

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 23 日現在

機関番号：14501

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2010～2012

課題番号：22560273

研究課題名（和文） 進行波型直接エネルギー変換器における変調方式の実験研究

研究課題名（英文） Experimental Study of Modulation Scheme in Traveling Wave Direct Energy Converter

研究代表者

竹野 裕正 (TAKENO HIROMASA)

神戸大学・大学院工学研究科・准教授

研究者番号：90216929

研究成果の概要（和文）：本研究では、重水素とヘリウム3を燃料とする核融合発電での利用が期待される進行波型直接エネルギー変換器について、実験的な研究が遅れている変調方式の模擬実験研究を行った。実機で利用可能な変調方式での変調効果が十分に得られていないが、実験結果の部分的な評価によって、定在波電界と進行波電界との変調特性を比較した。変調方式の選択と設計によって、装置サイズと変換効率のトレードオフに対する最適点を求める可能性を確認した。

研究成果の概要（英文）：This research treated traveling wave direct energy converter which was expected to be used in deuterium-helium3 fusion power generation. The modulation scheme, on which experimental studies were insufficient, was studied by simulation experiments. In a modulation scheme applicable to a practical device, quite weak modulation effect was found. A part of the experimental results were evaluated, and modulation characteristics were compared between standing wave field and traveling wave field. The optimum condition could be found in a trade-off between device size and conversion efficiency by appropriate selection of modulation scheme and modulator design.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2011年度	1,400,000	420,000	1,820,000
2012年度	600,000	180,000	780,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：工学

科研費の分科・細目：電気電子工学、電力工学・電力変換・電気機器

キーワード：プラズマ・核融合、直接発電

1. 研究開始当初の背景

重水素とヘリウム3を燃料とする核融合発電では、発生エネルギーの大半は荷電粒子である陽子をもつ。このため、直接発電の利用が期待できるが、陽子のエネルギーが大きいため、進行波型の変換器：Traveling Wave Direct Energy Converter (TWDEC)を用いる

方法が有望とされている。炉心から引き出した陽子ビームは変調器に導かれ、高周波電界で速度変調され、下流で集群する。集群部には減速器が配置され、集群ビームを電極列に作用させて、ビームのもつ運動エネルギーを高周波エネルギーとして取り出すものである。数値計算による研究でその有効性は認め

られてきたが、実験的な検証はまだ不十分である。

TWDEC の研究は、発案者が日本人であることもあり、日本人による研究が盛んである。前記の数値計算によるもの以外の実験的な研究は、申請者等のグループによるものしか見当たらない。申請者等は、TWDEC を実現するための基礎的な研究、特に、他で例をみない模擬実験装置を用いた実験研究を進めてきた。原理検証の他、減速器の構造に注目して改良を重ねてきたが、変調器については、最も単純な単一区間の一様電界で固定されていた。変調方式の選択も TWDEC の効率に大きく影響するため、実験的な検証を十分行う必要がある。

2. 研究の目的

本課題では、当初の目的としては、いくつか提案されている変調方式のうち、効果が大きいと予想される倍調波併用と多段進行波のそれぞれの方式について、変調効果を調べるものであった。しかし、4. の研究成果で説明する様に、最も簡単な構成の電極系で実験を行った際、想定される変調効果が見いだせない状況が続いた。問題の原因を調べる実験を行いつつ、得られる結果を部分的に評価して変調効果を見積もる研究を進めた。一方で、TWDEC の研究がアメリカ航空宇宙局 (NASA) で始まり、宇宙船用の動力源への可能性を調べる観点から、装置の小型化という課題が注目されることとなった。

この様な状況および背景の変化に鑑み、具体的に行ったことは、いくつかの変調方式の変調効果を反映すると予想される現象を調べ、それらの特性を TWDEC の小型化の観点から評価した。変調効果が強い場合、集群位置が近くなり、小型化に有利である。しかし、エネルギー拡がり大きい場合、一般に変換効率は低下する。評価の重要な観点は、このトレードオフである。いくぶん内容が変更されたが、TWDEC の実用化へ向けての変調過程の研究という基本に変化はない。

3. 研究の方法

(1) 実験では、既設の TWDEC 模擬実験装置を改良して用いる。変調電極系は実験毎に変わるので、次節で詳細を述べる。ここでは、共通する模擬実験装置の概要について述べる。図 1 に構成を示す。

イオン源内で 15MHz の高周波 (RF) を 1kHz の繰り返しパルスで振幅変調して印加し、ヘリウムプラズマを生成する。これに引き出し電圧 V_{ex} を印加し、イオンビームをビーム室へ取り出す。ビーム室には、ビーム収束用電極 (印加電圧 V_{conv})、変調電極 (図では例として 5 枚の場合を示している)、測定用ファラデーカップが設置されている。変調電極中、

高周波電圧を与える RF 電極には、15MHz RF 用のパルスと同期したパルスで振幅変調された 7MHz の RF を変調電圧として印加する。変調電圧は RF 電極の枚数に応じた数を用意し、それらの電圧間に適当な位相差を設定する。ファラデーカップでは、イオンリペラ電圧 V_{IR} でイオンをエネルギー選別する。得られた電流は繰り返しパルスに対してボックスカー積分器で平均化し、 V_{IR} に対する電流値 I_C としてデータ取得する。 $V_{IR}-I_C$ 特性からエネルギー分布関数を導出する。

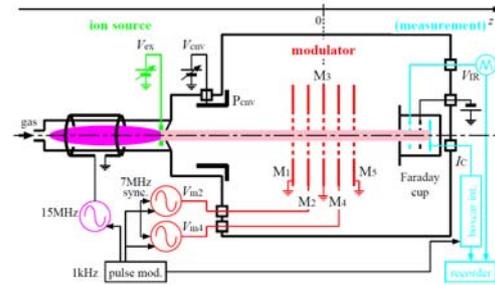


図 1 模擬実験装置の構成

(2) TWDEC の動作解析のための数値計算としては、従来から粒子軌道計算コードを使用してきた。入射速度分布は考慮されるが、流入イオンの電荷による電界は考慮されない。後者については、TWDEC への流入イオンの密度は粒子間作用を考慮する必要がない程度に小さいためである。しかし、模擬実験条件に対しては高い密度の可能性もあり、また、変調過程では集群を目的としており、集群位置では必然的に密度が高くなる。そこで、特に空間電荷電界による粒子軌道の発散を取り扱えるよう、空間二次元と空間電荷電界の扱いを盛り込んで計算コードを拡張した。具体的には PIC (Particle In Cell) 法を導入し、模擬実験の実験条件で計算を行った。この成果は 4. (6) にまとめてあり、他で述べられている粒子軌道計算は拡張前のものである。

4. 研究成果

(1) 最初に必要とされる課題は、従来模擬実験で用いられてきた単一様電界領域 (Single Uniform Field Region; SUFR) に代わる変調方式の導入である。SUFR では、RF 電界に応じて入射側 (模擬装置ではイオン源) の電位が変化する。実機の TWDEC ではこの様な構造は実現できないので、入射側が接地電位に固定された条件を導入する。最も単純なものは、1 枚の RF 電極を接地電位の 2 枚の電極で挟む一対一様電界領域 (a Pair of Uniform Field Regions; PUFRR) である。SUFR では、変調が理論に沿うには電極間隔 d が進行波波長 λ に対して十分短い必要がある。一方、PUFRR では d が短い場合 (二つある電極間隔は同じ長さとする)、走行する粒子が感じ

る電界が相殺されてほとんど変調がかからない。図2は粒子軌道計算で調べた変調器下流の位置 z に対する粒子数密度の分布である。PUFR の場合、 $d \cdot / 4$ 程度で理論による集群距離 z_0 と合致することがわかる。

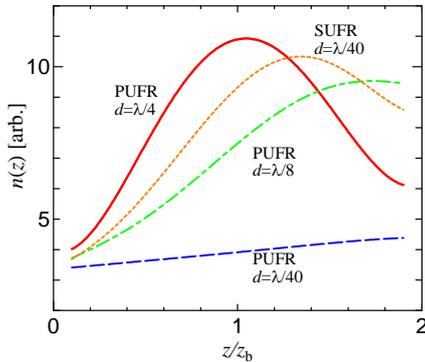


図2 電極構成と粒子密度の軸方向分布

(2) 実際に PUFR を構成して、下流でエネルギー分布を調べた。このとき、本課題についての最大の問題が確認された。図3は測定されたエネルギー分布の例である。変調前の分布(緑)に対してピーク付近の分布が減少し、変調電圧に対応する範囲に分布が拡がることを期待される。測定結果(赤)によると、分布の拡がり確認できるものの、その量が極めて少ない。後の(5)で述べる様に、実験条件の変化で改善されるが、この現象の原因は現在不明である。

図3に示すように、分布の最大値に対する半値を示すエネルギーを E_l , E_h , それらの平均値を E_0 とする。分布の拡がりの指標として、最大値の1/10を示すエネルギー E_{10} と E_0 の差を E_m とする。この E_m を用いて変調効果の評価する。

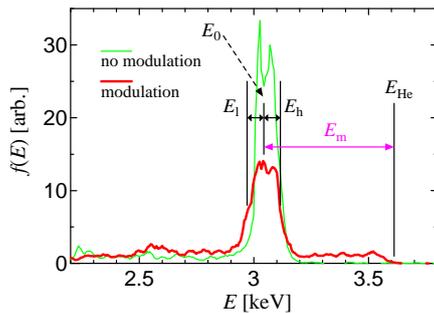


図3 エネルギー分布測定例

$d \cdot / 4$ として構成した PUFR を半波長変調器、これを2段連続で並べたもの(5枚の電極で構成)を一波長変調器と呼ぶ。ただし、一波長の場合、二つの RF 電極には、逆位相の電圧を与えるものとする。図4にこれらの変調器を用いた場合の電極電圧振幅 V_m に対する E_m の変化を示す。 $V_m=0$ に対する E_m は入射ビームの E_m を表す。 E_m の増分は V_m の増分に比例するが、一波長変調器では半波長変調器に比べて2倍の増分を示す。ただし、これは二

つの RF 電圧間の位相差 $\cdot \cdot$ に依存する。図5では、 E_m の $\cdot \cdot$ に対する依存性を示す。図には実験結果の他に粒子軌道計算の結果も示しており、両者の変化は定性的に一致する。

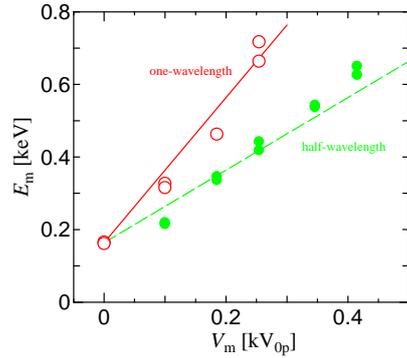


図4 半波長／一波長変調器の比較

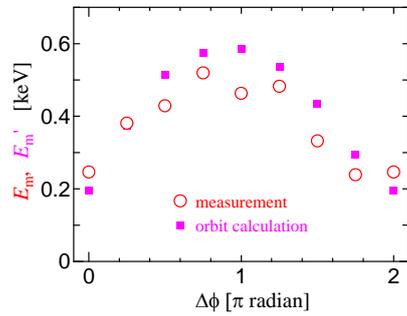


図5 位相変化に対する変調効果の変化

(3) 次に、定在波と進行波の差について調べた。最も単純な電極系は、2枚の電極間に定在波電界または進行波電界を構成するものである。このとき、両電極間の外側には片側接地の定在波電界が生じてしまう。接地電極を RF 電極から一波長分離して配置することにより、この効果を打ち消すようにする。また、定在波電界としては、片側電極を接地するものを用いる。

図6は、これらの条件で測定した V_m に対する E_m の変化である。 d と $\cdot \cdot$ の比 $\cdot = d / \cdot$ は0.25である。同じ V_m に対しては進行波電界の方が E_m が大きいことがわかる。

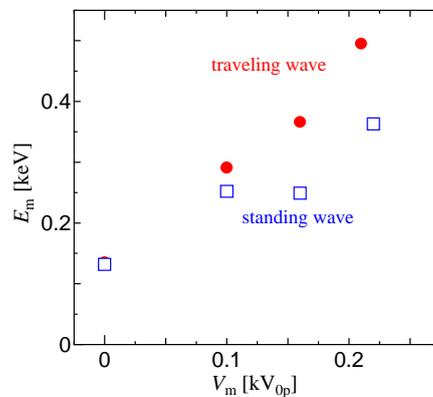


図6 進行波／定在波の比較

この様な変化を、 V_m の変化分に対するエネルギー拡がりの変化分の比で考える。粒子軌道計算で評価する場合、エネルギー拡がりとして半値半幅 H を用い、比は $H/e \cdot V_m$ となる。進行波電界の場合、電極間電圧の位相差が ρ に比例するとすれば、 ρ に対する変化は解析的に求められ、 $h=2(\sin \pi \rho)^2 / \pi \rho$ となる。粒子軌道計算で求めた値と併せて図 7 に示す。進行波電界と定在波電界では、 ρ に対する依存性が異なり、特に定在波の場合、 ρ が小さい方がエネルギー拡がりが大きい。図 6 の実験結果は $\rho=0.25$ であるが、エネルギー拡がりとして E_m を用いて同種の係数を求めたところ、進行波と定在波の比は、図 7 での比とほぼ一致した。(エネルギー拡がりの評価法が異なるため、各々の絶対値は必ずしも一致しない。)

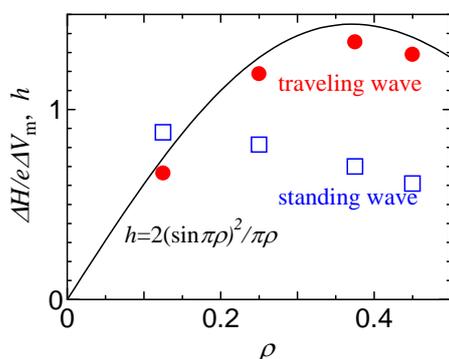


図 7 電極間隔に対する変調効果の変化

(4) 実験における変調方式間の比較では、現状ではエネルギー拡がりしか情報が得られていない。粒子軌道計算で集群位置を調べると、実験で扱った条件では、定性的にエネルギー拡がりが大きいほど集群位置が近くなる。TWDEC の小型化に対しては、例えば d に対するエネルギー拡がりの変化 (図 7) において、進行波と定在波で逆の依存性がある点に注目すれば、特定の制約下 (装置サイズなど) で、最大効率を得るための変調器を構成できることが期待される。

(5) 研究期間の終了間際になって、最大の問題とされた変調効果の改善現象が見出された。図 8 は、(3) での $\rho=0.25$ に対する定在波としたときの $V_m=180V_{op}$ で得られた分布関数である。従来、実験装置の熱的制約を考慮して変調用 RF エネルギーを抑えるべく、変調用 RF のパルス幅 (t_1 とする) を $50 \cdot s$ 程度としていた。図ではこの場合に加えて、 $t_1=70 \cdot s$ 、 $100 \cdot s$ の場合も併せて示している。 t_1 の増大に伴って変調を受けた粒子数が増大していることがわかる。

t_1 が変調効果に影響するとすれば、RF の周期程度あたりで変化する場合が考えられる。図に示したものはこれよりはるかに長く、理

論的な予想では考えられない変化である。現時点でこの変化の原因は見出されていない。また、 $t_1=100 \cdot s$ 程度の場合でも、粒子軌道計算で得られるほどの変調効果は得られていない。現状見出されている現象を足掛かりとして、より良い変調効果を得る方法を探ってゆきたい。

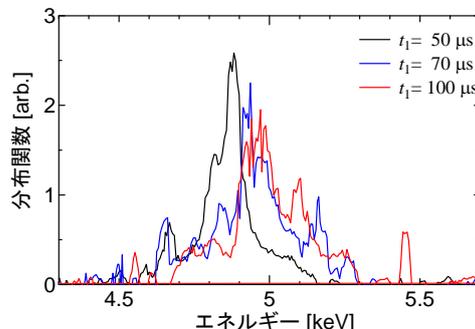


図 8 変調 RF パルス幅に対する変化

(6) 粒子軌道計算コードを拡張し、(1) の実験で確認された弱い変調効果の原因追究を念頭に、実験条件での計算を行った。

図 9 に、入射イオン密度に対する径方向の拡がりを示す。拡がりは集群位置で評価したものである。 $10^{14} m^{-3}$ 程度の密度から、径方向の拡がりが急激に大きくなるのがわかる。密度の上昇に伴って空間電荷電界が増大し、粒子が径方向の力を受けて軌道が発散し、拡がったためと考えられる。

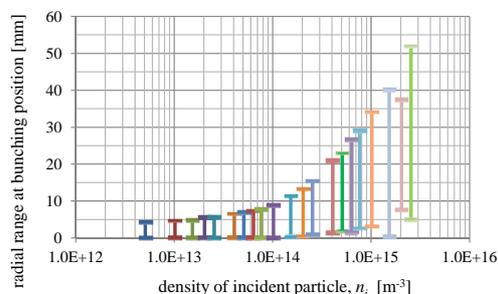


図 9 入射粒子の径方向拡がり

軸方向の粒子数分布の例を図 10 に示す。ここで粒子数とは超粒子の数である (計算では超粒子の個数は固定し、超粒子 1 個あたりの質量・電荷量を変化させて密度を変化させている)。密度が高い方が、集群位置が遠く、軸方向の分布が広く、集群位置での最大粒子数が小さい。高い密度で空間電荷電界が強い場合、速度変調で加速された粒子は前の粒子から減速電界を受けて減速し、速度変調で減速された粒子は後の粒子から加速電界を受けて加速する。結局、速度変調の効果が弱くなり、集群位置が遠くなる。軸方向分布と集群位置での最大粒子数については、図 9 の径方向の軌道が発散と同種の考えで、高い密度では空間電荷電界の増大によって、粒子が発

散しやすくなるためと考えられる。

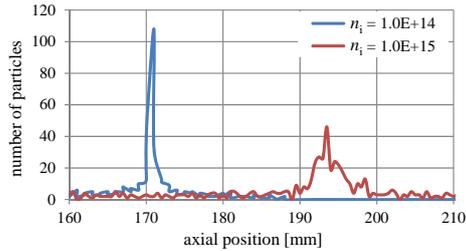


図 10 軸方向粒子数分布

実際に、密度依存性として調べた結果を図 11, 12, 13 (それぞれ集群位置, 軸方向分布幅, 集群位置の最大粒子数) に示す。上記の考察通り、密度の増大に伴って変調作用が悪化していることがわかる。 $10^{15}m^{-3}$ を超える密度で集群位置が近くに返るのは、径方向・軸方向への粒子の発散に伴って、空間電荷電界が弱くなるためと考えられる。

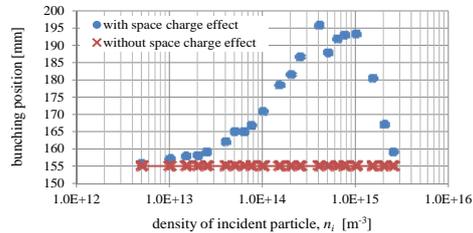


図 11 集群位置の密度依存性

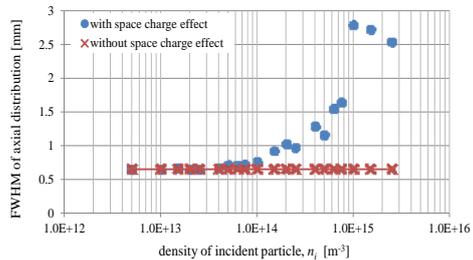


図 12 軸方向拡がりの密度依存性

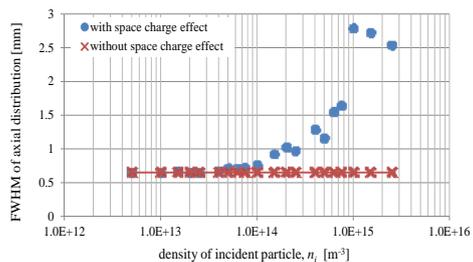


図 13 集群位置最大粒子数の密度依存性

この様に、 10^{14} - $10^{15}m^{-3}$ 程度の密度で変調作用が悪化する。模擬実験での密度は 10^{10} - $10^{14}m^{-3}$ の範囲の可能性があり、上記で調べた機構で変調作用が悪化する可能性がある。実験結果で説明した、変調される粒子数が少ない問題について、具体的な対応はまだ確認されていないが、今後可能性を調べてゆく。

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 5 件)

- ① H. Takeno, et al. (計 12 名, 1 番目), Recent Results in Research on Direct Energy Conversion for a Fusion System, Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有, to be published
- ② K. Nishimura, H. Takeno, Y. Yasaka, Numerical Analysis of Particle Orbits for Modulation Process in Traveling Wave Direct Energy Converter, Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有, to be published
- ③ H. Takeno, et al. (計 5 名, 1 番目), Simulation Experiments of Traveling Wave Direct Energy Converter on GAMMA 10 Tandem Mirror, Transactions of Fusion Science and Technology, 査読有, Vol. 59, 2011, pp. 202-204

[学会発表] (計 5 件)

- ① 藤田浩平、進行波型直接エネルギー変換器における変調効果解析のための基礎研究、平成 24 年電気関係学会関西支部連合大会、2012 年 12 月 9 日、豊中
- ② 竹野裕正、進行波型直接エネルギー変換器における変調方式・減速方式の統合的検討、プラズマ・核融合学会第 29 回年会、2012 年 11 月 30 日、春日
- ③ H. Takeno, On-Going Japanese Research in DEC Technology for Terrestrial Power Plants, 14th US-Japan Workshop on Inertial Electrostatic Confinement Fusion, Oct. 16th, 2012, College Park, USA

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・准教授
研究者番号：90216929

(2) 研究分担者

八坂 保能 (YASAKA YASUYOSHI)
神戸大学・大学院工学研究科・教授
研究者番号：30109037

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

(3) 連携研究者

()

研究者番号：