



4. 慣性核融合における先進燃料研究

4. Advanced-Fuel Fusion Researches in Inertial Fusion

城崎 知至

JOHZAKI Tomoyuki

広島大学 大学院先進理工系科学研究科

(原稿受付：2021年9月26日)

慣性核融合における点火条件・燃焼率の簡易モデルによる評価に基づいて、DT燃料と先進燃料(DD, D^3He , $p^{11}B$)の比較を行い、先進燃料の特徴を概説する。また、近年、特に注目を集めている $p^{11}B$ 燃料については、従来の熱核融合反応だけでなく、非熱的核融合反応に着目したレーザー加速粒子を用いたレーザー実験や、この反応を積極的に用いる点火方式などを紹介する。

Keywords:

advanced-fuel fusion, inertial fusion, ignition condition, burn-up fraction, DT ignitor, non-thermal fusion

4.1 はじめに

この原稿を執筆している最中に、米国国立点火施設(NIF)で核融合出力1.3 MJ達成のニュースが入ってきた[1]。爆縮に用いるレーザーエネルギー(1.9 MJ)に匹敵する核融合出力である。2021年6月に行われたIAEAの核融合エネルギー会議での報告値(170 kJ)から約一桁の増加で、核融合点火に向け、飛躍の進展をもたらす結果である。

慣性核融合では、直径数mmの核融合燃料球にレーザーやイオンビーム等のドライバーエネルギーを照射して固体密度の数千倍にまで圧縮(爆縮)、その圧縮燃料の一部もしくは全体を核融合点火温度まで加熱することで、爆発的核燃焼を起こす。発電炉では、この小爆発を数~数十Hzで繰り返すことで定常的にエネルギーを取り出す。

慣性核融合の点火方式としては、従来からある中心点火方式に加え、相対論高強度レーザーを用いた高速点火方式[2]や、衝撃波駆動による衝撃波点火方式[3]などの新点火方式が提唱され、多彩な方式で核融合点火に向けた研究が進められている。これに伴い、DD, D^3He , $p^{11}B$ 等の先進燃料を用いた慣性核融合研究にも広がりが生じている。特に $p^{11}B$ 燃料は、中性子生成量が非常に少ないクリーンな燃料として、種々の点火方式の提案やレーザー加速実験が行われ、また民間企業[4, 5]も参入し、研究が進められている。

しかし、先進燃料は、DT燃料に比べて点火条件が厳しく、十分な核融合出力を得るためには燃料サイズが大きくなる。また、副反応や二次反応により一定量の中性子が生成されることから、DT燃料に比べて炉としての優位性については懐疑的な点もうかがわれる。これらの観点から、本章では、慣性核融合における先進燃料の点火・燃焼特性や近年の先進燃料研究について紹介する。

4.2 慣性核融合燃料の点火条件

慣性核融合燃料の点火条件は、爆縮もしくは外部からの加熱源により、圧縮燃料の一部もしくは全体を加熱することで形成する高温の点火部におけるパワーバランスで評価される[6]。核反応生成荷電粒子による点火部へのエネルギー付与率(自己加熱率)が点火部からのエネルギー損失率(輻射損失率+熱伝導損失率+膨張仕事率)を上回れば、その後、自己加熱により温度が上昇し、衝撃波を伴う爆発的燃焼へと発展する。各種燃料に対して求めた点火条件を点火部のイオン温度 $T_{i,h}$ -面密度 ρR_h (点火部密度の径方向積分値)面上に示す(図1)。点火部の閉じ込め時間を $\tau = R_h/(4C_s)$ (R_h は点火部半径、 C_s は音速)とし、質量密度 ρ を電子数密度 n_e に置き換えることで第2章の磁場閉じ込め方式の点火条件(文献[7]の図3)と比較できる。

DT燃料に比べ先進燃料は反応断面積が小さく、そのピークがより高温にある(文献[7]の図1)ことやDD以外は平均電荷が大きく輻射損失が大きくなることから点火条件は厳しくなる。特に平均原子番号の大きな $p^{11}B$ では、輻射に対して光学的に十分厚い領域での点火となり非常に大きな面密度が必要となる。

いずれも電子温度 $T_{e,h}$ とイオン温度 $T_{i,h}$ は等しいとして評価したが、仮に $p^{11}B$ 燃料において電子温度をイオン温度より低く抑えることができれば、輻射損失を大幅に低減でき、DD燃料と同程度の点火条件にまで緩和することは可能である。しかし、いずれにせよ、DT燃料に比べると、先進燃料の点火条件は厳しく、その状態を達成するために要するドライバーエネルギーは大きくなり、点火の実現や効率の点で劣る。

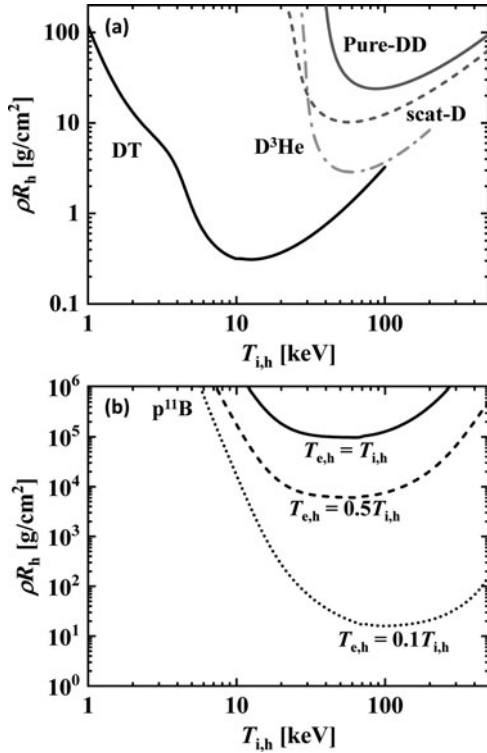


図1 慣性核融合における(a)DT, D³He, pure-DD, scat-D燃料, (b)p¹¹B燃料の点火条件. P¹¹B燃料に対しては, 電子温度 T_{e,h} とイオン温度 T_{i,h} が異なる条件についても示す.

4.3 燃焼率

前節では, 点火部に対するパワーバランスから点火条件を示した. ただし, 実際に爆発的燃焼に達するには, 核燃焼が爆発的燃焼に達するのに要する時間が, 高密度燃料維持時間より短いことも必要である. このため, 前節で示した条件は, 点火部に対する必要条件であり, 核燃焼実現のための十分条件ではない.

慣性核融合では, 点火部で開始された核反応で生成される荷電粒子や中性子による自己加熱が点火部の温度上昇を引き起こし, さらに周囲の低温高密度主燃料部へと核燃焼波を駆動し, 衝撃波を伴う爆発的な核燃焼が実現される. 衝撃波を伴う燃焼過程としては化学反応で生じるデトネーション波(爆轟波)に似ている. 化学燃焼のデトネーションでは衝撃波による加熱により, 衝撃波後方に化学反応が誘起され, その反応熱により衝撃波が駆動され, 衝撃波と燃焼波が一体となって伝播する. 慣性核融合の燃焼も同様の燃焼形態であるが, 輻射や核反応生成粒子, 電子熱伝導により衝撃波前方が先行加熱される点や燃焼率の低さ(高々30%程度である)が異なる. 慣性核融合では, 爆縮燃料のサイズが小さく, 100%燃焼する前に, 衝撃波が燃料端に到達し, その後, 希薄波により燃料密度が低下していくため, 100%の燃焼率を得るのは困難である. 同じ核燃焼形式でもスケールの大きな超新星爆発のように燃焼波の厚みが星=燃料のスケールに比べて極めて小さいような系では100%燃焼が可能であるが, そのような大サイズの爆縮燃料では, 出力が大きくなりすぎて, 炉として成立しない.

慣性核融合では, 燃料の燃焼率 ϕ は燃料全体の面密度

ρR により

$$\phi = \frac{\rho R}{\rho R + B} \tag{1}$$

で見積もられる[8]. ここで B は燃焼パラメータと呼ばれる量で,

$$B = \frac{8\sqrt{2k_B T_i m_i}}{\langle \sigma v \rangle} \tag{2}$$

である. ここで T_i は燃焼時の平均イオン温度, m_i は燃料中のイオン1個当たりの平均質量, $\langle \sigma v \rangle$ は核融合反応率係数である. 図2にDT, DD, scat-D, D³He, p¹¹B燃料に対する B を T_i に対して示す. 燃焼パラメータ B は T_i の関数であり, 燃焼率 ϕ も T_i に依存する. 燃焼パラメータ B は燃焼率 ϕ の分母にあることから, その値が小さいほど, 面密度 ρR の燃料の燃焼率は高くなる.

各燃料の B の最小値により燃焼率を評価した結果を図3に示す. 核融合炉として成立するためには, 投入したドライバーエネルギーの100倍程度の核融合出力が要求される. このためには燃焼率として0.3程度が必要である. このような燃焼率を得るために必要な面密度は, DT燃料が $\rho R = 3 \text{ g/cm}^2$ であるのに対し, D³Heやscat-Dでは $\rho R = 20 \text{ g/cm}^2$, p¹¹Bでは $\rho R = 50 \text{ g/cm}^2$ となり, DTに比べると先進燃料で十分な燃焼率を得るためには1桁大きな面密度が必要となる.

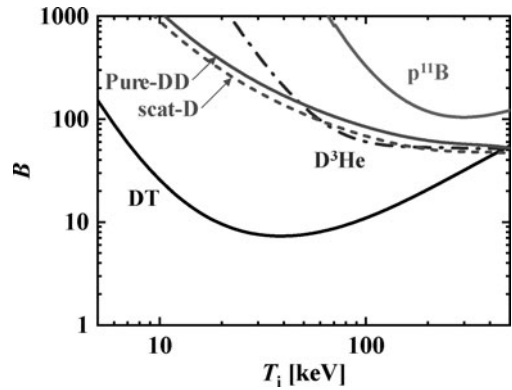


図2 燃焼パラメータ B の燃焼温度 T_i 依存性.

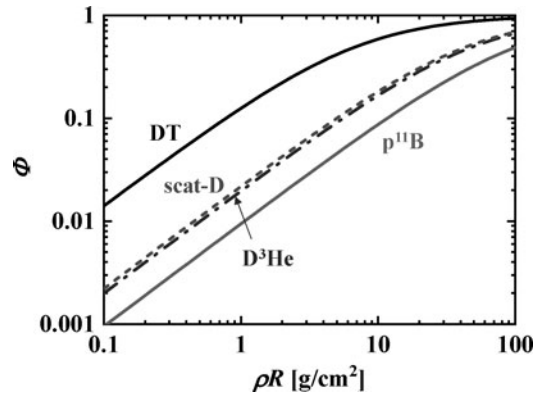


図3 燃焼率 ϕ の燃料面密度 ρR 依存性.

先進燃料で高燃焼率達成に必要なこのような大きな面密度の爆縮状態を実現するためには、DT 燃料と同程度の圧縮密度の場合、半径が約10倍、質量（ \propto 体積）が約1000倍の燃料が必要となる。これは爆縮に要するドライバーエネルギー・核融合出力ともに約1000倍大きくなることを意味する。DT 燃料での出力が百MJクラスであることを考えると、先進燃料では百GJクラスとなり、このような大きな出力に耐える炉を建設することは現実的でない。炉として成り立つためには核融合出力を数GJ程度に抑える必要がある。このため、先進燃料ではより高密度圧縮を行う必要がある。これにより、燃料質量の増加、つまりは核融合出力の増加を抑え、高面密度・高燃焼率を実現する。

4.4 DT 点火剤付き先進燃料

4.2節で示したように、先進燃料の点火条件は、DT 燃料に比べて格段に厳しい。この先進燃料の点火条件緩和のために、核燃焼の点火にはDT 燃料を用い、その周囲に主燃料として先進燃料を配置する、DT 点火剤付き先進燃料が提案されている（図4）。この場合、DT 燃料で核融合燃焼の点火を行い、そこからの燃焼波によって、周囲の先進燃料からなる主燃料部の燃焼を実現する。これにより、点火条件はDT 燃料と同程度に緩和できる。

中心点火方式を対象に、最大圧縮状態を計算の初期状態に仮定した数値シミュレーションによる解析が多く行われ、その有効性が示されていた（例えば、[9-15]）。これに対し中島ら[16]は1次元爆縮シミュレーションにより、中心点火方式では、爆縮途中に点火部のDT 燃料が燃え始め（先行点火）、主燃料部の十分な密度・面密度への圧縮が行えないことを示した。

一方、近年提案された高速点火方式[2]では、爆縮により燃料の高密度圧縮を先に行い、最大圧縮時に燃料に相対論的強度の短パルスレーザーを照射することで、燃料端の一部を点火温度まで加熱して点火部を形成する。この方式では、十分断熱的に圧縮を行えば、DT 点火剤の先行点火を回避することが可能である。計算の初期状態として最大圧縮状態を仮定し、主燃料である先進燃料の端部にDT 点火剤を置いた点火・燃焼計算が行われている（例えば、[17-21]）。

DT 点火剤付きDD 燃料において、主燃料のDD 燃料部に

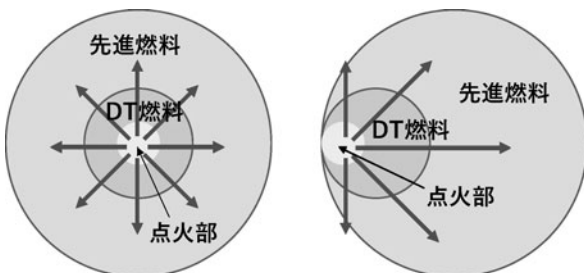


図4 DT 点火剤付き先進燃料の点火時の状態の模式図。左が中心点火方式で、右が高速点火方式。DT 燃料の周りに先進燃料を配置し、DT 燃料内に点火部を形成して核融合点火・燃焼を起こし、そこから伝播する核燃焼波で主燃料である先進燃料部を燃やす。

少量の T を添加した "T-poor" 燃料に対する解析も行われている[17]。この結果、DD 燃料部に 0.5~1% 添加した T が燃焼を促進することで、炉として十分な出力が得られるとともに、燃焼で消費される量を上回る T を DD 反応で生成できることが示されている。この場合、燃焼後のプラズマから T を回収することで、ブランケットでの T 増殖なしに燃料サイクルを回すことが可能となる。

中尾らによる DT 点火剤 / D^3He 燃料に対する解析[20]では、DT 反応生成中性子による加熱や、 D^3He 反応生成プロトンによる核弾性散乱の影響が評価され、これらによる D^3He 燃料の加熱が、 D^3He 燃料の燃焼を大きく促進することが示された。この解析では、核融合炉として要求される核融合利得（核融合出力 / ドライバーエネルギー） ≥ 100 を満たす条件が、ドライバーエネルギー 10 MJ で実現可能なことも示されている。ただし、中性子出力は意外に大きく全核融合出力の 10~20% であった。

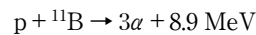
高速点火方式を対象とした解析は、現在のところ爆縮過程を無視し、計算の初期状態として最大圧縮状態を仮定したものしか行われていない。今後は、爆縮過程も考慮した統合シミュレーションによる、ターゲット並びに爆縮加熱ドライバーデザインが必要である。この統合シミュレーションでは、核反応生成荷電粒子による核弾性散乱や中性子による弾性散乱、その反跳によって生じる高エネルギー燃料粒子の輸送過程を減速途中の非熱的核融合反応も含めて計算する必要がある。

4.5 $p^{11}B$ は究極の燃料か？

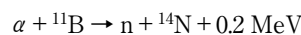
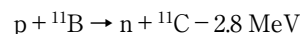
DT 燃料はその点火のしやすさから、第一世代の核融合燃料として、核融合点火に向けた研究において使用されている。しかし、反応で生成される中性子が核融合出力の 8 割を担うため、炉材の放射化は避けられない。また、燃料の T は放射性物質でありその増殖が不可欠である。

慣性核融合で先進燃料を用いる場合は、点火条件緩和のために、点火剤として DT 燃料を使用する必要があり、一定量の T 生成は必要となる。また、DD や D^3He 燃料では主反応や副反応、二次反応により中性子が生成されるため、核融合出力における中性子割合の大幅な低減は期待できない。では、 $p^{11}B$ 燃料の場合はどうであろうか？

燃料材が天然に存在し、主反応



からは中性子が生成しない点で、 $p^{11}B$ は究極の核融合燃料として期待される。ただし、断面積は主反応に比べて小さいものの、副反応や二次反応



により一定量の中性子は生成されるが、DT 燃料に比べると中性子出力割合は格段に小さい。このため、 $p^{11}B$ は究極の燃料として、慣性核融合を含め、レーザー核融合方式においても長年議論されている（例えば、[22-32]）。しかし、その断面積の小ささと、制動放射の大きさからその実

現は困難である。最近、雪崩的反応により、点火・燃焼の実現の可能性を示す解析結果[26,27]が出ている。しかし、これに対しては評価モデルが不適切であるとの反論[28]もある。

慣性核融合で燃焼を実現するためには、(1)反応率係数が十分大きくなるような数百 keV の高温で、かつ(2)制動放射が燃料内で再吸収できるような光学的に十分厚いプラズマ状態を実現する必要がある。また、炉として成立するためには、核融合出力を数 GJ 程度に抑える必要がある。これらの条件を実現するには、燃料密度 $10^4 \sim 10^5 \text{ g/cm}^3$ の超高圧縮で、イオン温度数百 keV、面密度 $\rho R \sim 50 \text{ g/cm}^2$ のプラズマを形成する必要がある。

輻射損失を抑えるためには、2節で示したように、電子温度をイオン温度より十分低い状態に保つことや、燃料中の ^{11}B の割合を減らして電子数密度を低くするなどの方法が考えられる。例えば Sano 等[33]が提唱している数 $10 \sim$ 数百 kT の磁場下での相対論強度のレーザープラズマ相互作用における、ホイッスラー波による高密度プラズマ中でのイオン直接加熱により、イオンを選択的に加熱する手法の利用などが考えられる。また、燃料粒子数比 (n_p/n_{11B}) についても、核反応率と輻射放射率のバランスにより最適値が存在する。

熱核融合反応でなく、レーザー加速で 1 MeV クラスの p ビームを作り、 $p^{11}\text{B}$ ターゲットに照射し、断面積の大きなところで非熱的ビームプラズマ核融合を起こす手法も提案されている。Hay 等[29]は空間 0 次元のビーム成分とバルクプラズマのパワーバランスから燃料全体で点火する体積点火方式 (volume ignition scheme) での点火条件や燃焼率を評価し、炉として成立する条件が存在していることを示している。また、Gus'kov 等[30]は中空の球殻燃料の内面に相対論的高強度短パルスレーザーを照射して強磁場を形成し、その磁気リコネクションにより燃料イオンを加速するとともに、燃料外面にナノ秒のハイパワーレーザーを照射して爆縮することで、燃料中心部に非熱的高エネルギーイオンを閉じこめ、 $p^{11}\text{B}$ 反応を点火させる方法を提案している。また、簡易モデルにより評価したレーザー強度やエネルギーの見積もりでは、数 MJ のレーザーでの点火の可能性を示している。ただし、その後の爆発的な燃焼が起こるかどうかの評価は行われていない。

一方、近年、PW クラスの超高強度レーザーを用いた実験も行われている (例えば[31], [32])。チェコの PALS レーザー (600 J) を用いた実験[32]では、レーザー加速 p ビームを B ターゲットに照射し、 $p^{11}\text{B}$ 反応で生成された 10^{11} 個の α 粒子が観測されている。さらには $p^{11}\text{B}$ 燃料によるレーザー核融合での発電をめざす民間企業も出てきている。

田島氏が小特集[34]で述べているように、慣性核融合でも $p^{11}\text{B}$ の点火・燃焼は DT 燃料に比べ非常に厳しい条件となり、その実現は困難である (物理的困難)。一方で、将来の核融合炉を見据えると、 $p^{11}\text{B}$ での点火・燃焼が実現できれば、燃料供給の点や、中性子発生数の少なさから炉としての技術的困難が著しく軽減する点で、非常に魅力的な究

極の燃料といえよう。熱核融合反応だけではなく、進展目覚ましい超高強度レーザーを用いたレーザー加速イオンビームや反跳イオンによる非熱的核反応も考慮し、また、強磁場印加など様々な工夫により点火・燃焼を実現できるシナリオをぜひとも描きたいものである。

4.6 結言

最後に、田島氏の記事 [34] からの引用であるが、エネルギーリソースとしての核融合研究は、“end in mind (「出口から遡れ」)”，まず出口を見極めそのゴールに到達する戦略を考えるというアプローチをとるべきである。米国 NIF で DT 燃料を用いた核融合点火まであと一步のところまで来ている。その後追いで、DT 燃料での点火・燃焼の実現を経て先進燃料の可能性を探る…という段階を経て進めるのではなく、 $p^{11}\text{B}$ で点火燃焼を実現するには、今、どのような研究が必要なのか？そういう視点に立って研究戦略を立てていく必要があるのかもしれない。

参考文献

- [1] NIF 1.3 MJ 出力達成のニュース: <https://www.science.org/content/article/explosive-new-result-laser-powered-fusion-effort-nears-ignition>
- [2] M. Tabak *et al.*, Phys. Plasmas **1**, 1626 (1994).
- [3] R. Betti *et al.*, Phys. Rev. Lett. **98**, 155001 (2007).
- [4] Mervel Fusion: <https://marvelfusion.com/>
- [5] HB11: <https://hb11.energy/>
- [6] S. Atzeni and J. Meyer-Ter-Vehn, "The Physics of Inertial Fusion, Beam Plasma Interaction, Hydrodynamics, Hot Dense Matter", Int. Ser. Monographs on Phys. **125**, (Clarendon Press, Oxford, 2004).
- [7] 松浦秀明: プラズマ・核融合学会誌 **98**, 65 (2022).
- [8] G. S. Fraley *et al.*, Phys. Fluids **17**, 474 (1974).
- [9] G.H. Miley *et al.*, Proc. 6th Int. Conf. on High Power Particle beams (Beams '86, Kobe, Japan), 309 (1986); Fusion Technol. **19**, 43 (1991).
- [10] S. Kawata *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **51**, 3018 (1982).
- [11] S. Takase *et al.*, J. Phys. Soc. Jpn. **52**, 3400 (1983).
- [12] S. Skupsky, Nucl. Fusion **18**, 843 (1978).
- [13] T. Shiba *et al.*, Nucl. Fusion **27**, 589 (1987); **28**, 699 (1988).
- [14] T. Honda *et al.*, Nucl. Fusion **31**, 851 (1991).
- [15] Y. Nakao *et al.*, Fusion Technol. **22**, 66 (1992).
- [16] H. Nakashima *et al.*, Laser Part. Beams **11**, 137 (1993).
- [17] S. Atzeni and M.L. Ciampi, Nucl. Fusion **37**, 1665 (1997); Fusin Eng. Des. **44**, 225 (1999).
- [18] B.G. Logan *et al.*, LBNL-57122, Lawrence Berkeley National Lab., Berkeley, CA, USA, 2004.
- [19] T. Ohmura *et al.*, J. Phys.: Conf. Ser. **112**, 022068 (2008).
- [20] Y. Nakao *et al.*, Fusion Sci. Technol. **56**, 401 (2009).
- [21] S. Khoshbinfar *et al.*, High Energy Density Phys. **30**, 1 (2019).
- [22] J.J. Duderstadt, G.A. Moses, Inertial Confinement Fusion (N.Y., Wiley and Sons, Inc., 1982).
- [23] L.P. Feoktistov, Phys.-Uspekhi **41**, 1139 (1998).
- [24] V.S. Belyaev *et al.*, Laser Phys. Lett. **12**, 096001 (2015).
- [25] V.S. Belyaev *et al.*, Yad. Fiz. **78**, 580 (2015) [Phys. At. Nucl. **78**, 537 (2015)].

- [26] H. Hora *et al.*, *Laser Part. Beams* **33**, 607 (2015).
[27] S. Eliezer *et al.*, *Phys. Plasmas* **23**, 050704 (2016).
[28] M.L. Shmatov, *Phys. -Uspekhi* **62**, 70 (2019).
[29] M.J. Hay and N.J. Fisch, *Phys. Plasmas* **22**, 112116 (2015).
[30] S. Yu. Gus'kov and F. A. Korneev, *JETP Letters* **104**, 1 (2016).
[31] F. Consoli *et al.*, *Frontiers Phys.* **8**, 561492 (2020).
[32] L. Giuffrida *et al.*, *Phys. Rev. E* **101**, 013204 (2020).
[33] T. Sano *et al.*, *Phys. Rev. E* **100**, 053205 (2019).
[34] 田島俊樹：プラズマ・核融合学会誌 **93**, 21 (2017).