

# Numerical Modeling of Hydrogen Ion Sources with the Radio Frequency Inductively Coupled Plasma

February 2018

Kenjiro Nishida

報告番号	㊦ 乙 第 号	氏 名	西田 健治朗
主論文題名： <b>Numerical Modeling of Hydrogen Ion Sources with the Radio Frequency Inductively Coupled Plasma</b> (高周波誘導性結合プラズマを用いた水素イオン源の数値モデリング)			
(内容の要旨) 高周波誘導性結合プラズマ ( <b>Radio Frequency Inductively Coupled Plasma: RF-ICP</b> ) を用いた水素イオン源は、LSI加工などの産業応用、高エネルギー物理学用加速器、医療用加速器における陽子生成など幅広い応用分野を有している。これら <b>RF-ICP</b> を用いた水素イオン源では、高密度プラズマの生成が求められており、これを達成するには高周波伝送系から放電容器内 <b>RF-ICP</b> への効率的な電力供給が必須の課題となる。しかしながら、 <b>RF-ICP</b> は高周波電磁場に対して複雑な応答を示すため、供給電力の最適化を図るのは容易でない。特に、低密度から高密度へ至る過程において、 <b>RF</b> 放電モードの遷移 ( <b>E</b> モード、 <b>H</b> モード間の遷移) が観測されてきたが、その遷移過程に関する解析は、未だ充分になされていない。以上を踏まえ、本研究では、次の二つのアプローチから、上記課題の解決に取り組む。(1) 巨視的アプローチ： <b>RF-ICP</b> を負荷に含む高周波伝送系における、0次元 <b>RF-ICP</b> 等価回路モデルを用いたインピーダンス整合の検討。(2) 微視的アプローチ：電磁超粒子モデルによる <b>RF</b> 放電モード遷移の運動論的解析。これら二つアプローチから、 <b>RF-ICP</b> 放電に関する知見を得、高密度 <b>RF-ICP</b> を用いた水素イオン源の設計及び研究開発に寄与する。以上の取り組みに関して、本論文を以下の構成でまとめた。 第一章は、序論であり、本論文の目的と意義についてまとめた。放電過程に係る基礎的な物理過程、及び <b>RF-ICP</b> の用途とその課題についてまとめた後、本研究の目的について述べている。 第二章では、インピーダンス整合解析に用いる等価回路モデルについて説明する。本モデルは、外部コイルを含むインピーダンス整合回路系、及び <b>RF</b> 水素イオン源内の <b>RF-ICP</b> で構成される。等価回路素子は、全て集中定数系で扱ういわゆる0次元モデルである。これを基に、主として高密度プラズマに対する電力供給の最大化を、インピーダンス整合の観点から解析する。 第三章では、第二章で説明した0次元等価回路モデルを、欧州原子核研究機構 ( <b>CERN</b> ) で開発されている線形加速器 ( <b>LINAC4</b> ) 用水素負イオン源に適用し、高周波回路設計・運転条件の解析を行った。これまで経験的に行っていた、駆動周波数操作による供給電力制御の有用性が、本モデルの解析結果から定性的に確認された。 第四章では、電磁超粒子モデルを用いた水素 <b>RF-ICP</b> 放電の運動論的解析について記した。本モデルは、 <b>Maxwell</b> 方程式系と荷電粒子の運動方程式を基礎方程式とする。従来の流体モデルに比べ、本モデルは大規模粒子モデルを基にしているため、運動論的観点から放電過程を詳細に解析することが可能である。このような運動論的なモデルによる <b>RF-ICP</b> のシミュレーションは現在までほとんどなされていない。 第五章では、第四章でまとめた数値モデルを用いた <b>RF</b> 放電の解析結果についてまとめている。本モデルは <b>E-H</b> 放電モード遷移を再現することが、解析結果から確認された。さらに、電子、水素イオンのそれぞれについて、放電モード遷移中のエネルギー分布関数 ( <b>EDF</b> ) を運動論的に解析した。解析の結果、荷電粒子の <b>EDF</b> は、熱平衡状態にある <b>Maxwell</b> 分布から逸脱することが確認され、運動論的視点の重要性が示唆された。本モデルによって、荷電粒子 <b>EDF</b> の非平衡性などを考慮した上で、プラズマインピーダンスの計算が可能となり、より微視的な観点からプラズマと高周波回路のインピーダンス整合を検討する上での基盤となる。 第六章では、第一章から第五章それぞれの内容を要約し、本論の結論を述べた。			

Thesis Abstract

No. \_\_\_\_\_

Registration Number	<input checked="" type="checkbox"/> "KOU" <input type="checkbox"/> "OTSU" No. _____ *Office use only	Name	KENJIRO NISHIDA
Thesis Title			
Numerical Modeling of Hydrogen Ion Sources with the Radio Frequency Inductively Coupled Plasma			
Thesis Summary			
<p>Hydrogen ion sources with the Radio Frequency (RF) Inductively Coupled Plasma (ICP) have been utilized in a wide range of fields, e.g., material processing, medical devices, particle injectors for accelerators. It is required for such ion sources to generate the high density plasma. Efficient power transfer between the RF system and the RF-ICP is one of the most important issues to achieve the requirement. However, the response of the RF-ICP to the ElectroMagnetic (EM) field provided by the RF power source is so complex that the optimization of the power transfer cannot readily be achieved. In particular, the discharge mode transition is one of the origins of the complexity: the RF-ICP shows two distinct discharge modes (E-mode and H-mode) depending on the operational regime of the plasma density. Considering issues mentioned above, we have studied the RF-ICP discharge process from (1) macroscopic and (2) microscopic points of view: the former approach is to (1) develop a 0D equivalent circuit model of the RF-ICP for the analysis of impedance matching in the RF system including the RF-ICP as a load, and the latter approach is (2) the particle-based kinetic modeling of the RF-ICP discharge. These studies have been carried out so as to obtain the insight into the RF-ICP, which is mandatory for the improvement of R&amp;D activities towards the realization of hydrogen ion sources with the high density RF-ICP.</p> <p>Chapter 1 is the introduction of this thesis. The purpose and the aim of this study are explained after the brief summary of the physics related to the RF discharge, applications and issues of RF-ICPs.</p> <p>In Chapter 2, the equivalent circuit model of the RF-ICP is explained, which has been developed for the study on impedance matching. This model describes the RF-ICP inside the ion source and the matching network including the external coil which surrounds the plasma chamber. All the elements have been modeled as lumped elements, which means this model is based on 0D model. By using this model, optimization of the power transfer and impedance matching between the RF system and the RF-ICP has been investigated.</p> <p>In Chapter 3, the analysis of the impedance matching in the RF system of the hydrogen ion source of CERN's linear accelerator, LINAC4, is given by using the model introduced in Chapter 2. From the results, it has been confirmed that the control of the RF signal frequency is useful to increase the efficiency of the power transfer to the RF-ICP, which has empirically been found in the experiments carried out at CERN.</p> <p>In Chapter 4, the numerical model of the hydrogen RF-ICP discharge is described. The model is based on the EM Particle In Cell (PIC) method, whose governing equations are Maxwell's equations and the equation of motion for the charged particles. This model is superior to conventional fluid or other simple numerical models of RF discharge: particle-based modeling enables the model to analyze the discharge process from a kinetic point of view. The RF-ICP has hardly been studied by such a kinetic model so far.</p> <p>In Chapter 5, the discharge process of hydrogen RF-ICP is numerically analyzed by using the model introduced in Chapter 4. It has been confirmed that the model is able to reproduce the E-to-H discharge mode transition. In addition, Energy Distribution Functions (EDFs) of electrons and ions are analyzed from a kinetic point of view. The EDFs deviate from the Maxwell distribution in the thermal equilibrium. This indicates the importance of the kinetic perspective to investigate the RF-ICP discharge. It is expected that this model enables us to calculate the impedance of the RF-ICP with the non-equilibrium EDFs. This model will be the basis for the further study of impedance matching between the RF system and the RF-ICP, which takes the kinetic effect into account.</p> <p>Chapter 6 is the summary of this thesis.</p>			