

研究論文

先進燃料核融合における直接エネルギー変換の実験則の研究

竹野裕正¹⁾, 八坂保能¹⁾, 中嶋洋輔²⁾, 長 照二²⁾, 富田幸博³⁾, 石川本雄⁴⁾

¹⁾神戸大学大学院工学研究科, ²⁾筑波大学プラズマ研究センター,

³⁾核融合科学研究所, ⁴⁾筑波大学システム情報工学研究科

(原稿受付: 2007年11月29日 / 原稿受理: 2007年12月21日)

1990年代初めの ARTEMIS の研究以来, 先進燃料核融合を対象とした直接エネルギー変換の研究が進められてきた。ARTEMIS での提案をベースとした研究を進める研究グループが形成され, 基礎実験に基づく種々の結果が蓄積されてきた。これらの実験結果を整理し, 実験則としてまとめた。カusp型直接エネルギー変換器での粒子選別では, Störmer Potential より考察されるパラメータが, 粒子の運動が磁力線に沿う程度を示し, 粒子種間でのこの差が粒子選別の指標となる。熱化イオンの直接エネルギー変換では, 粒子のエネルギー分布で変換効率が決まる。高エネルギー粒子からのエネルギー回収のための進行波型直接エネルギー変換器では, 変調・減速の各電界強度をも加味した系のエネルギーの大きさに応じて変換効率が変化する。ある程度大きなエネルギーでは, 単位波長あたりの変換効率が一定のレベルになる。

Keywords:

advanced fusion, direct energy conversion, particle discrimination, cusp-type direct energy converter, traveling wave direct energy converter, empirical scaling

1. はじめに

1990年代初めの ARTEMIS の研究[1]から, 先進燃料核融合を対象とした直接エネルギー変換の研究が進められてきた[2, 3]. 1990年代の後半には, 理論研究, シミュレーション研究, 模擬実験研究をそれぞれ担当するメンバからなる研究グループが形成され, ARTEMIS での提案をベースとしつつ, 傾斜カusp磁場の採用や同心円状進行波電極の導入など, 文献[1]とは異ったグループによるオリジナルなアイデアを追加する形で研究が進展してきた。2006年には, GAMMA 10 に接続された直接エネルギー変換実験装置によって, ランプの点灯という形で, その実証が達成された[4].

このグループによる研究のうち, 模擬実験等による多くの実験結果の蓄積がある。これらを整理して, 実験則としてまとめることは, 直接エネルギー変換の実機への適用を考える際に, 有効である。本論文では, このようにしてまとめられた実験則を示す。

本論文の構成は, 以下のとおりである。次節で示すように, 先進燃料核融合における直接エネルギー変換の課題は, 1)粒子の選別, 2)電子や熱化イオンの直接エネルギー変換, 3)高速粒子の直接エネルギー変換の大きく3つに分類される。次節では, これらの課題と ARTEMIS の提案について説明する。3~5節では, 3つの課題に対する策について, それぞれまとめた実験則を示す。6節では, 論文内容をまとめる。

2. ARTEMIS の提案と直接エネルギー変換

図1に ARTEMIS で提案された直接発電システムの構成図を示す。ARTEMIS では, FRC ベースの D-³He 核融合炉を採用し, これより流出する荷電粒子束に対して, 2種類のエネルギー変換器を適用する。ARTEMIS の提案に基づいた, 直接エネルギー変換の課題を整理すると, 以下のようになる。

1. 電子, 熱イオン, 高速陽子の混在した粒子束を, それぞれの粒子に適した変換器に導くために, 粒子選別が必要。
2. 電子や熱イオン等, 比較的低エネルギーの粒子からのエネルギー回収。
3. 単純な直流バイアス型では対応できない高速粒子(陽子)からのエネルギー回収。

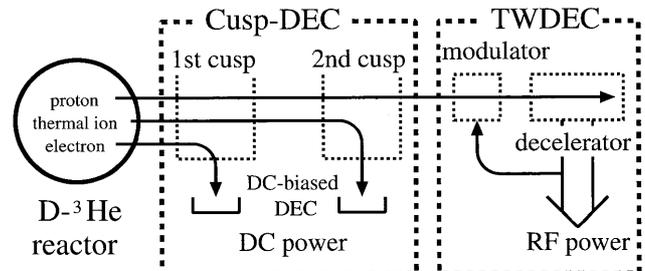


図1 ARTEMIS の直接発電システム。

Studies of Scaling Law on Direct Energy Conversion for Advanced Fusion

TAKENO Hiromasa, YASAKA Yasuyoshi, NAKASHIMA Yousuke, CHO Teruji, TOMITA Yukihiko and ISHIKAWA Motoo

author's e-mail: takeno@eedept.kobe-u.ac.jp

ARTEMIS の提案では、以下の過程でエネルギー回収を行う。粒子束は、まずカusp磁場と直流バイアス型エネルギー変換器より構成されるカusp型直接エネルギー変換器 (CUSPDEC) に導入される。CUSPDEC は 2 段で構成され、初段で電子を、次段で熱イオンをそれぞれ分離し、それぞれ従来型の直流バイアス型エネルギー変換器でエネルギー回収を行う。高速陽子は CUSPDEC を通過し、下流に設置された進行波型直接エネルギー変換器 (TWDEC) に導入され、ここでエネルギー回収される。

ARTEMIS の提案を受けて形成された研究グループでは、これらそれぞれの課題について模擬実験を行った。これらを以下で順に示す。

3. カusp型直接エネルギー変換器による粒子選別

カusp磁場を用いた粒子選別は、Störmer potential で評価する運動可能領域で理解することができる [5]。軸対称磁場中の粒子は、Störmer potential $V_{st}(r, z)$ が初期の運動エネルギー以下となる領域のみを運動することができる。

$$V_{st}(r, z) = \frac{m}{2} \left(\frac{p_\theta - qA_\theta r}{mr} \right)^2 \leq \frac{mv_0^2}{2} \quad (1)$$

ここに、 p_θ は正準角運動量、 q 、 m 、 v_0 はそれぞれ粒子の電荷、質量、初期速度、 A_θ はベクトルポテンシャルである。

軸対称磁場系のベクトルポテンシャルが A_0 なる点 (r_0, z_0) から入射した粒子の条件で (1) を表すと、

$$F \cdot \frac{r_0}{r} \cdot \left| 1 - \frac{rA_\theta}{r_0A_0} \right| \leq 1 \quad (2)$$

となる。ここで、 $F = |qA_0/mv_0|$ である。 F が大きいと $|1 - (rA_\theta)/(r_0A_0)| \sim 0$ 、すなわち $rA_\theta =$ 一定となり、粒子の運動は磁力線に沿うことがわかる。一般に、電子は F が大きく、イオンは小さい。すなわち、電子は磁力線に沿った軌道を進み、イオンは必ずしも沿わないことから、カuspのような磁力線が大きく曲がる磁場を利用すれば、粒子選別が実現できると考えられる。これを左右するパラメータとして、 F の大きさが挙げられる。

著者等の研究グループでは、CUSPDEC 模擬実験装置を構築して実験を行っている [6]。図 2 にこの装置の構造図を示す。

図中の coil A と coil B とでカusp磁場を形成する。カusp磁場の傾斜を強くした方が粒子選別に有利、という研究グループで得られたアイデアを実現するために、両コイルは径が異なり、コイル電流比で傾斜を制御できる。図 2 の破線の領域の磁力線分布の例を図 3 に示す。

装置図の左側にマイクロ波プラズマ源が設置されており、右方へと入射される。差動排気室を通過し、オリフィスで径を制限された粒子束がカusp磁場内に入る。カusp磁場内では、電子は磁力線に沿うためにラインカusp方向に軌道を曲げられるが、イオンは弱磁場領域を直進し、ポイントカuspへと向かう。カusp磁場領域には、4 つの粒子捕集電極 ($P_1 \sim P_4$) が設置されている。 P_1 および P_2 はラ

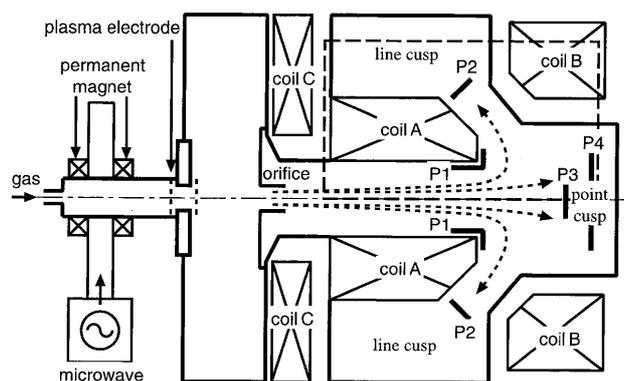


図 2 CUSPDEC 模擬実験装置。

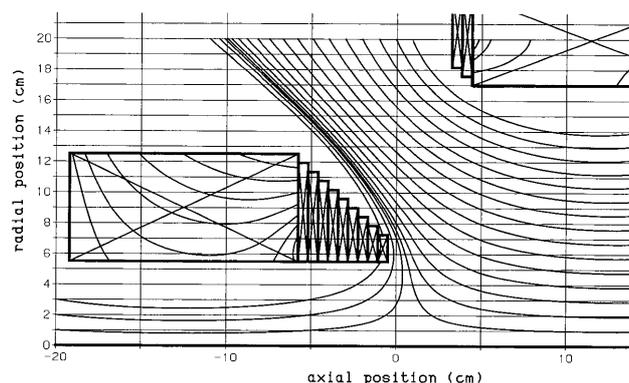


図 3 カusp部磁力線 (例)。

インカusp側に、 P_3 および P_4 はポイントカusp側に、それぞれ配置されている。

入射した粒子束を P_3 および P_4 で捕集し、元の粒子束に対する割合を評価すれば、カusp磁場を直進する粒子数の割合 (これを透過率と定義する) がわかる。先の考察により、粒子が磁力線に沿う運動をするか否かは、パラメータ F に依存するものと予想され、この F に対する透過率の依存性を実験則として利用できる。

模擬実験装置を用いて、 F に対する透過率の変化を調べた。coil A / coil B の電流比を一定として、磁場強度、粒子のエネルギーおよびイオン種を変化させて透過率を測定し、 F に対する依存性としてまとめたものを図 4 に示す。(a) 電子では F が大きく、 F の増加に対して透過率が急激に低下する。一方 (b) イオンは F が小さく、 F の増加に対して透過率はなだらかに減少する。いずれの場合でも、種々の条件変化に対して、データ点が一つの曲線上にあることがわかり、用いた傾斜磁場についてのスケージングと言える。よって、装置の規模やエネルギーが実機レベルでも、 F が同じなら同様の特性が期待でき、これを利用することにより粒子分離が実現できると期待される。

4. 熱化イオンの直接エネルギー変換

CUSPDEC 模擬実験装置で、粒子束の捕集に使用した電極をそのまま直流バイアス型の直接エネルギー変換器とみることができる。流入するイオン束に対しては、適当な正の直流バイアス下における流入電流を評価すれば、発

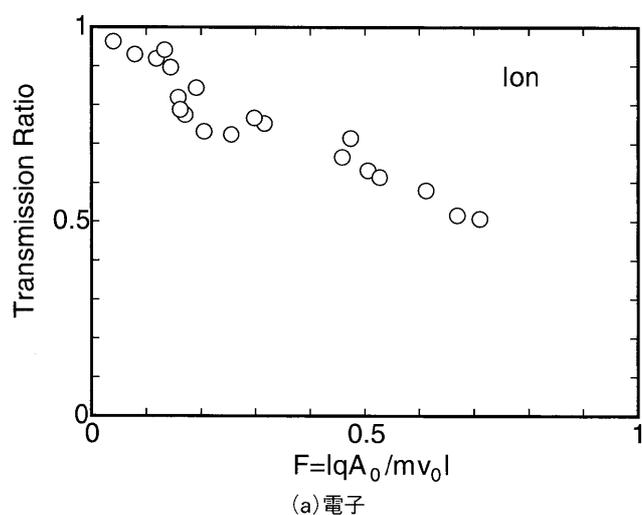
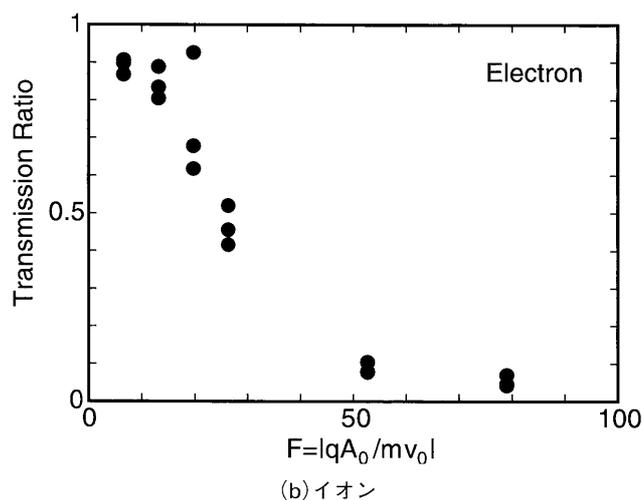


図4 粒子透過率のスケールング。

電電力相当が得られる。最適バイアス電圧を得るには、バイアス電圧を掃引して電流を調べ（いわゆる電圧-電流特性）、各電圧毎に発電電力を求め、その最大値が得られる電圧を最適バイアスとすることができる。

通常、電圧-電流特性は、電圧が低い間は一定の電流 (I_0) をとり、ある電圧 (V_0) で電流が急激に減少するものとなる。最適バイアスで得られる発電電力を P_0 とすれば、 $P_0/(V_0 I_0)$ が入射粒子束に対する効率とみることができる。この効率は、捕集電極における限定されたものであり、実際の発電器としての効率を議論するには、これの他に、粒子の選別・捕獲の効率等も考慮する必要がある。

図5に、種々の条件で行った実験での効率を、粒子束の規格化エネルギー拡がり ($\Delta E/E_0$) に対して整理したものを示す。図より、効率はエネルギー拡がりが大きくなると減少するが、種々の条件変化に対して一つの曲線上に存在することがわかる。これは、熱化イオンのエネルギー変換に対する実験則とみることができる。

5. 進行波型直接エネルギー変換器

TWDECは、エネルギー分布がモノクロマティックに近い粒子束を高周波電界で速度変調し、下流で集群する粒子に同じ位相速度の進行波電界を作用させ、粒子のエネル

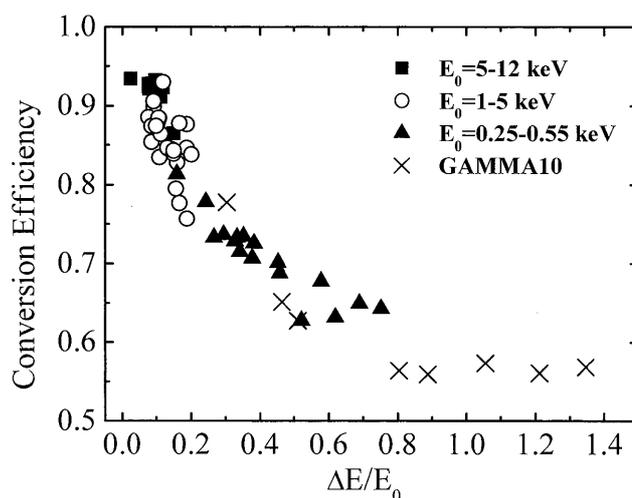


図5 直流バイアスによる変換効率。

ギーを高周波エネルギーに変換するものである。実機で想定されているものでは、集群粒子が電極列を通過する際に誘起する誘導電流を利用して、適切な外部回路を接続することにより、通過するビーム自身が進行波電界を誘起することにより、得られた高周波エネルギーの一部を変調回路へ戻すことにより、ビームの通過で自励発振させるものである。このようなTWDECの動作は、二つの過程に分解できる。即ち、ビームが進行波電界を誘起する高周波電力誘起の過程と、進行波電界でビームが減速されるエネルギー回収過程とである。研究グループではTWDECの模擬実験を行うにあたり、これら両過程を別々の実験モードとして構成することとした。

前者の過程に対しては、ビームに変調電界のみを与え、外部接続回路に誘起される高周波電力を評価する。これを受動型減速器モードと呼ぶ。この実験については報告があるものの[7]、必ずしも十分な結果がそろっているとは言えない。一方、後者の過程に対しては、ビームを減速する電界を外部より制御した形で与えて、ビームエネルギーの変化を調べる。これを能動型減速器モードと呼ぶ。進行波の条件を実験者が制御できるため、ビームと進行波との相互作用の条件依存性を実験的に調べることができる。これについては、多くの報告があり[8,9]、これらの結果の蓄積をまとめることにより、実験則を見出す。

研究グループが使用している模擬実験装置[8]を図6に示す。小型装置の機動性を生かして、研究の進展に伴って装置の一部は変更されてきたが、本質は変わっていない。図に示すものは、能動型減速器モードを行う最新の構成である。ヘリコン波プラズマ源よりヘリウムイオンビームを引出し、実機のTWDECと同様に、高周波電界で速度変調し、下流でビーム減速・エネルギー回収を行う。下流端にファラデーカップを設置し、ビームのエネルギー分布を計測する。装置全体が繰り返しパルスで運転され、ビームのエネルギー評価は、プラズマ生成用高周波が停止したアフターグローの時間を利用している。さらに、ボックスカー積分器で平均化することにより、高周波等によるノイズ対策を行っている。

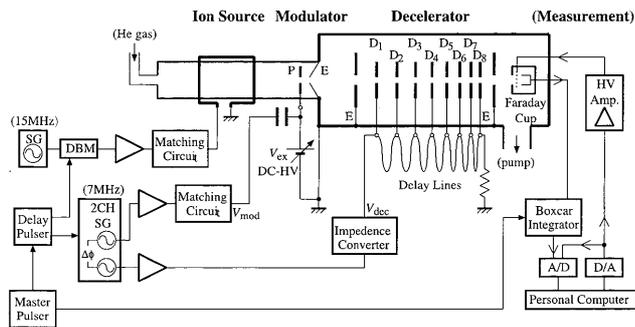


図6 TWDEC 模擬実験装置.

ファラデーカップによりビームのエネルギー分布が得られ、これよりビームの平均エネルギーが算出される。減速器に電圧印加しない場合の平均エネルギー $\langle E_0 \rangle$ と、減速器に電圧を印加した場合の平均エネルギー $\langle E \rangle$ とを用いて、減速率 $\eta = (\langle E_0 \rangle - \langle E \rangle) / \langle E_0 \rangle$ を求めることができる(η は、ビームが減速した場合に正の値になることに注意)。

種々の実験で得られた結果を、図7にまとめて示す。実験結果は、比較的古い低エネルギー実験のもの、比較的最近に行われた高エネルギー実験のものに分けてある。この図では、イオンビームの初期エネルギー E_0 に加えて、減速効率 η に影響する変調電圧 V_{mod} および減速電圧 V_{dec} の大きさを同時に表現するために、換算エネルギー $E_0^* = E_0 \cdot (V_{mod}/V_{mod0}) \cdot (V_{dec}/V_{dec0})$ を横軸にとり、減速器長の一波长あたりの効率 $\eta_1 = \eta / (L_{dec}/\lambda_0)$ の変化を表したものである(λ_0 は減速器入口での進行波の波長、 L_{dec} は減速器の長さ)。ただし、 V_{mod0} および V_{dec0} は、実機における電極許容電圧の E_0 に対する比(1 MV/14.7 MeV)で決定している。実験結果の他に、報告されている数値計算結果(1次元は[10], 2次元は[11])も示してある。

理想的には、 η_1 は長さによらず一定であることが望ましいが、ビームの径方向発散等、高エネルギーの方が有利な条件となる。図によると、 E_0^* の上昇に伴って、実機を対象とした数値計算結果[11]のレベルに迫っていることが確認できる。すなわち、ある程度以上のエネルギー条件ならば、単位波長あたりの減速効率はほぼ一定となる。これがTWDECについての実験則となる。実機では、減速器は3~4波長程度で構成されるので、図に示す η_1 の3~4倍が期待される効率となる。

6. まとめ

先進燃料核融合における直接エネルギー変換の可能性の検討に向けて、基礎実験で蓄積された実験結果を、実験則として整理した。その結果、以下が得られた。

1. CUSPDECにおける粒子選別では、Stömer Potentialの考察に基づくパラメータ \mathcal{F} が、粒子の運動が磁力線に沿う程度の指標となる。これを用いて、選別の程度(透過率)がまとめられた。 \mathcal{F} の差を大きくすることで効率的な選別が期待できる。

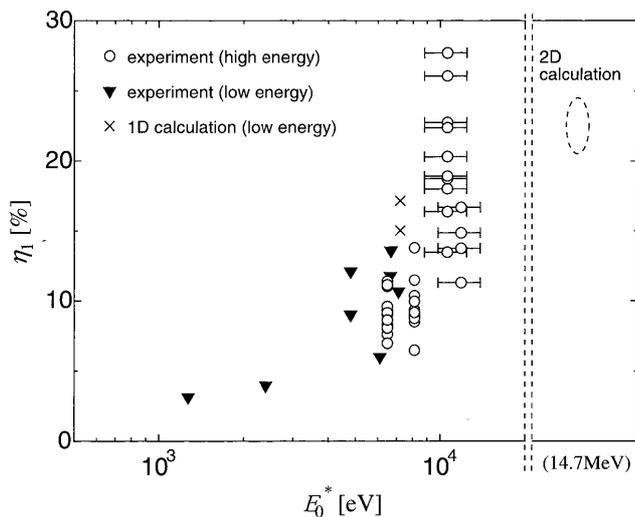


図7 TWDEC 変換効率のスケーリング.

2. 熱化イオンの直接エネルギー変換については、変換効率は粒子のエネルギー分布に依存して変化する。エネルギー拡がり小さい方が変換効率が高いが、関係は一つの曲線で表され、この部分についての効率の実験則となる。
3. 高速粒子の直接エネルギー変換については、変調・減速の各電界強度をも加味した系のエネルギースケールに応じて変化する。ある程度大きなエネルギーでは、単位波長あたりの変換効率が一定のレベルになる。

現状で得られている実験則の適用範囲は、必ずしも十分とはいえない。より高エネルギー、より高密度の粒子束を対象とした実験が求められる。

参考文献

- [1] H. Momota *et al.*, Fusion Technol. **21**, 2307 (1992).
- [2] H. Katayama, K. Sato and F. Miyawaki, Fusion Technol. **27**, 563 (1995).
- [3] H. Shoyama, H. Nakashima and Y. Kanda, J. Plasma Fusion Res. **72**, 439 (1996).
- [4] Y. Yasaka *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. **51**, 171 (2007).
- [5] Y. Tomita *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. **47**, 43 (2005).
- [6] H. Takeno and Y. Yasaka, Trans. Fusion Technol. **39**, 386 (2001).
- [7] H. Takeno, Y. Kiriyama and Y. Yasaka, Fusion Sci. Technol. **47**, 450 (2005).
- [8] H. Takeno, Y. Ikeda, T. Yamada, K. Noda and Y. Yasaka, Jap. J. Applied Phys. **39**, 5287 (2000).
- [9] K. Sugihara, T. Yamamoto, H. Takeno and Y. Yasaka, J. Korean Physical Soc. **49L**, S141 (2006).
- [10] M. Ishikawa, K. Horita, Y. Yasaka, H. Takeno and Y. Tomita, Fusion Eng. Des. **81**, 1689 (2006).
- [11] M. Ishikawa *et al.*, Fusion Eng. Des. **41**, 541 (1998).