特集

レーザー核融合

中井 貞雄*

(1987年5月29日 受理)

Laser Fusion

Sadao NAKAI *

(Received May 29, 1987)

The progress of laser fusion is remarkable approaching to the breakeven condition, in which the fusion generated energy is comparable to the incident laser energy onto the fuel pellet.

The investigation on the absorption of laser light, energy transport, ablation and implosion hydrodynamics of a pellet are proceeded leading to the accumulation of the data bases which are necessary for the scaling to the fusion ignition and breakeven. The recent results of the neutron generation of 10^{13} per shot and the pellet gain of 0.2% by LHART demonstrate the feasibility to achieve the ignition condition with 100 kJ blue laser.

Key Words: Laser fusion, Implosion, Breakeven, Fusion ignition

1. まえがき

レーザー核融合研究は、1983年12月に激光Ⅻ号が稼動を開始して以来長足の進歩を遂げた。Fig. 1にレーザー核融合の最近の進展をショット当りの中性子発生数の増加として示す。1986年9月には中性子発生数 10^{13} 個を達成した。このようにレーザー核融合研究は、本格的な着手以来短期間のうちに着実な進展をみせ、今やブレイクイーブンの実現を見通して研究が進められている状況である。これは核融合燃料ペレットに投射したレーザーエネルギーに見合った核融合エネルギーを発生する条件である。100kJ級レーザーにより達成されるものと予測されている。爆縮実験に関する理論およびシミュレーションによる物理過程の解明、スケール則の確

Fig. 1 Progress of nuclear fusion experiment.

* 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘2-6)

* Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6, Yamada-oka, Suita Osaka 565)

立によりこの予測の精度は高い。また 100kJ 級レーザーは激光Ⅷ号の延長線上にあり、建設の技術はすでに確立している。

この科学実証のうえにたって、1990年代には出力MJ 級で高効率・高繰返しレーザーと炉工学技術の開発による実用化研究が進められ、21世紀初頭には新エネルギー源として社会システムの将来構想に大きな寄与をなすものと期待されている。

2. レーザー核融合のしくみ

レーザーは、極短時間にきわめて高いエネルギーを局所に集中することができる。このため、1960年にレーザーが実現すると、すぐにアメリカ、ソ連においてそのエネルギーを集中して、重水素・3重水素の核融合反応を行わせる計画が極秘のうちに提案された。60年代の研究は非公開のうちに進められたが、1964年代、量子エレクトロニクス国際会議において N. Basov¹⁾ がガラスレーザーを重水素化リチウムに照射し、中性子が発生する実験を発表した。

わが国でもレーザーによる気体放電の研究から始まって、プラズマ生成の研究が、1963年頃に行われ、レーザーとプラズマとの相互作用の研究が進み、1968年には非線形吸収の理論が西川²⁾により提案され、実験的にもレーザー光の強度がある一定のしきい値を超えるとプラズ

マ波の励起を伴う吸収が増加して高温電子の出現することが山中³⁾により確かめられた。1971年にはガラスレーザーを用い、固体重水素をターゲットにして D-D 反応による中性子の検出に成功した。これら一連の成果は、レーザー核融合研究を強力に刺激するものであった⁴⁾。

アメリカは1972年になって、E. Teller が新式内燃機関と称して、それまで機密にしていたレーザー爆縮核融合の概念⁵⁾を公表した。これは微少燃料ペレットを大出力レーザー光で照射してペレット表面から球対称的にプラズマを噴出させ、その反作用でペレット内部の燃料水素を圧縮するものである。その結果、中心部は固体密度の1000倍にも達する高密度で、かつ、核融合点火温度の1億度に達して、1ns 以下の短時間に核融合反応が進行し、照射レーザーエネルギーの100倍以上もの核融合エネルギーが放出されるものである。この過程の時間的変化を Fig. 2 に示す。

レーザー照射中のペレットにおける物理モデルを Fig. 3 に示す⁶⁾。表面に発生し、膨張したプラズマ中でレーザー光が吸収される。Fig. 3(a)の C-A 断面での密度、温度分布を(b)に示す。右方より入射したレーザー光は電子密度 $n < n_c$ (n_c : 臨界密度) のコロナ領域で吸収される。

吸収されたエネルギーは古典的な熱伝導、高温電子と流れ、輻射等によりアブレーション (Ablation) 面まで運ばれ、ここでアブレーション

Fig. 2 Concept of inertial confinement fusion — Pellet Implosion —

Fig. 3 The process of inertial confinement fusion (a) and the related physics.

ンの反作用として内部コアに対する圧縮力を発生する。レーザーパワーを段階的に上昇させると発生圧力がこれに伴って増大し、コア中心に向かって次々に衝撃波を駆動する。効率よく圧縮するには、吸収率と共に伝導領域でのエネルギー輸送が充分よくなければならない。更に対称的に圧縮する為には、アブレーション面が安定でなければならない。この面が中心に向かって加速される時期には、力は密度の高い圧縮領域から密度の低い熱伝導領域に向かっていているため、レーリー・テラー不安定性が起こる可能性がある。効率よく圧縮するには、コア燃料の先行加熱を極力抑制したうえで、単一の強い衝撃波を用いるより、多段の弱い衝撃波をそれぞれが同時にコア中心に達するように発生し、圧縮を行わせる。このとき球の中心部での核融合反応で発生した α 粒子による自己加熱により核融合燃焼波が高密度領域を伝搬してペレットのエネルギー利得を高める。圧縮の終状態と核融合点火、燃焼の様子をFig. 3(b)のペレット中心Cの周囲に示す。

このような自己点火が可能なコアプラズマの密度と半径の積 ρR は、 α 粒子の飛程よりも大きく、 $\rho R \geq 0.3 \text{ g/cm}^2$ が要求される⁷⁾。レーザー光のペレット表面での吸収率を η_a 、吸収エネルギーから圧縮されたコアエネルギーへの流体力学的効率を η_n とすると、核融合点火に必

要なエネルギーは、 $T_i = 10 \text{ keV}$ の場合

$$\begin{aligned} E_L &= \frac{4}{3} \pi R^3 \frac{2\rho}{m_i} \cdot \frac{3}{2} \cdot T \frac{1}{\eta_a \eta_n} \\ &= \frac{4\pi T_i}{\eta_a \eta_n} \frac{(\rho R)^3}{m_i \rho^2} \\ &= 3 \times 10^9 \frac{1}{\eta_a \eta_n} \left(\frac{\rho_s}{\rho} \right)^2 \end{aligned}$$

となる。ここに ρ_s は液体DTの密度(0.2 g/cm^3)である。これにより、点火に必要なレーザーエネルギーは、圧縮率 (ρ/ρ_s) の2乗に逆比例することがわかる。例えば、1000倍の圧縮(200 g/cm^3)では $\eta_a \cdot \eta_n = 0.05$ に対し $E_L = 60 \text{ kJ}$ で自己点火プラズマを得る。このときペレット利得 $Q \approx 1$ となり、ブレークイーブンを達成することにより自己加熱燃焼過程を引き起こすことができる。

3. レーザーとプラズマの相互作用

レーザー核融合研究の初期には、レーザーとプラズマの相互作用の研究が中心であった。プラズマ中に入射したレーザー光の電界により電子は振動し、イオンと衝突して熱を発生する。こうしてレーザー光のエネルギーはプラズマを加熱することになる。これがレーザーとプラズマとの相互作用のうち最もよく知られている機構であり、“逆制動輻射”あるいは“古典吸収”

と呼ばれる。ところが入射レーザー光強度が上昇し、プラズマ温度が高くなると、電子-イオンの衝突によるプラズマの電気抵抗はゼロに近づき、レーザー光の吸収は急激に低下し、レーザーの周波数で遮断密度面でレーザーのエネルギーがすべて反射されてしまう。確かにプラズマの古典的な取り扱いでは、こうした状態が予想されるのである。事実、波長 $1\ \mu\text{m}$ のガラスレーザー光では、 $10^{13}\ \text{W}/\text{cm}^2$ 以上で吸収率が減少しはじめたのである。これ以上吸収が起こらないのなら、レーザーによる核融合は不可能であると思われた。

ところが、より強力なレーザーが開発されるにつれ、「異常吸収」と呼ばれる興味深い吸収現象がいろいろと明らかになってきた³⁾。レーザー光によりプラズマ中にプラズマ振動と音波とを励起し、この波の減衰としてプラズマにエネルギーを与えるパラメトリック吸収²⁾、レーザー光が遮断密度面で反射するとき光の電界がプラズマの密度勾配の方向と一致し、そこで強いプラズマ振動を励起し、その結果レーザー光が強く吸収される“共鳴吸収”⁸⁾等である。Fig. 4に波長の異なるレーザー光の吸収の様子を示す。レーザー強度を $I\ (\text{W}/\text{cm}^2)$ 、波長 $\lambda\ (\mu\text{m})$ とすると $I\lambda^2 \approx 10^{14}$ あたりから異常吸収の寄与で吸収率が上昇する。したがって波長の短いレーザー光ほど、古典吸収で、よりパワー密度の高いところまで強い吸収を示す。

異常吸収では非線形過程のため高速電子が発

Fig. 4 Absorption coefficient as a function of laser intensity and laser wavelength.

生する。この高速電子は燃料小球の内部に侵入し、そこを加熱してしまう。このように爆縮以前に燃料を予備加熱されると、爆縮がうまく起こらなくなる。このような事情より、核融合用レーザーとしては、より短波長のものが用いられるようになってきた。

4. ペレット爆縮

レーザーパワーの増大につれ、ペレット爆縮実験は着実な進展をみせ、爆縮物理過程の解明が進んできた。同時に爆縮性能が向上し、核融合点火、ブレイクイーブン達成への見通しが得られてきた。Table I に各種レーザー核融合の方式を示す。大別するとレーザー光を直接燃料ペレットに投射する直接照射型と、我が国独自の発明によるキャノンボール型および最近提案されたハイブリッド型とがある。

衝撃圧縮は、燃料DTガスの封入された肉厚の薄いガラスマイクロバルーン (GMB) に短パ

Table I Schemes of laser fusion.

ルスレーザー光を投射し、GMBのガラスシェルを瞬時に、一様に加熱し、これの内向き膨張により内部のガスを急激に圧縮、加熱するものである。この方式については十分に現象が解明され、理論及びシミュレーションとの一致もよく、ペレット爆縮の標準となっている⁹⁾。

アブレーション圧縮は、GMBの表面にプラスチック層等をコーティングし、その表面のみをレーザー照射により加熱する。表面プラズマの外向き噴出の反作用で、シェル内部の温度を低く保ったまま、ゆっくりと圧縮するものである。このような高密度圧縮では、輻射、高温電子による先行加熱を抑制すること、圧縮の安定性、圧縮効率の向上が重要な課題となる。

安定でかつ高効率爆縮が可能な方式として、阪大レーザー研より、多重衝撃波圧縮ペレット(LHART, Large High Aspect Ratio Target)が提案され、ガラスレーザー激光Ⅻ号を用いた爆縮実験により、その優れた特性が実証された^{10,11)}。直径 R が大きく、肉厚 ΔR の薄い高アスペクト比($R/\Delta R$)のペレットに整形パルスを投射するものである。プッシャーシェルが内側に向け加速される過程で次々に駆動される衝撃波が、同時にペレット中心に到達するように設計するものである。かつ巨大圧縮時にはプッシャーシェルがほぼアプレートしつくした状態になる。多重衝撃波による圧縮では、衝撃波圧縮の特性である高温と同時に高密度も、断熱圧縮なしに達成される。このようにスタグネーション相がなく、これに必要なプッシャーシェルが不要となるため、効率が高い。燃料ガス全体が圧縮加熱されるため体積点火(Volume Ignition)ともいわれる。

ペレットを二重とし、外球を加速し、加速されたシェルを内球に衝突させ、その内部の燃料を圧縮する方式も実験され、優れた性能を示している¹¹⁾。

キャノンボール型ペレットでは、燃料を含んだ内球と、重い外球とで形成されるキャビティにレーザー光を入射し、ここで光が何回も反射されながら壁面に吸収される。このため、高

い吸収率と内球面上での一様な照射強度、入射エネルギーがキャビティ内にトラップされることによる効率のよい圧縮が実現される。内球表面と外球内面の表面コート層の材質や、キャビティ形状によりプラズマキャノン、輻射駆動キャノンに分けられる。前者は低 Z 物質をコートし、できるだけキャビティ体積を少なくした構造としたもので、キャビティ内を高温高密度のプラズマで充満し、この圧力で内球燃料ペレットを圧縮するものである。後者は、外球表面を金、ウラン等の高 Z 物質でコートし、レーザー照射によりこの面から発生したX線輻射を内球表面で吸収し、X線駆動アブレーションにより内球を圧縮するものである。キャノンボールペレットが上記二つのモードのどちらが主モードとなって動作するかは、材料、構造及びレーザー波形、波長等によりきまる。

ダブルシェルキャノンは、キャノンボールペレットの内球をダブルシェル構造としたものである。実験的にも優れた特性を示している。

上記の各種ペレットの形状と、その特徴、達

Target	η_{abs}	η_c
Ablative target	50%	1%
LHART	70%	6%
Double shell	50%	2%
Cannon ball	70%	6%
Double shell in cannon	70%	1%
	Higher efficiency by blue	
	High uniformity requirement	
	Stable	
	Uniformity improved	
	Velocity multiplexing	
	Uniformity Improved	
	High efficiency	
	Uniformity greatly improved	

Fig.5 Structures of pellet targets and the features.

成された代表的パラメータをFig. 5に示す。レーザーエネルギーから圧縮された燃料コアエネルギーへの結合効率($\eta_c = \eta_a \eta_n$) 6%が達成されている。爆縮パラメータとしては圧縮密度 10 g/cm^3 , 温度 10 keV , $n\tau \approx 10^{14} \text{ sec/cm}^3$, $\rho R \sim 10 \text{ mg/cm}^2$, 中性子発生数 $10^{13}/\text{ショット}$, ペレット利得 0.2%等が達成されている。Fig. 6にこれまでの圧縮コアパラメータの進展と点火、ブレークイーブン達成の目標パラメータを示す。

核融合用レーザーとしては、ガラスレーザーが主として用いられている。Fig. 7に最近の各国の主要レーザーの建設、稼働の状況を示す。最近のものは非線型光学結晶KDPを装着した2

倍高調波(グリーン)や3倍高調波(ブルー)出力のものである。米国では 100 kJ システムとして完成したノバ(NOVA)が、現状では最高出力 20 kJ であるが、設計出力 100 kJ へ向けて改良を進めている。我が国では激光Ⅷ号の実績の上に、これを基礎とした増力システムが計画されている。技術的には1980年代中に、核融合点火、イグニッションの達成が可能である。

レーザー核融合炉を展望したとき、その技術的実現性は高い¹²⁾。炉用レーザーに要求される仕様は出力エネルギー $1 \sim 5 \text{ MJ}$, 効率10%, 繰返し $\sim \text{Hz}$, パルス幅 $\sim 10 \text{ ns}$, 集光性能 $> 10^{14} \text{ W/cm}^2$ 等である。もちろん寿命, 経済性, 装置の信頼性, メンテナンス等実用機器としての特性が要求されることは当然である。このようなレーザーの開発は、核融合以外への大きな波及効果を引き起こすものである。今後10年間のレーザー核融合研究の進展およびその科学・産業技術における応用の広がり注目される。

参考文献

- 1) N.G. Basov and O.N. Krokhin: Soviet Physics JETP **46** (1964) 171.
- 2) K. Nishikawa: J. Phys. Soc. Jpn **24** (1968) 916, 1152.
- 3) C. Yamanaka *et al.*: Phys. Rev. **A6** (1972) 2335.
- 4) 日米セミナー“レーザーと物質の相互作用”京都都ホテル, 1972年9月.
- 5) J. Nuckolls *et al.*: Nature **239** (1972) 139.
- 6) 山中, 中井: 原子力学会誌, **24** (1982) 92.
- 7) S.E. Bodner: J. Fusion Energy, **1** (1981) 221.
- 8) K. Estabrook and W.L. Kruer: Phys. Rev. Lett. "Properties of Resonantly Heated Electron Distributions" **40** (1978) 42.
- 9) E.K. Storm: Preprint UCRL-79788 "A Simple Sciaing Model for Exploding Pusher Targets" 1977. 11.
- 10) C. Yamanaka and S. Nakai: Nature **319** (1986) 757.
- 11) C. Yamanaka *et al.*: "Inertial Confinement Fusion Research by GEKKO Lasers at ILE Osaka and Target Design for Ignition", 11th Int. Conf. on Plasma Phys. and Controlled Nuclear Fusion Res. IAEA-CN-47/B-I-4. (1986)
- 12) 慣性閉じ込め核融合炉設計検討報告書(第1次概念設計案), (昭和54.4), 大阪大学レーザー核融合研究センター, 慣性核融合研究委員会.

Fig. 6 Progress of pellet compression in confinement parameter $n\tau$ and ion temperature.

Fig. 7 Major laser facility for laser fusion.