

324 MHz 高周波駆動の大強度負水素イオン源のマッチング回路の設計

DESIGN OF A MATCHING CIRCUIT FOR A HIGH-INTENSITY NEGATIVE HYDROGEN ION SOURCE DRIVING WITH 324 MHz RF POWER SOURCE

神藤勝啓^{#, A)}, 柴田崇統^{B)}, 和田元^{C)}

Katsuhiko Shinto^{#, A)}, Takanori Shibata^{B)}, Motoi Wada^{C)}

^{A)} J-PARC Center / Japan Atomic Energy Agency (JAEA)

^{B)} J-PARC Center / High Energy Accelerator Research Organization (KEK)

^{C)} Doshisha University

Abstract

Negative hydrogen isotope (H^-/D^-) ion sources which are used at high-intensity proton accelerator facilities such as J-PARC or neutral beam injection systems for D-T plasma heating in the fusion devices such as ITER produce plasmas by using RF sources driving with the frequency of 1-2 MHz. We have shown that the H^- beams extracted from the RF-driven H^- ion source with the frequency of several MHz have some fluctuations with the fundamental and the second harmonics of the driving RF frequency. The reason is that the high plasma density is produced in the ion source with the low driving frequency. Therefore, we propose the driving RF frequency same as the RF sources with that of 324 MHz in the J-PARC linac, which is much higher than the ion plasma frequency, is used for producing the plasma to suppress the H^- beam fluctuations. As the first step, we performed a design of a matching circuit for the higher frequency driven H^- ion source. We present the background for decision of a new RF amplifier with much higher frequency and the design concept.

1. はじめに

J-PARC などの大強度陽子加速器施設では、シンクロトロンへの入射に荷電変換多重入射を用いるために、前段加速器のリニアックでは負水素イオン (H^-) ビームを加速している。また、国際熱核融合実験炉 ITER などの中性粒子入試加熱施設では、MeV 以上のビームエネルギーを持った中性粒子ビームを生成する際に中性化効率の高い負重水素 (D^-) ビームを用いる。これらの施設では、年単位での連続運転が不可欠であるため、熱陰極放電による H^-/D^- イオン源ではフィラメントの寿命が懸念されていた。

高周波 (RF) 放電を用いた H^- イオン源の開発は、1990 年頃に米国ローレンスバークレー国立研究所 (LBNL) で始められ[1]、約 30 年経過した現在では、米国オークリッジ研究所 (ORNL) の SNS[2]、欧州原子核研究機構 (CERN) の LINAC4[3] や独マックスプランク研究所のプラズマ研究所 (IPP-Garching) [4]、J-PARC[5] など RF H^-/D^- イオン源が研究・開発され、利用されている。これらの研究機関で用いられている H^-/D^- イオン源は、駆動周波数 1~2 MHz の数 10 kW の半導体アンプを用いてイオン源チャンバー内に (重) 水素プラズマを生成し、大強度の H^-/D^- ビームを引き出している。J-PARC では、2022 年夏メンテナンス後の 11 月より 2023 年 6 月までの加速器利用運転 (Run#90) において、途中で交換することなく 1 台の H^- イオン源で運転を行う段階まで来た[6]。

しかしながら、大強度 RF H^- イオン源プラズマ中の水素原子から放出された Balmer- α 光[7]や、そのイオン源より引き出された H^- ビーム電流量[8]、 H^- ビームプロファイル[9]、 H^- ビームエミッタンス[10]を調べると、RF 駆動周波

数及びその 2 倍高調波成分を持った揺動が見られることが分かった。現在のところ、リニアックのビーム損失などに直接影響があるという測定結果は見られていないが、数~10%程度の揺動があることは、将来さらに大強度化を進めた時に問題になるのではないかと懸念される。

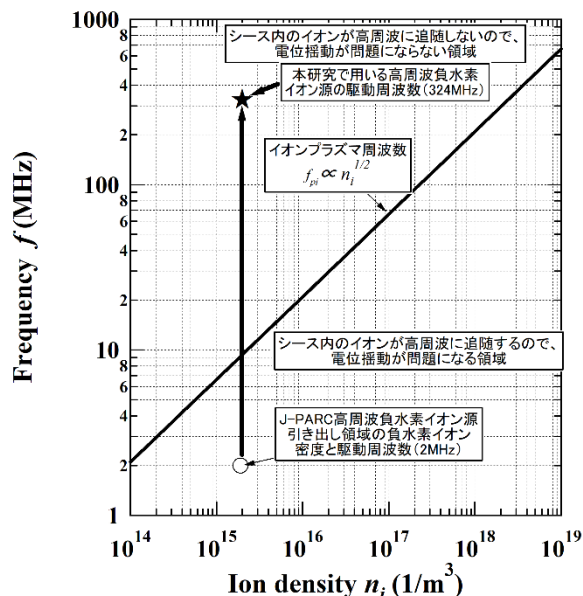


Figure 1: Ion plasma frequency plotted as a function of the ion density and the driving frequency of the present high-intensity RF H^- ion source (open circle) and planned one (black star).

[#] kshinto@post.j-parc.jp

プラズマやビームが揺動を持つ原因は、シース端のイオン密度が 10^{15} m^{-3} 程度の高密度プラズマ生成に用いている RF 源の駆動周波数が密度の1/2乗に比例するイオンプラズマ周波数よりも低い周波数であるため、シース内のイオンが RF に追随し、電位が揺動する結果、引き出されたビームも揺動したものになると考えられる。Figure 1 にイオン密度に対するイオンプラズマ周波数の変化(実線)と現在 J-PARC で用いている大強度 RF 駆動型 H⁺イオン源の駆動周波数(2 MHz)とプラズマ密度の関係(白丸)を示す。駆動周波数がイオンプラズマ周波数よりも高いと、プラズマやビームに揺動が生じないと考えられる。

そこで、我々はプラズマ生成に用いる RF 源は安定な半導体アンプを用いること、また将来的にリニアックでの RF バケツから漏れた粒子によるビーム損失の低減の可能性や、リニアックの RF バケツに対する入射ビーム位相のマニピュレーションを考慮して、リニアックの RF 加速空洞と同じ周波数(J-PARC の場合は 324 MHz、Fig. 1 中の黒星)を駆動周波数としてイオン源内プラズマを生成する検討を開始した。

本稿では、RF 源より効率よくプラズマにパワーを投入するために 324 MHz の RF 源を用いた場合の RF マッチング回路の設計を行った結果を報告する。

2. J-PARC 2 MHz 大強度 H⁺イオン源の RF 等価回路

Figure 2 に J-PARC で用いている大強度 RF 駆動 H⁺イオン源でビーム引き出し時に生成する高密度プラズマを発生するための 2 MHz RF 回路系の回路図を示す。図中で、 R_0 は伝送線路のインピーダンス(純抵抗、50 Ω)、 C_s 及び C_p はそれぞれマッチング回路の直列及び並列キャパシタ、 L_x はアンテナとは別に取り付けている外部インダクタンス(2.596 μH)、 R_a 及び L_a はそれぞれ高周波アンテナの抵抗(0.093 Ω)及びインピーダンス(0.57 μH)、 R_p 及び L_p はプラズマ抵抗及びプラズマインダクタンスである。

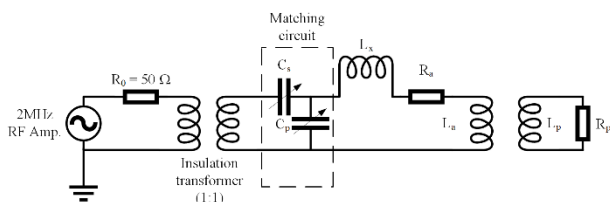


Figure 2: An electrical circuit of the 2 MHz RF system for the J-PARC high-intensity RF-driven H⁺ ion source.

Figure 2 の回路のアンテナ端子部より見た部分のインピーダンスを Z_s とすると、

$$Z_s = R_s + j\omega L_s \quad (1)$$

と表せる[11]。Figure 3 に Z_s を用いた等価回路を示す。Figure 3 での R_a+R_s 及び L_s は、参考文献[12]より RF パ

ワー $P_{RF} = 38 \text{ kW}$ のときには、それぞれ

$$R_a + R_s = 1.085 \text{ } \Omega \quad (2)$$

$$L_s = 0.5428 \text{ } \mu\text{H} \quad (3)$$

となる。

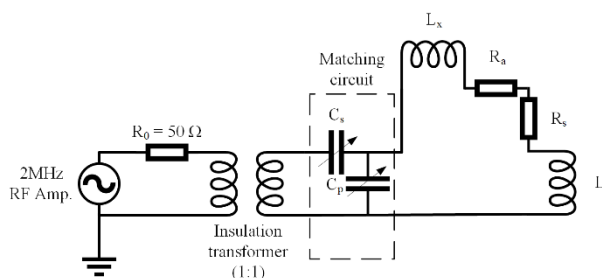


Figure 3: An equivalent circuit expressed as the impedance seen at the coil terminals of $Z_s = R_s + j\omega L_s$.

3. 324 MHz RF 駆動大強度 H⁺イオン源のマッチング回路の検討

集中定数による等価回路を考えるときにマッチング回路は L 及び C を直列、並列につなぐことで 8 通りの回路を考えることができる。

Figure 4 に 324 MHz の RF 源を用いた電気回路を、集中定数回路素子を仮定した場合の等価回路を示す。2 MHz の等価回路で示した外部インダクタンス L_x を挿入すると、周波数が高い(2 MHz の 162 倍)ために負荷側のリアクタンス成分が非常に大きくなる。そのため、Fig. 4 に示すように L_x を取り外した等価回路で考える。

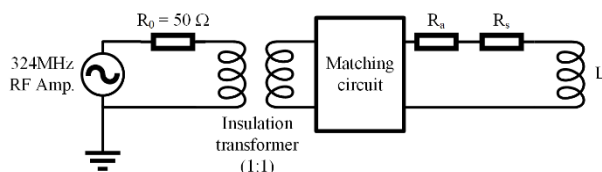


Figure 4: An equivalent electrical circuit of 324 MHz RF system for a planned high-intensity RF-driven H⁺ ion source.

324 MHz の RF 源を用いてプラズマを点ける場合には、Figure 5 に示す 4 通りのマッチング回路が考えられる。

4. プラズマインピーダンスに対するマッチング回路素子の変化

Figure 5 の 4 通りのマッチング回路で集中定数回路素子の可変域を考えると、Figure 5(a)に示す回路が実現できそうなマッチング回路であると判断し、プラズマインピーダンス Z_s が変化した時の C_s 、 C_p の変化を調べた。Figure 6 に Figure 5(a)をマッチング回路として挿入した図を

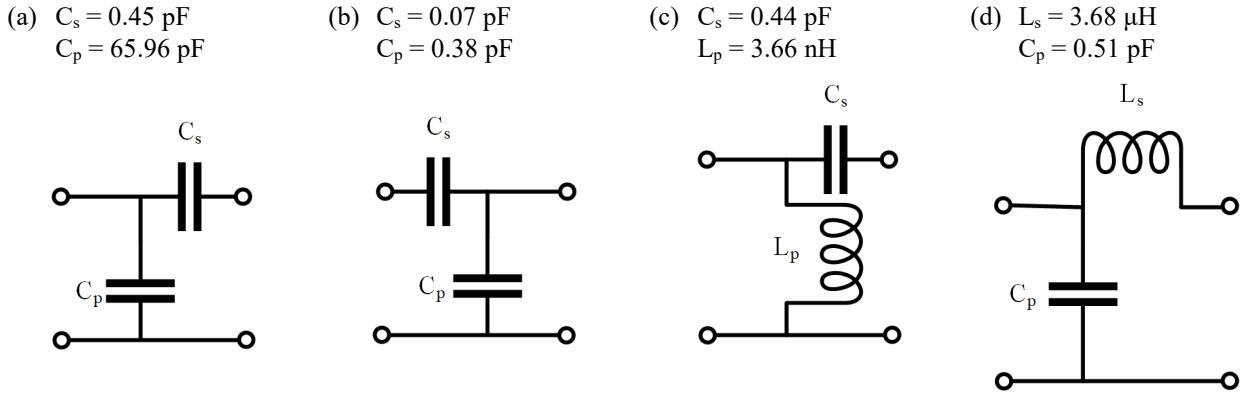


Figure 5: Possible matching circuit for the 324 MHz RF system for the planned high-intensity RF-driven H⁻ ion source.

示す。負荷側のインピーダンス Z は、

$$Z = [j\omega C_p + \{R_a + R_s + j\omega L_s + (j\omega C_s)^{-1}\}^{-1}]^{-1} \quad (4)$$

であり、これが R_0 に等しいとすることで、 C_s 及び C_p はそれぞれ、

$$C_s = \left[\omega \left\{ \omega L_s - \sqrt{(R_0 - R_L)R_L} \right\} \right]^{-1} \quad (5)$$

$$C_p = \frac{\sqrt{(R_0 - R_L)R_L}}{\omega R_0 R_L} \quad (6)$$

と表される。ここで、 R_L は負荷側の抵抗で

$$R_L = R_a + R_s \quad (7)$$

とおく。負荷側(アンテナとプラズマ)のインダクタンス L_s はほぼ一定であると考えられる[11]。一方、プラズマ抵抗はプラズマの密度に依存する[11]ので、負荷側の抵抗 R_L の変化に対する C_s 及び C_p の変化を、Fig. 7 に示す。J-PARC で駆動している大強度 RF 駆動 H⁻ イオン源では、抵抗 R_L は、

$$0.5 \, \Omega < R_L < 1.5 \, \Omega \quad (8)$$

で変化する。

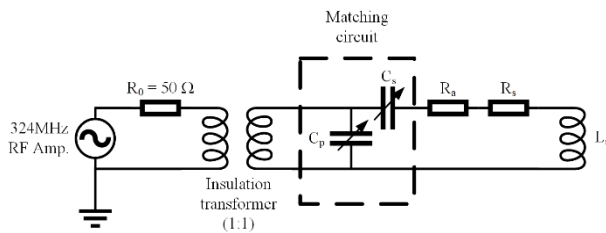


Figure 6: An equivalent electrical circuit with a matching circuit of the 324 MHz RF system.

周波数が 324 MHz と高いので、 $\omega L_s \gg R_L$ となり、 C_s は

$$C_s \approx (\omega^2 L_s)^{-1} \quad (9)$$

と表せる。この負荷抵抗 R_L 範囲での、 C_s 及び C_p の変化を見ると

$$C_s = 0.45 \, \text{pF} \text{ でほぼ一定} \quad (10)$$

$$100 \, \text{pF} \geq C_p \geq 50 \, \text{pF} \quad (11)$$

となる。

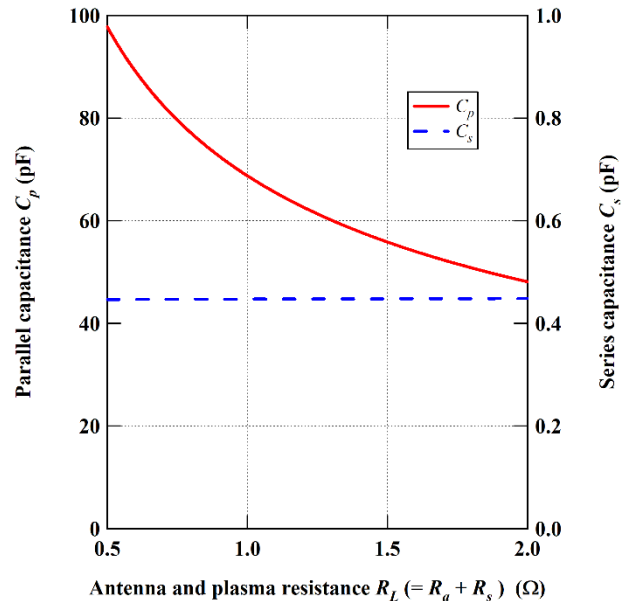


Figure 7: Parallel and Series capacitance of matching circuit for the 324 MHz RF system plotted as a function of the antenna and plasma resistance.

この結果より、長時間連続で運転するときには、一度 C_s を決めるとほぼ変える必要はなく、負荷側の抵抗成分の変化に対して、 C_p のみを調整することでマッチングが

取れることが分かる。

5. まとめ

大強度 RF H⁻イオン源から引き出された H⁻ビームが駆動周波数及びその高調波成分で揺動することを抑制するために、我々はイオンプラズマ周波数よりも高い駆動周波数である J-PARC リニアックと同じ周波数を用いた H⁻イオン源の検討を始めた。今後、本設計結果を基にイオン源のテストベンチの製作を行う予定である。

参考文献

- [1] K. N. Leung *et al.*, “rf driven multicusp H⁻ ion source”, Rev. Sci. Instrum., vol. 62, pp. 100-104, 1990.
doi:10.1063/1.1142315
- [2] R. F. Welton *et al.*, “H⁻ ion source research and development at Oak Ridge National Laboratory”, AIP Conf. Proc., vol. 2373, 070004, 2021.
doi:10.1063/5.0057549
- [3] J. Lettry *et al.*, “Linac4 H⁻ source R&D: Cusp free ICP and magnetron discharge”, AIP Conf. Proc., vol. 2052, 050008, 2018.
doi:10.1063/1.5083762
- [4] D. Wunderlich *et al.*, “Transferring Knowledge Gained for Pulsed Extraction at the ELISE Test Facility to ITER-relevant CW Extraction”, AIP Conf. Proc., vol. 2373, 030003, 2021.
doi:10.1063/5.0057534
- [5] A. Ueno *et al.*, “110 mA Operation of J-PARC Cesium RF-Driven H⁻ ion source”, AIP Conf. Proc., vol. 2373, 040002, 2021.
doi: 10.1063/5.0057552
- [6] K. Shinto *et al.*, “Operation status of J-PARC high-intensity RF-driven negative hydrogen ion source”, The 20th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (PASJ2023), Funabashi, Japan, Aug./Sep. 2023, FRP035, this meeting.
- [7] T. Shibata *et al.*, “Observation of plasma density oscillation with doubled value of RF frequency in J-PARC RF ion source”, AIP Conf. Proc., 2011, 020008, 2018.
doi: 10.1063/1.5053250
- [8] K. Shinto *et al.*, “Observation of beam current fluctuation extracted from an RF-driven H⁻ ion source”, AIP Conf. Proc., vol. 2011, 080016, 2018.
doi: 10.1063/1.5053371
- [9] M. Wada *et al.*, “Measurement of a time dependent spatial beam profile of an RF-driven H⁻ ion source”, Rev. Sci. Instrum., vol. 91, 013330, 2020.
doi: 10.1063/1.5128015
- [10] T. Shibata *et al.*, “High-speed Emittance Measurements for Beams Extracted from J-PARC RF Ion Source”, AIP Conf. Proc., vol. 2373, 050002, 2021.
doi: 10.1063/5.0057418
- [11] M. A. Lieberman and A. J. Lichtenberg, “Chapter 12 Inductive discharges” in Principles of plasma discharges and materials processing (1st edition), John Wiley & Sons, Inc., 1994.
- [12] A. Ueno *et al.*, “Perfectly matched pulsed 2MHz RF network and CW 30MHz RF matching network for the J-PARC RF-driven H⁻ ion source”, AIP Conf. Proc., vol. 1515, pp. 409-416, 2013.
doi: 10.1063/1.4792810