

小特集 D-³He 核融合とその開発課題

7. 直接エネルギー変換

富田 幸博

(核融合科学研究所)

(1995年4月14日受理)

Direct Energy Conversion

TOMITA Yukihiro

National Institute for Fusion Science, Nagoya 464-01, Japan

(Received 14 April 1995)

Abstract

D-³He fueled fusion releases most of energy as a form of synchrotron radiation and charged particles. Direct energy converter (DEC) with high efficiency brings about a fusion reactor plant with high efficiency and alleviates waste heat problems. Rectennas, or rectifying antennas in a low β tokamak fusion reactor, has been proposed to convert synchrotron radiation to electricity. Applicability, however, for conversion of wide range of frequency is left as one of future problems. In order to convert kinetic energy of ions out of the burning plasma, a novel and high efficient system with cusp-typed DEC and a traveling wave DEC has been proposed. This system resolves the problems of transparency of ion flow, cooling of collector plates, and electron separation from ions, which are left as an unresolved problems in a conventional Venetian blind DEC.

Keywords:

D-³He fueled fusion, direct energy conversion, rectennas, cusp-type DEC, traveling wave DEC,

7.1 はじめに

核融合炉からのエネルギーは中性子, 放射(制動放射とシンクロトロン放射), それに荷電粒子の形態で炉外に取り出される. D-T 核融合では核融合出力の約80%が中性子出力であるのに対して, D-³He 核融合の場合は中性子出力は全体の数%にすぎず, 放射と荷電粒子が核融合出力の大部分を担っている. 中性子のエネルギーは熱-電

気エネルギー変換で電気エネルギーに変換されるが, その変換効率は高々40%にすぎず炉のプラント効率(電気出力の核融合出力に対する比)はこの低い変換効率で決まってしまう. 一方, D-³He 核融合では, 放射や荷電粒子の持つエネルギーを高効率に直接電気エネルギーに変換することが可能で, その変換効率は60%以上が期待でき, その結果廃熱による熱汚染の問題を軽減させ, 炉の効

率を上げて COE (Cost of Electricity) を下げることになる。ここでは、現在までに行われた $D-^3\text{He}$ 核融合の放射エネルギーや荷電粒子の運動エネルギーの直接エネルギー変換器 (DEC: Direct Energy Converter) の研究を紹介して今後の研究課題について述べる。

7.2 シンクロトロン放射の直接エネルギー変換

トカマク等の閉じた磁力線配位では荷電粒子を外部的に取り出すことは困難であるが、低 β 領域、特に第一安定化領域 ($\beta < 0.1$) での $D-^3\text{He}$ 核融合ではシンクロトロン放射出力が核融合出力の約 50% [1] と多く、その直接エネルギー変換は炉の成立性を左右する。そこで、 $D-^3\text{He}$ /トカマク核融合炉設計 “Apollo” や “ARIES” で採用されたのが rectennas (rectifying antennas) [2-4] である。これは、G. Logan による 2.45 GHz の単色高周波電力を 85% の効率で直流電気に変換した実験に基づいている [5]。プラズマからのシンクロトロン放射は、第一壁で反射され、導波管によって直接エネルギー変換部に導かれて電気エネルギーに変換される。導波管直径に対する長さの比が 30 の場合導波管内の損失は 5 % 以下で、全体の変換効率は 80% と見積もられている。rectennas の等価回路と現在考えられている基本構造を Fig. 7.1 に示す。プラズマ温度が 50-60 keV の $D-^3\text{He}$ 核融合ではシンクロトロン放射の中心周波数は $\sim 5\text{-}10$ THz で帯域は $\sim 1.5\text{-}30$ THz であるために、広い帯域幅のエネルギー変換に log-spiral 形状を持った rectennas が提案されている [3,4] が、超高周波での有効性実証や回路素子の開発が必要であり、さらに、高反射率 ($>90\%$) の第一壁やその経年変化およびプラズマ disruption 時の対策なども今後の研究課題である。また、このようにシンクロトロン放射を直接電気に変換するのではなく、シンクロトロン放射による水銀の過熱蒸気を利用した MHD 発電方式が D-T/トカマク核融合炉で検討され [6,7]、炉プラント効率が 45% にまで達することが示されており、高シンクロトロン放射出力の $D-^3\text{He}$ /トカマク核融合炉ではさら

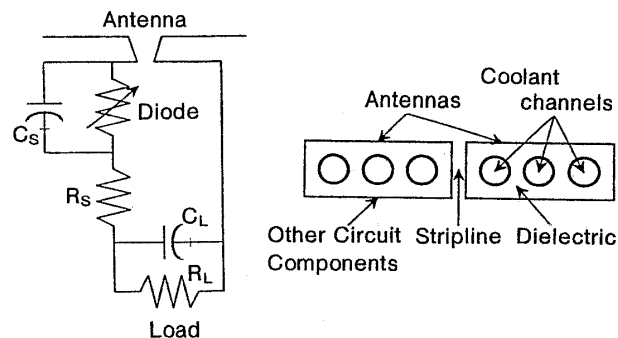


Fig. 7.1 Equivalent circuit and geometry of the rectennas [3, 4]

に高効率が期待できる。

7.3 荷電粒子エネルギーの直接エネルギー変換

7.3.1 Venetian blind DEC

プラズマ閉じ込め領域から漏洩する荷電粒子の運動エネルギーを直接電気エネルギーに変換するために最初に提案されたのは R.F. Post [8] による D-T 燃料ミラー核融合炉における静電型 DEC [8-10] である。基本過程は次の 4 段階からなっている。(1) 炉から損失したプラズマは、最初に磁場の拡張によってその磁場に垂直方向エネルギーから平行成分へと変換されると同時に粒子密度が減少される。(2) 次に、プラズマ・イオン流から電子が分離される。(3) 分離されたイオンは静電場によって減速されて、そのエネルギーの大きさで分けられる。(4) 最後に、減速されたイオンは収集板に集められる。これら過程でイオンの運動エネルギーが外部回路に誘起される電力に変換されるものである。R.F. Post はイオンをエネルギーで分けさせるために 22 段静電収束法を用いているが、その収束法を改良したものが Venetian Blind 型 DEC (VBDEC) [9-10] である。これはリボン型 (Venetian Blind 型) 電極の角度を各段で変えることによってイオンの分けを行い変換効率を上げている。D-T 核融合炉での 3 段 VBDEC を Fig. 7.2 に示す。この例ではミラー磁場のロス・コーンから漏洩する最低エネルギー 100 keV、平均エネルギー 168 keV の D, T イオンに対して -50 kV の負電極で電子を反射させてイオンから分離し、それぞれ 98, 152, 235 kV の

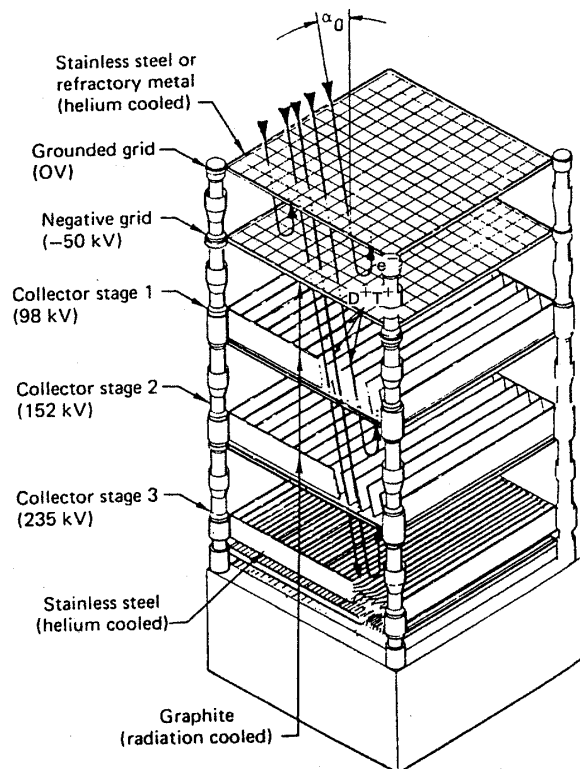


Fig. 7.2 A typical direct energy converter module of the three-stage Venetian blind direct energy converter [10].

3段イオン集束電極によってイオン・エネルギーを回収する。その変換効率は1112 MWの損失イオンパワーに対して63.8%と見積もられている[11]。

7.3.2 Cusp-type DEC and TWDEC

D-³He 核融合の特徴は D-T 核融合と異なっており、閉じ込め領域から損失するプラズマに熱化プラズマと同時に15 MeVの陽子が含まれている点である (ARTEMIS-L: $P_{\text{thermal}} = 577$ MW, $P_{15\text{MeV}} = 545$ MW[12])。この高エネルギーの回収に静電的方法を用いるのは非現実的である。ちなみに、15 MVの印加電圧が放電破壊しないためには 10^{-3} Torr以下の真空度で電極間隔が25~180 m必要となる[13]。さらに、熱化イオンのエネルギー回収のためのイオン流内の電極設置は15 MeV陽子の衝突による損失につながると同時に、その熱除去は重要な問題となる。そこで提案されたのが、熱化イオンのエネルギー回収のために、イオン流中に電極を持たないカusp型 DEC (Cusp DEC) [12]と、15 MeV陽子のエネルギー

回収のための進行波型 DEC (TWDEC) [14,15]である。これらの全体構造を Fig. 7.3 に示す。以下ではこれらの直接エネルギー変換器が設置された磁場反転配位 (FRC: Field-Reversed Configuration) D-³He 燃料核融合炉概念設計 “ARTEMIS-L” を例にしてこれらの機構を紹介する。

燃焼プラズマから損失した荷電粒子は磁場の拡張によってそのエネルギーの垂直成分はほとんど平行成分に変換される。ARTEMIS-Lでは閉じ込め領域の磁場5.36T、セパトロクス半径1.68mから半径5mのエネルギー変換領域に拡張され、そこでの磁場は0.086Tとなる。その結果、閉じ込め領域で全エネルギーの1/3であった磁場に平行成分は拡張後0.989となる。このようにほとんど平行成分に変換された荷電粒子流は二重カusp磁場配位をもつカusp型 DEC に導かれる。電子はその小さい質量のゆえに磁力線に沿って前段カuspの導かれ、熱化イオン (最低 energy = $167 \times Z_i$ keV, energy spread = 167 keV) は後段カuspの磁場を調節することによって後段カuspに導かれる。粒子軌道計算によれば、電子の99%以上が前段カuspに導かれ、陽子、重水素、三重水素の90%以上及び³He, ⁴Heの50%以上が後段カuspに導かれて静電型 VBDEC によってそのエネルギーが回収される。Cusp DEC を通過した残りの熱化イオンは、円筒形反射電極 (< 1 MV) によって Cusp DEC に反射される。VBDEC のみでは電子のイオンからの分離はプラズマ流中に設置された負電圧グリッドによる反射で行われているために完全に分離することができないが、Cusp DEC では以上のように電子とイオンは十分に分離され、イオン流中にグリッド・メッシュが存在しないために粒子衝突による損失や熱除去の問題はなくなる。

15 MeV 陽子は熱化イオンより十分高エネルギーのためにその軌道に影響を受けずに Cusp DEC を通過し、TWDEC[14]に導入される。これは線形加速器 (Linac) の逆過程を利用したもので、変調器 (Modulator) と減速器 (Decelerator) で構成されている。変調器では、効率よくエネルギー回収を行うために、入射陽子ビーム中に置かれ

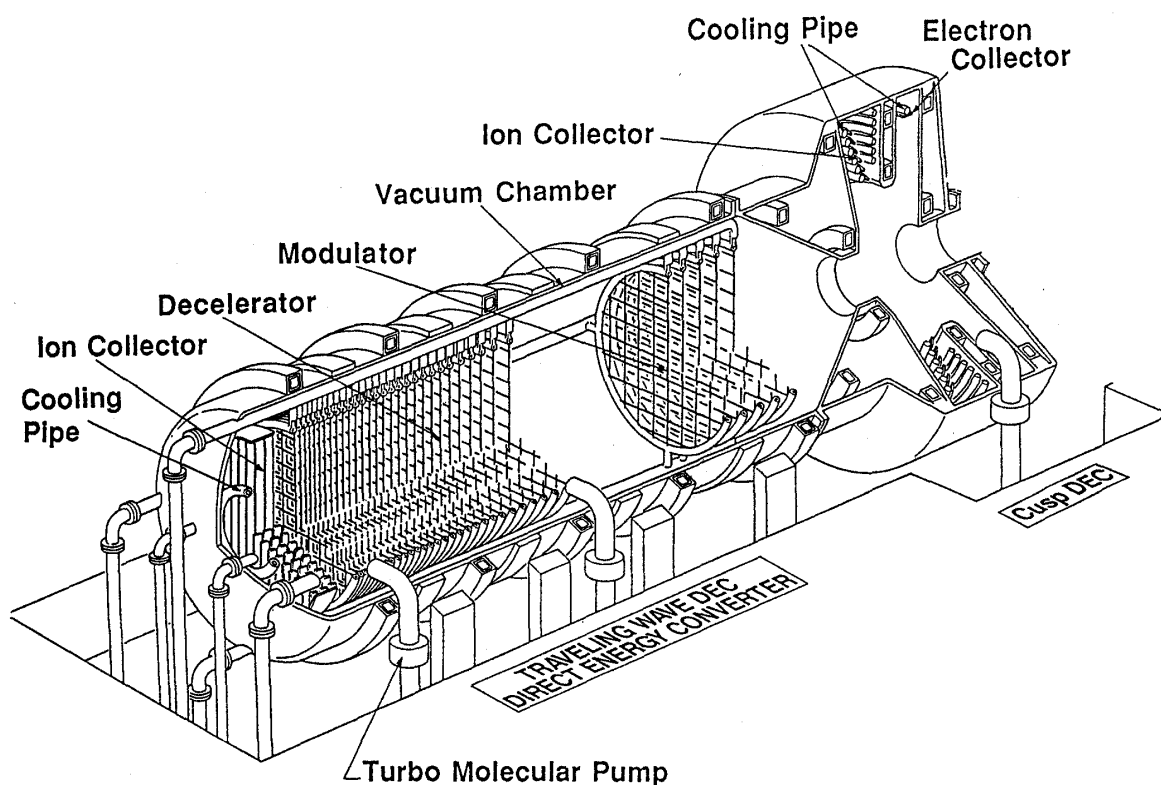


Fig. 7.3 The schematic drawing of the proposed DECs, i.e. the cusp-type DEC and the traveling wave DEC [14-16].

た grid mesh array に印加された進行波によって速度変調が行われ、一様に入射した陽子ビームは変調器電界の下流で空間的に集束する。そこに設置された減速器は grid mesh array とそれらに結合された外部の transmission 回路で構成されており、集束した陽子ビーム流はこれらの grid mesh array を通じ transmission 回路に高周波電流を励起する。また、この励起された grid mesh array 上の電圧は荷電粒子ビームを減速させる役目をする。grid mesh array の間隔を調節して進行波の位相速度を減速された陽子ビームの速度と合わせることによって陽子ビームの運動エネルギーが効率よく電気エネルギーに変換される。核燃焼 $D-^3He$ プラズマから漏洩した核反応生成陽子は 15MeV の中心エネルギーに、生成時のドップラー効果によるエネルギーの拡がりを持っている。プラズマ温度が 83.5 keV の場合、その拡がり（半値半幅：Half Width of Half Maximum）は 0.83 MeV である。ARTEMIS-L では半径 5 m の TWDEC 部での陽子数密度は $2.7 \times 10^{10} \text{ m}^{-3}$ で、

それによって形成される空間電位は $4.9 \times 10^4 \text{ V}$ と陽子のエネルギー 15MeV より非常に小さく、陽子の集団的效果は無視できる。変調器中陽子ビームの集束の様子を Fig. 7.4 に示す。ここで λ_m は変調器に印加された進行波電界の波長であり、その電界は 0.0 から 1.0 の間に印加されている。その下流の x/λ_m が 3.0-4.0 で空間的に最も鋭い分布となり、その前後の x/λ_m が 2.0 および 5.0 の近傍で正弦波に近い分布となっている。さらに下流では空間的な集束はなくなり、一様になる。この陽子ビームの空間分布がエネルギー回収にとって最適となる位置に減速器が設置される。減速部での grid mesh array とそれに接続された外部 transmission 回路を Fig. 7.5 に示す。ここで添え字 n は mesh 番号を示し、 V_n^e , V_n はそれぞれ集束したビームによる電位と mesh 電位であり、それらは stray capacitance C_s によって結合されている。ここでの電力励起は Linac の原理によって以下のように表される [16]。陽子ビームは正弦的に集束して減速しているものを考え、それによる

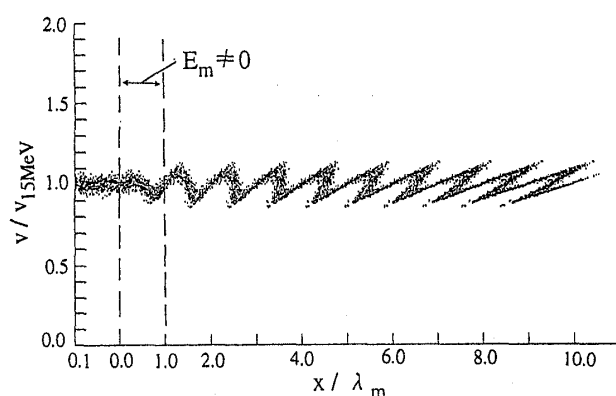


Fig. 7.4 The phase plot of 15 MeV fusion proton beams in the modulator. Here λ_m is a wave length of applied electric field in modulator. The modulator field is applied at the position from 0.0 to 1.0 [16].

空間電位 $V^e(x, t)$ は,

$$V^e(x, t) = \tilde{V} \left\{ 1 + \cos \left[\int^x k_d d\xi - \omega_d t \right] \right\} \quad (7.1)$$

と表され、波数 k_d の空間変化は次式のようにとられている。

$$k_d(x) = \omega_d \left(1 - \frac{3eV_{d0}\omega_d}{mv_{15\text{MeV}}^3} x \right)^{-1/3} \quad (7.2)$$

ここで、 V_{d0} は減速部に印加される最大電圧で、角周波数 ω_d は一様である。この空間電位によって transmission 回路には次式の共鳴条件を満足する進行波のみが減衰しないで伝播する。

$$\omega_d^2 = \Omega^2 - \frac{\nu^2}{4} \quad (7.3)$$

ここで、

$$\Omega^2 \equiv \frac{1}{LC[2(1-\gamma) + C_s/C]}, \quad \nu \equiv R/L$$

$$\gamma \equiv \cos(\theta_{n+1} - \theta_n).$$

であり、 θ_n は n 番目 mesh grid での進行波の位相を示す。このように減速部でのエネルギー回収の観点からは、入射陽子ビームは transmission 回路の特性周波数 Ω に共鳴する正弦波の形が最適であり、それ以外の高調波成分は transmission 回路に雑音を発生するのみでエネルギー回収の対象にはならない。以上のように TWDEC による

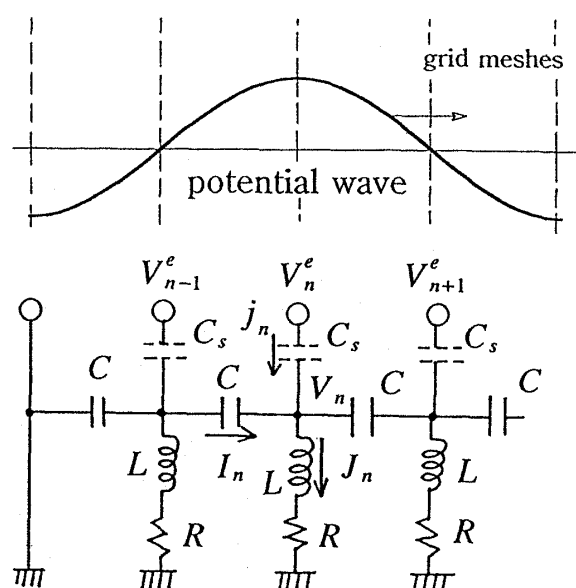


Fig. 7.5 The transmission circuit in the decelerator, consists of inductances L , capacitors C , and registers R [16].

15 MeV 陽子エネルギー回収の方法が提案されたが、その最適化や実証実験は残された課題である。また、実用化にあたっては、高電力、高周波の AC-AC 変換器の開発が必要となる。TWDEC では陽子ビーム中に grid mesh が置かれているが、それらの熱除去に関して、陽子入射パワーが 3.5 MW/m^2 と多いために放射冷却のみでは解決されず（最高 mesh 温度 $\sim 3000 \text{ K}$ ）、半径 5 mm、厚さ 1 mm の stainless steel 管に 30 MPa の加圧水を流速 5 m/sec 以上で流せば、安定な水流で mesh の出口部温度は 500 K 以下となりその問題は解決される。また、15 MeV 陽子の衝突による grid mesh の sputtering yield は 7.1×10^{-7} と非常に小さく、30 年の耐用年数の間その効果は無視できる。

荷電粒子の担うパワーが多い $\text{D-}^3\text{He}$ 核融合の特徴を活かして直接エネルギー変換を利用することによって炉プラント効率は高められる。特に、Cusp DEC と TWDEC の提案はそれらの効率が各々 60%、70% 以上に見積もられ、炉プラント効率は D-T 核融合等の 2 倍の 60% 以上が期待できる。

7.4 まとめ

$\text{D-}^3\text{He}$ 燃料・低 β トカマク核融合炉ではシンク

ロトロン放射の直接エネルギー変換のために Rectennas が提案されたが、燃焼プラズマからの広帯域幅を持つ放射の変換は今後に残された課題である。一方、FRC では高 β 値のためにシンクロトロン放射損失が非常に少なく、核融合パワーのほとんどを荷電粒子が担い、周辺が開いた磁場構造を持つためにこれらを容易に直接発電器に導くことができる。このエネルギー変換のために、Cusp DEC と TWDEC が提案された。この方式では従来の静電型 DEC で課題となっている、電子流のイオン流からの分離、核融合生成15MeV陽子のエネルギー回収、金属電極の熱除去等が解決される。この直接エネルギー変換器の原理実証実験と中規模変換器試作による技術開発は早急に遂行されるべきである。

参考文献

- [1] G.L. Kulcinski, G.A. Emmert *et al.*, *Fusion Technol.* **15**, 1233 (1989).
- [2] J.F. Santarius *et al.*, *Proc. of IEEE 13th Symp. on Fusion Eng.* Vol. 2, 1039 (1989).
- [3] J.F. Santarius, *Proc. US-USSR Workshop on D-³He Based Reactor Studies*, Moscow, USSR, September 25–October 2 (1991).
- [4] G.A. Emmert *et al.*, *Proc. of Second Wisconsin Symp. on Helium-3 and Fusion Power* 329 (1993).
- [5] B.G. Logan, *Fusion Power Associates Annual Meeting*, April 24, Washington, DC (1986).
- [6] M.A. Hoffman, R. Campbell, and G. Logan, *Fusion Technol.* **15**, 1254 (1989).
- [7] K. Yoshikawa *et al.*, *Proc. 12th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research*, Nice, France, October 1989, Vol. 3, p. 441, IAEA (1993).
- [8] R.F. Post, *Proc. BNES Nucl. Fusion Reactor Conf.*, Abingdon, England, September 1969, p. 88 (1969).
- [9] R.W. Moir and W.L. Barr, *Nucl. Fusion* **13**, 35 (1973).
- [10] R.W. Moir *et al.*, *Proc. 6th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research*, Berchtesgaden, Germany, October 1977, Vol. 3, p. 223, IAEA (1978).
- [11] M.A. Hoffman, *J. Energy* **2**, 293 (1978).
- [12] H. Momota *et al.*, *Proc. 14th Int. Conf. Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion Research*, Würzburg, Germany, September 1992, Vol. 3, p. 319, IAEA (1993).
- [13] Y. Ohara *et al.*, JAERI-M 90-154, Japan Atomic Energy Research Institute (1990).
- [14] H. Momota, LA-11808, Los Alamos Natl. Lab., p. 44 (1989).
- [15] L.Y. Syu, Y. Tomita, and H. Momota, *Proc. 6th Int. Toki Conf. on Plasma Physics and Controlled Nucl. Fusion* (Toki, 1994).
- [16] H. Momota, private communication.