのパルス波形を確認しながら、スイッチング電源と直流高圧電源間にコンデンサー(図 1, Cb)を設けることでスイッチング電源に流れるピーク電流量が増えるよう調整した。

構築した高速スイッチ電源を永久磁石型 ECR イオン源のビーム引き出し用電源として用いるため、高圧プローブを用いて ECR イオン源に印加されたパルス電圧の波形を測定し、パルスの立ち上がり時間やパルス波形の確認をおこなった。次に、ECR イオン源をファラデーカップと分析用偏向電磁石により構成されるビーム分析ライン(図 2)に接続し、パルス高圧電源による、ECR イオン源からパルスイオンビームを引き出し、下流に設けたファラデーカップでビーム波形を測定した。更に、分析用偏向電磁石及びスリット、ファラデーカップを用いたイオン種分析をおこない、パルス引き出しタイミングに対するイオン種の変化を確認した。

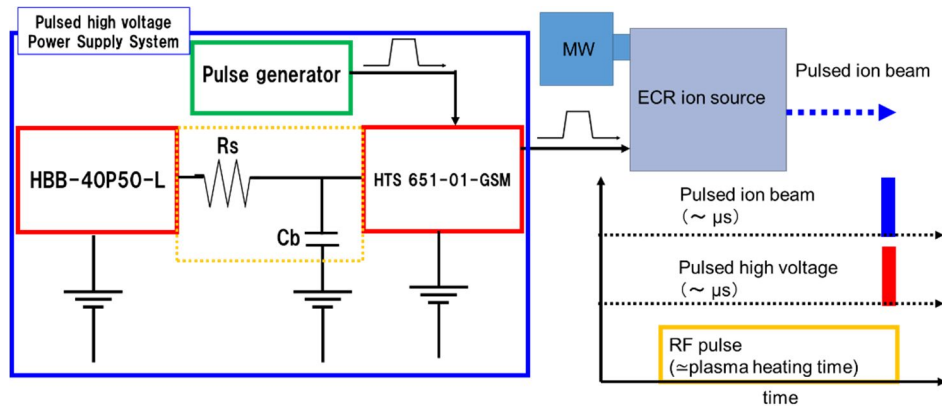


図 1、高速スイッチパルス電源システム

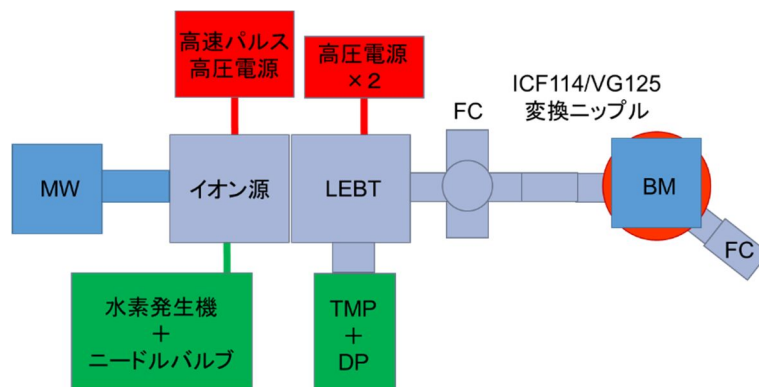


図 2、イオン源用テストベンチ概略図

#### 4. 研究成果

高速スイッチパルス電源に用いたスイッチング電源(型番)を図 3 a)に示す。直流高圧電源から高電圧をスイッチング電源に印加し、パルス幅・繰り返しを制御した入力タイミング信号に応じてスイッチングが作動しパルス電圧として出力される。高速スイッチパルス電源を永久磁石型 ECR イオン源に接続した状態において、イオン源のプラズマチェンバーに印加されたパルス電圧を図 3 b)に示す。但し、このときの印加電圧は 2 kV であり図 1 の  $R_s$  と  $C_b$  の箇所にはそれぞれ抵抗及びコンデンサーは設けていない。図 3 b)の波形はイオン源に印加された電圧を高圧プローブでピックアップして Pico scope で測定した波形である。

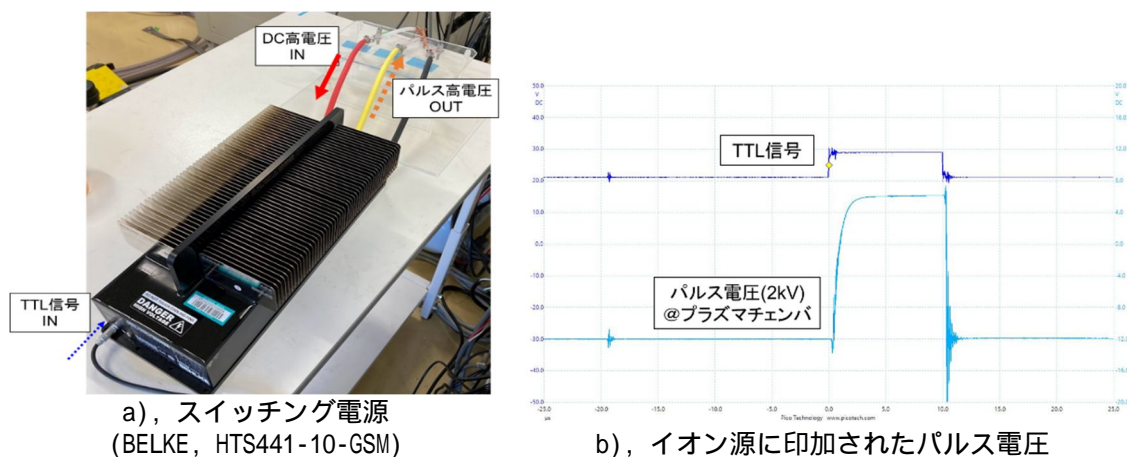


図 3、イオン源用テストベンチ概略図

プラズマチェンバーには約  $2 \mu\text{sec}$  程度の立ち上がり時間で高電圧が印加されている。これは、使用した ECR イオン源が図 4 のようにプラズマチェンバー(高電圧)と真空容器管(グラウンド)の間がコンデンサーのようになっており、約  $50 \text{ pF}$  の静電容量を有して、高電圧がフラットになるまでに充填時間が存在するためである。また、高電圧パルスが立ち下がるには、電圧波形がリップルしているが、これは高速スイッチパルス電源と負荷側のイオン源の間のインピーダンスがマッチしてないためフライバックが生じている。

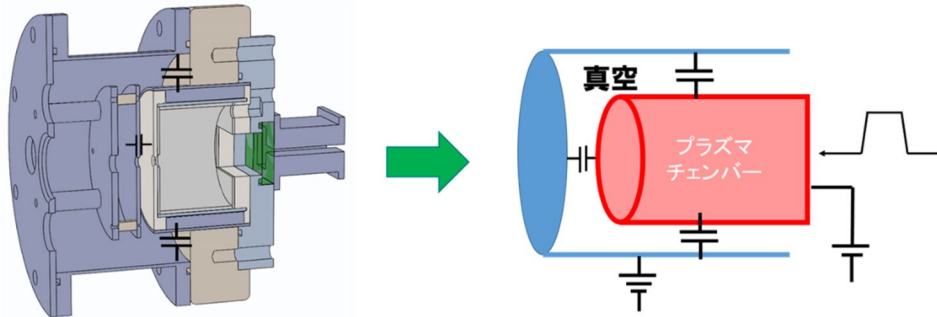
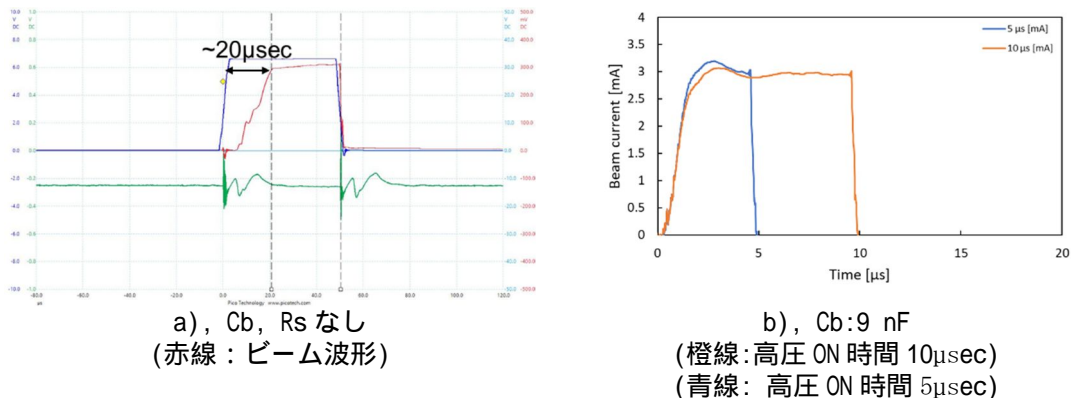


図 4、ECR イオン源チェンバー断面図

次に高速スイッチパルス電源及び ECR イオン源によるイオンビームの引き出しをおこなった。引き出されたイオンビームはアインツェルレンズを通過してファラデーカップで測定した。パルス電圧により引き出されたイオンビームを図 5 a) に示す。この際の引き出しに用いた電圧は 12 kV でありパルス幅は 50  $\mu\text{sec}$  である。ビーム波形がフラットになるまでの立ち上がり時間は約 20  $\mu\text{sec}$  となっており、イオン源に印加したパルス電圧の充填時間より長い立ち上がり時間となっている。これは引き出し電圧を印加するための電荷がイオンビームの引き出しに使われてしまったことにより、引き出し電圧がフラットになるまでの充填時間が長くなっていることが考えられる。そこで、高速スイッチパルス電源中の直流電源と高速スイッチ電源の間に 9 nF のコンデンサー (Cb) を設けることでパルス電圧印加時の電流量を補填することにした。また、負荷側からのフライバックから直流高圧電源を保護するために、直流高圧電源直下に抵抗器 (Rs) を設置した。以上の条件において、パルスイオンビームを測定した結果、イオンビームの立ち上がり時間は 2  $\mu\text{sec}$  まで短くなり、ビームのパルス幅も 5  $\mu\text{sec}$  以下まで短くすることが可能であることを確認した。そのことから、ビームの立ち上がり時間を短くし、ビームパルス幅を更に短くするために、高速スイッチパルス電源内のコンデンサー (Cb) の容量を大きくすることが有効であることがわかった。また、引き出し電圧を 12 kV より高くするとコンデンサー部分で放電が生じていることから、より高耐電圧なコンデンサーを複数並列に接続することで、RFQ 線形加速器の入射エネルギーである 35 keV の短パルスイオンビームを発生できる見通しが得られた。



a), Cb, Rs なし  
(赤線: ビーム波形)

b), Cb: 9 nF  
(橙線: 高圧 ON 時間 10 $\mu\text{sec}$ )  
(青線: 高圧 ON 時間 5 $\mu\text{sec}$ )

図 5、パルス電圧により引き出されたイオンビーム波形

最後に、イオン源から引き出されたパルスイオンビーム中のイオン種をビーム分析ラインで測定した。但し、ECR プラズマを発生させるための、ピーク電力 2000 W のマイクロ波を 1 msec 1 Hz で投入している。引き出されたイオンビーム中のイオン種比率を測定した結果、陽子比率は約 35 % であり、直流電圧で引き出されたイオンビームと同等の値となっている。また、パルス引き出しのタイミングをマイクロ波発振時から 100 $\mu\text{sec}$ -900  $\mu\text{sec}$  の間で 200  $\mu\text{sec}$  ごとに変化した場合においてもイオン種比率は 35 % 程度であり、直流電圧で引き出した時と大きな差は確認されなかった。そのため、パルス引き出し法によるイオン種比率の影響を確認するには至らなかった。更なる、ビーム引き出し有無の状態におけるプラズマ中の陽子比率が変化を測定・評価するには、今回使用した ECR イオン源の改良や他イオン源を用いた場合におけるパルスビーム引き出し試験によるイオン種測定をおこなう必要がある。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計1件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 1件）

1. 発表者名 Shota Ikeda, Tomohiro Kobayashi, Yoshie Otake and Noriyosu Hayashizaki
2. 発表標題 Development status of the accelerator system for transportable compact neutron source RANS-
3. 学会等名 International Symposium on Zero-Carbon Energy Systems (国際学会)
4. 発表年 2023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
---------	---------