

レーザー核融合プラズマでの燃焼ダイナミクス Nuclear Fusion Burn Dynamics in Laser Fusion Plasma

城崎 知至
JOHZAKI Tomoyuki

広島大学 大学院先進理工系科学研究科
Graduate School of Advanced Science and Engineering, Hiroshima University

はじめに

レーザー核融合では、直径数mmの核融合燃料球表面にレーザーを照射して燃料を爆縮し、固体密度の数千倍の高密度($\sim 10^{26} \text{ cm}^{-3}$)燃料プラズマを形成する。この高密度燃料の一部を核融合点火温度(DT燃料で5 ~ 10 keV)まで加熱することで、核融合反応を点火させ、燃料が慣性で留まっているごく短時間($\sim 100 \text{ ps}$)に爆発的核燃焼を実現する。燃料を供給しつつ、準定常的に希薄($\sim 10^{14} \text{ cm}^{-3}$)なプラズマ中で核燃焼を維持する磁場閉じ込め方式とは大きく異なる燃焼形態となる。このレーザー核融合の燃焼特性と近年着目されている内容について紹介する。

点火過程

レーザー核融合の点火は、高密度爆縮コア内に、爆縮もしくは外部加熱により形成される点火部でのパワーバランスによって決まる。高温点火部において、核反応生成 α 粒子による点火部への自己加熱がその領域からのエネルギー損失(輻射・熱伝導・膨張仕事)を上回ることが点火に要する必要条件である。この条件が達成されると、 α 粒子加熱により点火部温度は更に上昇して核反応率が增大する。また、周囲の低温主燃料部への輻射や中性子、 α 粒子、熱伝導による熱輸送で燃焼領域が爆燃波的に広がっていく。

燃焼過程

点火部の急激な温度上昇に伴う圧力上昇により、周囲の低温主燃料部へと圧力波が駆動され、最終的にはこれが衝撃波となり周囲の主燃料部に伝播していく。このフェーズになると、衝撃波による加熱で、衝撃波面後方の燃料温度が上昇し核反応が誘起され、核反応生成粒子による加熱がさらに衝撃波を駆動するという、爆轟

波的燃焼になる。この状態にまで達するためには、この遷移時間の間、燃焼波前方に十分なサイズの高密度主燃料部が残っている必要がある。前述の点火の必要条件と、この爆発的燃焼を実現するための主燃料閉じ込め時間・サイズが満たされると、爆発的核燃焼に遷移し、燃料全体に燃焼波が伝播していく。

燃焼波が燃料端に到達すると、そこから燃料内部に希薄波が伝播していく。これにより燃料の密度・温度が低下していき、核燃焼が終了する。

化学燃焼爆轟波との相違点

化学燃焼爆轟波の場合は、燃料のサイズが衝撃波と燃焼領域からなる燃焼波のスケールに比べ十分に大きく、また衝撃波の伝播速度に比べ、反応速度も大きいため、定常伝播する爆轟波が形成され、燃焼波後方の物質は100%燃焼した既然ガスとなる。しかし、DT燃料を用いたレーザー核融合では、炉として成り立つために1回の燃焼当たりの出力が制限され、燃料サイズが質量半径積(ρR)で 3 g cm^{-2} 程度(半径は高々 $100 \mu\text{m}$ 程度)となる。また、DT反応率は70 keV程度にピークがあり、それ以上の温度になると反応率が温度上昇に伴い低下する。この特徴から、燃料が100%燃焼する前に、燃焼波が燃料端に到達するため、定常燃焼には達せず、燃焼率は高々30%にとどまる。

化学爆轟波とレーザー核融合爆轟波の違いは波面構造にもある。化学反応では反応熱はほぼ局所的に付与される(一部輻射による熱輸送も生じる)。これに対し、レーザー核融合では、輻射や核反応生成中性子、 α 粒子、熱伝導による非局所輸送が顕著であり、衝撃波前方への先行加熱が生じる。また、化学反応では衝撃波加熱による分子の振動モードの励起やラジカル

生成等の誘導領域をはさんでその後方に発熱反応領域がある。レーザー核融合では爆縮並びに先行加熱により完全電離したプラズマ中を衝撃波が伝播し、反応もDT反応の1反応である（副反応や2次反応も生じるが、DT主反応が支配的である）。このため、誘導領域は生じない。

また、多次元化学爆轟波では、デトネーション波面にそって伝播する横波同士が衝突することで小爆発を繰り返し、複雑な3次元構造（セル構造）を形成する。これに対しレーザー核融合燃焼では、完全電離プラズマ中での1反応燃焼であること加えて先行加熱が生じるため、衝撃波前方に弱い燃焼領域が形成され、衝撃波面と燃焼領域が離れずに伝播する。また燃焼領域のサイズが燃料サイズと同程度、もしくは大きい。このような燃焼の特性と燃料スケールの関係から、化学爆轟波でみられるようなセル構造は生じない。

プラズマ阻止能の不確定性

非定常なレーザー核融合燃焼における特徴は、核反応生成粒子が背景プラズマ粒子との衝突より減速しつつ、有限距離と有限時間にわたり輸送されることで生じる、核反応生成粒子による加熱の非局所・非瞬間性にもある。特に燃焼を支配する α 粒子の輸送特性は、核燃焼特性に大きく影響する。 α 粒子に対する高密度プラズマの阻止能は、2体衝突モデルやプラズマ集団相互作用効果を考慮し、また、背景プラズマの電子縮退効果や強結合効果を考慮した様々なモデルが提唱されており、モデル間での差異が大きい。また実験的にも十分には検証されていない。阻止能の不確定性は、レーザー核融合の点火・燃焼設計の不確定性となるため、近年、阻止能に対する実験・理論の両面からの研究が精力的に進められている。

非熱的核反応

核反応生成粒子の非局所輸送においては、 α 粒子とプラズマ粒子のクーロン微小角散乱だけでなく、核力を伴う大角度散乱(Nuclear Elastic Scattering; NES)効果や、電荷をもたない中性子と背景プラズマ粒子との弾性衝突も興味深い。NESや中性子による弾性散乱により、背景プラズマ中の熱的燃料粒子が高エネルギー状態に反跳される。反跳燃料粒子は、燃料中を減速しつつ輸送される中で、背景燃料粒子と非熱的核

融合反応を起こす。この反応では、反応系に反跳粒子の運動エネルギーが持ち込まれるため、生成される粒子は、熱核融合反応で生成される粒子よりも高いエネルギーを有する。この反応に着目し、燃料外に放出されるこれら非熱的核反応由来の高エネルギー粒子を観測することで、燃料の状態を同定する計測手法が提唱されている。また、非熱的反応が核融合点火・燃焼に（特に爆縮燃料サイズが大きい高出力燃料やDD, D³Heなどの先進燃料において）一定の影響を及ぼすと予測され、核燃焼特性評価において興味深い課題である。また、DT燃料においても、精度良い点火燃焼特性評価においては考慮すべき現象であろう。

キロテスラ級磁場による燃焼制御

近年、レーザー駆動キャパシターコイルを用いたキロテスラ級磁場の生成が可能となった。この磁場を燃料球に印加することで、高速点火レーザー核融合点火時のレーザー加速電子ビームの発散を抑え燃料加熱効率を増大させる方法が提唱され、シミュレーションや実験によるその有効性が実証されている。また点火時には熱伝導損失抑制や、 α 粒子の飛程短縮効果による点火条件の緩和効果も期待される。燃焼過程では、電子熱伝導の非等方性や、 α 粒子輸送に対する影響を介して、燃焼波の伝播特性や擾乱下での燃焼への影響等も、興味深い課題である。一方で、印加磁場が爆縮時の流体不安定性を増長するという報告もあり、磁場の影響を爆縮から燃焼まで一貫して考慮した統合的研究が必要である。

終わりに

以上のように、レーザー核融合の核融合点火・燃焼特性は、磁場閉じ込めにおけるものとは大きく異なる非定常・パルス燃焼である。本シンポジウムでは、化学燃焼爆轟波や超新星爆発における核融合爆轟波との類似性・相違性に着目して、レーザー核融合の燃焼特性について報告する。