

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 2 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2013～2015

課題番号：25420255

研究課題名(和文)核融合直接発電のための高周波電界を用いた荷電粒子分離改善法の研究

研究課題名(英文)Studies on improvement of charge separation by using radio frequency field for fusion direct power generation

研究代表者

竹野 裕正 (Hiromasa, Takeno)

神戸大学・工学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：90216929

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,000,000円

研究成果の概要(和文)：この研究では、核融合直接発電での電荷分離に利用するカスプ型直接エネルギー変換器の性能向上に、高周波電界を利用する。

最初のイオン捕集電極前面の網電極による実験結果から、磁場平行方向の電界が有用であることを見出した。これに基づいて電子捕集電極前に円環対電極を設置して実験を行い、電子電流を増大させる条件があることを見出した。この現象の物理的理解のために電子の軌道計算を行ったところ、電子の走行時間の差が実験結果に対応すると考えられる。

物理機構の究明には至っていないが、性能改善の可能性が見出された。現象の応用を目指した研究を継続して行く。

研究成果の概要(英文)：In this research, radio frequency (rf) electric field is used for improvement of charge separation performance of a cusp-type direct energy converter employed in fusion direct power generation.

The first experiment using a mesh electrode in front of the ion collector revealed effectiveness of rf field parallel to the magnetic field. According to this result, a pair of ring electrodes were settled in front of the electron collector. The experiment using the ring electrodes showed increase of electron current in a certain condition. To examine the physical mechanism of the phenomena, electron orbits were calculated. The calculation results suggested the difference of running time of electrons might correspond to the experimental results.

The physical mechanism has not been necessarily clarified yet, but a possibility to improve the device performance is shown. The research will be continued in order to apply the phenomena to the practical device.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：直接発電 カスプ型直接エネルギー変換 高周波動重力

1. 研究開始当初の背景

先進燃料核融合発電では、反応生成物が荷電粒子のため、直接発電が期待できる。直接発電でまず行うべきことは、正負電荷の分離であり、この課題に対して、カusp型直接エネルギー変換器(CuspDEC)が提案された。

研究代表者等のグループでは、CuspDECの模擬実験装置を構築し、他で類を見ない模擬実験によるCuspDECの開発研究を進めてきた。それらの模擬実験の結果によると、CuspDECは比較的低密度のプラズマを効率良く分離できるが、密度の上昇に伴って電荷間の結合が強くなり、分離効率が低下する。実機レベルの密度を対象とした場合、CuspDEC本来の外部磁場の効果だけでは十分な分離は難しく、何らかの補助手段が必要と考えられた。

2. 研究の目的

研究グループの代表者等は、1.の問題に対して、高周波電界がもたらす非線形力を補助手段として利用できることを発案した。高周波電界は、離れた位置にアンテナを設置して高周波を放射することで、電界の元になる構造体にプラズマが直接触れないよう、配置できる。CuspDEC本来の特徴である、無電極構造での電荷分離を保ったまま、補助する効果が得られるものと期待される。

本研究の目的は、このような高周波電界による電荷分離の補助効果を実証することである。その可能性を調べるべく、研究を計画した。

3. 研究の方法

(1) 模擬実験

模擬実験を主体として、研究を行った。主となるCuspDEC模擬実験装置は、研究開始時点で既設であった。本研究に即した、高周波電界放射用の構造物および周辺機器を追加するだけで、実験は可能である。しかしながら、電荷分離領域、即ち測定領域に、大振幅高周波電界が存在するので、計測信号に大きな雑音が重畳することになり、それらの評価が難しくなる。

(2) 数値計算

実験的に測定できるものは限られており、実験結果の解釈には、数値計算の併用が必須である。本研究では、主として独自に開発した粒子軌道計算コードを用いた。

4. 研究成果

(1) イオン捕集電極前面の網電極による実験

既設のCuspDEC模擬実験装置の構造を図1に示す。ポイントカusp領域にイオン捕集電極(P3)があり、その前面に網電極(P4)がある。この網電極に7 MHzの高周波電圧を印加できるように、設備を整備して実験を行った。

図2に、イオン捕集電極の電流 - 電圧特性を示す。高周波を印加しない場合は、0 V付近で電子電流が急激に増大するようなプロ

ープ特性に近いものが得られる。一方、高周波印加時は、電流が広い電圧範囲でなだらかに変化する。

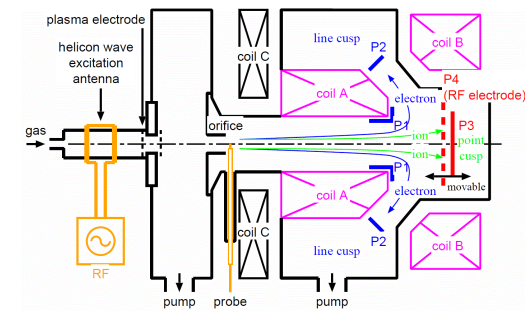


図1 CuspDEC 模擬実験装置の構造

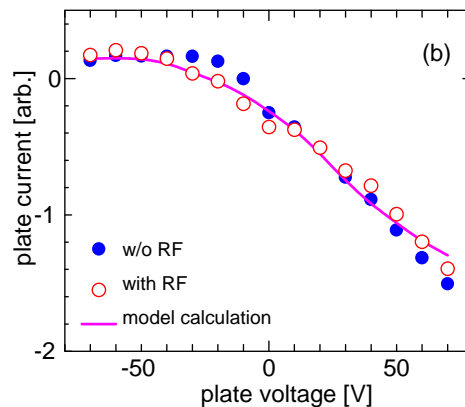
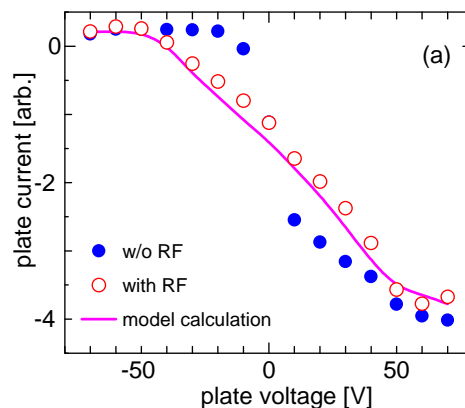


図2 イオン捕集電極の電流 - 電圧特性
(a): $I_B/I_A=0$, (b): $I_B/I_A=0.67$)

このようななだらかな電流の変化は、高周波で空間電位が変化することによる、見かけの変化と予想した。適当な振幅で、高周波なしの電流 - 電圧特性の空間電位が正弦波状に変化するものとして、見積もられる電流を測定値に適合させたものが図中の曲線である。曲線の適合状況から、(b)の $I_B/I_A=0.67$ (I_B, I_A は、それぞれ図1のcoil B, Aの電流)では適合度が高いが、(a)の $I_B/I_A=0$ では差が認められる。つまり、(b)では、高周波印加による電流 - 電圧特性に変化がないが、(a)では変化があると考えられる。

このような差の I_B/I_A に対する変化を調べたところ、図3の結果を得た。図より、 I_B/I_A

が小さい領域で差が大きく、高周波印加によって電流 - 電圧特性が変化する、即ち、高周波による影響が大きいことがわかる。 I_B/I_A が小さい領域では、外部磁場が主として軸方向であり、今の網電極による印加電界も軸方向が主であることを考えると、外部磁場に平行な方向の電界がより強く影響を与えることができると予想される。

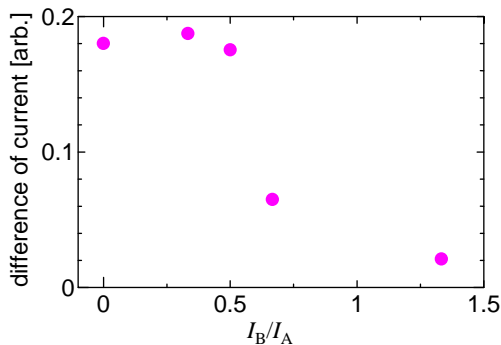


図3 正弦変化適合曲線と測定値との差

(2)電子捕集電極前面への円環対電極設置による実験

(1)の結果そのままでは、通常分離用磁場でない条件で高周波電界の効果が現れるので、補助手段とならない。分離用磁場で効果が得られるよう、円環対電極を設置した。

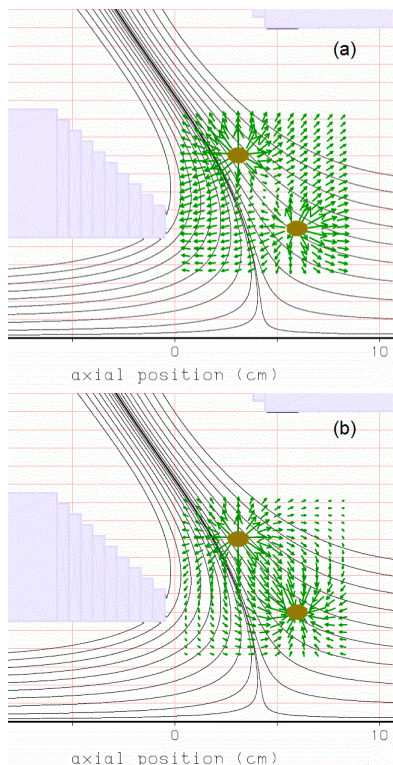


図4 円環対電極の配置と電界分布
(a): 同相印加, (b): 逆相印加

図4に径 - 軸方向断面上の円環対電極の配置を磁力線とともに示す。また、同相および

逆相の電圧を印加した場合の電界分布も示す。二つの電極間の位相差を変化させることで、電極間の磁力線平行方向の電界を変化できる。

この電極への高周波電圧印加による、電子捕集電極での電子電流の変化を調べた。図5は、 $I_A=30$ Aで固定したときの I_B の変化に対する電子捕集電極(+50 V時)の電流を示す。印加高周波は7 MHzで、同相である。円環対電極(接地時)への流入電流も上部グラフに示す。

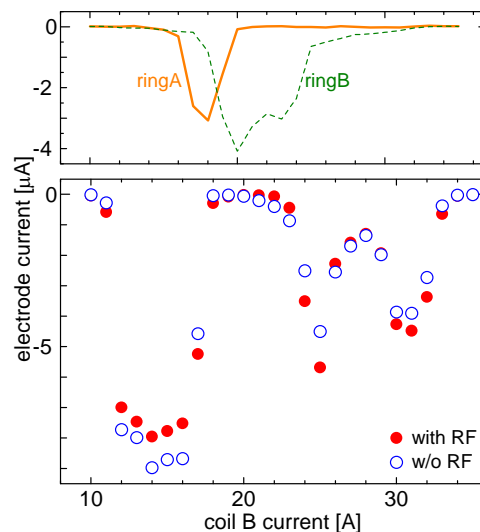


図5 下流コイル電流に対する電極電流

$I_B=12-32$ Aの範囲中、円環対電極への流入が見られる条件以外で、電子捕集電極での電子電流が確認できる。高周波印加で電子電流が増大する場合と減少する場合とがあり、増大するのは、円環対電極で隠される境界付近の条件である。これは、主となる電子の流れが円環対電極の直近であり、電子がより強い電界を受けていることに対応するためと考えられる。

図5で電子電流が増大する条件として $I_B=25$ Aを選び、印加電圧に対する電子捕集電極の電子電流の変化を調べた。図6に、高周波印加のない場合の電子電流 I_0 で規格化した電子電流の大きさ I_E/I_0 の高周波印加電圧依存性を示す。図では、磁場強度依存性として、 $I_B/I_A=25/30$ A/Aの比を保ちながら I_B を変化させた結果も示す。また、この測定を同相(in-phase)と逆相(out-of-phase)の各電圧印加条件で行った結果も示す。

図6の同相の場合、電子電流は高周波電圧に応じて増加する場合と減少する場合とがある。磁場強度が強いほど増加率は大きく、 $I_B=20$ A未満では、増加率が負、即ち減少している。一方、逆相の場合、正の増加率の場合には認められない。しかし、磁場強度が強いほど増加率が大きくなる点は、同相の場合と共通している。

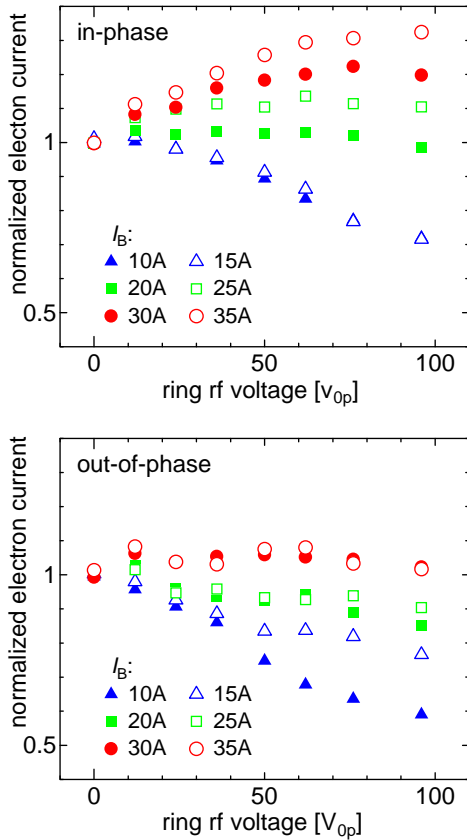


図6 電子捕集電極の電子電流の高周波電圧および磁場強度に対する変化

さらに、印加高周波の周波数依存性についても調べた。図7に図6と同様の電子電流の変化を、高周波の周波数を変化条件として示す。 $I_B/I_A=25/30$ A/Aで、同相印加である。

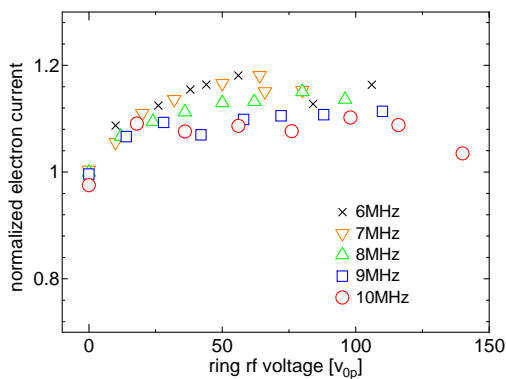


図7 電子捕集電極の電子電流の高周波電圧および周波数に対する変化

図7より、電子電流の高周波電圧に対する増加率は、周波数が高くなるほど低下することがわかる。このような変化は、高周波電界による非線形力（高周波動重力）の理論的な表式による予想と矛盾しない。

(3) 粒子軌道計算による物理機構の検討

(2)の円環対電極の実験に対応した、電子の軌道計算を行った。計算方法は、時間に対して4次のルンゲ-クッタを適用した。磁場は

コイル電流をビオ・サバル則に沿って数値積分して求め、電界はラプラスの式を差分法で解いた。円環対電極に印加高周波の電圧振幅分を与えたものを境界条件として求めた解を予め用意して、時間追跡の際に、値を7MHzで正弦波状に変化させた。物理機構を明瞭にするために、捕集電極の電位は0Vとしている。

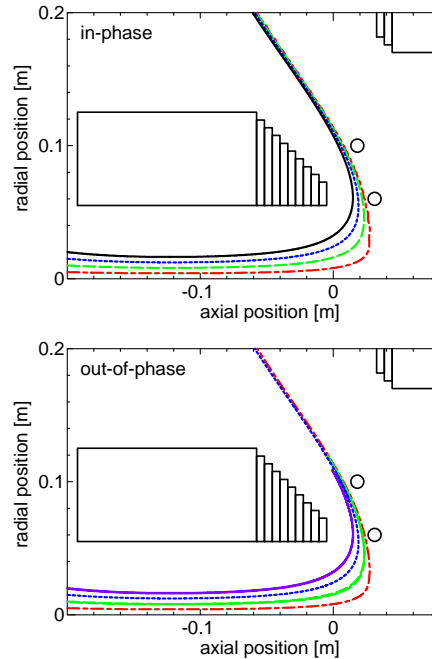


図8 数値計算による電子の軌道例

図8は、4種類の径方向位置から入射した場合の軌道計算例である。同相では、高周波がない場合と同様の軌道を描くが、逆相では、円環対電極付近で折り返して、電子捕集電極に到達しないものがある。また、到達するものでも、入射から到達に至る時間が異なる。到達時間は、入射時の高周波の位相（初期位相）で変化する。入射径位置の条件とともにまとめたものを図9に示す。図では、折り返し(reflected)で到達しなかった場合も示してある。

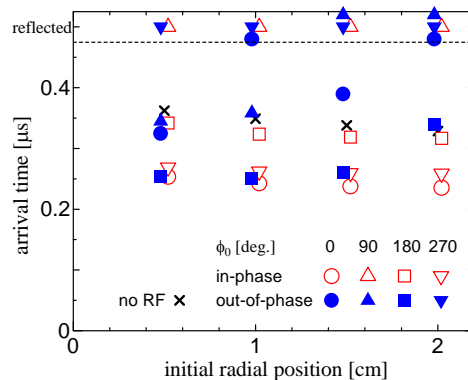


図9 条件変化に対する到達時間の変化

図9から、同相より逆相の方が到達しない

条件が多いこと、また、平均的に逆相の方が到達時間が長いことがわかる。これらは、いずれも逆相の方が電子電流が小さくなることと矛盾しない。また、条件毎に違いはあるが、高周波を印加しない場合に比べて到達時間が短くなる条件もあり、高周波を印加しない場合よりも電子電流が増大することに対応している可能性がある。

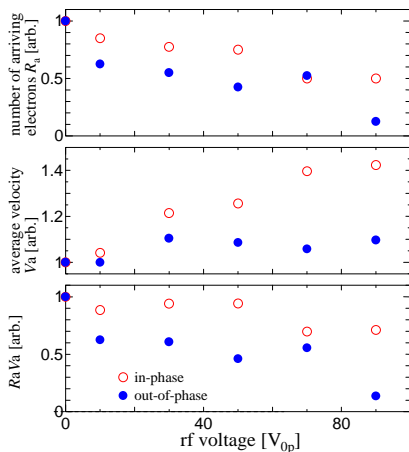


図 10 高周波電圧に対する到達可能性と規格化平均到達速度の変化

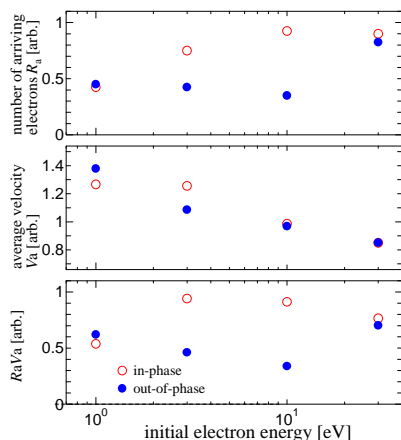


図 11 電子エネルギーに対する到達可能性と規格化平均到達速度の変化

これらの変化を定量的に扱うために、径方向分布を考慮した到達可能性 R_a と、到達時間の逆数を高周波を印加しない場合に対して比をとった規格化平均到達速度 V_a を調べた。図 10 に高周波電圧に対する依存性を示す。 R_a はいずれも減少ながら、逆相で大きく減少し、 V_a はいずれも増加で、同相で大きく増加する。これらの積はいずれも減少ながら、逆相で大きく減少する。同相/逆相間の差は実験結果と矛盾ないが、同相で高周波を印加しない場合に比べて増大する効果は確認できない。

図 11 は同様に電子エネルギーに対する依存性を示す。 R_a は同相で大きい、 V_a はあまり大きな差はない。両者の積は、3-10 eV で差が大きいことがわかる。実験で用いたプ

ラズマ源の電子エネルギーはこのあたりと見積もられるので、同相/逆相間の差は定性的には矛盾ない。しかし、積が 1 以上となる場合が見いだせず、高周波印加で電子電流が増大することの直接的な計算結果は見いだせていない。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計 1 件)

Masaki HAMABE, Hiroaki IZAWA, Hiromasa TAKENO, Satoshi NAKAMOTO, Kazuya ICHIMURA, Yousuke NAKASHIMA, Studies on the Effect of Radio Frequency Field in a Cusp-Type Charge Separation Device for Direct Energy Conversion, Plasma and Fusion Research, 査読有, Vol. 11, 2016, 2405028

[学会発表](計 8 件)

竹野 裕正、濱邊 真輝、井澤 裕皓、中本 聡、市村 和也、中嶋 洋輔、カusp型直接エネルギー変換器における高周波電界による粒子軌道の変化、プラズマ・核融合学会第 32 回年会、2015.11.24、名古屋大学(愛知県) 濱邊 真輝、富田 裕、竹野 裕正、八坂 保能、市村 和也、中嶋 洋輔、カusp型直接エネルギー変換器における高周波電界印加時の粒子束信号の解析に関する研究、平成 26 年電気関係学会関西連合大会、2014.11.24、奈良先端科学技術大学院大学(奈良県)

H. TAKENO, M. HAMABE, S. NAKAMOTO, Y. YASAKA, K. ICHIMURA, Y. NAKASHIMA, Variation of Charge Separation due to Radio Frequency Application in a Cusp-type Direct Energy Converter, PLASMA2014, 2014.11.18, 朱鷺メッセ(新潟県)

H. TAKENO, Y. TOMITA, K. NISHIMURA, Y. YASAKA, K. ICHIMURA, Y. NAKASHIMA, Effect of Radio Frequency Field to Charge Separation in a Cusp-type Direct Energy Converter Simulator, 23rd International Toki Conference, 2013.11.20, セラトピア土岐(岐阜県)

6. 研究組織

(1)研究代表者

竹野 裕正 (TAKENO, Hiromasa)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号: 90216929

(2)研究分担者

中本 聡 (NAKAMOTO, Satoshi)

神戸大学・大学院工学研究科・助手

研究者番号：10198260

八坂 保能 (YASAKA, Yasuyoshi)

神戸大学・大学院工学研究科・名誉教授

研究者番号：30109037

(3)連携研究者

()

研究者番号：