レーザ核融合の概念

杉 浦 賢

(昭和49年12月30日受理)

Laser Fusion

Masaru SUGIURA

(Electrotechnical Laboratory, 5-4-1 Mukodai-machi, Tanashi, Tokyo)

(Received December 30, 1974)

1. ま え が き

現在までの核融合研究の主流は、超高温（約2億度）のプラズマを磁界により、一定時間真空中に閉じ込めようとする方式であり、研究の主題は、「如何にしてプラズマを安定に磁界中に閉じ込めるか」という点にあった。ここに述べるレーザ核融合は、プラズマの閉じ込めに磁界を用いない方式であり、物理的、技術的に全く異なった方式である。

1960年に始めてレーザが作られ、間もなくレーザによる核融合の可能性の検討が、計算機シミュレーションなどにより追求され始めた。その後、レーザの出力が増大し、相当規模の実験が可能になり、レーザ核融合の研究は急速に進展した。1968年には、ソ連のレベデフ研究所のパゾフ達がレーザで加熱したプラズマから、核融合反応による中性子放出を始めて観測したことを報告した。

本稿は核融合特集の中の一編であるから、核融合の一般的特長や基本的事項は他編にゆずり、本編の説明に必要な事項のみを表1にまとめて示すに留めた。なお、核融合および核融合炉の基本的問題については、「真空」誌、第17巻、第1号（1974年）1頁以下に、筆者による解説があるので、御参照頂ければ幸いである。

2. 慣性閉じ込めと圧縮

超高温プラズマに外部から注入したエネルギーと核融合反応により発生したエネルギーが釣り合うためには、表1の(4)および(5)式に示したローソンの条件 (Lawson's criteria) を満足させる必要がある。磁界によるプラズマ閉じ込め方式では、比較的うすい密度 (n ; $10^{14} \sim 10^{16}$ 個/cm³) のプラズマを、数 10 m sec $\sim$ 1 sec の間磁界で閉じ込める。これに対し、レーザ核融合では、燃料のD T混合

小球にレーザ光を照射し、瞬間的に超高温に加熱し、プラズマが熱速度で拡散し、消滅してしまう前に充分な核融合反応を起こしてしまおうとするもので、「慣性閉じ込め」と呼ばれている。慣性閉じ込めの場合、閉じ込め時間は、プラズマ小球の半径を原子核の熱速度で除した値に近似的に等しい。D T反応の場合、この時間にプラズマ密度を乗じた値が 10^{14} (sec $\cdot$ cm⁻³) より大きくなる必要がある。

レーザ核融合の場合、数値計算を行なってみると、プ

表1 核融合の基礎関係式

(1) 核融合反応

i) D-D 反応

ii) D-T 反応

D: 重水素, T: 三重水素, He: ヘリウム, n: 中性子, P: 陽子, 右辺の反応生成物の後の括弧内の数字は、反応後その粒子が持つエネルギーを MeV 単位で示したもの

(2) ローソンの条件 (エネルギー・バランス成立の条件)

i) D-D 反応に対して

$$T_p > 2 \times 10^8 K; n\tau > 10^{16} (\text{sec/cm}^3) \quad (4)$$

ii) D-T 反応に対して

$$T_p > 3 \times 10^7 K; n\tau > 10^{14} (\text{sec/cm}^3) \quad (5)$$

T_p : プラズマ温度, n : プラズマ電子密度 (cm⁻³), τ : プラズマ閉じ込め時間 (sec)

(3) T の生産

Li: リンウム

* 電子技術総合研究所 (田無市向台町5-4-1)

図1 核融合に必要なレーザーエネルギー

ラズマ球を圧縮して、固体密度（約 5×10^{22} 個/cm³）の1,000~10,000倍に圧縮する必要がある、圧縮という概念が重要になってくる。数値例を示しながら、この点について説明してみよう。

温度が約1億度の場合、半径1mmの燃料小球（プラズマ）に対する閉じ込め時間(τ)は、約 2×10^{-10} secであり、密度(n)が 5×10^{22} 個/cm³（固体の密度）であっても $n\tau = 10^{13}$ sec·cm⁻³ となり、ローソンの条件を満足しない。この時、プラズマの持つエネルギーは約1MJとなり、これをレーザーのみで加熱すれば、それ以上の出力のレーザーが必要になる。

ここで何らかの方法で、この小球の半径を1/10に圧縮できたとすると、閉じ込め時間は1/10になるが、密度は1,000倍になるため、 $n\tau$ の値は100倍になり、ローソンの条件を満足するようになる。この場合重要なことは、密度が1,000倍になると、核融合の結果発生する高エネルギー（3.5 MeV*）のHe原子の平均自由行程が、約1cmから0.2mm以下に減少するため、小球中で数回衝突し、そのエネルギーを燃料に与えるので、加熱に必要なレーザーエネルギーは、100分の1近くに減少することである。圧縮の効果を図示したのが図1である¹⁾。圧縮比が大きくなると、利得が増大することが判る。さらに圧縮比を増大させていくと利得が減少するのは、圧縮に必要なエネルギーが過大になるためである。利得が1ということは、入力レーザーエネルギーに等しい核融合エネルギーが発生することを意味し、この点をブレーク・イーブン (break even) と呼んでいる。10⁴ 倍の圧縮が達成できれば、1 kJ のエネルギーのレーザーでブレーク・イーブンが得られる。

* 1億度のプラズマの持つエネルギーは、約10 keV。

3. レーザ光の吸収および小球の圧縮

さきに述べたようなレーザー光による燃料小球の加熱あるいは圧縮は実際に可能であるか、また研究の現状はどこまで進んでいるのか、について述べてみよう。

レーザー光を小球表面に照射すると、図2に模式的に示したように、小球表面は急速に加熱され、溶けて蒸発する。その反作用として内側には大きな圧力を生じ、圧縮が始まる。圧縮が進むにつれて小球内部の圧力が上昇するから、照射するレーザー波形もそれに従って注意深く成形する必要がある。この成形が充分正しく行なわれないと、余分なレーザーエネルギーが必要になる。

レーザー光をプラズマが吸収する機構としては、光子が電子に衝突してエネルギーを与える、いわゆる古典的吸収があるが、これはプラズマの温度が高くなると衝突が減少し、効率は著るしく低下する。従って古典的吸収にのみ頼っていると、レーザー核融合は不可能になる。

レーザー光の周波数が、電子プラズマ振動の周波数とイオン音波の周波数の和に近くなり**、しかもレーザー光のパワー密度がある一定値を越えると、プラズマ中に不安定（パラメトリック不安定, parametric instability, と呼ばれている）を引き起こし、この不安定を介してレーザー光は非常に効率良く吸収されるようになる。これを異常吸収 (anomalous absorption) と呼んでいる。異常吸収を生じるレーザー波長と、プラズマ密度の関係は、レーザー波長 1.06 μ m（ガラスレーザーの波長）の時プラズマ密度約 10^{21} 個/cm³、10.6 μ m（CO₂レーザーの波長）の場合に約 10^{19} 個/cm³ となり、レーザー波長が短かい程、高密度領域で吸収される。

プラズマに吸収されたエネルギーが熱エネルギーにな

** 電子プラズマ振動の周波数>イオン音波の周波数であるから、この条件は、電子プラズマ振動の周波数<レーザーの周波数ということになる。

図2 圧縮のモデル

らず、高速な電子を発生すると、高速電子は衝突が少ないため、小球の内部に侵入し、小球を内部から加熱するので圧縮を困難にする。この現象をプリヒート (preheat) と呼んでいる。これは、原子番号の高い物質を、燃料中に混入するか、波長の短いレーザを用いることによって改善することができる。

レーザとプラズマの相互作用については多くの実験が進められている。レーザ光の吸収率は高く、パラメトリック不安定を介した異常吸収が生じていることを示す幾つかの実験的証拠もあり、将来に希望の持てる結果を与えている。しかし、なおその物理的現象には不明の点が多い。また吸収されたエネルギーは、高速のイオンや電子の発生に使われる場合が多く、熱伝導にも異常な結果が認められ、今後、レーザ光の波長、強度、波形あるいはプラズマの密度勾配の依存性を詳細に研究して行く必要がある。

プリヒートを避け、圧縮を効果的に行なうためには、むくの小球よりも中空の小球を用いる方がよい。最近発表されたところによると、図3に示すような種々の構成の小球について、圧縮の計算機シミュレーションが行なわれ、最適設計の研究が進んでいる²⁾。同図(c)に示すような構成の小球では、最外部の低Z材料*は内部への熱伝導の対称性を改善し、次の高Z材料は高速電子によるプリヒートを防いでいる。同図(d)では氷の燃料またはLi DTを用いることによって中空の小球を作っているが、レーザ波形への依存性が低く、所要レーザエネルギーも少なくなる等、(c)よりもさらにすぐれた特性が期待できる。

中空の小球を圧縮する場合、アスペクト比 (aspect ratio, 肉厚と半径の比) を大きくすると、入力エネルギーが長い圧縮期間に亘って運動エネルギーとして蓄わえられるため、レーザの波形依存性が低く、幅の広いレーザを使用できるが、一様な圧縮が困難になる。シミ

ュレーションによると、アスペクト比が5を越えると不安定 (レーレー・テイラー不安定, Rayleigh-Taylor instability) を生じるという結果が報告されているが、この問題に関する実験的解明が待たれている。

現在のところ、対称性を保ちながら圧縮に成功したと

図3 燃料小球の構造

(OAの断面を示す)

縦軸: q (密度, g/cm^3) 横軸: r (半径)

表2 圧縮の実験

研究機関	KMS Fusion 社 (アメリカ)	レベデフ研究所 (ソ連)	ロス・アラモス研究所 (アメリカ)
レーザエネルギー (J)	50 (~200)	300	30~40
レーザパルス巾 (nsec)	0.3 (0.03~1)	0.5~1	0.05
レーザビーム数 (本)	2	8	1
標 的	D-T ガス封入ガラス球	CD ₂ 固体	D-T ガス封入ガラス球
体 積 圧 縮 比	100~200	~30	50~100
中 性 子 発 生 数	$10^5 \sim 10^7$ (D-T)	$10^6 \sim 10^7$ (D-T) $10^3 \sim 10^4$ (D-D)	観測せず

いう実験がいくつかあるので、その結果を表2に示した。圧縮の可能性を実験的に示したという点で、その意義は大きい。

今後の実験は第2段階に入り、現象の詳細な解明が必要になる。そのためには、計測技術の開発が鍵をにぎるものと思われる。レーザ核融合研究の計測の対象は、高エネルギー密度、微小体積、短時間など困難な条件が重なっているので、従来のプラズマ計測よりはるかに困難である。

4. レーザ核融合炉

以上述べて来た考え方に従って運転されるレーザ核融合炉の概念設計が進められている。その1例を図4に示

した³⁾。燃料のDT小球は上部から落下され、それに対して数本のレーザによって周囲から照射される。反応生成物の中性子あるいはX線等を遮蔽するために、小球およびレーザ光の通路はジグザグになっている。ブランケット (blanket) の主成分はリシウムで、その主要な役割は、核融合反応の結果発生した14 MeVの高速中性子を減速・熱化すること、および天然には存在していない燃料のT (トリチウム、三重水素) を、表1の(6)および(7)式の反応により炉内で生産することである。熱除去装置のパイプ中には熱伝達媒体を流がし、ブランケット内で発生する熱を外部へ導き、発電等に利用する。ブランケットの主材料のリシウムは、高温で液体であり、熱伝達媒体として良好な性質を持っているので、リシウムを直

図4 レーザ核融合炉概念図

接熱伝達媒体として循環させることも可能である。

レーザー核融合炉を用いた発電所の電気出力を $P(W)$ 、レーザーエネルギーを $L(J)$ 、毎秒の反応回数を N (回/sec)、レーザーエネルギーに対する核融合エネルギーの割合を G_L (図1の縦軸に目盛ってある量に対応)、熱電気変換効率を η_t 、レーザー効率を η_L とすると、

$$P = N(LG_L\eta_t - L/\eta_L) = NL(G_L\eta_t - \eta_L^{-1}) \quad (8)$$

の関係が成立する、 $\eta_t = 0.4$, $\eta_L = 0.1$ とし、純電気出力が得られるように、 $G_L\eta_t \geq 2\eta_L^{-1}$ とするためには G_L は50以上が必要となる。これは図1より $L \geq 10^4 J$ で可能である。1 GWの電気出力の発電所を作るためには、 $L = 1 MJ$, $N = 100$ 回/secが目安になる。

レーザー核融合炉を磁界でプラズマを閉じ込める形式の炉と比較すると、次のような特長がある。

- (i) 磁界を用いないため構造が簡単で、建設費が安い。
- (ii) 磁界方式では炉はトーラス形になるが、レーザー方式では球形となるので、これも構造を簡単にする。
- (iii) 磁界方式で深刻な問題になっているプラズマ中への不純物の混入の問題は、レーザー方式では著しく緩和され、炉壁の真空技術に対する要求がゆるやかになる。
- (iv) 磁界方式では経済的な炉の電気出力は1 GW以上になるものと予想されるが、レーザー核融合炉は小出力の炉を経済的に設計できよう。

これらに対して、問題点としては、

- (i) レーザプラズマ相互作用、圧縮などの現象に対する理解がまだ不十分である。
- (ii) 高効率レーザーの開発に対する見通しは、現在のところまだ明るくない。
- (iii) $10^8 J$ の核融合小爆発は、50ポンドのTNTに相当し、毎秒10~100回の衝撃に耐える炉壁を構成する必要がある等である。特に大出力高効率レーザーの開発は重要な課題で、次にこの問題について述べる。

5. 大出力高効率レーザーの開発

核融合炉に必要なレーザーの仕様は前述したところでは明らかであるが、改めて数値を挙げてみよう。

出力：図1および(7)式を考慮に入れると、 $10^4 \sim 10^6 J$ 、パルス幅：慣性閉じ込めの時間を考えると、1 nsec以下効率：(7)式の数値例等から考え5%以上
波長：高密度領域で吸収させ、プリヒートなどの不都合な現象を少なくするために、 $0.3 \sim 0.8 \mu m$ 、ということになる。

出力エネルギーについていうなら、Nd ガラスレーザーと CO_2 レーザーでは、 $10^4 J$ 級のものが間もなく利用可能になると期待されている。

Nd ガラスレーザーは、波長が $1.06 \mu m$ であるが、非線

形光学結晶を用いれば、 $1.9 \sim 0.265 \mu m$ の範囲で、40%以上の効率で波長を変えることができる。パルス幅も0.1 n sec以下のものが容易に得られるので、科学的可能性を実証するためのブレイク・イーブン実験をめざす研究には、このレーザーが用いられよう。しかしながら現在の効率は0.1%程度で核融合炉用には使用できない。

一方 CO_2 レーザーは効率が高いことが注目されるが、パルス幅を狭くすると5%程度にしかならない。また波長が $10.6 \mu m$ と長いので、吸収が低密度領域で起こり、さきに述べたプリヒート等を生じ圧縮を妨げる。 CO_2 レーザーの波長変換技術は現在研究中であるが、赤外領域で光学的強度が強く、非線形効果の大きい材料がまだ得られていない。いづれにしても波長を1桁以上も変換するのは容易ではない。しかしながら、レーザーとプラズマの相互作用の研究の今後の発展によっては、 $10.6 \mu m$ のまま核融合炉用に使われることもあり得る。この場合媒質が気体であるため、レーザー中で発生する大量の損失熱の除去が容易であるという特長が生きてくる。

このように現存するレーザーはいずれもそのまま核融合炉に適用することはできない。そこで新レーザーの出現をめざして種々の開発研究が進められている。ヨウ素やHFの化学反応を用いるレーザー、キセノン、クリプトンあるいは水銀を媒質としたエキシマレーザー (excimer laser) 等が候補に挙げられているが、大出力・高効率化の達成には多くの技術的問題点が存在する。

6. む す び

レーザー核融合の研究はその浅い歴史にもかかわらず急速な発展を遂げつつある。米ソを始め世界中の先進諸国は、強力な研究体制を作っている。我国でも大阪大学レーザー工学研究施設、名古屋大学プラズマ研究所等で研究が進められ多くの成果を挙げてきた。電子技術総合研究所では大出力レーザーの開発が重点課題として採り上げられ、レーザー核融合の研究もスタートした。理論の面では広島大学 西川恭治教授のグループが国際的成果を挙げている。これらのグループを中心に広い分野の力を結集し、協力体制を固めて行く必要がある。

(文 献)

- 1) J. Nuckolls, et al: Nature **239** (1972), 139.
- 2) G. S. Fraley, et al: 5th I.A.E.A. Conf. on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research, (1974, Tokyo, Japan), paper CN-33/F 5-5.
- 3) J. L. Emmett, et al: Scientific America, **230** (1974) 24.