20aVII
(招待講演)

平成7年レーザー学会学術講演会第15回年次大会

レーザー核融合点火燃焼に向けて
Towards Ignition and Burning in Laser Fusion

高部英明 (大阪大学レーザー核融合研究センター)

Hideaki TAKABE (Institute of Laser Engineering, Osaka University)

I. はじめに

レーザー核融合では、レーザー自体のエネルギー効率が低いことから、入射レーザーエネルギーと核融合出力エネルギーの比で定義されるベレット利得 Q を100以上にすることが必要である。そのため、レーザー爆縮により、中心部に高温(4–5keV)、低密度($\sim 100\text{g/cc}$)の点火部を形成し、周りの主燃料部($\sim 300\text{eV}$, $\sim 500\text{g/cc}$)を核反応により生成するアルファ粒子により自己加熱する必要がある。このような点火・核燃焼に向けての爆縮の課題としては

①いかに少ないレーザーエネルギーで自己点火する、つまりコアのサイズがアルファ粒子の平均自由行程程度の点火部を形成しうるか。

②点火部・主燃焼部の構造を球対称に形成しうるか。が挙げられる。より少ないエネルギーで点火を実現するには、より高密度の爆縮が必要である。そして、より高密度の爆縮を行うには、より高精度の球対称爆縮が要求され、流体力学的不安定の抑制等の工夫が必要となる。又、技術的課題として、より高精度のレーザー・ターゲット均一性が要求されることとなる。

本講演では、爆縮コード[1]を用い現在の1–10kJoule出力レベルの爆縮から将来の5MJouleクラスの核融合炉での爆縮までシミュレーションを行い、点火や高利得実現の条件について調べた結果について報告する。

II. ターゲット設計

爆縮シミュレーションを行う際、ターゲットのサイズ、構造、さらにレーザーの波形とシミュレーションパラメータは多数存在する。より少ないエネルギーで、より安定で、より高利得のターゲット爆縮をこれらすべてのパラメータを変化させて求めることは非現実的である。そこで、何らかの設計思想にのっとり、数々のパラメータ

を変えて最適化を行うこととなる。我々は与えられたレーザーエネルギー E_L の下で調整するパラメータとしてレーザーについては

①プレパルスの強度 I_p , 幅 τ_p

②主パルスの幅 τ_m

を選んだ。ターゲットについては、初期アスペクト比 A_0 を5とし、中心に1気圧のDTガス。これをDTの固体層とCHのアブレーター層が囲む構造とした。CH層はレーザーによりほぼ全てがアブレーションしてしまうよう厚さを調整した。

レーザーエネルギー E_L を変えたとき、ターゲットのサイズ R_0 は

$$R_0 \propto E_L^{1/3}$$

の比例則には従って変えた。こうすることにより、レーザー強度を一定に保ち、流体力学的に等価な爆縮を行い、温度、密度が同じ構造で(E_L を小さくしたとき)サイズのみ小さくなる爆縮が可能となるはずである。ただし、実際にはカットオフの動きの違い、スタグネーション時の熱伝導効果の違い、輻射冷却時間と爆縮時間の比の変化などにより、必ずしも流体力学的に等価な爆縮とはなっていない。

図-1に $E_L=5\text{MJoule}$ で利得130の高利得爆縮の例を示す。ターゲットはDTガス層が2mm、固化DT層450 μm 、CH層45 μm で、レーザーはプレパルス幅 $\tau_p=28\text{nsec}$ で強度 $1 \times 10^{13}\text{W/cm}^2$ 、主パルス幅 $\tau_m=12\text{nsec}$ である。

最適化の一例を示す。図-2に示したのは利得 Q の爆縮速度依存性である。これは、図-1の場合で主パルス幅のみを変化させることにより、爆縮速度を変えて得られたものである。ただし、図中、マークの異なるグループはプレパルス強度を $0.4 \times 10^{13} - 4 \times 10^{13}\text{W/cm}^2$ に変えた場合である。図より明らかなことは、①点火に必要な最低速度(臨界爆縮速度)がある。②最高利得は臨界速度よ

図-1 高利得爆縮のダイナミクス

図-2 ペレット利得Qの爆縮速度依存性

りわずかに高速度の場合に得られる。③爆縮速度が高すぎても利得は下がる。④プレパルス強度の上昇とともに臨界速度は上昇し、利得は下がる。横軸を A_{inf} （インフライト・アスペクト比）に取っても同様の図が得られる。高利得実現のための最低の A_{inf} が存在し、5MJでは約60程度である。

同様の最適化を $E_L=2\text{MJ}$ 、500kJ、100kJ、10kJ、1kJの

場合について行った。その結果点火に必要な臨界速度 v_{cr} は

$$v_{cr} = 3.7 \times 10^7 \times \left(\frac{E_L}{3\text{MJ}} \right)^{-6.3} \quad (\text{cm/sec})$$

と求まった。100kJ点火には $5 \times 10^7 \text{cm/sec}$ の爆縮速度が要求されることとなる。

インフライトアスペクト比は $A_{inf} = (\text{半径}) / (\text{加速中のターゲットの実効厚})$ で定義される。ここでは、時々刻々のターゲットの実効厚を密度分布を関数近似して求め、 A_{inf} を計算し、その最大値を取った。LLNLやLLEでは異なる定義をしていることに注意。燃焼速度(v)、 A_{inf} を固定したときの利得曲線を図-3に示す。 $E_L < 100\text{kJ}$ の領域では、 E_L の増大とともに燃料の量が増大し、 pR 値が増大するため、利得は pR に比例して、ほぼ $Q \propto pR \propto E_L^{1/3}$ で増大していく[2]。これは体積効果である。まだ自己点火は起こっていない。100kJ-1MJで利得曲線が急に立ち上がっているのは、自己点火により温度が上昇し、燃料率が增大することによる。そして、 $E_L > 1\text{MJ}$ の領域では、又、 $Q \propto pR \propto E_L^{1/3}$ の傾向を示す[3]。

図-3 ペレット利得曲線

図-3より明らかなことは

①爆縮速度(v)、インフライトアスペクト比(A_{inf})

を増大させることにより点火に必要なレーザーエネルギーを下げるができる。

②爆縮速度が大きいと高利得での利得は下がる。

③点火には200kJから1MJ程度のレーザーエネルギーが必要である。

③の条件をもっとはっきりさせるためには、現実問題として、①どこまで爆縮速度を上げうるか、②どこまでインフライトアスペクト比を大きく取れるか、を定量的に評価する必要がある。①は特に輸送の物理に関連し、②は流体力学的安定性の物理に関連する。ここでは②に注目し、以下に2次元流体コードによる考察を行う。

III. 点火ターゲットの爆縮安定性

図-3の300kJ点火ターゲットに対する2次元シミュレーションをILESTA-2Dコード[4]を用いて行った。ターゲットは700 μm のDTガス層、140 μm の固化DT層、33 μm のCH層より成る。これに9nsプレパルスと3nsの主パルスより成る0.35 μm のテラード・パルスを照射した。1次元コードでは利得2で、点火が確認されており、ここにレーザー不均一を与えて2次元シミュレーションを行った。

図4 レーザー不均一1%時の点火爆縮
(最大圧縮近傍の密度等高線)

図4に示したのは、 $\ell=4$ のモードでレーザー強度不均一1%の場合の結果である。図は最大圧縮近傍の2時点($t=12.55\text{ns}$, 12.65ns)での密度の等高線を示す。この間

の100psecに中性子数は 1.76×10^{16} から 7.23×10^{16} に増大している。しかし、0.3%の不均一の場合には、中性子数はこの100psecの間に 1.27×10^{17} まで増大しており、不均一による低減は明らかである。実際、温度は不均一0.3%の場合15keVにも達しているのに対し、不均一1%では10keVにしか達していない。そして、 $t=12.65\text{ns}$ 時点で0.3%ではまだ10keVに保たれているのに対し、1%では6keVにまで下がっている。これは不均一による体積膨張率が大きく、膨張冷却が早く起こることも一因である。

波数 ℓ を $\ell=2, 4, 6, 10$ と変え、それぞれのモードに対する利得の不均一依存性を調べた。結果を図-5に示す。図で■印は1次元コードでアルファ加熱の効果を切った場合である。アルファ加熱により $Q=0.3$ から $Q=1.8$ まで増大しており、これが点火効果である。レーザー不均一を増大していくと、1%の所で Q が0.3以下($\ell=10$ モード)となる。有為な点火を実証するためには、せいぜい0.6% (σ_{rms} では0.4%)程度以下に抑えておく必要があることがわかる。

図-5 300kJ点火ターゲット利得のレーザー不均一依存性

$\ell > 10$ のモードについては混合モデル (mixing model) を使い、評価していく必要がある。今後の課題である。

IV. 高利得ターゲットの爆縮安定性

高利得ターゲット爆縮では、一旦点火が起こり、アルファ粒子加熱が開始すると、アルファ粒子熱輸送によるアブレーションや熱平滑化効果で流体運動の平滑化が期待できる。しかし、これはあくまで点火が起こった時の話である。点火を起こすためには高度な爆縮均一性が要求されるのは言うまでもない。

図-1や図-2に示した高利得ターゲットについてプレバルス強度 10^{13} W/cm^2 の場合について、2次元シミュレーションを起こした。爆縮速度が点火が起こる臨界値に近い場合は不均一爆縮に敏感であると予想される。ここでは衝撃波が中心に衝突した時刻に爆縮プラズマに歪を与え、その割合 $\xi_\ell = \delta R_\ell / R_0$ (DTとCHの境界面)をパラメータとして、利得の変化を調べた [4]。 $\ell=2$ で $\xi_\ell=10, 20, 30\%$ の場合の結果について図-6に示す。図-6より明らかに1次元 (■) シミュレーションで点火が起こる臨界速度 ($\sim 2.5 \times 10^7 \text{ cm/sec}$) 近傍では利得は不均一に敏感である。利得がこの臨界速度近傍で一番高かったことから、不均一爆縮での利得の低下は図のように大きくなる。ところが、爆縮速度が充分大きい時は不均一に利得が強く依存しない傾向が見られる。

図-6 ペレット利得の爆縮不均一依存性 ($\ell=2$)

V. 今後の課題

点火・高利得に向けての科学的シナリオ作りのためには、1次元爆縮コードによるターゲットの最適化を行っていくと同時に、2次元爆縮コードを用いてターゲットやレーザーの不均一による性能低下を定量的に調べていく必要がある。しかし、1次元コードと同系の物理を含む2次元コードで調べる場合、多くの ℓ モードを含んだ全シナリオのシミュレーションは非現実的である。むしろ、各モードの成長の様子を調べ、これを用いて何らかの混合モデル (mixing model) と組み合わせて評価していく必要がある。特に $\ell > 10$ のモードについてはこの方法が妥当と考える。そして、用いる混合モデルの妥当性については、現在の激光XII号実験等の解析に適用して調べていく必要がある。基本は、現実の爆縮実験結果を説明しうるシミュレーションコード・理論モデルをベースに点火・高利得の予想・評価を行うということである。

今後の課題としては、①混合モデルの開発・適用を行っていく。と同時に、1次元コードにより②利得が200以上出そうな爆縮方法を探す。③アブレーティブ安定化等を積極的に利用し、流体不安定の成長を抑制する爆縮モードを模索する。さらに④実験の解析を進め、コード・モデルの妥当性をチェックしていくことが必要である。

参考文献

- [1] H. Takabe, "Hydrodynamic Simulation Code for Laser Driven Implosion", to be published in Laser and Part. Beams.
- [2] G.S. Fraley et al., Phys. Fluids 17, 474 (1974).
- [3] J. Mayer-ter-Vehn, Nucl. Fusion 22, 561 (1981).
- [4] H. Takabe and T. Ishii, Jpn. J. Appl. Phys. 32, 5675 (1993).