

小特集 先進燃料核融合研究の現状と展開

6. 直接エネルギー変換の模擬実験研究の現状と展望

6. Current Status and Prospects of Simulation Experiment of Direct Energy Conversion

竹野 裕正

TAKENO Hiromasa

神戸大学大学院工学研究科

(原稿受付：2021年9月14日)

ARTEMIS の提案後に進められてきた直接エネルギー変換についての模擬実験研究の現状と展望を解説する。小規模装置で実施する模擬実験では扱える課題に限られており、現状では変換原理の検証が中心となる。粒子分離が主課題であるカusp型変換器では、傾斜カuspの採用で優れた電荷分離を達成しているが、高密度粒子束での効率低下やイオン種分離に課題が残る。高速陽子の回収器である進行波型変換器では、50%越えの変換効率を達成しているが、負荷への電力供給や自励発振などの課題が残る。

Keywords:

direct energy conversion, simulation experiment, ARTEMIS, cusp-type direct energy converter, traveling wave direct energy converter

6.1 はじめに 一小模擬実験の扱う課題一

直接エネルギー変換の模擬実験については80年代の報告があるが[1]、現在行われているのは5章で説明されているARTEMISに即したものである。すなわち、重水素-ヘリウム3燃料の炉から流出する14.7 MeVの陽子とその他のイオンおよび電子から熱サイクルを経ずにエネルギーを回収する。主たる課題は、高速陽子からのエネルギー回収と他の粒子の分離である。前者では、陽子のエネルギーが莫大であるため従来の単純な静電減速法では工学的に構成が難しく、新しく提案された進行波型直接エネルギー変換器(Traveling Wave Direct Energy Converter, TWDEC)[2]の実現をめざす。そして、このTWDECを効率良く動作させるためには、炉から流出する他の粒子の混入を抑制する必要がある、粒子の分離という後者の課題となる。粒子分離には従来はバイアスグリッドが利用されてきたが、高速陽子の衝突を避けるためにグリッドを用いない手法が望ましい。これに応じてカusp型直接エネルギー変換器(Cusp-type Direct Energy Converter, CuspDEC)[3]が提案された。これの実現が具体的な課題である。

現在までの模擬実験では、これらの原理の確立をめざした研究が進められてきた。そのほとんどは、大学の一研究室の実験室で生成する低温プラズマを利用する小規模な実験で、高速陽子もそのプラズマ中のイオンをkeVオーダーに加速したものである。実験装置の電力の制約や機材の耐熱の問題から、単一ないし繰り返しパルスで行われる。研究分野は炉工学ながら、材料の熱的問題などは未だ扱われていない。

また、あくまでも発電は模擬で扱われる。以下に典型的な構成で説明する。図1(a)の様に、イオンが捕集電極(コレクタ)に向かって走行すると誘導電流が流れ、電極に接続されている負荷に電流が流れる(厳密には正電荷に引かれて電子が逆向きに流れる)。電流が流れている負荷には電圧降下が発生して、捕集電極は正の電位をもつ。イオンは正電位の電極がもたらす逆電界に抗して走行することで自身の運動エネルギーを失う一方、回路の負荷では電気エネルギーが消費されており、これがエネルギー変換に対応する。電極電圧をeV単位のイオンの運動エネルギーに等しく維持できれば最大の効率となる(回路としての整合条件に対応)。これを模擬実験条件として考えると、 μA オーダーの電流でkeVオーダーの電圧降下を得るにはG Ω オーダーの負荷が必要で、現実的でない。また、電極電圧は実験条件として制御できることが望ましいので、実験では図1(b)の様に構成し、電圧源の起電力で負荷の電圧降下を模擬する。この場合電圧源には自身の本来の供給方向と逆向きの電流が流れ、供給ではなく電力を受領するので、イオン側が発電したと考えることができる。模擬実験ではこの様に発電を模擬している。

6.2 カusp型直接エネルギー変換器

先述の通り、荷電粒子の選別でグリッドを排除する手法としてCuspDECは提案された。基本的には、粒子の進行経路にカusp磁場を設ければ、電子は磁力線に沿ってラインカuspへと偏向されるが、イオンは弱磁場領域では磁力線に拘束されずに直進する。より具体的に、図2(a)に示す

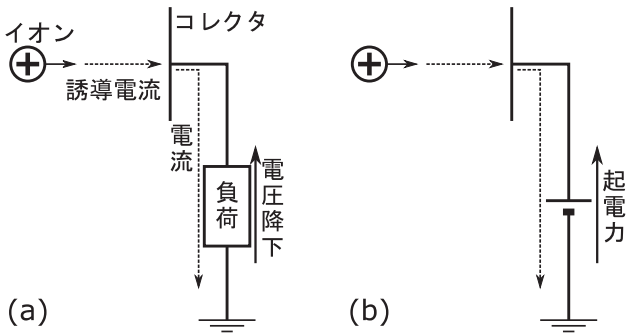


図1 模擬実験における直接エネルギー変換の構成。

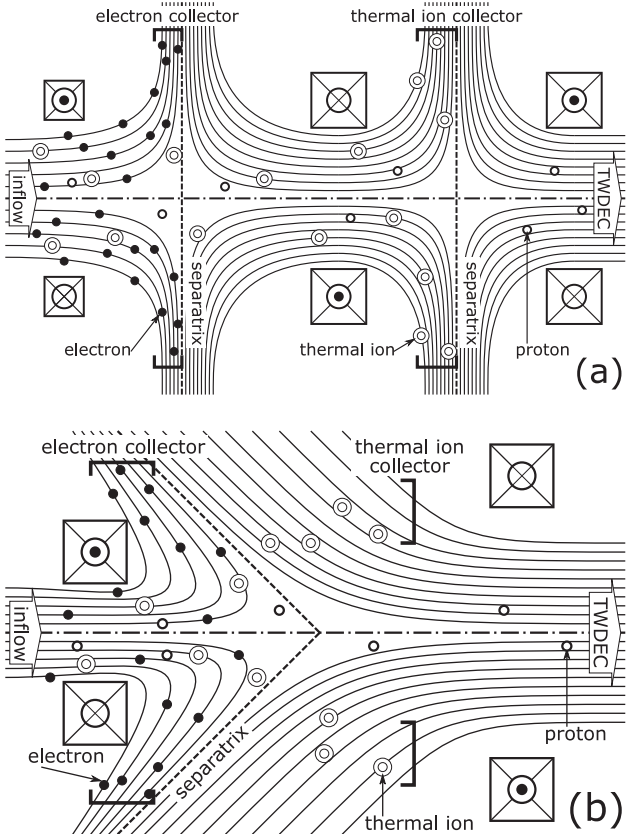


図2 CuspDECの構成 ((a)ARTEMIS, (b)傾斜磁場)。

ARTEMISのCuspDECの構成でその動作を説明する。

ARTEMISでは、磁場強度の異なる2段のカusp磁場が縦続接続され、前段で電子が、後段で熱化イオンがそれぞれ偏向され、高速陽子はいずれも通過する。それぞれのラインカusp上に静電減速器を配置してエネルギーを回収する。その意味で、CuspDECの機能は粒子分離のみならず、電子と熱化イオンからのエネルギー回収も含むと考えてよい。以下、エネルギー回収と粒子分離を、それぞれの機能に分けて説明する。

6.2.1 電子および熱化イオンからのエネルギー回収

電子や熱化イオンからのエネルギー回収については、従来から提案されている静電減速型の変換器（ベネチアン・ブラインド型変換器（Venetian Blind DEC, VBDEC）[4]など）をCuspDECに組み込むことが当初は考えられた。このため、研究課題としてエネルギー回収に注目した報告は多くないが、VBDECのエネルギー選別の考えをカusp磁

場空間内で応用した2段減速の報告がある[5]。VBDECの考え方にある様に、熱化粒子はエネルギー帯域が広く、効率向上には狭帯域毎の捕集電極が必要となる。一つの捕集電極では、その電位より低いエネルギーのイオンが反射される。この反射イオンを対象としたより低い電位の補助捕集電極を追加して、二つの電極で構成するのが2段減速法である。イオンはカusp磁場領域を運動するので、その軌道はほぼ電界で決まる。[5]の報告では、測定されたイオンのエネルギー分布を元に、最適な電極位置と電位を調べている。

他に、CuspDECでのエネルギー回収に関わる報告として、GAMMA 10の端損失プラズマを対象とした発電の実演がある[6]。GAMMA 10 端部にCuspDEC 模擬実験装置を配置し、端損失プラズマを電荷分離して電灯を点灯させる。端損失プラズマは2-300 eV程度のエネルギーで、低密度のため小電流である。この条件に対する整合性の高い負荷としてネオンランプが使用され、明瞭な発光を観測している。

6.2.2 荷電粒子の分離選別

粒子分離に関しては、磁場構成の改良がある。ARTEMISでは図2 (a)に示す様に、電子および熱化イオンそれぞれの分離を担う2段のカusp磁場を用いる。これに対して、分離の原理がステルマーのポテンシャル（Störmer Potential[7]）で理解されることに基づき、セパトトリックスを傾斜させた一つの傾斜カusp磁場で選別を実現・高効率化することが構想された[8]。

この構成は図2 (b)に示す通りで、電子は磁力線に沿うために、90°以上の偏向を受ける。熱化イオンは強い磁場でいく分偏向され、高速陽子は直進するので、2段カusp磁場と同等の効果が期待できる。実際の模擬実験装置の構築では、径の異なる磁場コイルを対向させることで傾斜カusp磁場を実現でき、両コイルの電流比を変えることで傾斜を変化できる。模擬実験では、マイクロ波生成プラズマを対象として電子とイオンの分離が調べられた。カusp磁場の傾斜を変化させる実験がステルマーのポテンシャルの計算と照合され、分離の原理が実証された[6]。

電子-イオンの分離では、分離されたイオンがポイントカusp捕集電極前に滞留することで正の空間電位を形成し、分離が悪化する可能性がある。これは密度の上昇に伴って顕著となるので、実機で想定される密度領域での分離機能の有効性に関わる。図3は、カusp磁場コイルの電流比 I_B/I_{AC} (I_{AC} , I_B は、それぞれ上流, 下流側コイルの電流) に対する、電子のカusp磁場領域の透過率の測定結果である[9]。電子は径方向に軌道を曲げられて分離されるため、透過率が小さいほど分離性能が高いことを意味する。図によると、横軸のコイル電流比、つまり下流側コイルの電流が大きく、カusp磁場の傾斜が大きいくほど、高い分離性能が得られている。一方、密度の上昇に対しては分離性能が悪化することがわかる。

CuspDECでは、熱化イオンも高速陽子から分離する必要がある。傾斜カusp磁場方式では、低速の熱化イオンが小さいながらも偏向されることを利用した分離が想定され

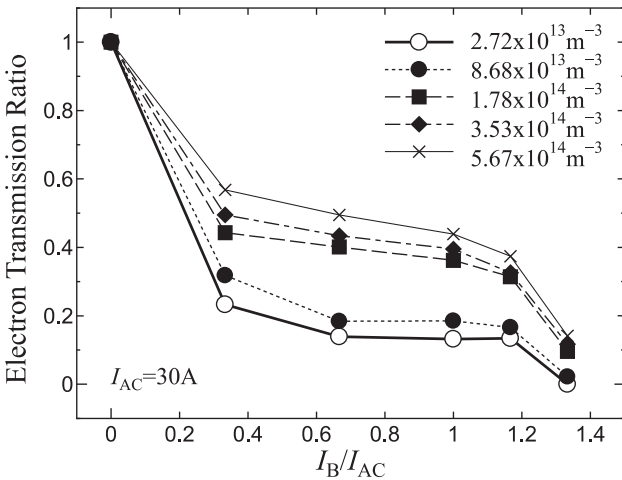


図3 電子透過率の磁場傾斜および電子密度依存性 (参考文献 [9] の Fig. 2 を編集).

ていた。その後、先述の2段減速の手法を基に、磁場でなく電場を利用するイオン-イオン分離手法が提案された [10]。図4はCuspDEC内のr-z断面内にイオンの軌道計算結果を示している。粒子は左から入射し、図の右外にはTWDECが配置される。電子は傾斜カusp磁場で図の上方向に偏向・回収される。イオンは磁場の影響をほとんど受けず、右のポイントカuspに向かうが、そこには中心に穴を持つ2枚の平行平板電極がある。上流電極Gは接地され、下流電極Pには高速イオンのエネルギーよりも低く、熱化イオンのエネルギーよりも高い電圧が印加されている。この構造では、Pによる空間電位が、Gの穴から上流側にしみ出す。高速イオンは両電極の穴を通過・直進してTWDECへ向かうが、熱化イオンはしみ出した空間電位で偏向され、イオン-イオン分離が達成される。

このイオン-イオン分離の模擬実験は現在進行中である。直接的に分離を示すには、エネルギーの異なるイオン束が必要で、複合プラズマ源が構築されている [10]。

6.3 進行波型直接エネルギー変換器

TWDECの動作は電子管のクライストロンに似ている。同一エネルギーを持つ荷電粒子束を速度変調すると、下流で空間的に集群する。これが電極対を通過する際に誘導電流が流れる。集群粒子は変調周波数で繰り返し訪れるので、変調周波数の誘導電流が流れる。誘導電流に応じた電圧降下などで元の粒子に逆電界を作用させれば粒子が減速され、粒子の運動エネルギーが電極を含む回路内の電気エネルギーに変換されたことになる。

元の荷電粒子束として、ヘリウム3燃料核融合で発生する高速陽子束を対象としたものがTWDECである。図5に示す様に、変調器(modulator)と減速器(decelerator)から成り、これらは多数のグリッド電極で構成されるが、CuspDEC開発経緯の説明通り、できれば避けるべきである(数値計算によるグリッド形状の工夫の研究がある [11])。上流のCuspDECで分離された高速陽子が図の左から流入する。流入時はほぼ同一の速度を持つが、変調器のRF電界で速度変調を受ける。するとRF周波数一周期分

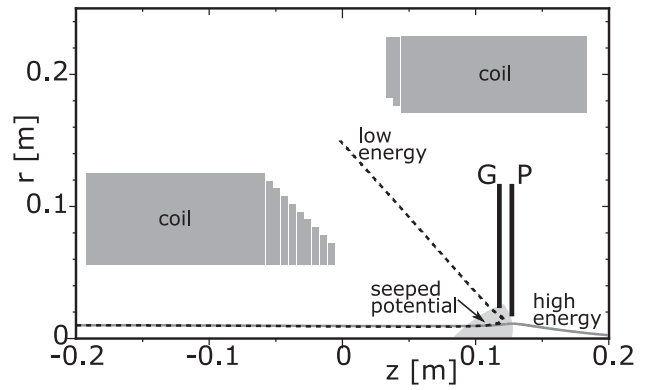


図4 電界によるイオン-イオン分離。

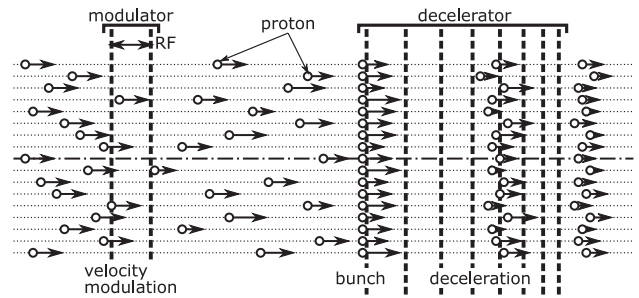


図5 TWDECの構成。

の陽子が、下流の同一場所に同一時刻に集まり(集群)、これがRFの周期で繰り返される。この集群位置に減速器を配置する。減速器では、多数並んだ電極が外部回路に接続されており、電極間を走行する陽子が誘導電流を流す。陽子の流入はRFの周期で繰り返されるので、適当な電圧降下を生ずる素子で外部回路を構成すれば、RF周波数の誘導電流による電圧降下で陽子を決速する電界を電極間に形成できる。このような電界中を陽子が走行することにより陽子は減速し、そのエネルギーが外部回路に組み込まれた負荷の電気エネルギーとして消費される。

TWDECは元々、14.7 MeVのエネルギーに対応した単純な直流の静電減速電極の構成が困難であることから着想されたもので、電極電圧は実現可能な範囲内におさめる必要がある。それには、一つあたりの電極の電圧を抑え、陽子の進行方向に並べた多数の電極の電圧の積算で必要な電圧を得る様にする。陽子は集群しているので、減速の電界は陽子が通過するときの電極間のみで必要となる。そこで粒子の進行に応じて減速電界も波の様に進行させる。進行波ではあるが電磁波ではなく、電極間電圧で形成する静電界を用いる。

実機では対象粒子は14.7 MeVの陽子であり、現実的な構成では変調周波数はMHzオーダーとなる。大学の小規模実験では粒子エネルギーは数千分の一の数keV、電極電圧数百Vで、ビーム電流はμAのオーダーとなる。大きな課題はビームの変調と減速であるが、6.1で説明した様に、高エネルギー・小電流のビームに対して受動回路素子で逆電界を形成することは困難である。そのため減速過程の課題は、外部電源を用いて調べる粒子減速と、走行する荷電粒子による電圧誘起の二つに分けられる。

6.3.1 変調器

変調のめざすところは、減速にとってより良い集団を形成することである。良い集団とは、位置空間および速度空間（またはエネルギー空間）における広がりを抑えることであるが、装置寸法を抑えるとの観点から、より短い距離での集団も重要である。これらのうち、速度空間での広がりと集団距離とはトレードオフの関係にある。例えば、最も簡単な変調法として、2枚のグリッド電極で変調周波数の電界を印加するものがある。この場合の制御条件は電極電圧振幅のみで、小振幅ではエネルギー広がりを抑制できるが、集団距離が長くなる。速度空間での広がり問題は、後に述べる定減速度法によってある程度対応できるので、短い集団距離に着目した報告がある[12]。

一方、位置空間の広がり抑制を扱った模擬実験の報告として、2周波変調方式がある[13]。理論計算によれば、1箇所での変調電界で全ての粒子を1点に集団させるには、正弦波でないある理想的な波形が必要である。しかし、MHz領域での理想波形の実現は困難である。そこで理想波形をフーリエ分解した基本波と第2高調波のみで近似波形を構成する。電圧印加電極を2枚用意し、フーリエ成分に応じた振幅と粒子の走行による位相差を加味した2周波の電圧をそれぞれ印加する。報告では、変調されたビームの電流が粒子軌道計算と照合され、期待した変調が確認された。この変調手法は以降の減速実験で利用され、その有用性が確認された。

変調過程について、模擬実験で不可解な現象が報告されている。変調電界印加によるビームの過渡変化時間は、変調器と測定器との間の粒子の走行時間程度と考えられ、報告の実験条件では μs のオーダーとなる。ところが、十分な変調効果を得るまでに数百 μs 程度の時間が観測されている[10]。この現象は未解明であり、模擬実験ではパルス幅を拡張して十分な変調効果を確認する形で対処療法的に対応している。

6.3.2 減速器

減速器の構造の良否については、模擬実験では粒子の減速を調べることになり、減速器電極の電圧を外部より印加する手段を用いる。一方、集団粒子の誘導電流による電圧誘起の過程では、電極電圧は観測対象となる。前者の構成は能動型減速器、後者は受動型減速器と呼ばれ、それぞれ独立に実験が行われている。

能動型減速器ではより良い減速器構造を調べる。これまで調べられてきた減速器の構成法としては、最適減速法と定減速度法とがある。

最適減速法では、ビームの中心エネルギーの粒子を対象として、その速度に合わせた位相速度をもつ進行波を考え、粒子はその波の最大減速電界で常に減速されるとする。電圧振幅が一定なら最大減速電界は波の波数に比例、すなわち位相速度に反比例する。粒子の運動方程式から、最終減速点（速度が0となる位置）までの距離に対して速度は3乗で変化する[11, 14]。この方法では、粒子と波の関係を最適に保っているが、粒子が中心エネルギーからずれると最適減速の関係が崩れ、特にエネルギー広がりの大き

なビームでは、高い減速効率が得られない。

定減速度法では、一定の減速度を指定して設計する[15]。進行波内の電界は、位置に対して近似的な正弦波状に変化している。指定した減速度で進む進行波の座標系で見ると、粒子は自身の慣性力と減速電界の力とが釣り合う点（静止点）に位置する。進行波との速度のずれが生じると、静止点を中心として往復運動しながら、進行波と共に減速する。この場合、ビームにエネルギー広がりがあっても、往復運動が可能な範囲内の速度であれば電位の谷に捕捉され、波とともに減速する。変調器でエネルギー広がりを大きくすると、電位の山を越えて捕捉されない高エネルギーの粒子が現れる。これに対しては、山の高さは減速器に印加する電圧によるので、全粒子を覆うように設計すればよい。

減速器の性能はビームの平均エネルギーの変化で評価する。元のエネルギーに対するTWDECの動作による減少分の割合を変換効率とする。図6は模擬実験における最大変換効率の変遷を示している。2010年頃までは最適減速法が用いられ、変換効率は最高20%台であった。その後、定減速度法が採用されて変換効率が著しく上昇し[16]、2周波変調方式の併用により、最高50%台を記録するに至っている[17]。

一方、受動型減速器については、電極に誘起される電圧の大きさや波形が評価対象である。模擬実験のビーム電流では誘起電圧での粒子の減速は期待できないので、等間隔の電極配置のもとで、誘起電圧を向上させる電極間の接続回路が主たる課題となる。ループ型回路の採用で電圧向上が達成されているが[18]、 μA オーダーのビーム電流では mV オーダーの電圧に留まっている。

6.4 まとめ 一課題と展望一

ARTEMISの提案に沿って、CuspDECおよびTWDEC個々について模擬実験が進められてきた。個々の変換器についての重要な課題も残されているが、小規模模擬実験装

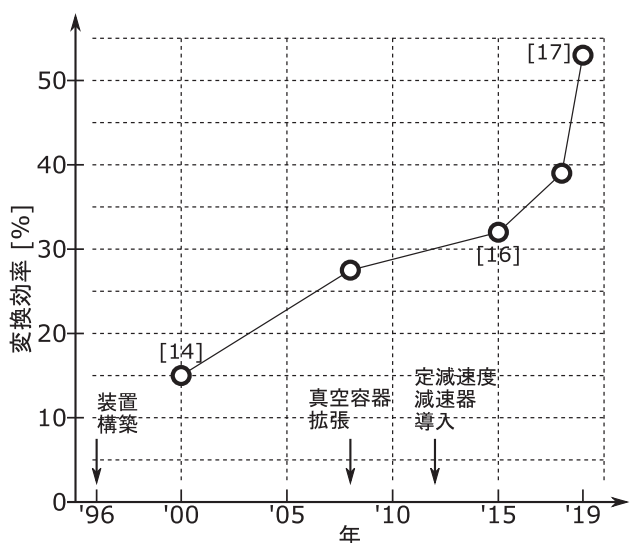


図6 能動型減速器の変換効率の変遷 ([]は参考文献)。

置による厳しい制約も認められている。

CuspDECでは高密度粒子束に対する電荷分離効率の改善が必要であるが、小規模装置で高密度粒子束を得るには供給ガス量の増大が必要である。この際、生成プラズマの電離度が低いと、多量の中性ガスが装置内に流入する。CuspDECの粒子分離の原理は無衝突の仮定に基づいており、小容量装置での多量の中性ガスは、この条件の成立を厳しくする。

TWDECの変換効率の向上には減速器長の増大が必要である。しかし、延長分の電極間隔は数mmより狭く、耐電圧等の観点で構成は難しい。TWDECでの手つかずの課題である自励発振については、受動型減速器での励起電圧の向上が必須である。これにはアンペアオーダーのビーム電流が必要で、ビーム電力としてkW~10kWが要求され、これも小規模装置では厳しい条件である。自励発振動作自体に的を絞って、増幅した減速器の誘起電圧を変調器に帰還させて疑似動作を狙う試みも行われているが、まだ十分な結果は報告されていない。

さらに、以上の様な個々の変換器の課題に加えて、両者を統合した模擬実験も検討されねばならない。CuspDECでのイオン-イオン分離に関係して、熱化イオンのエネルギー分布によっては異種イオンのTWDECへの流入も懸念される。また、分離過程での高速イオンの散乱がTWDEC動作に及ぼす影響も想定しうる。統合型装置構築の報告はあるが[19]、実際の統合動作の実験はまだ行われていない。

一方で、ARTEMISの構想範囲を超えた取り組みの報告もある。TWDECでは、集群が十分でないと進行波に対して加速位相となる陽子が存在し、元より高いエネルギーの陽子が排出される。この様な高エネルギー陽子からのエネルギー回収策として、二次電子放出型変換器の模擬実験が行われている[20]。これは、高エネルギー陽子を金属箔に入射させて二次電子を発生、すなわち二次電子のエネルギーへと変換し、これら二次電子のエネルギーを回収するものである。また、直接エネルギー変換はプラズマからエ

ネルギーを奪う手段との観点から、核融合炉実現での喫緊の課題であるダイバータ熱負荷の低減へCuspDECの応用をめざした報告もある[21]。

直接エネルギー変換は、通常、荷電粒子の捕集が目標となるので、現在主流のトーラス型とは相性が良くない。専ら先進燃料炉への適用で考えられ、新概念の分野で扱われがちで実験研究は広がらない。現状では、実験環境の制約などからほとんどは変換原理が研究対象であり、材料の熱的問題などは全く手つかずである。変換原理での未解決の課題と合わせて、装置規模を拡大した模擬実験研究の進展が望まれる。

参考文献

- [1] W.L. Barr and R.W. Moir, Nucl. Technol./Fusion 3, 98 (1983).
- [2] H. Momota, LA-11808-C, Los Alamos Natl. Lab., 8 (1990).
- [3] H. Momota *et al.*, Proc. 7th Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems, 16 (1993).
- [4] R.W. Moir and W.L. Barr, Nucl. Fusion 13, 35 (1973).
- [5] Y. Yasaka *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. 55, 1 (2009).
- [6] Y. Yasaka *et al.*, Nucl. Fusion 48, 035015 (2008).
- [7] W. Schuurman and H. de Kluiver, Plasma Phys. 7, 245 (1965).
- [8] Y. Tomita *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. 47, 43 (2005).
- [9] Y. Munakata *et al.*, Plasma Fusion Res. 7, 2405071 (2012).
- [10] H. Takeno *et al.*, Plasma Fusion Res. 14, 2405013 (2019).
- [11] M. Ishikawa *et al.*, Fusion Eng. Des. 41, 541 (1998).
- [12] H. Takeno *et al.*, Trans. Fusion Sci. Technol. 61, 129 (2012).
- [13] H. Takeno *et al.*, Plasma Fusion Res. 14, 2405014 (2019).
- [14] H. Takeno *et al.*, Jpn. J. Appl. Phys. 39, 5287 (2000).
- [15] 片山英昭, 佐藤邦弘: プラズマ・核融合学会誌 77, 698 (2001).
- [16] Y. Togo *et al.*, Plasma Fusion Res. 10, 3405013 (2015).
- [17] K. Shibata *et al.*, Plasma Fusion Res. 14, 3405078 (2019).
- [18] H. Takeno *et al.*, Fusion Sci. Technol. 47, 450 (2005).
- [19] H. Takeno *et al.*, 30th ITC, 19Ca-1 (2021).
- [20] A. Kurisuno *et al.*, Plasma Fusion Res. 15, 2405046 (2020).
- [21] Y. Nonda *et al.*, Plasma Fusion Res. 13, 3405050 (2018).