

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 3 年 6 月 8 日現在

機関番号：82110

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2017～2020

課題番号：17K05108

研究課題名(和文)大電流高周波イオン源より引き出された負水素イオンビーム揺らぎの観測

研究課題名(英文) Observation of H- beam fluctuation extracted from an rf-driven high-intensity ion source

研究代表者

神藤 勝啓 (Shinto, Katsuhiko)

国立研究開発法人日本原子力研究開発機構・原子力科学研究部門 J-PARCセンター・研究副主幹

研究者番号：80322999

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,700,000円

研究成果の概要(和文)：高周波駆動の大強度負水素イオン源より引き出された負水素イオンビームについて、プラズマ生成に用いている高周波の駆動周波数あるいはその高調波に同期したビーム電流、ビームプロファイル、ビームエミッタンスの揺動を観測した。ビーム電流及びビームプロファイルは高速のオシロスコープを用いることで観測することができた。ビームエミッタンスは、60 Msamples/sの高時間分解能のデジタイザと70 MHzまでの周波数帯域を持った高速差動増幅器を用いた測定系を新たに製作し、測定を行った。その結果、高周波源の駆動周波数とその2倍高調波成分を持った揺動がビームにみられることが分かった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、プラズマ波動の物理を考慮し、イオン源の引出領域近傍のイオンソースが高周波に追従することから予想される帰結として引き出された負水素イオンビームが高周波の影響を受けているということを実験で検証するというのが学術的な特色であり、これまでの大強度高周波イオン源の研究にはない独創性がある。負水素イオンビームの揺らぎを抑えることで揺らぎ成分によるビーム損失を低減し、後段の加速器への輸送効率を上げることを目指した研究過程の中で、ビームの揺動がイオン源のプラズマ生成に用いた高周波の周波数が影響したということが理解できた。本研究成果は加速器ビームの輸送に対して学術的に意義のあるものと考えられる。

研究成果の概要(英文)：We observed fluctuations of the beam current, the beam profile and the beam emittance of the negative hydrogen ion beams extracted from a radio-frequency-driven high-intensity negative ion source. By using a high-speed oscilloscope, the fluctuations of the beam current and the beam profile were measured. In case of the beam emittance measurement, we developed a new diagnostic system equipped with a high time-resolved (60 mega samples/sec) digitizer and a differential amplifier with the frequency range up to 70 MHz. By these measurements, we found the beam fluctuations with the fundamental and the second harmonics of the driven rf frequencies.

研究分野：ビーム物理

キーワード：負水素イオン源 高周波イオン源 負水素イオンビーム ビームエミッタンス

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

K. N. Leung らによって 1.8 MHz での高周波駆動の大強度負水素イオン源が開発されて以来、J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex、日本、日本原子力研究開発機構(JAEA)と高エネルギー加速器研究機構(KEK))、SNS (Spallation Neutron Source、米国、オークリッジ国立研究所(ORNL))、LHC (Large Hadron Collider、欧州、欧州原子核研究機構(CERN))などの世界中の研究機関では、数 10 mA 級の負水素イオンビーム電流を引き出すために 2 MHz の高周波源を用いた大強度負水素イオン源の開発、運転が行われてきた。高周波の周波数が高くなると、真空管増幅器による大出力高周波源となり制御が困難であるため、高周波源の周波数 2 MHz、出力 50 kW 程度の半導体増幅器によるプラズマ点火が行われてきた。

イオン源で生成される負イオン電流密度は、J-PARC で最大 943 A/m^2 (負水素イオンビーム電流 60 mA/引出孔直径 9 mm) であり、これがイオン飽和電流密度に等しいとして負水素イオンの密度を算出すると、イオン源引出部近傍(イオンシース領域)で約 $1.9 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 程度となる。SNS 及び LHC についても同様に算出すると、それぞれ $2.7 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 及び $2.4 \times 10^{15} \text{ m}^{-3}$ 程度となる。RF イオン源内プラズマの密度はシース領域の密度よりも高いと考えられる。ところで、イオンシースの時間応答性は、イオンプラズマ周波数によって決まると考えられるが、これはイオン密度の 1/2 乗に比例する。

研究代表者は、イオン源内プラズマのイオンシースが高周波に追従しない周波数帯の高周波源でプラズマ点火し、電位揺動が問題にならない運転を行う必要があると思ひ、揺動の有無についての検証実験として現在のイオン源から引き出されるビームの状態の調査から始めることを考案した。

2. 研究の目的

粒子加速器では、イオン源で生成されたビームを後段の線形加速器や円形加速器に首尾よく輸送するために、位相空間上での粒子分布であるエミッタンスをできる限り小さくする必要がある。

負水素イオン源内でプラズマ点火に用いている高周波源の周波数(2 MHz)はイオンプラズマ周波数よりも低いため、イオンシースが高周波に追従し、電位揺動していると考えられる。そのイオンシースの揺動の中を負水素イオンが通ってビームとして引き出されるため、測定したエミッタンスは揺らぎが生じ、大きくなっている可能性があると考えられる。

そこで、負水素イオンビームの時間変化を精密に測定し、高周波に起因したエミッタンスの揺らぎを観測することを目指す。

3. 研究の方法

本研究は、J-PARC にある大強度負水素イオン源のテストスタンドを用いて行った。

イオン源内プラズマは、イオン源天板に取り付けたビューポートから集光レンズ、光ファイバーケーブルを通して分光器に接続されている。この分光計測系を用いて、水素原子の発光するバルマーアルファ光の時間変動を観測した。

イオンビーム電流は、イオン源の下流のビーム輸送系に設置したファラデーカップに入ってきたビームを電気信号として出力し、高速のデジタルオシロスコープで測定した。

ビームプロファイル及びビームエミッタンスの測定には、ダブルスリット型のエミッタンスモニターを用いて測定した。

ビームプロファイルは垂直方向のスリットと水平方向のスリット付きファラデーカップを用いた。2 つのスリットを通過してきたビームはエミッタンスモニターのファラデーカップで電気信号として出力し、高速のデジタルオシロスコープで測定した。

エミッタンス測定には、エミッタンスモニターのファラデーカップに入ってきた微弱信号を増幅するために周波数帯域 70 MHz で利得 200 倍の増幅器を用いて微弱信号を増幅した後に毎秒 60 メガサンプルのデジタルサイザで信号を取り込み、位相空間図としてプロットした。

4. 研究成果

(1) イオン源内プラズマのバルマーアルファ光の揺動

図 1 に、イオン源に 2 MHz の高周波が印加された時のバルマーアルファ光の強度の変化を示す。2 MHz の高周波電力(シアン)がイオン源内に設置されているアンテナに投入されることで誘導性結合プラズマに遷移しながら、バルマーアルファ光の強度(青)が増加し、また、光の揺動周波数が 2 MHz から、4 MHz に変化しているのが観測された。

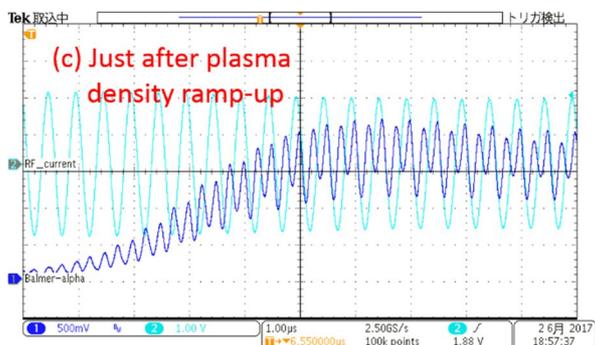


図 1 イオン源内プラズマのバルマーアルファ光の時間変動

(2) ビーム電流の揺動

図 2 に、イオン源より引き出された負水素イオンビームをファラデーカップで受けた時の信号の波形を示す。ビーム波形は高周波電力波形に同期して揺動しており、ビーム平均電流 44 mA に対して、約 1 mA の変動があることが分かった。

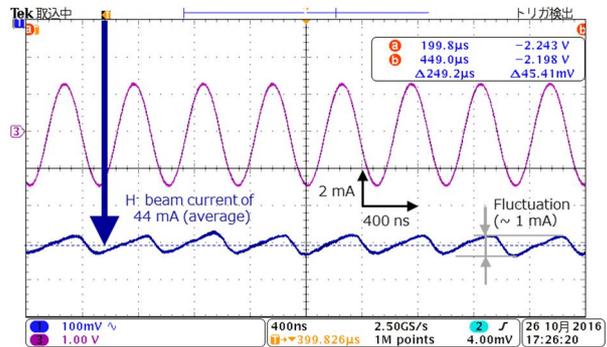


図 2 大強度高周波イオン源より引き出された負水素イオンビーム波形 (青) と高周波電力波形 (マゼンタ)

(3) ビームプロファイルの揺動

大強度高周波負水素イオン源より引き出されたビームプロファイルを測定した。図 3 には、ビームの中心部とビーム端部 (ビーム中心から 1.1 mm 離れた場所) のプロファイル測定のおしロスコープで測定した波形をフーリエ変換して得られた周波数成分の比較を示す。ビーム中心部では、高周波の駆動周波数である 2 MHz が主成分であるのに対し、ビーム端部では 2 倍高調波の 4 MHz が主成分であった。

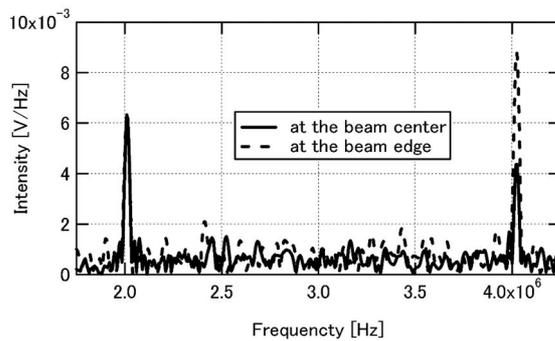


図 3 ビームプロファイル測定によるビーム中心部 (実線) とビーム端部 (破線) のビーム揺動の周波数成分

図 4 には、スリット付きファラデーカップの中心位置からの距離に対するビーム電流の変化 (赤)、各位置で測定した時のビーム波形の 2 MHz 成分 (基本波) 及び 4 MHz 成分 (2 倍波) の変化を示す。ビームの中心付近では高周波成分はさほど大きくないが、ビーム中心から離れるにつれて、2 MHz 成分、4 MHz 成分が大きくなっていることが分かった。

(4) ビームエミッタンスの揺動

ビームエミッタンスの測定では、スリット付きファラデーカップで得られた信号を、広帯域の増幅器と高速デジタイザを用いて、位相空間上の各座標での測定データをプロットした。デジタイザで取得したビーム電流信号の時間的に連続する 6 つのデータで平均化することで、S/N 比の向上を図った。図 5 に、測定されたビームエミッタンス (黒)、Twiss パラメータの時間変化を示す。それぞれのパラメータは、イオン源内プラズマの生成に用いている高周波源の駆動周波数で揺動していることが分かった。

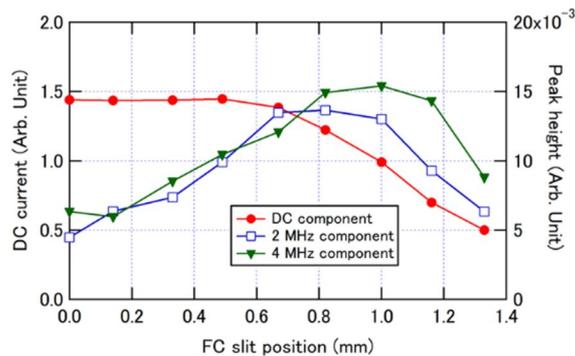


図 4 スリット付きファラデーカップの位置に対するビームの DC 成分 (赤)、2 MHz 成分 (青) および 4 MHz 成分 (緑) の変化

図 5 で得られたエミッタンスの時間変化の内、エミッタンスが最小になるところ (Phase 1 (青破線部)) と最大になるところ (Phase 2 (赤破線部)) について、位相空間分布プロットを図 6 に示す。ビーム成分は大きく 4 つに分けられ、(1) ビームコア部、(2) 発散性ハロー部、(3) 集束性ハロー部、(4) 非対称成分に分けられることが分かった。Phase 1 と Phase 2 を比較することで発散性ハロー部と非対称成分がエミッタンス増大に寄与していることが分かった。

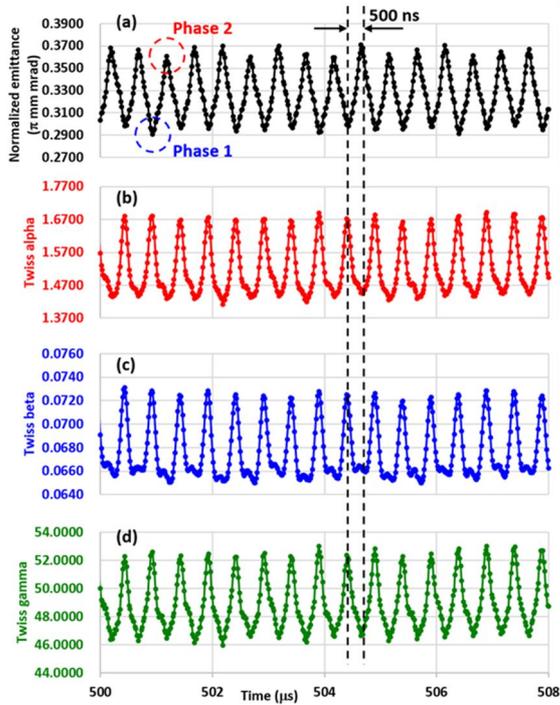


図5 ビームエミッタンス(黒)、Twiss パラメータの(赤)、(青)、(緑)の時間変化

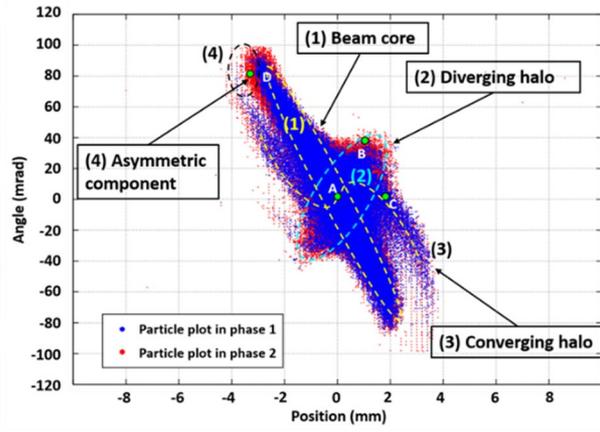


図6 図5のPhase 1(青)とPhase 2(赤)の部分の位相空間分布図

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計5件（うち査読付論文 5件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 M. Wada, K. Shinto, T. Shibata, M. Sasao	4. 巻 91
2. 論文標題 Measurement of time dependent beam profile of an RF-driven H- ion source	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Review of Scientific Instruments	6. 最初と最後の頁 13330
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5128015	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 T. Shibata, K. Shinto, A. Takagi, H. Oguri, K. Ikegami, K. Ohkoshi, K. Nanmo, and F. Naito	4. 巻 2011
2. 論文標題 Observation of plasma density oscillation with doubled value of RF frequency in J-PARC RF ion source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 20008
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5053250	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Shinto, K. Ohkoshi, K. Ikegami, A. Takagi, T. Shibata, K. Nanmo, Y. Namekawa, A. Ueno, and H. Oguri	4. 巻 2011
2. 論文標題 Present status of the J-PARC cesiated RF-driven H- ion source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 50018
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5053316	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -
1. 著者名 K. Shinto, T. Shibata, A. Miura, T. Miyao, and M. Wada	4. 巻 2011
2. 論文標題 Observation of beam current fluctuation extracted from an RF-driven H- ion source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 80016
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1063/1.5053371	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

1. 著者名 Katsuhiko Shinto, Kiyonori Ohkoshi, Takanori Shibata, Kesao Nanmo, Kiyoshi Ikegami, Akira Takagi, Yuya Namekawa, Akira Ueno, and Hidetomo Oguri	4. 巻 2052
2. 論文標題 Progress of the J-PARC cesiated RF-driven negative hydrogen ion source	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 AIP Conference Proceedings	6. 最初と最後の頁 50002
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1063/1.5083756	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計5件 (うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件)

1. 発表者名 神藤 勝啓、柴田 崇統、和田 元
2. 発表標題 高周波負水素イオン源から引き出されたH ⁻ ビームの揺動
3. 学会等名 第16回日本加速器学会年会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 神藤 勝啓、柴田 崇統、和田 元
2. 発表標題 負水素イオン源の放電用2MHz高周波が引き出しビームに与える影響
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 柴田 崇統、高木 昭、神藤 勝啓、池上 清、大越 清紀、南茂 今朝雄、小栗 英知、内藤 富士雄
2. 発表標題 高周波放電型負水素イオン源へのバイアス電圧印加方法の検討
3. 学会等名 日本物理学会第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 神藤 勝啓、柴田 崇統、和田 元
2. 発表標題 大強度負水素イオン源の高周波放電による引き出されたビームへの影響
3. 学会等名 第14回日本加速器学会年会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大越 清紀、神藤 勝啓、池上 清、柴田 崇統、高木 昭、南茂 今朝雄、上野 彰、小栗 英知
2. 発表標題 J-PARC負水素イオン源の運転状況
3. 学会等名 第14回日本加速器学会年会
4. 発表年 2017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
研究 分担者	和田 元 (Wada Motoi) (30201263)	同志社大学・理工学部・教授 (34310)	
研究 分担者	柴田 崇統 (Shibata Takanori) (20773956)	大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・加速器 研究施設・助教 (82118)	

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
---------	---------