

■ 展 望 ■

核融合研究の現状と展望

(第2部) 慣性核融合

Review of the Fusion Research

(II) Inertial Fusion



宇尾 光 治*

Koji Uo

6. 慣性核融合

慣性核融合は、水素爆弾と同じ原理で、レーザー光、あるいは、イオン・ビームを燃料のペレットに四方からあてて、表面を蒸発させ(図-17、図-18参照)その反作用で燃料の中心部を圧縮高温にし、(爆縮という)燃料が飛び出る前にきわめて短時間で核融合反応を終了してしまおうというものである。磁場を用いず、物質に力を加えても、すぐには動き出さないという、慣性を利用した方式であるから、慣性核融合とよばれる。

この方式は1970年代に入り、レーザー核融合と呼ばれる高出力のレーザーをプラズマを圧縮するためのドライバーとして使用する方法の研究を中心に進められた。

その後、ドライバーとして、相対論的電子ビーム、軽イオンビーム、重イオンビーム等も可能性があることがわかり、研究分野が拡大してきた。レーザーの場合には、プラズマを圧縮する物理的機構の理論的解明は、ある程度進んできたが、最大の問題は、電気エネルギーをレーザー光のエネルギーに変換する効率が、実際に燃料ペレットを圧縮するに有効な波長範囲において、きわめて低いことである。(Ndガラスレーザーで効率は0.01%~0.04%)。炭酸ガスレーザーは効率は10%と高いが波長が長く(10μm)、ペレットを圧縮するのに有効でないから、目下の圧縮実験はすべてNdガラスレーザー(波長~1μm)を使って行われている。

この点を克服するために、新しい型のレーザーの開発を進めると同時に、レーザーの代りに、イオンビーム等を用いる方向に進んでいる。磁場閉じ込め方式のEnergy break-evenに相当する領域に到達できるドライバー

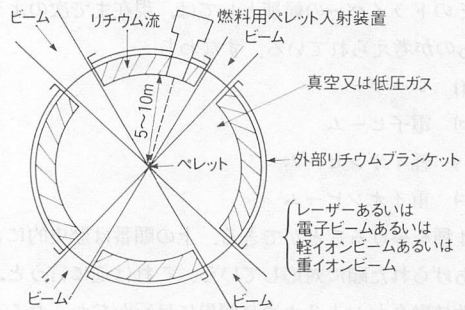


図-17 慣性核融合炉の概念図

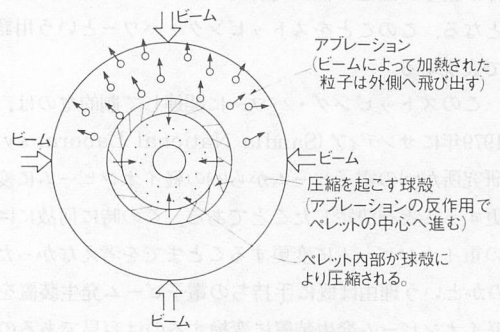


図-18 ペレットにおける圧縮の原理図

としては、イオンビームがやや有望視されている。慣性核融合方式は、本質的にパルス運転になるので、短時間に数多くのパルスを生じさせて、炉工学的には、連続に近くできるように工夫する必要がある。これは、レーザーあるいは、イオンビーム双方にとって、大きな技術的課題である。

慣性核融合については、その詳細については磁気核融合をやっている人々、およびその他の人々の多くは、十分に理解していないこともあると思われるので、以

* 京都大学ヘリオトロン核融合研究センター
センター長・教授

〒611 京都府宇治市五ヶ庄

下に慣性核融合の方法と条件, 各種ドライバーの現状と問題点, およびこの方式の展望について, 少しくわしく説明しよう。

6.1 慣性核融合の方法と条件

慣性核融合を引き起こすエネルギー源の事を「ドライバー」と言うが, このドライバーを用いて数ミリメートル程度の大きさの重水素ペレット(微小球)(あるいはこれに金属シェル等を付加する等の構造を持たせる)に照射し, ペレット表面を局部的に加熱して粒子を外向きに飛び出させ(アブレーション), この反動でペレットを圧縮し高温にして核融合の点火条件を達成しようと言うものである。

そのドライバーの候補としては, 現在まで次のようなものが考えられている。すなわち

- (イ) レーザー
- (ロ) 電子ビーム
- (ハ) 軽イオンビーム
- (ニ) 重イオンビーム

の4種を挙げることができる。上の順番は歴史的にとりあげられた順に対応している。これは逆に言うと, 慣性核融合がシナリオ通り簡単には行かなかったことを反映するものでもある。この順は, 物理的にはエネルギーの局所的な注入の難易度でもある。ビームの担体が重ければ重い程, 局所的なエネルギー注入が容易となる。このことをストップング・パワーという用語で表現する。

このストップング・パワーに関連して劇的なのは, 1979年にサンディア(Sandia National Laboratory)研究所が(ロ)の電子ビームから(ハ)の軽イオンビームに変更することを決定したことである。この時に何故に(ニ)の重イオンビームに変更することまでを考えなかったのかという理由は既に手持ちの電子ビーム発生装置を軽イオンビーム発生装置に変換するのは容易であるのに対して, 重イオンビーム発生装置となると全く新しい装置を作らねばならなかったからである。

そのストップング・パワーが小さいとペレットの内部が爆縮される前に高速電子により加熱されて(電子ビームの時にこれが起こる。レーザーについてもこの可能性は大きい)内部の圧力が高まり, もはや充分な圧縮を行うことが不可能になってしまうのである。図-19参照。

さて, ドライバーを使って慣性核融合を起こす為の条件(勿論, 実用化の為の)は,

- (a) カップリング効率が3%~4%以上であること。

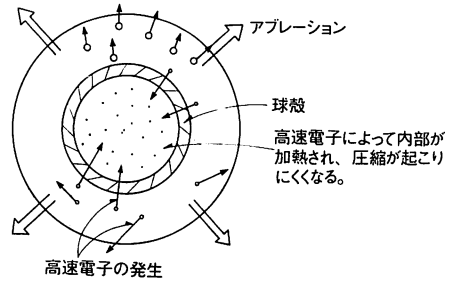


図-19 圧縮における高速電子の影響

カップリング効率とは吸収効率 η_a (レーザーの出力エネルギーがペレットに吸収される割合)と流体力学的変換効率 η_h (吸収エネルギーの内アブレーションの結果反作用としての運動エネルギーへの変換割合)と爆縮変換効率 η_i (内向する運動エネルギーが燃料の圧縮と加熱の為のエネルギーに変換される割合)の積で $\eta_a \times \eta_h \times \eta_i$ で定義される。

ただし, この値3%~4%はペレットゲインQ(熱核反応で生じた出力エネルギーをペレットに照射したレーザーのエネルギーで割ったもの)を100~200と仮定した場合の値である。このとき, ドライバー効率 η_d とペレットゲインQとの積が10より大きい事が必要であるのでドライバー効率 $\eta_d \geq 5\% \sim 10\%$ が必要であることを意味する。

- (b) ablationの反作用としての圧縮圧力は5百万気圧以上であること。
 - (c) ペレットを圧縮するに要するエネルギーがフェルミエネルギー(温度0の状態のエネルギー)の数倍以下でなければならない。(固体密度の千倍の密度に圧縮する場合のフェルミエネルギーは1グラム当たり約10メガジュール)これが, ペレット内の高速電子による予備加熱の許容度の目安となる。
 - (d) 爆縮の際, 核融合の点火条件が存在していること。
 - (e) 爆縮の際のペレット形状の一様性の精度は2~3%以内であること。
- 等, 甚だ厳しいものとなっている。

(S. E. Bodner: Journal of Fusion Energy I (1981) 221, B. H. Rinpin, Naval Research Lab. IAEA, 1982)

ペレットによるエネルギーのゲインは, 入力100倍以上を要求されている。エネルギー効率から言ってもこれは当然の事である。慣性核融合が実用化するには(a)~(e)の全ての条件が満足されなければならないのは勿論のこと, これに繰り返し動作が1秒間に1~10回

程度が必要である。

これらの条件を踏まえて、(イ)~(ロ)のドライバーの現状と問題点を以下で見て行く事にする。

6.2 レーザー核融合の現状と問題点

このドライバーが歴史的には最も古くから始められた。それだけに研究も最も進んでいる。レーザーにおける大きなテーマはアブレーション（ペレット表面が加熱されて粒子が飛び出すことを言う）効率の波長依存性である。これは最近多くの実験が行われ、波長が短かい程有利であることは明確になって来た。（例えば、W. Seka, Rochester, IAEA B2-2, 1982 ; Y. Ohwadano, 電総研 IAEA B2-1, 1982 ; C. Yamanaka, 大阪大 IAEA F-1, 1982等）ところが、これらの実験の基礎になっているのは波長1.06ミクロンのネオジウム・ガラス（Nd-glass）レーザーである。非線型素子を用いて高調波を生成して、短波長レーザーとするのである。

このネオジウム・ガラスレーザーの効率は1%よりずっと悪く、この点で既に前節の条件(a)を満たすことができず、Nd-glassレーザーを使って商業炉を作ることとは不可能である。従って、例えば、大阪大の激光シリーズ（II : 0.4 TW, IV : 4 TW, MII : 7 TW（いずれも動作中）、XII（1983年完成予定）、1TWはTera Wattで10億キロワットの事）は純粋に爆縮物理を研究する為のものであり、直接、炉に結びつくものではあり得ない。それは又、1サイクル以上の繰り返しをすれば、レーザー媒質内で自己収束が起こり、固体レーザー媒質の損傷を生ずる事からも明らかである。

炭酸ガスレーザーは実際に10%程度の効率のものが作られており、条件(a)の点で有利としばしば言われている。しかし、第一に上に述べたようにアブレーションの波長依存性がはっきりした現在、炭酸ガスレーザーの様に10.6ミクロンと長波長のものは、ほとんど可能性はなくなった。

第二に、10%程の効率（あるいは30%程度まで）というのは事実であるが、それは炭酸ガスレーザーのパルス巾が長い時（百万分の1秒程度）であって、実際に核融合に用いられるのは1 ns（nsはナノ・セカンドで10億分の1秒の事）程度までであるから、このような条件のもとでは効率はずっと落ち条件(a)を満たすことはほとんど不可能である。

西独では波長1.3ミクロンのヨウ素ガスレーザー（S. Witkowski, MPI）が開発されていて、波長の点でNd-glassレーザーの長所と繰り返しに耐える点で炭酸ガス

レーザーの長所を合わせ持っている。しかし、ASTER I X-IIIと名付けられた。この装置で150ジュールの出力しか得られておらず、高出力の実績が無い。必要とされる1,000キロ・ジュール程度のエネルギーにはほど遠い。波長の点でも、まだ長過ぎる。

波長や効率など全てにわたって有利なレーザーは現存していないと言える。この点で、新レーザーの開発が各国で行われている。キセノン（Xe）の二原子分子によるレーザーは波長が短かく（ ~ 0.2 ミクロン）望ましいものであるが、効率は今の所良くない。この新レーザーの開発に関しては現在有望なものは見つかっていない。

6.3 ビーム核融合の現状と問題点

(1) 電子ビーム

ソ連のKurchatov研究所ではAngara装置で研究が続けられているし（Angara-5は1983年完成予定、800キロ・ジュール、パルス巾90 ns）日本では、大阪大で進められたが、前節で述べた様に米国では既に1979年に電子ビームは断念された。この種の研究は大きかりなため研究の「慣性」が大きいただけに、高速電子によりペレット内を予備加熱して（J. Launspach Nucl. Fusion 21 (1981) 105）爆縮効率を著しく低下させるといふ障害があっても、一部では続行されているが、世界的な流れは、電子ビームはドライバーとして不適当としている。

(2) 軽イオンビーム

軽イオンビームの研究はまだ歴史が浅い。しかし、レーザー核融合が実用化は難かしいとあって急に脚光を浴びるようになった。重イオンビームの方がストップング・パワーの点でより有利なのだが、装置が重イオンビームの場合よりはるかに簡単で、原理的には電子ビーム発生装置の極性を変えれば良く、改造が楽な事から、軽イオンビームが急激に各国で研究されるようになった。

米国のSandia研究所では、Proto I (1TW), Proto II (10TW), PBFA I (30TW) を用いて研究され、PBFA II の設計が1984に始まり、1986年に完成されることになっている。これにはNRL研究所も協力する。Cornell大でも1平方センチメートル当り、500 A程度のイオンビームを得ている。大阪大の励電IVでは100キロ・ジュール、1TWのイオンビームを得ている。

軽イオンビームは、非常に高密度の電流の為にビームが不安定になりやすいのが問題である。これを解決する為に、例えばレーザー等で予備電離されたプラズマ

・チャンネルを通すことが考えられ、背景の電子でイオンビームを中和化する事が期待されている。実際に実験も行われ (K. Imasaki, 大阪大, IAEA N-4, 1982) 1メートルで70%程度の輸送効率が得られている。しかし、このプラズマ・チャンネルは当然ペレットに接触することになりペレットに悪影響を及ぼすことが予想される。このビームの強電流は、不安定性も含め、ペレット表面へ集束する時に問題となるだろう。

(3) 重イオンビーム

重イオンビームはストップング・パワーの点で(1)~(2)の内でも最も有利である。それは本質的にはビームの担体の質量が大きい為と同じエネルギーに対し速さが小さくて済み飛程が他の場合に比べ小さいからである。(飛程とは荷電粒子が物質中を進む時に、その粒子が停止するまでに進行する距離のこと)そして、ペレットとの相互作用はほとんど古典物理的な範囲であり、又、効率が良いことも予測されており、米国や西独等で検討が進められている。

但し、問題になるのは、本格的な一種の加速器を必要とし莫大な費用(千億円のオーダー)が見込まれることである。加速器と言っても簡単なものを作って予備実験というわけにいかず、始めからかなり本格的なものを必要とするので具体的な実験となると慎重にならざるを得ない。1982年のIAEA国際会議では重イオンビームに関する発表が見られなかったのは、その予算的な問題の為に軍事研究(後述)の為に極秘事項になったのかいづれかであろう。

6.4 ペレットの問題

ドライバーに関する種々の問題を挙げたが、もう一つの大きな問題点はペレットに関するものである。第6.1節の(c)や(e)で述べたことと関連して、まずペレットはきわめて高度の等質性や真球度をもつものでなければならない上に、このような精度をもつペレットを大量生産できるのかという問題がある。

次に現実の大型炉の中心に例えば5~10mの距離から半径数ミリメートルのペレット球を射出するわけであるが、このような長い距離から射出されたペレットを、0.1ミリメートル程度以内精度で正しい位置に入射する事が実際にできるのか、という問題がある。ペレットの構造にしても最近は何層にも構造をもったものになっており、複雑になってきて生成方法もより困難となってきている。構造に関しても結論は未だ出ていない。

6.5 慢性核融合の展望

(1) 爆縮物理

ペレットが実際に固体の密度の1,000倍程度まで圧縮され得るのか(少なくとも前述のようなアプレーションのメカニズムを使って)は全くわかっていないし、それを示唆する実験も存在していない。圧縮過程でレイリー・テラー不安定(N. M. Ceglio Phys. Rev Lett 44 (1980) 579)が起き、ブッシャー・シェル(爆縮を起こさせるための球殻)が早期に壊れてしまう可能性がある。又、高密度圧縮状態における状態方程式も解っていない。

(2) 炉としての可能性

レーザーの場合は第6.2節で述べたように既に可能性は低いが、炉の構造を考えるともっと非観的となる。既ちレンズあるいは鏡は必然的に炉の中心を見込む位置に来る為、放射線・燃焼生成物・燃焼残留粒子によって損傷を受けることは避けられない。

ビームの集光径とレーザー・ビームの拡がり角はあまり小さくできないので、レンズとペレットまでの距離は制限され(例えば集光径1ミリメートル、ビームの拡がり角が2百分の1度で1mしか離せない)、鏡等を余り遠ざけることはできない。この程度の大きさの炉に緩衝剤としてのガスをつめても、衝撃波による炉壁およびレンズや鏡等の損傷、組立位置のずれを引き起こす。その上緩衝ガスを突抜けてくる粒子や放射線を十分に抑え切ることにはできない。

レーザー以外のドライバーの場合は、前に述べたようにペレットの位置制御とペレット球の高精度の生成が問題である。本質的にパルス炉であるから、壁がこの大きな負荷に耐えられるかという問題もある。これは種々の検討がなされてはいる。

最後に、1982年に米国 Baltimoreで開かれた IAEA 国際会議における2つの発表は、慣性核融合の研究における流れに大きな示唆を与えるように思われるのでここに紹介しておこう。両者共、米国における慣性核融合の指導的な研究所における研究者であるので特に興味深い。

ロス・アラモス国立研究所(LAL)のS. D. Rockwood (F-6)は「慣性核融合(ICF)の二つの長期的目標の内の第一はビーム兵器研密であり(studying weapon physics), 第二として核融合エネルギー源を供給すること(provide controllable source of fusion energy)である。」としている。

又、ローレンス・リバモア国立研究所(LLNL)の

J. F. Holzrichter (F-3)は「レーザー核融合の目標は高度な計測により爆縮過程を研究すること(produce significant well-diagnosed fusion implasions)であり、当面は(in the near term)軍事的応用を開発する事であり(exploit this capability for military applications), 長期的には(in the longer term), エネルギー源開発である(for civilian power application).」としている。そして「エネルギー源開発としては価値はあるが、大きな技術的及び経済的危険を伴う(entails considerable technical and economic risk).」と言い切っている。

両者共、炉(reactor)という言葉は全く使わず、非軍事的な利用も目標の一つであることを忘れずにつけ加えてはいるが、炉の実現という立場からは明らかにトーンダウンとなっており、軍事目的がはっきり第一番目に挙げられているのが非常に印象的である。今まで噂では当然の事とされていたが、学術的な国際会議用にはっきりと文字で書かれたのは初めてのことであろう。

Holzrichterの研究所(LLI)ではNova という大型装置が1984年に完成する事になっており、8ビームの内の2ビーム(Novette)が1982年11月に運転され

ることになっているのであるから、なおさら技術的・経済的リスクが大きい事を現在の段階で云々するのは重大なことである。これはRockwoodの方(LAL)でも同じで、炭酸ガスレーザーによるHelios実験が進められ、1983年にはAntares(40キロ・ジュール)が運転されることになっている。

レーザーを炉のドライバーとした融合炉は両者共にほとんど断念しており、レーザーを使うときはあくまでペレットの大きさや形状、点火条件等の研究に使うとしている。

又、Rockwoodは、今日における最も重大な問題は、爆縮によるペレットの圧縮実験の結果が、理論的に予測された程度を大きく下まわっている事だとしている。ここに述べてきた事により、現在の世界の大勢として慣性核融合の第一目的はビーム兵器の研究にあり経済的に成り立つ核融合炉としては、現在のところ目途が全く立っていないのである。レーザー核融合の研究も巨額の費用を要する大がかりな研究であるので目途のつかない事にいつまでもかかわるべきでなくその研究の方針も適当な時期に十分な検討を経たのち、転換される必要があると思われる。

