RECENT PROGRESS IN ION BEAM INERTIAL CONFINEMENT FUSION

イオンビーム慣性核融合研究の動向

Shigeo Kawata

Department of Electrical Engineering, Nagaoka University of Technology, Nagaoka 940-21, JAPAN.

PHONE(0258)46-6000, FAX(0258)46-6506.

(Received 15, August 1989)

(Accepted 14, September 1989)

In this report, we present the recent progress in ion beam inertial confinement fusion(ICF). First we review the concept of ICF briefly. Then merits and demerits of ion beam in ICF are discussed. Finally recent researches are introduced.

Key words: inertial confinement fusion, ion beam, research review.

1. 緒言

核融合エネルギーは次世代の長期的エネルギー源として考えられ、その実現に向けて研究が活発に行なわれてきている。資源のない日本のような国でも、海水から核融合燃料を抽出し利用すれば、立派な資源国になれる。本解説では、イオンビームを用いた慣性核融合にスポットをあて、最近の研究の動向について紹介してゆきたい。筆者は特に軽イオン（プロトンやリチウム）ビームを用いて核融合を行なおうとする方式に興味をもち研究を続けてきているため、軽イオンビーム慣性核融合の研究を中心に解説したい¹⁾。

まず、慣性核融合の概念²⁻⁴⁾を簡単に紹介し、次に核融合を実現することに対してイオンビームの持っている利点及び欠点を述べる。その後最近の研究の動向について触れたい。

2. 慣性核融合

まず地上で行なおうとしている核融合反応は反応断面積の大きいDT反応、

である。

慣性核融合は原理的に核融合燃料を閉じ込めない方法である。すなわち、高温に加熱された燃料プラズマが膨張し飛び散るまでの時間に、言い換えれば慣性の効いている時間に、核融合反応を終らせてしまう方法である。

ここで半径 r のDT燃料球を考える。この球の外側から音速 C_s で希薄波が中心に到達する時間 $t = r / C_s$ が反応時間となる。ここでローソン条件 $n t > 10^{20} \text{ sec/m}^3$ は、 $n r > 10^{20} C_s$ と書き換えられる。さらに、この燃料球を温度 T にまで加熱するために必要な入力エネルギー E_i は $2 \cdot (3 n T / 2) \cdot 4 \pi r^3 / 3$ となり、ローソン条件を用いて

$E_i > 4 \pi T (10^{20} C_s)^3 / n^2$ なる関係式がえられる。したがって入力エネルギーは燃料密度 n が大きければ大きいほど少なくて済む。水素の液体密度

$n_s = 5 \times 10^{28} / \text{m}^3$ 程度では E_i は 1 GJ ほどになり、入力エネルギーとしては桁違に大きくなってしまふ。そこで密度を $1000 \times n_s$ にするとすれば、 E_i は 1 kJ となり現実的になる。また密度 n を大きくすれば核融合反応率も大きくなり、好都合である。このことのために燃料密度を大きくすることが慣性核融合にとって重要になる。そして n を大きくするために燃料を爆縮することになる。爆縮の原理はロケットの推進の原理と同じである。質量 $m + M$ の固まりを考えて、質量 m の物質が v で吹き出せば、残りの質量 M は $m v = M V$ の運動量の保存によって与えられる V の速さで動く。今球状のDT燃料を考え、その外側を加熱して球状に均一に吹き飛ばせば、内側の燃料球は球状のまま圧縮される。

燃料球の外側を吹き飛ばそうと外側だけを加熱するために、レーザーやイオンビーム・電子ビームを燃料球に照射する。レーザーを照射した場合をまず考えてみよう。DT表面はレーザーの電場によって電離された薄いプラズマによって覆われる。レーザーはこのプラズマを通過しカットオフ密度まで進入し、一部は反射されるがほぼ吸収される。こうして表面が加熱され外に吹き出しDT燃料は内側に向かって爆縮される。

3. イオンビームの利点・欠点

ここで、爆縮の効率について考えてみよう。入力エネルギーのうち運動エネルギーに変換されるエネルギーを $E_k = M V^2 / 2 + m v^2 / 2$ と表わす。このうち圧縮される燃料の持つエネルギーの割合は、

$$(M V^2 / 2) / E_k = m / (m + M) \quad (1)$$

となり、外側に吹き飛ばす質量 m が大きければ大きい程爆縮効率が良くなる。⁵⁾

イオンビームの利点の一つは、この爆縮効率が高くとれる可能性があることである。なぜなら、イオンビームはレーザーにくらべて、燃料球の内側まで（とはいっても、物質やビーム粒子エネルギーによって違う

が、数百ミクロン程度)、すなわち液体密度の領域まで入り込みエネルギーを与え、 m を大きくとれるからである。さらに、イオンビームはそのエネルギーを標的物質とのクーロン衝突によって落すため、イオンの速さがおそくなると、つまりイオンが止まりそうになると、大きなエネルギーピーク(ブラッグピーク)を作ってそのエネルギーを標的に与える。したがって、DT燃料標的の外側に重い物質をコーティングしておく(Fig. 1)、 m を大きくでき、爆縮効率を高くすることができる。

Fig.1 LIB-ICF simple pellet structure.

Fig.2. Stopping power. Proton beam (10MeV) impinges on a fuel pellet shown in Fig.1. The pellet temperature is 100eV and the number density is the solid one. A sign of θ_m shows the maximal incident angle measured from the normal direction on the pellet surface.

Figure2には、Fig.1の標的に10MeVの陽子ビームを照射した場合の stopping・パワーを示した。ビームは左側から入射している。

第2の利点は、イオンビーム自身の発生効率 η_a が高く、数十%はとれることである。この発生効率は、直接に核融合炉のシステム効率 η にひびいてくる。さらには核融合燃料の圧縮の割合への要求の厳しさに関連してくる。

$$\eta_s \sim \eta_{th} - 1 / [\eta_a (Q + 1)] \quad (2)$$

ここで熱効率を η_{th} 、核融合反応エネルギー利得を $Q (= E_f / E_i)$ とした。 E_f は核融合出力エネルギーである。システム効率 η_s を高くとりたいから、 η_a と Q を大きくしなければならない。例えば、熱効率 η_{th} を0.4とし、ビームの発生効率 η_a を0.2と見積もると、エネルギー利得 Q は50~100程度で済む。しかし η_a が1%程度であれば、 Q は1000程度は必要になる。 Q が10倍大きくなるということは、ビーム入力エネルギー E_i を固定したとき、核融合出力エネルギーを10倍大きくしなければならないということであり、燃料をより圧縮し反応率を上げなければならないということを意味している。イオンビーム慣性核融合の場合 $Q = 50 \sim 100$ 程度でDTの密度を液体の1000倍に圧縮することを目指しているが、レーザー核融合の場合は $Q = 1000$ で圧縮率は10000を目指している。

第3の利点は、イオンビームの標的に与えるエネルギーの空間的分布あるいはストップ・パワーがよく分かっており、燃料標的の設計が比較的容易であることである。不安定性や非線形現象によってストップ・パワーが予測しにくいということがない (Fig. 2参照)。

第4の利点は、イオンビーム、特に軽イオンビームの場合、炉建設費用が他の核融合炉建設費用にくらべて安く済むことである。これは、将来炉心の研究が一段落したあとで、実際には非常に重要になってくるファクターである。

さらにMJoule程度のエネルギーであれば容易に発生できることも一つの利点と考えられる。

次に欠点を述べる。第1に、軽イオンビームについて言えば、レーザーと違い、粒子エネルギー及び速度方向にばらつきが多く、収束が容易ではないことである。それでも現在(1989年4月)では、米国サンディア国立研究所の軽イオンビーム加速装置PBFA IIによって、6mmの直径の標的上に 5.4 TW/cm^2 のパワー密度が達成された。目標値は $10 \sim 100 \text{ TW/cm}^2$ を達成することであるが、サンディア国立研究所は1990年にこれを達成しようとしている。

第二の欠点は、ビームの輸送が容易ではないことである。実際の核融合炉の中では、ビームは、炉壁近傍で発生され、5~10m程度は輸送され、炉中心の燃料標的に照射される、と考えられる (Fig. 3)。そのため、直径5~10mmのビームを広げず輸送するか、輸送中に5~10mmまでに収束させなければならない。本来イオンビームは電荷を持っているので、ほうっておけば拡がってしまう。特に重イオンと違って、軽イオンは粒子の質量が小さい分だけ、収束に関しては不利である。現在では、Fig. 3の様に、ビームを発生する以前にz放電により作り、方位角方向の磁場によりビームを閉じ込めながら輸送しようとするプラズマチャンネルを用いる方法(6~8)と、コンパクトトラスのように、Fig. 4のイオンビーム自身の持つ電流を積極的に用いようとする方法(4)が考えられている。

Fig.3 Beam transportation by a plasma channel.

Fig.4 Beam convergence and transportation by the LIB current itself.

第三の欠点は、ビームエネルギーと標的への入射角のばらつきから来る、燃料標的の圧縮効率の低下である。Fig. 3あるいはFig. 4からも想像できるように、標的に入射するビームはばらばらの入射角度を持っている。入射角が余りにも大きい場合、イオンビームの持つ利点として上であげた爆縮効率の高さが損なわれる。これはFig. 2に示したストップパワーのグラフからも理解できる。最大入射角度が図中には示されているが、イオンの入射角の分布はゼロから最大入射角まで均一とした。入射角が大きすぎると、付与されたエネルギーのピークが標的の外側にずれ、押される物質が多くなり、式(1)でMが大きくなってしまふ。これと同様なことが、粒子のエネルギー分布にばらつきがあっても生じる。軽イオンビームはFig. 3や4に示されているように、向かい合った電極に電圧を印加し、陽極にプラズマを作って、そのプラズマからイオンを引き出す。イオンビームを発生させる機構は簡単であり、一つの利点となっているが、逆に簡単なせいで、引き出されるイオンの持つエネルギーのばらつきを抑えることが容易でない。印加される電圧が時間的に変化するうえに、イオン源となるプラズマが陽極に不均一にできる可能性もある。しかしこの二つの欠点は、上に述べたサンディア国立研究所で、原因が究明され、解決されつつある。また後述するように、エネルギーや角度のばらつきについても、燃料標的の設計のほうで、解決しようと、研究されている。

4. イオンビーム慣性核融合の最近の研究の動向

特に実験について言えば、数年前までは、イオンビームを発生させることに集中した研究が盛んに行なわれた。様々なイオンビーム発生装置が開発されその特性が調べられた。現在では特性の安定した磁気絶縁型ダイオード(MID)(Fig. 5参照)による研究が中心となり、成果があげられている。

Fig.5 Magnetically insulated diode

上記したように、米国サンディア国立研究所ではPBFALLによって既に 5.4 TW/cm^2 のパワー密度が達成され、1990年にはグレードアップして $10 \sim 100 \text{ TW/cm}^2$ 目指そうとしている。そこで用いられているビーム発生装置もMIDである。

ビーム発生装置における問題点がないというわけではない。燃料標的の構造によっては、ビームパルスの長さを短くしたい場合も出てくる。その場合にたいしては印加電圧を時間的に上昇させて、ビーム輸送中にパルス圧縮を行なうことが提案されている。このときかにして印加電圧を時間的に上昇させるかが一つの課題である。

現在サンディア研究所では、ビームを輸送させずに標的のすぐ近くにダイオードを起き、ビームを発生させている。ビーム輸送に関しては理論的にはかなり調べられつつあるが(6-10)、実験的にはこれからであり、今後に期待したい。プラズマチャンネルを用いる場合では、炉のなかにいかにして何本ものチャンネルを同時に形成するかが一つの問題である。

もう一つの現在の話題は、肝心の燃料標的の構造にある。レーザー核融合の場合では、大阪大学レーザー核融合センターで、DT液体燃料密度の600倍の密度が実験的に既に実現された。この成果はアイデアと綿密な設計とによるたまものである。イオンビーム用燃料標的の振る舞いもレーザー用標的のそれと共通する点が多いが、標的へのビームエネルギーの付与の仕方が、上記したように、違うため、イオンビーム用の標的設計が必要である。

特に軽イオンビームの場合では、ビーム粒子エネルギーや入射角にばらつきがあるため、標的表面で数十%程度の不均一性があると予想される。それが引き金となり、レーラー・テラー不安定性が成長し、高い圧縮率を得られない可能性がある。実際に空間三次元のコンピュータシミュレーションによっても、圧縮の不均一性は数%以下に抑えないと、標的を1000倍には圧縮できないことも分かっている(11)。そのため、いかにして数十%の不均一を、数%にまでならすかが焦点となる。

そのためには、ビームエネルギーをX線に変換し、X線の輸送によって、均一化することが考えられている。Figure 6には、Fig. 1の標的に対して、二次元コ

ンピューターシミュレーションによる結果を示した。X線輸送によって初期の6%の不均一性が0.9%にまでならされていることが分かる。図中において、点線はX線輸送を半径r方向のみ導入し、実線は半径・方位角両方向に導入した結果である。この結果のように、不均一性の均一化にとってX線輸送は非常に重要で、今後の研究が待たれるところである。

特にX線輸送に関して、標的物質の電子状態の正確な情報が標的構造に直接関連し、重要となり、理論・実験両面の研究が大切である(12)。

5. 結言

以上、軽イオンビーム慣性核融合を中心に、現在までの成果と研究の動向について、簡単に見てきた。詳しい内容については参考文献を参照していただきたい。

核融合研究はまだ基礎研究の段階にあり、どのようにしたら核融合が地上で合意の得られる枠内で、実現できるかについては、基本的なところから考えて研究してゆかねばならないと、考えられる。革新的なアイデアが要求される。

Fig. 6 Peak temperature profiles in Al layer(see Fig. 1) at time= 40nsec as a function of θ . A solid line shows a result with the radiation transportation in both the r and θ directions. A dashed line shows a result without the radiation transportation in the θ direction but with it in the r direction. The radiation transportation smoothed the initial nonuniformity of 6% to 0.9%.

References

- 1) S. Kawata, 「研究の進む粒子ビーム核融合発電 (Particle-Beam Fusion)」, 日経サイエンス(Nikkei Science), (1987)44.
- 2) T. Yabe, S. Kawata and M. Fukuda, 「シミュレーション物理入門(Introduction to Computer Simulation)」, 朝倉書店(Asakura Shoten), (1989)105.
- 3) K. Niu and K. Sugiura, 「核融合(Nuclear Fusion)」, 共立出版(Kyoritu Shuppan), (1979).
- 4) K. Niu and S. Kawata, Fusion Technology, 11 (1987)365.
- 5) M. Tamba, N. Nagata, S. Kawata and K. Niu, Laser and Particle Beams, 1(1983)121.
- 6) S. Kawata, K. Niu and H. Murakami, Jpn. J. Appl. Phys., 22(1983)302.
- 7) H. Murakami, S. Kawata and K. Niu, Jpn. J. Appl. Phys., 22(1983)305.
- 8) S. Kawata and K. Niu, Laser and Particle Beams, 1(1983)219.
- 9) H. Murakami, T. Aoki, S. Kawata and K. Niu, Laser and Particle Beams, 2(1984)1.
- 10) M. Matsumoto, S. Kawata, Laser and Particle Beams 6(1988)555.
- 11) S. Kawata and K. Niu, J. Phys. Soc. Jpn., 53(1984)3416.
- 12) Y. Hurutani, 「レーザー爆縮プラズマの原子過程(Atomic Processes in Laser Plasma)」, 昭和62年度科学研究費・核融合特別研究(1)・研究成果報告書 (Research Report of the Ministry of Education Science and Culture in Japan), (1988).