

解説

慣性静電閉じ込め核融合中性子源

大西正視

(京都大学エネルギー理工学研究所)

(1997年7月30日受理)

Neutron Source by Inertial Electrostatic Confinement Fusion

OHNISHI Masami

Institute of Advanced Energy, Kyoto University, Uji, Kyoto 611, Japan

(Received 30 July 1997)

Abstract

The principle, history, and present research status of an inertial electrostatic confinement (IEC) fusion are reviewed. Since the electrostatic potential formed in an IEC device is closely related to the operational principle, the experiments and theoretical works with respect to both of the electrostatic potential and the neutron generation are described in detail. Finally, the important issues to be addressed on plasma physics as well as engineering are summarized.

Keywords:

inertial electrostatic confinement fusion, neutron source, electrostatic potential well, potential oscillation, ICC effects, D-³He fusion, non-Maxwellian ions, direct energy recovery

1. はじめに

最近、慣性静電閉じ込め核融合という言葉を目にする。これは慣性閉じ込め核融合でもなければ磁気閉じ込め核融合とも異なり、イオンおよび電子を球形状中心に収束させ核融合反応を起こさせるもので、ビーム・ビーム衝突核融合の一種である。イオンビームを球形状中心に収束させると電子はイオンの作るポテンシャルにより同じく球中心に集中する。電子の役割はイオンの空間電荷を中和し、中心部でのイオン密度を上昇させることにある。こうして球中心部で高温・高密度のプラズマが生成され、作動ガスとして重水素・三重水素ガスを用いれば核融合反応が生起する。この概念の基は1950年代に旧ソ連の Lavrent'ev [1]、これと独立に P. T. Farnsworth (米国のテレビジョンの父) [2] により電子ビームを球中心に収束させ、電子と中性ガスとの衝突で生じたイオンが電子の空間電荷により加速され球中心で核融合が起こるという考えから始まる。W. C. Elmore [3] らによりこれに

対するプラズマの平衡・安定性の理論解析が行われ、不安定性により核融合反応が十分起こるほど密度が上昇しないことが示された。1960年代に入り R. L. Hirsch [4, 5] により電子ビームの代わりにイオンビームを用い、この密度制限を克服することが考え出され、イオン銃を用いた装置による実験で 10^9 s^{-1} の D-T 中性子束の発生が計測された。1970年代前半まで全米各地で研究が行われたが、次の事情により研究は中断した。

- (1) Hirsch の実験結果を追試できなかった。
- (2) 大出力化を考えたときグリッドの冷却という工学的困難が予測される。
- (3) 出力が電流の1乗に比例するという実験結果を核融合炉に外挿したとき装置の規模が非現実的になる。
- (4) 核融合炉の重点がトカマクに移った。

最近、IEC の原理を Fig. 1 に示す簡単な装置で実現する実験が行われた [6]。すなわち、球形状の陽極 (真空容器が兼ねる場合がある) および陰極 (メッシュ) の間

でグロー放電を起こさせるとこの領域で生じたイオンは陰極に向かって加速されメッシュ状陰極を通過し球中心に収束する。直径 30 cm 程度の装置で 10^6 s^{-1} 以上の D-D 中性子の発生を実証し IEC 研究がこれを契機に復活した。この背景にはトカマク開発に必要な研究予算が膨大になりトカマクに代わる方式の検討が重要との認識が生まれたこと、核融合炉として実用化しなくても中性子源として広い応用が考えられることがある。

IEC の基本動作原理に静電ポテンシャルが重要な役割を演じており、静電ポテンシャル井戸構造と中性子生成率は何かの相関があると一般に考えられている[4]。高出力中性子源あるいは核融合炉の可能性を検討する上で静電ポテンシャルの構造は重要な物理を含んでいると考えられる。この解説では IEC における中性子発生とともに静電ポテンシャルにも焦点をあてて IEC 研究現状と課題について述べる*。

2. 研究の現状

2.1 実験

(a) 中性子発生

すでに述べたように IEC の概念に基づいた実験は R. L. Hirsch により初めて行われた[4]。実験装置は球状の陽極の内側にイオンが通過できるポートを持った球状陰極からなる。陽極には 6 個のイオン源が取り付けられている。装置は陽極・陰極間印加電圧、150 kV 電流、60

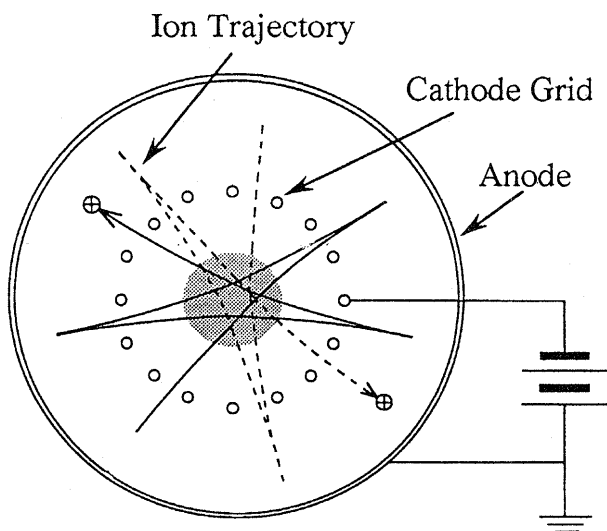


Fig. 1 Schematic view of an IEC. Several tens keV is applied between the anode and the wired cathode. The ion trajectories are also shown by the solid and broken curves.

mA で定常に動作する。中性子は中性子コリメータ観測により球中心部より発生することが確認されている。D-T ガスを用いた実験で Fig. 2 に示すようにイオン電流 10 mA, 印加電圧 90 kV で 10^9 s^{-1} の中性子の発生を観測している。この中性子数は単純なポテンシャル井戸から計算される核融合反応率より多く、理論で予測されている 2 重あるいはそれ以上の仮想陽極が中心部で生じている可能性を示すとされている。また、同時に X 線計測を行い 2 重仮想陽極の形成を示唆するデータを得ており、中性子計測データと矛盾しない。

イリノイ大学でイオン源を用いずワイヤーで作られた球形状陰極と、その外の陽極（真空容器）の間の放電でイオンを生成し陰極に向けてイオンを加速させる装置で実験が行われた。Fig. 3 に D ガスを用いた放電で得られた陰極印加電圧に対する中性子発生率を種々のイオン電流に対して示す[6]。70 kV, 10 mA で定常的に 10^6 s^{-1} の中性子の発生を観測している。D-T ガスを用いると核反応率は約 2 桁増大するので Hirsch の実験に近い結果を得たことになる。Hirsch の実験と同様に

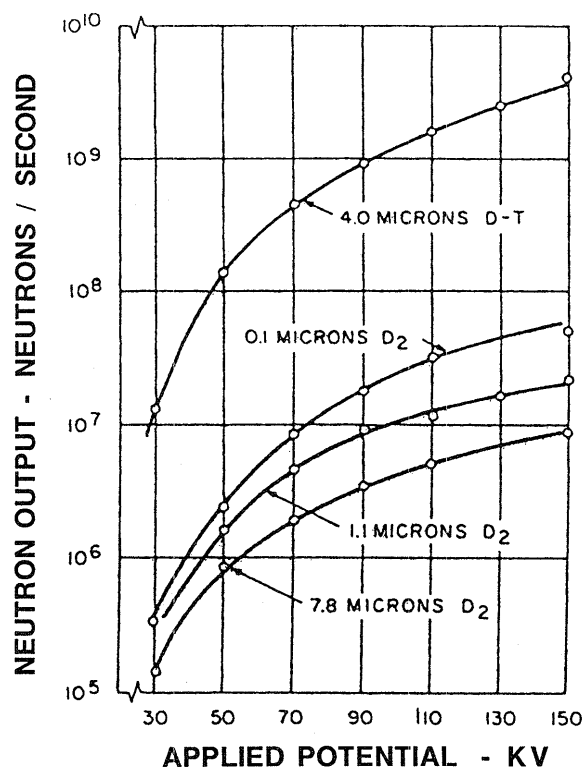


Fig. 2 Neutron outputs vs. applied potential at various pressure (ion current = 10 mA) [4]. 1 Micron equals to 0.1 Pa.

*磁場を電子の閉じ込め補助に用いる PolywellTM [7]およびペニングトラップ[8]も提案されているが本稿では触れない。

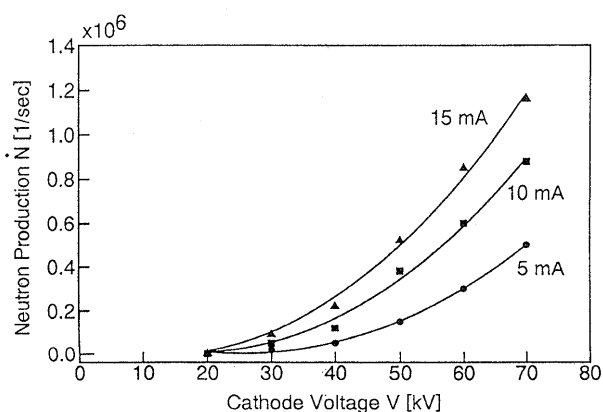


Fig. 3 Neutron output for IEC device with voltage for several currents [9,12].

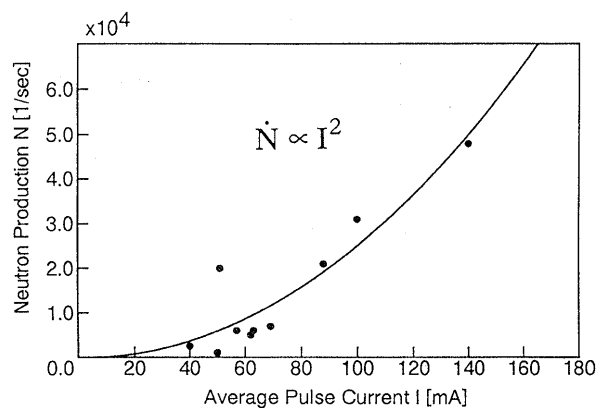


Fig. 4 Neutron output vs. pulse current at applied voltage = 10 kV shows an I^2 scaling.

中性子発生数は電流に比例しているが、中心部のイオン密度がイオン電流に比例するなら中性子発生は I^2 に比例するはずである。その後、高い電流密度領域の実験が電源の制約および陰極の過加熱の問題を避けるためにパルス実験として行われた[9]。Fig. 4に平均パルス電流に対する中性子生成率を示す。ここで、陰極印加電圧は10 kVである。この実験はパービアンズ値 $I(\text{mA})/V(\text{kV})^{3/2}$ が2.2を超えると中性子発生は I^2 則に従うことを示す。

(b) ポテンシャル分布

初期の実験として D. A. Swanson 他[10]は、電子を高エネルギーで入射しポテンシャル井戸を形成させ、電子ビームプローブ法で定常的に正の静電井戸の内側に負の静電井戸が存在することを計測した。

最近、ウィスコンシン大学で、中心ワイヤー陰極と陽極の間にもう一つワイヤー電極を付加した装置で、低圧放電 (53 mPa 以下) を行い中心部へのプラズマ流を高

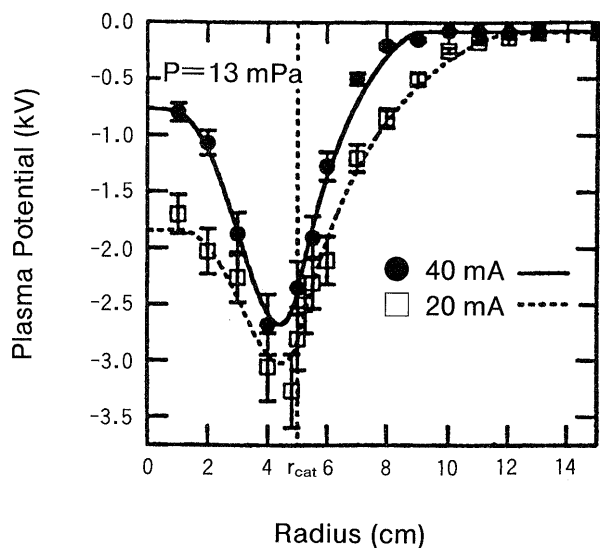


Fig. 5 Plasma potential measurements for different cathode currents [11]. The broken line indicates the position of the cathode.

圧のエミッシブルプローブを用いて計測した実験が行われた[11]。径方向プラズマポテンシャル分布は衝突のない空間制限電流モデルと良い一致を示す。イオンの収束は印加電圧の上昇および中性ガス圧の低下とともに改善され、陰極ワイヤーの間隔および電流の増加とともに悪くなる。Fig. 5に見られるように中心にイオンの収束結果による仮想陽極が形成される。しかし、Hirsh のいう多重井戸の形成は確認できていない。CCDによる光強度の計測からコア半径は0.6 cm、中心付近イオン密度は $n_{ic} \sim 10^{15} \text{ m}^{-3}$ と計測され、モンテ・カルロ法によるシミュレーション結果と一致する。

これに対して、イリノイ大学では中性子のコリメーションは容易でないので核融合反応の生起位置を同定するためコリメートした D-D 反応陽子を計測する実験を行った。Fig. 6に径方向位置に対する陽子密度分布を示す[12]。電流の増加とともに中心の密度ピークが顕著になるとともに両側に2つめのピークが現れる。粒子シミュレーションにおいて2重井戸が現れるとき、中心ではイオンのエネルギーが高く、一方イオン密度のピークは中心より周辺にずれる分布をする。その結果、Fig. 6に示された分布に近い陽子生成分布が得られるのではないかと推測している。しかし、前述のウィスコンシン大学の実験と一致してない。

2.2 理論およびシミュレーション

(a) グロー放電シミュレーション

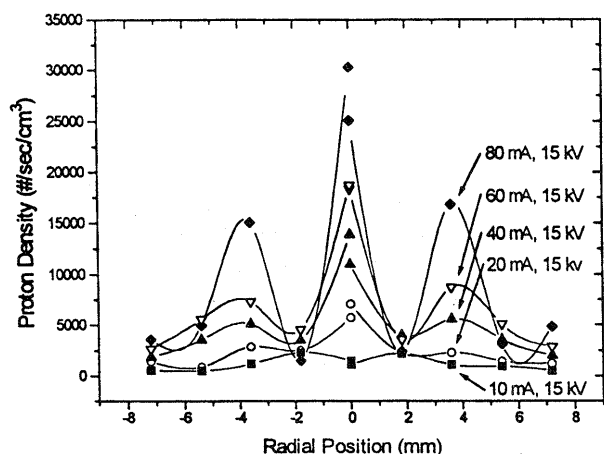


Fig. 6 A comparison of radial proton density profiles at different currents. The cathode voltage is constant at 15 kV [24].

Fig. 7 はプラ核学会の今年度のカレンダーに掲載された典型的な IEC 装置の放電である [13]。この放電はスターモードと呼ばれ、放射状の光のスポークはイオンの軌道が作る軌跡である。このような放電パターンができる理由は Fig. 8 に示すイオン軌道追跡コード SIMION の計算結果により説明される [14]。イオンの軌道は陰極近傍では不安定で陰極に衝突し失われる。したがって、陰極近傍を通過するイオンは短寿命で、陰極グリッドから離れて通過するイオンは寿命が長くこの軌道に沿って多数のイオンを生成する。生成されたイオンも長寿命で同じ軌道を描くイオンを作る。このようにブーツラップ状にイオンを生成し Fig. 7 に見られる放電パターンが得られる。

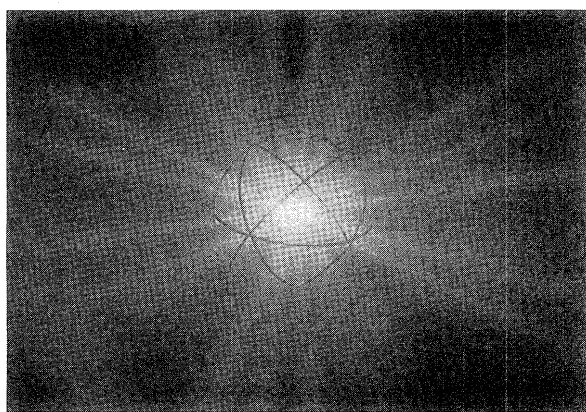


Fig. 7 Typical glow discharge in an IEC device called "star mode". The light spokes indicate the ion trajectories.

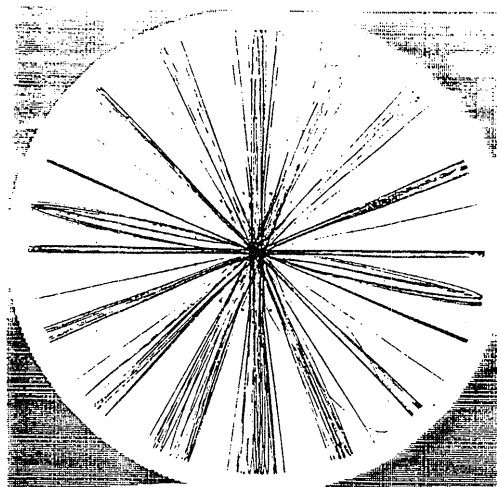


Fig. 8 A SIMION calculation of ion paths in the IEC. The trajectory bundles resemble microchannels while a dense plasma core is formed by intercepting trajectories at the center of sphere (The shaded outer region defines the chamber wall.) [14].

(b) PIC コードシミュレーション

多重ポテンシャル井戸の形成は初めて R. L. Hirsh により議論され「poissor」と命名された多重井戸の形成を理論的に予測した [4].

R. W. Hockney [15] は二次元粒子シミュレーションで一種類の荷電粒子 (イオンもしくは電子) を入射し荷電粒子により作られる仮想電極が安定に作られることを示した。また、最近では S. K. Wong および N. A. Krall [16] により方形のポテンシャル井戸に電子を入射したときの井戸の構造について理論解析が行われている。W. M. Nevins [17] はイオンの速度分布関数を仮定し、方形ポテンシャル井戸中におけるイオン密度を計算し、慣性静電閉じ込めの商用実用炉の可能性を検討している。これらの研究はいずれも一種類の荷電粒子 (イオンまたは電子) に限った解析である。イオン・電子ともに取り扱うモデルに拡張した解析が Ohnishi 他 [18, 19] により行われ、静電ポテンシャルと中性子発生の相関についての議論が行われている。イオン・電子の簡単な速度分布関数を仮定し荷電中性条件、すなわち $n_i = n_e$ を解くことにより平衡ポテンシャル分布を求め、二重井戸構造ができることが示された。井戸の深さはイオン・電子の収束半径に依存すること、井戸の深さと中性子発生は弱い相関のあることも明らかにされた。次に、二重井戸構造の安定性を調べるため超粒子モデルによる時間追跡数値シミ

レーションが実行された。Fig. 9に示すように単一エネルギーのイオンを入射した場合、入射イオン電流の大きさに依存し一重、二重および三重井戸の形成が示された。エネルギーが拡がりを持ったイオンの場合も二重井戸までの形成が示された。しかし、二重井戸構造以上は中心部の井戸は不安定でイオン音波程度の周波数でカオティックな振動を繰り返す。Fig. 10に見られるように時間平均の中性子発生は二重井戸構造が形成されるとイオン電流の2剰に比例する。二重井戸構造が形成されるイオン電流のしきい値は2.1節(a)に述べた $I \text{ (mA)} / V \text{ (kV)}^{3/2} \geq 2.2$ で与えられる値と一致する[20]。イオン電流の2剰以上の依存性はポテンシャル井戸の不安定な振る舞いに付随する中心付近のイオン密度の間欠的なピーキングに依るものであると説明されている。このような効果は R. W. Bussard [21,22]により理論的に予測されたイオン音波励起による中心部の圧縮による密度上昇による核反応率の増大効果 (inertial collisional compression, ICC 効果) と同一のものと考えられる。

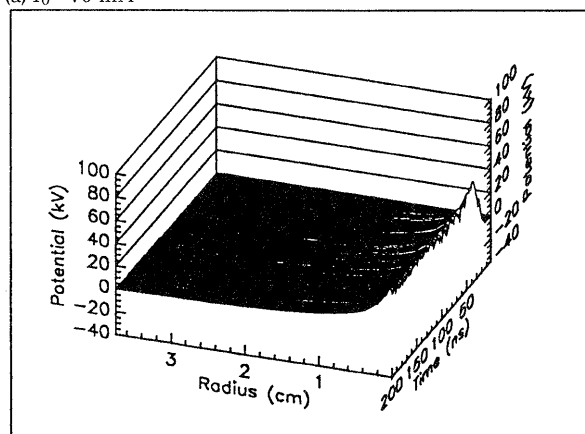
(c) クーロン衝突効果

慣性静電閉じ込め核融合プラズマは非マックスウェル速度分布関数をもつ。イオン同士の衝突によりイオン-イオン衝突時間程度でマックスウェル分布への緩和と単色エネルギーイオンの入射との競合で分布関数は決まる。ポテンシャル井戸構造、核融合反応およびQ値の正確な評価にはクーロン衝突効果を入れた bounce-averaged Fokker Plank 方程式を解かねばならないが、まだそのような解析は行われていない。イオン-イオン衝突がエネルギー平衡に与える効果について T. H. Rider および W. N. Nevins がそれぞれ簡単なモデルを用いて評価を行っている。Rider [23]によるとイオン上方散乱および電子の損失により D-T 以外の燃料、たとえば D- ^3He 燃料を用いた核融合炉は成立しないとされている。W. M. Nevins [16]もイオン-イオン衝突による緩和を妨げるに必要な入力は核融合出力より大きくなり中性子源となり得ても発電炉として成立しないと結論づけている。しかし、前項で述べたようにイオン、電子の損失、中心イオン密度は静電ポテンシャル井戸と強い相関があり、電子・イオンの運動で決まる自己無撞着なポテンシャル井戸とともに議論する必要がある。

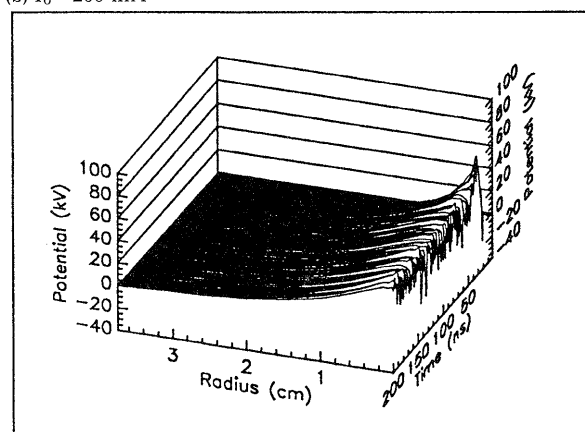
3. 今後の研究課題

IEC による中性子源の高性能化と核融合炉への可能性を探るために今後取り組まなければならない課題をまとめると以下のようになる。

(a) $I_0 = 70 \text{ mA}$



(b) $I_0 = 200 \text{ mA}$



(c) $I_0 = 400 \text{ mA}$

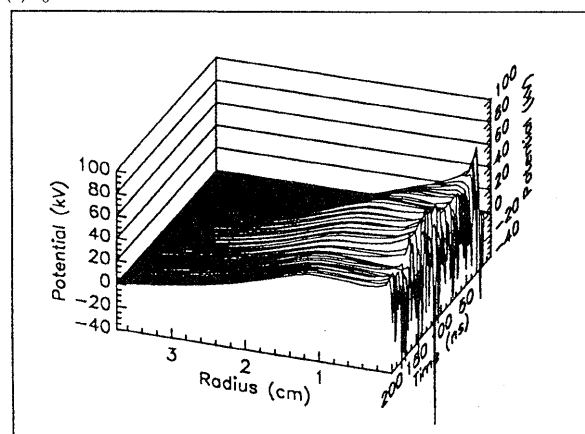


Fig. 9 The PIC particle simulation gives a time evolution of electrostatic potential profiles for three ion currents, where the ion are monoenergetic [19].

まず実験では

- (i) 静電ポテンシャルの直接計測 (陽子計測[24], シュタルク効果による禁制線の計測を用いた局所電界測定

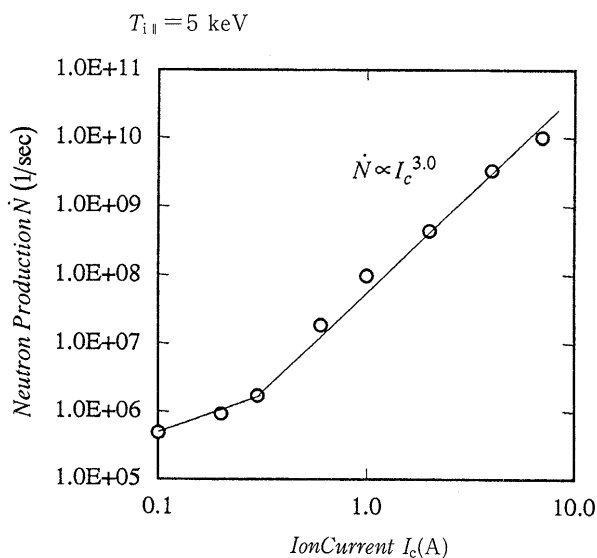


Fig. 10 Time averaged neutron production rate vs. ion current. The steeper slope gives a β^3 scaling [19].

[25, 26]) による井戸構造とその時間挙動の解明

- (ii) 中性子発生のイオン電流依存性の同定
- (iii) 中性子生成のグリッド形状, 動作条件の最適化が当面の課題である. 理論では
 - (i) クーロン衝突, 電極の不整合による球対称性の歪み, 中性粒子衝突等によるイオンの位置および速度空間的拡がりの定量的解析ならびにその静電ポテンシャル構造に及ぼす影響の解析
 - (ii) 非マックスウェル分布イオン速度空間不安定性励起の可能性と IEC 動作原理への影響の検討
 - (iii) 静電ポテンシャルの振動, ICC 効果のより現実的モデルでの理論解析

を行うことが必要である. そして, 装置・炉技術の課題として

- (i) 高熱負荷陰極の冷却法
- (ii) 低エミッタンス・高電流イオン源の開発
- (iii) 炉へ展望したときの核反応イオンの直接エネルギー変換器の開発

等があげられる.

4. おわりに

慣性静電閉じ込めという名称は一見奇妙に思えるが, イオンに運動量を与えることにより Earnshaw の定理を破り空間的に極値を持つ静電ポテンシャルによりイオン・電子を自ら閉じ込めるという意味に解釈できる. この「マジック」が起りうるかどうかを調べるのが IEC の研究の最も中心的な課題と思われる. IEC プラズ

マは中心部と周辺部とのごく僅かな距離でプラズマの分布関数が大幅に異なる大きく平衡からはずれた系でありプラズマ物理学上興味深い研究対象でもある.

工学的応用という観点では, 今までの核融合開発研究で得られたプラズマ生成技術はプラズマ応用として材料の微細加工等先端科学技術に大きな貢献をしてきたが, IEC は核融合反応そのものを利用する最初の装置である. 核融合炉として成立するかどうかは今後の研究に待たねばならないが, このような簡便な装置で安価に中性子が得られるので, 現在得られている中性子発生量でも油田探査, 爆薬の発見, 10^{12} s^{-1} 程度の発生量になると癌治療[27], 材料試験[28, 29]等広い応用が期待される. 従来の超ウラン元素 (たとえば ^{252}Cf) を用いた中性子源を越える長所として

- (1) エネルギースペクトルが単色, すなわち D-T ガスを用いれば 14 MeV, D-D を用いれば 2.5 MeV の中性子源となる.
 - (2) 崩壊による中性子源の強度減衰がない.
 - (3) 使用しないときの取り扱いが極めて容易である.
 - (4) D- ^3He ガスを用いれば 14 MeV の陽子源になる.
- が考えられる. IEC 研究は核融合炉へのユニークな一つのアプローチとして考えてみる価値があると思われる.

謝辞

本稿を執筆するにあたり種々議論を頂きました京都大学エネルギー工学研究所の吉川 潔教授, 井上信幸教授, 山本 靖助教授, 広島大学の尾田年充教授, 多幾山憲助教授, 姫路工大の佐藤邦弘助手, イリノイ大学の G. H. Miley 教授, ロスアラモス研究所の R. Neble 博士, ウィスコンシン大学の J. F. Santarius 助教授に感謝致します.

参考文献

- [1] A. Sakharov, *Memoirs* (Random House, New York, 1992) p.139.
- [2] P. T. Farnsworth, U. S. Patent No.3, 258, 402 (1966).
- [3] W. C. Elmore *et al.*, *Physics of Fluids* **2**, 239 (1959).
- [4] R. L. Hirsch, *J. Applied Physics* **38**, 4522 (1967).
- [5] R. L. Hirsch, *Physics of Fluids* **11**, 2486 (1968).
- [6] G. H. Miley *et al.*, *Proc. of 3rd Int. Conf. on Dense Z-pinches*, AIP Press, New York, p.675 (1994).
- [7] R. W. Bussard, *Fusion Technology* **19**, 273 (1991).
- [8] D. C. Barnes *et al.*, *Physics of Fluids* **B5**, 3651 (1993).
- [9] Y. Gu *et al.*, *Proc. 12th Topical Meeting on Technology of Fusion Energy*, Fusion Technology,

- Vol.30, No.3, Part 2B, 1342 (1996).
- [10] D. A. Swanson *et al.*, *Physics of Fluids* **16**, 1939 (1973).
- [11] T. A. Thorson *et al.*, *Physics of Plasmas* **4**, 4 (1997).
- [12] Y. Gu *et al.*, *Abstract: 1995 IEEE Int. Conf. on Plasma Science*, 266 (1995).
- [13] Y. Yamamoto *et al.*, *Preliminary Studies of Inertial-Electrostatic Confinement Fusion Experiments, to be published in Transactions of Fusion Technology, 12th Topical Meeting on the Technology of Fusion Energy*, American Nuclear Society, Reno, Nevada, June 16-20, 1996.
- [14] J. M. DeMora *et al.*, *Proc. IEEE/NPSS 16th Symposium of Fusion Energy*, IEEE, 1486 (1996).
- [15] R. W. Hockney *et al.*, *J. Applied Physics* **39**, 4166 (1968).
- [16] S. K. Wong and N. A. Krall, *Physics of Fluids* **B4**, 4140 (1992).
- [17] W. M. Nevins, *Physics of Plasmas* **2**, 3804 (1995).
- [18] M. Ohnishi *et al.*, *Multi-Potential Well Formation and Neutron Production in Inertial Electrostatic Confinement Fusion by Numerical Simulation, Proc. of the 16th IEEE/NPSS Symposium on Fusion Engineering*, 1468 (1996).
- [19] M. Ohnishi *et al.*, *Nuclear Fusion* **37**, 611 (1997).
- [20] M. Ohnishi *et al.*, *Study on Inertial Electrostatic Confinement Fusion as Portable Neutron Source, to be appeared in Proc. 4th Int. Symp. on Fusion Nuclear Tech.*, Tokyo, 6 April, 1997.
- [21] R. W. Bussard, *Physics of IEC for Fusion Reaction Systems*, LANL Report, Contract No.9-XG2-U5957-1, 1994.
- [22] D. C. Barnes and L. Turner, *Physics of Fluids* **B4**, 3890 (1992).
- [23] T. H. Rider, *Physics of Plasmas* **2**, 1853 (1995).
- [24] Y. Gu, *Measurement of Proton Density Profiles in a Spherical IEC Fusion Device*, Ph. D Thesis, Dep. of Elec. Eng. U. of IL, 1997.
- [25] K. Takiyama *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **25**, L455 (1986).
- [26] K. Takiyama *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **33**, 5038 (1994).
- [27] J. Nadler, *IEC-Based Neutron Generator and Filter Concept for Neutron Capture Therapy, 6th Int. Symp. on Neutron Capture Therapy for Cancer*, Kobe, 31 Oct. -4 Nov. 1994.
- [28] Y. Gu *et al.*, *A Portable Cylindrical Electrostatic Fusion Device for Neutron Tomography*, *Fusion Technology* **26**, 3 Part 2, 929 (1994).
- [29] R. A. Anderl *et al.*, *Development of an IEC Neutron Source for NDE, Proc. 16th IEEE/NPSS Symposium Fusion Engineering*, 1482 (1996).