

令和元年6月1日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(B)（一般）

研究期間：2016～2018

課題番号：16H04317

研究課題名（和文）核融合直接発電のためのカusp型 - 進行波型統合システムの研究

研究課題名（英文）Study of combined system of cusp and traveling wave types for fusion direct power generation

研究代表者

竹野 裕正 (Takeno, Hiromasa)

神戸大学・工学研究科・教授

研究者番号：90216929

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 10,000,000円

研究成果の概要（和文）：ヘリウム3燃料反応に対する核融合直接発電システムは、カusp型と進行波型の二種の変換器で構成され、従来は個々別々に研究が進められてきた。本研究課題では、既存装置の拡張による模擬実験および数値計算で、両変換器の統合に伴う問題を初めて扱った。カusp型変換器でのイオン間分離では、新分離手法の提案と数値計算によるその有効性の分析を、進行波型変換器の動作では、ビームの散乱に伴う問題の解決を、それぞれ行った。

研究成果の学術的意義や社会的意義

核融合直接発電は、先進燃料核融合を直接の対象とする、将来のエネルギー問題に関わる技術である。核融合研究と同様、その規模の大きさから、長期間にわたる研究を積み重ねる必要があり、本研究課題もその一段階と言える。従来の研究成果に基づいて、研究段階を一段上昇させる位置づけであり、新段階の初期研究としての成果が得られたものと言える。研究の過程で、進行波型変換器のトップデータが得られた意味は大きい。

研究成果の概要（英文）：A direct energy conversion system for helium-3 fuel fusion is composed of two kinds of converters of cusp type and traveling wave type, which have been studied individually. In this project, problems relating to unifying two converters are treated for the first time by simulation experiments on an extended equipment and numerical calculations. Proposition of a new scheme for separation between ions in the cusp type converter with examination of the effectiveness of the scheme by numerical calculation, and problem solving on beam scattering for the traveling wave type converter was carried out.

研究分野：プラズマ工学

キーワード：核融合 新エネルギー 直接発電

様式 C-19、F-19-1、Z-19、CK-19（共通）

1. 研究開始当初の背景

現在研究されている核融合直接発電は、ヘリウム3燃料に対する反応生成物を想定して、カスプ型と進行波型の二種の変換器を縦続接続するシステムとして提案されたものである。両変換器の機能や動作は全く異なるために、これまではそれぞれ独立に研究が進められてきた。それぞれの研究が相当進展する中で、両変換器を統合する際の問題が意識されはじめてきた。

特に、粒子分離を担うカスプ型変換器では、一つの重要な機能である高速イオンと熱化イオンの分離について、少なくとも実験的には全く手つかずの状態であった。この分離の性能については、両変換器が統合された後に、後段の進行波型変換器に流入する不純物の量として影響してくることになる。また、十分研究が進んでいる電子-イオン分離についても、分離が不十分な場合は、進行波型変換器に電子を流入させかねない。

これらの問題について、特に実験的な取り組みについては、問題内容を意識した模擬実験装置が必要となるが、現状、対応できる装置はない。申請者等が使用している従来の模擬実験装置は、適切な改良・拡張によって、問題を扱う装置として再構成できると考えられる。

2. 研究の目的

本課題では、ヘリウム3燃料核融合直接発電システムについて、カスプ型と進行波型を統合した際の問題を模擬実験を中心として取り扱う。具体的には、1) 既設の模擬実験装置を改良・拡張して、統合型実験ができるよう、整備すること、2) カスプ型変換器での高速イオン-熱化イオンの分離（イオン間分離）について、従来提案と異なる手法を提案し、その有効性を調べること、および 3) 進行波型変換器について、未分離不純物粒子が流入する際の影響について調べることを、の各課題に取り組む。

3. 研究の方法

- (I) 既設の模擬実験装置の改良・拡張では、I) 高速イオン-熱化イオンの分離実験が実現できるよう、新たに着想した複合プラズマ源を構築し、既設の単純高速イオン源と置き換えること、II) 二変換器の統合実験ができるよう、主容器を軸方向に拡張すること、を行う。

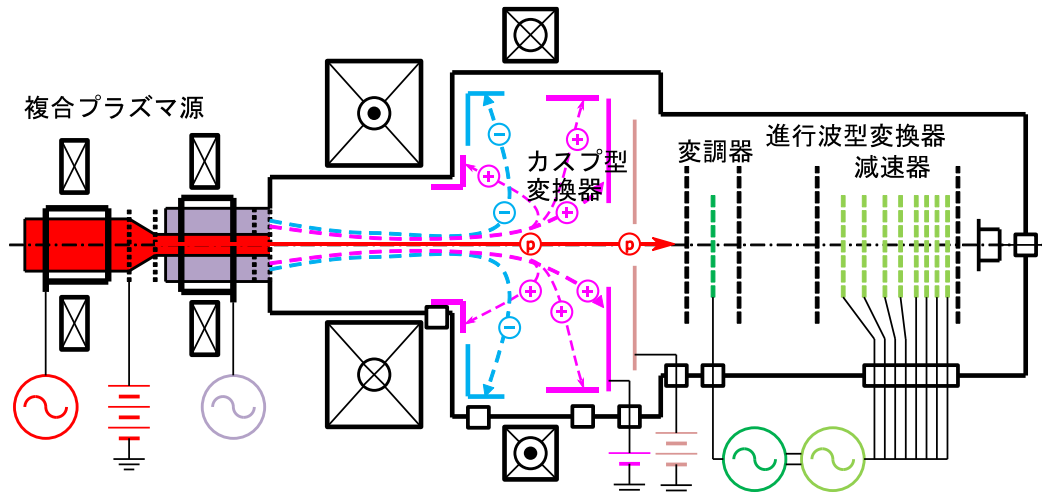


図1 統合型核融合直接発電模擬実験装置の構成

図1に、これらの改良・拡張による模擬実験装置の構成を示す。図の左側に新着想の複合プラズマ源を配置する。二種のプラズマ源を縦続接続したもので、上流（左側）の高速イオン源から引き出されたイオンは、下流（右側）の熱プラズマ源を中空構造にして設けた管路中を通過し、変換器容器へと流入する。下流の熱プラズマ源は変換器容器に直結しており、熱化イオンと電子とが流入する。変換器容器は前段（図中央）にカスプ型変換器を配置して電子とイオンを分離し、下流に設けた単一孔電極対でイオン間分離（次項参照）を行う。これらを通じた高速イオンは、再下流（図右側）の進行波型変換器でエネルギー回収される。

(2) カスプ型変換器でのイオン間分離については、従来はカスプ磁場の効果での分離が想定されていたが、過去の研究の二段減速から着想された単一孔電極対による静電分離を提案した。下流電極に熱化イオンにとって障壁となる高電圧を印加し、上流電極の穴から漏れ出る電界で熱化イオンを反射させる。高速イオンは両電極の穴を通過して、下流の進行波型変換器へ向かう。既設の別装置で試験を行ったところ、想定シナリオに反する結果がみられた。分離領域の手前で流入イオンが発散していることが原因と予想され、効果的な回避策が得られなかったため、数値計算で新手法の効果を調べることにした。

(3) 進行波型変換器での不純物粒子流入の影響に関して、模擬実験でイオンビーム中に電子の混入が観測され、その発生源は変換器を構成している網電極からの二次電子と予想された。

その問題追及の過程で、測定電極の信号評価を通じてビーム自体の散乱現象が発見され、過去の数値計算との照合、並びに近年問題となっている変調効果の時間変化との関係追及が進んだ。電子の混入問題は未解決ながら、ビーム散乱についての重要な知見の獲得へと展開した。

4. 研究成果

(1) 統合型核融合直接発電模擬実験装置の構築

設計・製作した新着想の複合プラズマ源の外観を図2左に示す。既設装置への接続前に、単独での動作・調整を行った。二組のガス圧・磁場強度の設定があり、また、装置組込みに伴う真空系の変化でガス圧は変化するため、動作の最適化は未達である。

模擬実験装置の全景を図2右に示す。主容器部の拡張および複合プラズマ源の接続は問題なく行われ、真空系も良好に動作している。

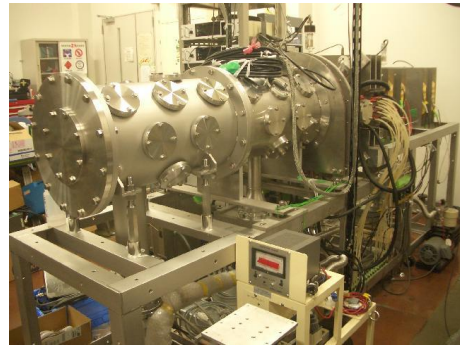
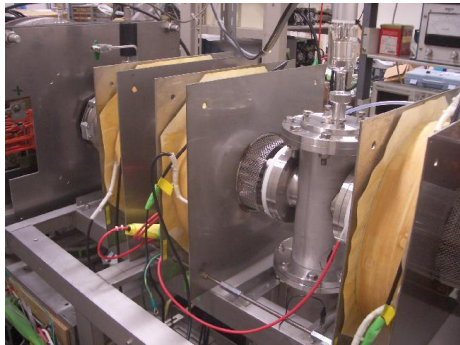


図2 複合プラズマ源（左）と模擬実験装置全景（右）

(2) カスプ型変換器におけるイオン間分離

既存の粒子軌道計算コードを改良して、単一孔電極対による電界下での単一イオンの軌道計算を行い、新提案のイオン間分離手法を検討した。

熱化イオンは単一孔電極対で反射され、カスプ型変換器内に配置した熱化イオン捕集電極でエネルギー回収する。反射イオンの軌道方向に捕集電極を配置するため、反射イオンの軌道を調べた。径(r)-軸(z)二次元平面内で、軸方向上流側($-z$)に基準方向をとり、反射イオンの進行方向が成す角を評価した。

図3に、上流電極の孔半径(r_U)に対するイオンの反射方向の変化を示す。イオンは入射半径10 mmで、図中に示すエネルギー毎に調べた。図より、20-80 eVの広いエネルギー範囲において、孔半径が増大すると、反射軌道が 0° 程度の方向に収束することがわかる。同様に、電極対の間隔(z_D-z_U)に対する依存性を調べた結果について、入射半径20 mmの場合を図4に示す。この場合も、電極間隔の増大に伴って40-80 eVの範囲で反射角度が収束する方向にあることが確認できる。

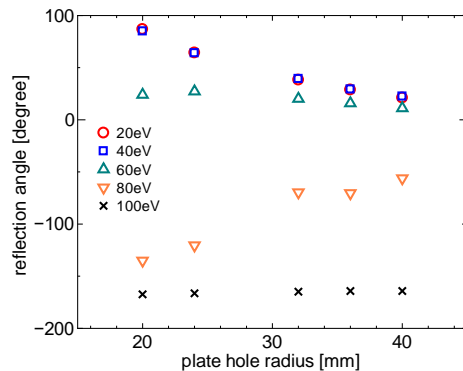


図3 反射方向の上流電極孔半径依存性

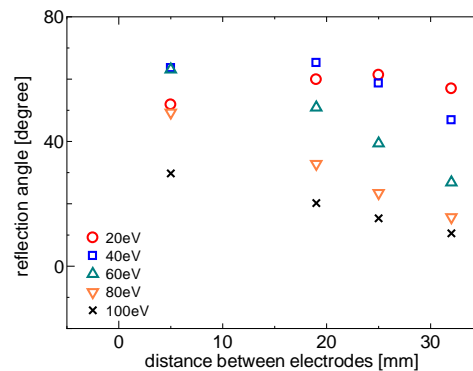


図4 反射方向の電極間隔依存性

以上の軌道変化は、電極近傍の電界分布より理解できる。図5に、3種類の電極配置（キャプション中に表示）での電極近傍電界の分布を示す。上流電極孔半径に対する変化について、(a)と(b)とを比較すると、孔半径の大きな(b)の方が、上流の電界の軸方向に対する傾きが小さい。これにより、孔半径の増大に伴ってイオンの反射方向が軸方向に向かうことがわかる。電極間隔依存性については、(b)と(c)とを比較すると、電極対間で半径20 mm程度の空間では電界が軸平行方向であり、電極間空間の大きな(c)の方が、この方向の電界による軌道への影響を強く受けると考えられる。

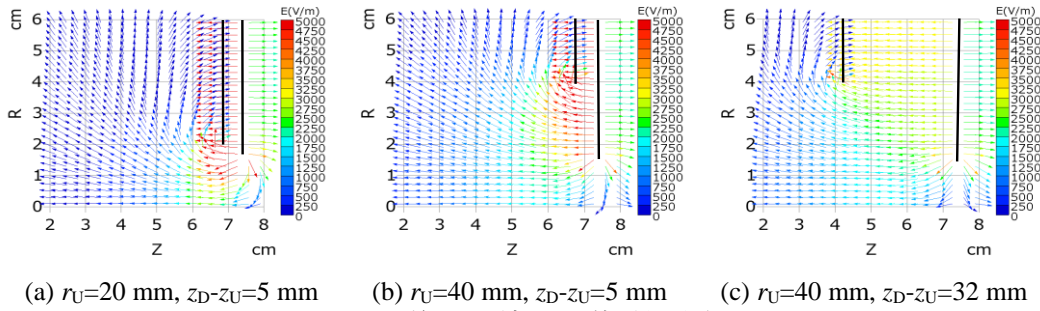


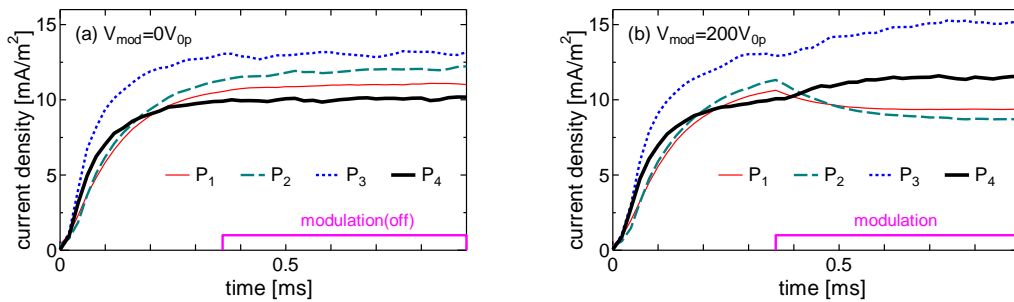
図5 単一孔電極対近傍電界分布

反射軌道の 0° 方向の近くでは、入射口付近に熱化イオンの捕集電極が従来から設置されており、この配置での熱化イオンの捕集が有効と予想される。

(3) 進行波型変換器におけるビーム散乱

進行波型変換器でのビームの散乱は、過去の数値計算の研究によって予測されていた。ビームの変調に伴ってイオンは集群し、その集群イオン周辺の電界の増大に伴って、イオンの軌道が乱される。模擬実験では、この現象は調べられていなかった。本研究では、軸方向最下流に径方向に分割した電極を設置し、変調電界の印加に伴うビーム電流の径方向分布の変化を測定して、この現象を扱った。

図6に、電極毎のビーム電流の時間変化を示す。(a)は変調をしない場合で、0.3 ms以降で一定の電流が観測される。200 V_{op}の変調電圧を0.36 ms以降に印加した結果が(b)である。変調電圧の印加に伴って、各電極の電流は(a)に比べて変化し、より径の小さいP₁, P₂では減少する一方、径の大きなP₃, P₄で増大している。これは、ビーム電流分布が外側に広がったことを示しており、径方向の散乱と考えられる。図6の変化で、電流の変化が0.1-0.2 ms程度の時間を要している点も注目される。



(a) 変調電圧 0 V_{op} (変調なし) (b) 変調電圧 200 V_{op}
図6 径方向分割電極のビーム電流の時間変化

変調電圧を変化させて、変化に要する時間(時定数)を調べた結果を図7に示す。横軸は電極半径の平均値を示す。径方向全域に渡って、100-200 μ sの時定数であることがわかる。変調による集群はビームの速度変調の理論からイオンの走行時間程度で形成され、集群粒子の電界による散乱も同程度の時間と考えられる。これらは本実験条件ではマイクロ秒の桁であり、明らかに観測した時定数が大き過ぎる。

進行波型変換器では、変調効果に時間変化があることが最近問題となっている。この変化は100 μ sのオーダーの時定数で収束する。本研究の散乱の時間変化との関係が想起される。

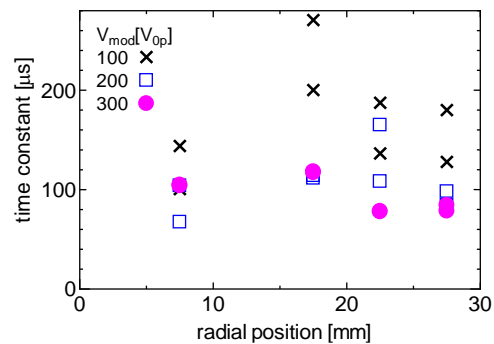


図7 散乱による電流変化の時定数

ビームの径方向散乱は、実機の場合、直接損失を意味する。回避策が必要となるが、このビームをそのまま定減速度型減速器に導入したところ、散乱が抑制されることが観測された。

ビームのエネルギー分析は、最下流に設置したファラデーカップ(FCP)で行っている。図8は、FCPで計測されたエネルギー分布から算出された到達粒子数の時間変化を示している。イオン源のプラズマ点火から0.3 ms後程度でビームは定常状態となるが(図6参照)、定常の期間に変調および減速の高周波電界を印加する。図8によると、変調のみ(●)の場合、散乱現象に呼応した粒子数の低下が見られる。ところが、適切な位相で減速器電界を印加する(○)と、一旦低下した粒子数が高周波印加前のレベルまで回復する現象が観測される。減速器電界

が適切な位相でない (□) と、粒子数の低下はむしろ悪化することがわかる。減速器電界の位相の適切さは、減速率に直接現れる。図9は、到達粒子数と減速率との相関を表したもので、両者には明瞭な相関が認められる。

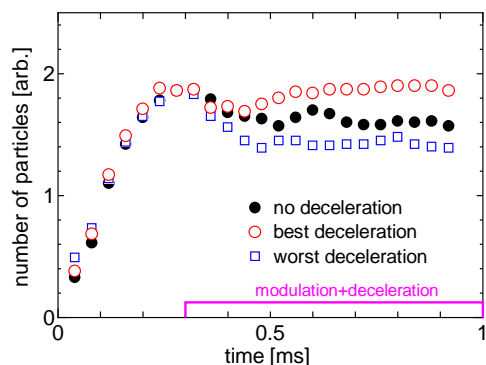


図8 計測器到達粒子数の時間変化

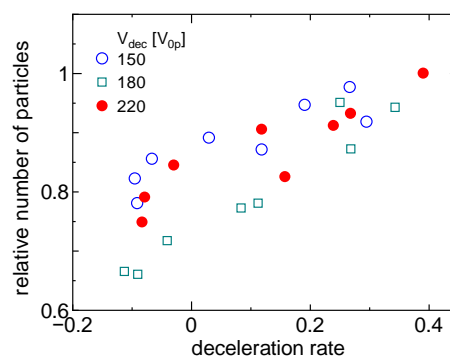


図9 到達粒子数と減速率との相関

以上の観測結果は、減速器電界の散乱抑制作用を示している。定減速度型減速器では、進行波の電位の谷に粒子を捕捉して減速する。本来は軸方向の捕捉であるが、この効果が径方向にも現れたものと理解できる。適切な位相で減速器を動作させれば、電位谷への粒子の捕捉が達成されているが、位相が適切でない場合、少数の粒子の捕捉に留まり、その結果、減速率は低くなる。粒子の捕捉は一方で径方向にも働き、散乱の抑制と、その結果として、到達粒子数が増大したものと見える。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

- (1) Kazuhiro SHIBATA, Hiromasa TAKENO, Kazuya ICHIMURA, Satoshi NAKAMOTO, Yousuke NAKASHIMA,
Experimental Analysis on Variation of the Amount of Particles Passing Through Traveling Wave Direct Energy Converter,
Plasma and Fusion Research, 査読有, Volume 14, 2019, 3405078.
DOI: 10.1585/pfr.14.3405078
- (2) Kazuhiro SHIBATA, Hiroki SATO, Hiromasa TAKENO, Kazuya ICHIMURA, Satoshi NAKAMOTO, Yousuke NAKASHIMA,
Analytical Experiment of Time Evolution of Deceleration Effect in Traveling Wave Direct Energy Converter Using Dual-Frequency Modulation,
Plasma and Fusion Research, 査読有, Volume 14, 2019, 2405027.
DOI: 10.1585/pfr.14.2405027
- (3) Hiromasa TAKENO, Hiroki SATO, Kazuhiro SHIBATA, Kazuya ICHIMURA, Yousuke NAKASHIMA,
Examination of Bunching Effect of Dual-Frequency Modulation in a Traveling Wave Direct Energy Converter Simulator,
Plasma and Fusion Research, Volume 14, 2019, 2405014.
DOI: 10.1585/pfr.14.2405014
- (4) Hiromasa TAKENO, Kazuya ICHIMURA, Satoshi NAKAMOTO, Yousuke NAKASHIMA, Hiroto MATSUURA, Junichi MIYAZAWA, Takuya GOTO, Yuichi FURUYAMA, Akira TANIIKE,
Recent Advancement of Research on Plasma Direct Energy Conversion,
Plasma and Fusion Research, Volume 14, 2019, 2405013.
DOI: 10.1585/pfr.14.2405013

[学会発表] (計 15 件)

- (1) Yuuki OKAMOTO, Kazuya ICHIMURA, Satoshi NAKAMOTO, Hiromasa TAKENO, Junichi MIYAZAWA, Takuya GOTO,
Improvement of ion-ion separation and collection by modification of electrode structure in a cusp type direct energy converter,
The 27th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference, 2018.
- (2) Yuuki OKAMOTO, Kouhei HARADA, Kazuya ICHIMURA, Satoshi NAKAMOTO, Hiromasa TAKENO, Junichi MIYAZAWA, Takuya GOTO,
Working characteristics of a combined plasma source for ion-ion separation experiments in direct energy conversion,
12th International Conference on Open Magnetic Systems for Plasma Confinement, 2018.

- (3) K. Harada, Y. Okamoto, K. Ichimura, S. Nakamoto, H. Takeno, J. Miyazawa, T. Goto,
A Preliminary Study of Ion-Ion Separation in Cusp-type Direct Energy Converter,
The 26th International Toki Conference, 2017.
- (4) 岡本祐樹, 原田康平, 市村和也, 中本聡, 竹野裕正, 宮澤順一, 後藤拓也,
カusp型直接エネルギー変換器でのイオン-イオン分離の模擬実験研究,
平成29年電気関係学会関西連合大会, 2017.
- (5) 竹野裕正, 近藤太志, 若泉貴弘, 市村和也, 中本聡, 中嶋洋輔,
進行波型直接エネルギー変換模擬実験装置における集群イオンの電界による散乱に関する研
究,
Plasma Conference 2017, 2017.

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：中本 聡

ローマ字氏名：NAKAMOTO, Satoshi

所属研究機関名：神戸大学

部局名：大学院工学研究科

職名：助手

研究者番号 (8桁)：10198260

研究分担者氏名：市村 和也

ローマ字氏名：ICHIMURA, Kazuya

所属研究機関名：神戸大学

部局名：大学院工学研究科

職名：技術職員

研究者番号 (8桁)：20756001

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

※科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。