

高出力レーザーによるレーザー核融合

白 神 宏 之

Laser-Driven Fusion by High-Power Lasers

Hiroyuki SHIRAGA

Laser-driven inertial confinement fusion (laser fusion) has been investigated with large-scale high-power lasers since 1960's. Progress of new laser technology, such as multi-beam irradiation system, frequency conversion, beam smoothing, and chirped pulse amplification, significantly accelerated the laser fusion research. The first demonstration of ignition and burning of controlled nuclear fusion will be demonstrated soon by laser fusion in 2011-2012. Laser fusion demo power plants are expected to be constructed in 2020-2030. Laser drivers with large output energy, high efficiency, high repetition rate, long life, and low cost will be required for laser fusion reactors.

Key words: inertial confinement fusion, high-power laser, implosion, fast ignition, beam smoothing, chirped pulse amplification

現代の代表的な大出力レーザーである大型のガラスレーザーは、主としてレーザー核融合研究からの要請により開発・建設が進められてきた経緯がある。そして、レーザー出力が増強されるに伴い、レーザー核融合研究が進展してきた。しかしその過程は決して大出力化だけではなく、レーザー核融合プラズマ物理の要請からさまざまな高精度レーザー技術が開発・導入され、さらにそれらは多方面への応用をもたらした。本稿では、その様子を振り返りながら、レーザー核融合研究の現状と将来を概観する。

1. レーザーによる慣性閉じこめ核融合の原理と研究の端緒

核融合反応を起こしエネルギーを発生するためには、核融合燃料を高温・高密度状態にすることが必要である。熱平衡状態での核融合反応は熱核融合とよばれ、加速器などで高エネルギーイオンをターゲットに照射して起こすビーム核融合とは区別される。熱核融合では原子核の(熱速度での)平均運動エネルギーが比較的小さくても、熱速度分布中の高エネルギー側のすそ(熱外エネルギー)にある高速の成分により核融合反応を起こすことができる。これはマクスウェル分布自体の性質であり、統計力学におけるエ

ルゴード性の贈り物である。

磁場閉じ込め核融合では、密度は 10^{15} cm^{-3} 程度(室温1気圧気体の 10^{-5} 倍程度)と高くないが、プラズマを閉じ込めて反応時間を長く取ることで反応数を確保するのに対し、レーザーなどを用いた慣性核融合では、密度を 10^{26} cm^{-3} 程度(固体密度の1000倍程度)と極端に高くし、時間は短くとも衝突頻度を上げて反応数を稼ぐ。超高温・超高密度すなわち超高压力状態になった燃料プラズマは瞬時に熱的に膨張・飛散するが、それまでの時間すなわち慣性でとどまっている間だけ反応は続く。このような超高压物質を地上で人為的な外力により閉じ込めることは不可能であり、やがて飛び散るに任せるのである。その意味で、慣性「閉じ込め」という言葉はトリッキーである。慣性閉じ込め核融合は本質的に非定常である。

慣性核融合におけるもうひとつの重要な概念は、「自己点火」である。圧縮する燃料を冷たいまま保てるなら、燃料に与える熱エネルギーは小さくてすむ。その上で、燃料の一部のみを核融合点火させれば、点火部分から発生した核反応粒子が周辺部を加熱し燃焼波伝搬により全体が燃え広がる。自己点火するためには点火部の燃料の密度・半径積 ρR が、例えば最も容易な重水素(D)-三重水素(T)反

応の DT 燃料なら発生するアルファ粒子の飛程 (0.3 g/cm²) より大きいことが条件となる。自己点火により、慣性核融合のエネルギー効率は飛躍的に上がる。

慣性核融合プラズマは、たとえば点火燃焼状態だとエネルギー密度が 10¹³ J/cm³ オーダー (10¹⁶ Pa=100 Gbar の圧力に相当) という典型的な高エネルギー密度状態の物質である。これは太陽中心よりもさらに 1 桁以上高い値である。したがって慣性核融合研究は、それを実現するための高エネルギー密度工学である。エネルギー源としての制御核融合を目的とした場合、慣性核融合研究の本質は、取り扱可能な程度に小規模なパルスの熱核融合反応装置の実現である。超高密度状態を作る手法として、レーザーなど超高パワー密度のエネルギードライバーを用いた「爆縮 (implosion)」という概念を用いる。爆縮とは、照射するレーザーの光エネルギーを「プラズマの熱エネルギー→膨張反作用 (アブレーション) による燃料プラズマの運動エネルギー→燃料の圧縮仕事→燃料の熱エネルギー」とエネルギー変換し、時間空間的にパルス圧縮して高密度圧縮を行う、基本的に流体力学的な工学手法である。爆縮こそはレーザー核融合の根幹をなす概念であり、爆縮プラズマとはそのようなエネルギー変換デバイスであると考えることができる。

燃料の圧縮により超高密度を実現し小規模に核融合エネルギーを発生する「マイクロ核融合」の概念は、実は 1960 年のレーザー出現以前にすでに考案されていた。米国ローレンス・リバモア研究所 (リバモア研) で Teller のもとで研究していた Nuckolls が、1957 年ごろまでに「原爆による駆動を用いなくて水爆と同じ核融合エネルギー発生をどれだけ小規模で実現できるか」について検討し、1960 年ごろまでには炉心プラズマとして「ビー玉程度までサイズを小さくした」設計を完成していたようである¹⁾。そのキーポイントが燃料の高密度圧縮である。Nuckolls の検討時には高パワー密度が必要とされるエネルギードライバーの種類は白紙であり、机上の空論であった。しかしその後、1960 年に Maiman によってルビーレーザーが発明された²⁾ が、Maiman はリバモア研で Nuckolls と同様の研究を行っていた Kidder の友人の友人であり、大出力レーザーの実現性が議論された。その結果、リバモア研ではマイクロ核融合のドライバーとしてレーザーを採用することが着想されたようである。確かに高パワー密度エネルギードライバーとしてのレーザーのポテンシャルは、その後のハイパワーレーザーの発展をみれば明白である。

レーザーによる爆縮の概念は 1972 年になって初めて公表された³⁾。これは主燃料を個体密度の 1000 倍程度に圧

縮し、その中心部に 5 keV 以上の中心点火スパークを形成するというシナリオであり、レーザー核融合の具体的設計提案であった。この実現を目指して 1970 年代後半から 1980 年代前半にかけて米国、日本、ヨーロッパの各国にて大型レーザーが建設され、爆縮核融合の本格的研究がスタートした。

なお、慣性核融合ドライバーとしては、当初ガラスレーザーのみならず炭酸ガスレーザー、KrF レーザー、相対論的電子ビーム、軽イオンビーム、重イオンビーム等も検討されたが、電子輸送や装置の制御性の観点から、実験用にはガラスレーザーが最も適しているといえる。しかし発電炉用には効率と繰り返しの観点からガラスレーザーではなく、後述の新しいレーザーが求められる。その観点から、KrF レーザー、重イオンビームについては現在も研究が続けられている。

2. 爆縮核融合研究の進展とレーザー技術のもたらしたもの

爆縮核融合研究の進展においてレーザー技術の展開がどのように作用したかを、研究開発の流れとして時間的に振り返って見てみたい。興味深いことに、プラズマ物理の問題を解決するために新しいレーザー技術が要請され、また逆に新しいレーザー技術が導入されることでレーザー核融合研究に新しい進展がもたらされてきた。その様子を表 1 にまとめた。

2.1 多ビーム高出力装置の建設：本格的爆縮実験の開始

爆縮核融合では球状の燃料ターゲットを均一に照射し圧縮するので、1980 年代前半から米・日・欧で建設された本格的レーザー装置はいずれも球対称照射系あるいはそれに準ずる多ビームのシステムであり、これにより本格的爆縮実験が行われるようになった。しかし後述するように、照射の球対称性あるいは一様性に対する要請は、この段階で考えられていたよりもはるかに厳しいものであることが、その後間もなく明らかとなる。その結果、1990 年代後半に改造された米国ロチェスター大学の OMEGA-UG 装置は 60 ビーム、その後米国リバモア研で建設された NIF (National Ignition Facility) 装置は 192 ビームという、きわめて多ビームの装置となった。

2.2 高調波変換技術：高速電子問題の解決と高温圧縮

高出力と制御性の観点からほとんどの爆縮用レーザー装置はガラスレーザーであった。しかし、その基本波である 1.05 μm 光では、プラズマ中で発生する高速電子⁴⁾ が多すぎて圧縮する前に燃料の温度が上がってしまうプレヒートとよばれる問題があり、またアブレーションによる駆動圧

表1 レーザー核融合研究の進展とレーザー技術開発.

年次	達成項目	国	研究機関
爆縮用レーザーの建設と高温プラズマ達成			
爆縮実験用 10~100 kJ 級多ビーム高調波レーザー建設			
1980	OMEGA (24 ビーム, ω : 5 kJ, 3ω : 3 kJ)	米	ロチェスター大学
1983	激光 XII 号 (12 ビーム, ω : 20 kJ, 2ω : 15 kJ, 3ω : 10 kJ)	日	大阪大学
1985	NOVA (10 ビーム, ω : 100 kJ, 3ω : 50 kJ)	米	リバモア研
1986	Phebus (2 ビーム, ω : 20 kJ, 3ω : 10 kJ)	仏	リメイユ研
1995	OMEGA-UG (60 ビーム, 3ω : 40 kJ)	米	ロチェスター大学
高温度高中性子イールド爆縮実験			
1985	中性子 1 兆個, 激光 XII 号, 2ω : 15 kJ	日	大阪大学
1986	中性子 10 兆個, 激光 XII 号, 2ω : 15 kJ, $\eta=0.2\%$, 1 億度	日	大阪大学
1986	中性子 20 兆個, NOVA, 3ω : 25 kJ	米	リバモア研
1995	中性子 100 兆個, OMEGA-UG, 3ω : 30 kJ, $\eta=1.0\%$	米	ロチェスター大学
照射一様性改善と高密度爆縮達成			
照射一様性の改善技術			
1984	ランダム位相版 (RPP: random phase plate)	日	大阪大学
1987	ISI (induced spatial incoherence)	米	NRL
1989	SSD (smoothing by spectral dispersion)	米	ロチェスター大学
高密度爆縮実験			
1987~1988	個体密度の 200 倍, OMEGA, 3ω : 3 kJ (クライオ DD)	米	ロチェスター大学
1987	個体密度の 100 倍, NOVA, 3ω : 20 kJ (ガス DT)	米	リバモア研
1988~1990	個体密度の 600 倍, 激光 XII 号, 2ω : 10 kJ (CDT プラスチック)	日	大阪大学
照射一様性の高度化と流体等価爆縮			
1993~	激光 XII 号 ASE (amplified spontaneous emission) ビーム発生	日	大阪大学
1994	NOVA, 間接照射爆縮	米	リバモア研
1995~	NIKE (KrF, 一様性=0.2%), 直接照射, 基礎実験	米	NRL
1995~	OMEGA-UG (60 ビーム, 3ω : 40 kJ), 直接照射爆縮	米	ロチェスター大学
1995~	激光 XII 号部分コヒーレント光, 直接照射爆縮	日	大阪大学
2004	OMEGA-UG 直接照射爆縮で流体等価爆縮	米	ロチェスター大学
超高強度レーザーと高速点火実験			
超高強度レーザー建設			
~1996	1 PW レーザー, 1 ビーム	米	リバモア研
~1997	100 TW レーザー, 1 ビーム	日	大阪大学
~2001	1 PW レーザー, 1 ビーム	日	大阪大学
2003~2007	10 kJ/1~10 ps (1~10 PW) LFEX レーザー, 4 ビーム合成	日	大阪大学
高速点火実験			
2000	爆縮コアの加熱デモ, 激光 XII 号+100 TW レーザー	日	大阪大学
2002	爆縮コアを 1000 万度に加熱成功, 激光 XII 号+1 PW レーザー	日	大阪大学
2009~	FIREX-I (10 kJ 爆縮+10 kJ 加熱), 爆縮コア加熱 T=5 keV 目標	日	大阪大学
核融合点火燃焼実験計画			
2010~	NIF (192 ビーム, 3ω : 1.8 MJ/500 TW), G=10~20, 間接照射	米	リバモア研
(2013~)	LMJ (240 ビーム, 3ω : 1.8 MJ/500 TW), G=10~20, 間接照射	仏	CEA
(2014~)	FIREX-II (50 kJ 爆縮+50 kJ 加熱), G=1~10, 直接照射+高速点火	日	大阪大学

力が低い. これらを解決するためにより短波長のレーザー光が求められた. これに応じて, 主として KDP 等の非線形光学結晶を用いた波長変換技術が開発され, 照射レーザーは二倍高調波 (0.53 μm) や三倍高調波 (0.35 μm) に短波長化された.

波長変換技術そのものは以前から知られていたが, 大口径, 高フルーエンスでの高効率変換には, 数十 cm から

メートル級の大型の結晶育成や, 高精度光学素子としての研磨技術など, 多くの困難があった. この高調波発生技術により, プレヒートが少なく効率の高いアブレーション駆動による爆縮が可能となった (図 1).

核融合点火に必要な 5~10 keV を実現することは, 早々と 1985~1986 年に大阪大学の激光 XII 号ガラスレーザー (波長 0.53 μm , 光出力 15 kJ/12 ビーム) (図 2) により達成

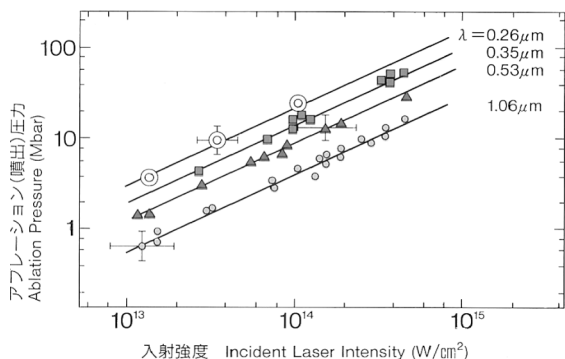


図1 レーザー照射により駆動されるアブレーション圧力のレーザー波長依存性。

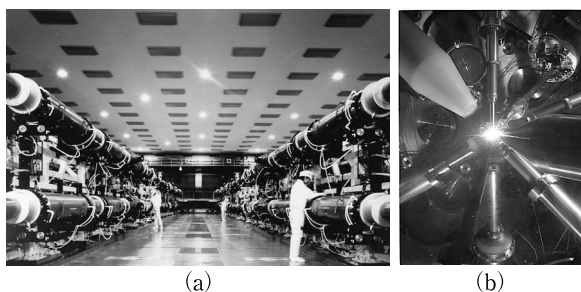


図2 ガラスレーザー激光 XII 号。(a) レーザー室、(b) ターゲット照射時のチャンパー内部。

された^{5,6)}。これは LHART (large high aspect ratio target) とよばれる、直径 1000 μm 、厚さ 1 μm 程度の薄いガラスマイクロバルーンに DT ガスを封入したターゲットを用い、多重衝撃波を爆縮コア形成時にターゲット中心に集中させるという方法で、このとき DT 核融合中性子 $10^{12}\sim 10^{13}$ 個/ショット (核融合利得 0.2%) が発生した。LHART はシェルを徐々にアブレーティブ加速するが、シェルが薄いので容易に高速度爆縮になり、高い温度が得られる。LHART により、多重衝撃波を使って流体工学的に燃料を加熱することを実証できた。ただし実験で成功したのは、シェルがほとんど減速相をもたない、すなわち減速に入る前に衝撃波集中が終わる場合のみである。減速相が顕著な場合には、温度は上がっておらず、その原因は減速時のシェル/燃料界面での流体不安定性により界面が歪み、往復する衝撃波による断熱圧縮が維持できなかったと考えられている⁷⁾。

2.3 照射一様性の向上：高密度圧縮

主燃料を高密度に圧縮する試みは、1980 年代後半に本格化した。大阪大学の激光 XII 号レーザー (波長 0.53 μm 、光出力 8 kJ/12 ビーム) で重水素化ポリエチレン (CD) シェルを爆縮し、固体密度の 600~1000 倍クラスの圧縮が実証された⁸⁾。この場合のターゲットは直径 500 μm 、殻

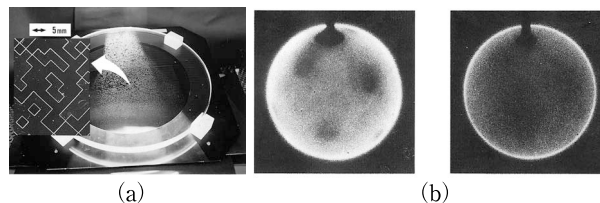


図3 (a) ランダム位相板、(b) ランダム位相板の有無 (左：無、右：有) によるレーザー照射球ターゲットの X 線発光強度分布。

厚 8 μm と厚いシェルで、完全にアブレーティブな爆縮であった。この成果は、真球度と殻厚一様性が 99% 以上の高品質シェルターゲット、ランダム位相板⁹⁾ により一様性を向上したレーザービームの使用 (図 3)、および放射化法による高精度診断など、新たな技術の導入によるものである。この結果により、燃料の超高密度圧縮も流体工学的に可能であることが実証された。ランダム位相板とは、ビームの開口を細かくセグメント化しランダムに選んだセグメントに、半波長の位相差を施すものである。これはビームの空間コヒーレンスを破壊し焦点位置で混合し近視野像内の空間分布を焦点面で均一化することができるデバイスであり、「レーザーはコヒーレント」という概念を覆す技術であった。

この実験で得られた $\rho R = 0.5 \text{ g/cm}^2$ 、密度 600 g/cm^3 は、一次元球対称シミュレーションの予測値と一致した。つまり、設計通りの高密度爆縮がなされたことになる。ところが、このときの中性子イールドは予測より 1~3 桁低い値であった。すなわち、主燃料爆縮は成功したが、中心ホットスパーク形成には失敗したと解釈された¹⁰⁾。その理由は、依然として爆縮一様性が不十分であるためと考えられた。

2.4 照射一様性のさらなる高度化：流体不安定性の克服、流体等価爆縮

上記までの結果、レーザー核融合に必要な高温・高密度はそれぞれ個別には達成されたが、同時達成ではない。これより、爆縮非一様性が最も重要な問題であると認識され、これをいかに克服するかが最重要の物理的・工学的課題となった。これ以後のレーザー装置建設では、OMEGA では 60 ビーム、NIF では 192 ビームと、多ビーム化によって照射一様性を確保する試みがなされると同時に、レーザー光の照射パターン自体を向上するため、ランダム位相板からさらに飛躍して、スペクトル制御による均一化¹¹⁾、部分コヒーレント光¹²⁾ など、レーザー光のコヒーレンス制御技術が駆使された。

1990 年代には次の研究ステップとして、そのような均

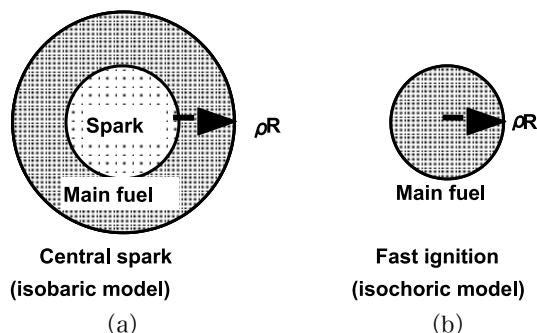


図4 中心点火と高速点火の燃料構造.

一照射技術を用いた「流体等価プラズマ」の実現が課題となった。これは、規模が小さいことを除いて密度、半径収縮率などの流体力学的パラメーターが点火燃焼プラズマと同等の高密度主燃料中に高温中心スパークを形成するもので、点火燃焼達成に必要とされるのと同様のレーザー、ターゲット、および爆縮の品質が要求される。米国では1994年にリバモア研のNOVAレーザーにおいて間接照射によりこれを達成したと発表し、NIF建設へのステップとした¹³⁾。ロチェスター大学OMEGAレーザーでは、直接照射クライオ重水素燃料ターゲットを用いて現在精力的に実験が進められ、低アイセントロップ ($\alpha \sim 4$)、半径収縮率 ~ 20 で、主燃料 $\rho R \sim 0.3 \text{ g/cm}^2$ のホットスパーク/主燃料構造を実現するに至っている¹⁴⁾。

2.5 CPAによる超短パルス超高強度レーザー：高速点火核融合へのアプローチ

一方、近年取り上げられている高速点火方式では、高密度に圧縮された燃料に外部から同期して短時間内に加熱エネルギーを注入し、点火部を形成する。中心点火では、中心スパークの半径と周りの主燃料の厚さがほぼ等しくなるのに対し、高速点火では中心スパーク部を作らなくてよい。ため、燃料は中実で等密 (isochoric) である。したがって、同じ主燃料 ρR であるなら、コアの半径は中心点火 (図4 (a)) の半分 (図4 (b))、つまり燃料の質量は約1桁小さくてすむ。それに伴い、所要のレーザーエネルギーも約1桁小さくなるので、炉設計の観点からは自由度が大きくなる。これは、同じ ρR を保って燃料の質量を小さくするという慣性核融合の原理に添うものであり、高速点火がadvanced targetとして真に画期的なのはこの点においてである。

高密度に圧縮された燃料を瞬時に加熱する高速点火方式は、アイデア自体は非公式ながら1983年には存在していた¹⁵⁾。その後1985年にチャープパルス増幅技術が実現し¹⁶⁾、超短パルス ($\sim 1 \text{ ps}$) でペタワット ($\text{PW} = 10^{15} \text{ W}$) オーダーの超高強度レーザーが得られるようになり、2000

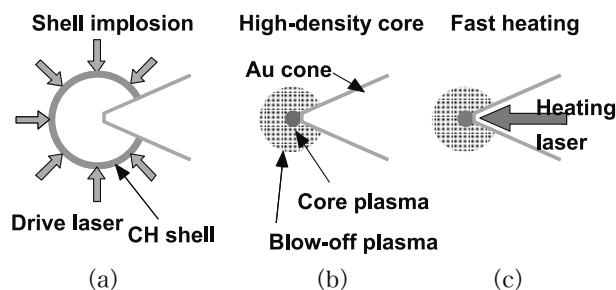


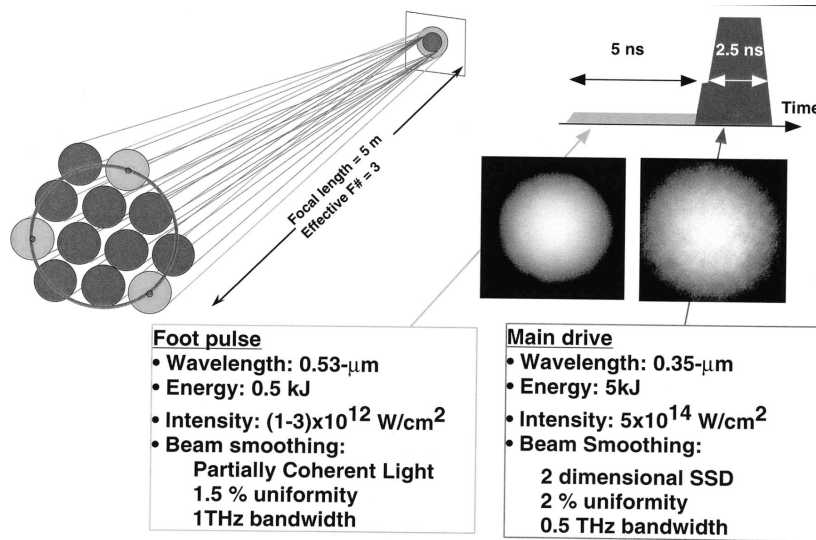
図5 コーン付きシェルターゲットによる高速点火シナリオ。(a) 爆縮レーザー照射, (b) 高密度爆縮コアの形成, (c) 超高強度超短パルスレーザーの注入による爆縮燃料の高速加熱.

年代に入ってはじめて高速点火の研究が現実的となった^{17,18)}。

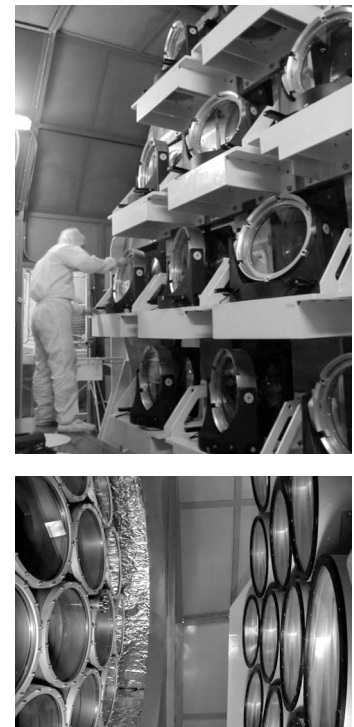
加熱エネルギー源としては、超短パルス超高強度レーザー照射により発生させた高エネルギー電子流が有力候補である。すなわち、高速点火の原理はビーム加熱であり、大電流ビーム・プラズマ相互作用が物理機構となる。高速電子発生レーザーのレーザー波長依存性などの理由から、加熱用レーザーとしては $1.05 \mu\text{m}$ レーザーが主流に考えられているが、コアプラズマ周辺にはレーザーのカットオフ密度よりはるかに高い密度のプラズマが存在し、その中をできるだけコアに近い位置までエネルギーを伝搬させる必要がある。この手法としては、まずレーザー・プラズマ相互作用の非線形性を利用して自己収束モード的伝搬¹⁹⁻²¹⁾を行わせる方式が提案され、さらに新しい手法として、シェルターゲットに金属製のコーンを設けることが提案され (図5) て実験に導入された。大阪大学では爆縮用の激光XII号レーザーに併設して1997年に100 TW ($50 \text{ J}/0.5 \text{ ps}$)、2001年に1 PW ($1 \text{ kJ}/1 \text{ ps}$) のビームラインが完成し、日英の協力研究によりコーン付きシェルターゲットを用いて激光XII号により圧縮されたプラズマを約1 keVまで追加熱することに成功した^{22,23)}。この実験において特筆すべきは、加熱用レーザーから爆縮コア加熱へのエネルギー効率は約20~30%にも達していることが明らかになったことである。

2.6 多様な基礎実験装置：高エネルギー密度科学の展開

高強度レーザーにより生成されるプラズマは、超高温・超高密度の物質であり、高エネルギー密度物理学としての研究展開が期待される。例えば、天体現象の一部をある程度実験室で模擬できることから、実験室宇宙物理学や実験室惑星科学という分野がひらかれつつある。また超高温ではない場合にwarm dense matterという新しい研究が進められている。さらにはプラズマをX線やEUV光、高エネルギー電子やイオンなどの放射光源とする応用研究も展開している。これらの基礎科学や応用においては、必ずしも



(a)



(b)

図6 HIPER 照射系. (a) 多波長多ビーム照射配位とビーム特性, (b) バンドル照射部のターニングミラーと集光レンズ系.

球対称の爆縮用レーザーではなく、平板ターゲットをさまざまな照射条件で実験できるための照射配位のほうが有用である。大阪大学では、爆縮の基礎過程の研究やさまざまな高エネルギー密度状態の物理研究を目的として、激光 XII 号レーザーの第 2 照射チェンバー室を改造し、全ビームを束ねて高強度で一方から多様な条件で照射できる装置とした。図6は大阪大学のHIPER装置である。「HIPER」は high-intensity physics experimental research の略で、基礎実験に特化した照射系である。これは出力光のレーザー波長 (1.05 μm , 0.53 μm , 0.35 μm)、ビームスムージング (コヒーレント光, 部分コヒーレント光, SSD 光)、パルス波形 (100 ps~20 ns) などを選択あるいは混合して実験に供給することができる装置となっており、幅広い分野の多くのユーザーによる共同利用・共同研究に使われている。

3. レーザー核融合研究の現状

レーザー核融合研究は著しい進展をみせ、間もなく核融合点火・燃焼を達成する状況にある。わが国を中心とした高速点火核融合と海外の動向について概観したい。

3.1 高速点火核融合の進展

コーン付きターゲットで先述の CD シェルのような高密度爆縮ができ、これを 5~10 keV まで加熱できれば、点火・燃焼は既存技術で確実に達成できると考えられる。そ

のため大阪大学では FIREX (fast ignition realization experiment) 計画を推進しており、その第一段階である FIREX-1 計画として、先のペタワットレーザーに替えてさらに1桁高出力である 10 kJ/1~10 ps の加熱用レーザー LFEX (Laser for First Ignition Experiment) が建設された。これを用いて 2009 年より高速点火統合実験が開始され、すでに高速加熱による核融合中性子発生数の増大を観測している²⁴⁾。さらに加熱効率を向上し、2010~2011 年には目標である燃料温度 5~10 keV への加熱を達成すべく、現在ビーム品質の向上と出力エネルギーの増強を図っている。これが達成されれば、第二段階 (FIREX-2) として、爆縮用ドライバー・加熱用レーザーともにスケールアップし、高速点火方式による点火燃焼を実証する計画である。

また、高速点火の統合実験はこれまで大阪大学のみで行われていたが、advanced target としての重要性から、米国 OMEGA レーザーでも実験が開始され¹⁴⁾、NIF でも計画が検討されている。

3.2 米国 NIF における点火燃焼実験の現状

レーザー発明から 50 年を経て、米国リバモア研の NIF にて、間接照射・中心点火方式で核融合点火燃焼の達成が目前に迫っている。先にも触れたが、NIF は 192 ビーム、3 ω 出力 1.8 MJ の世界最大のレーザー装置で、2010 年 5 月に建設完成、稼働開始し、2010 年 9 月 29 日にはついにク

ライオ燃料層をもつターゲットに 1 MJ を投入する統合実験を開始し、予測通りの成果が得られたとの報告がごく最近なされた²⁵⁾。現段階ではまだ燃料中の三重水素の比率を下げて核融合出力を低く抑え、さまざまなチューニングを行っている状態だが、レーザー装置、クライオターゲット装置、プラズマ計測装置はすべて順調に稼働している。2011～2012 年ごろまでに三重水素：三重水素の比率を目標の 50：50 にし、核融合利得 (=核融合出力エネルギー/投入レーザーエネルギー) = 10 程度を達成する計画である。これまでの基礎研究や計算コードによる爆縮設計の信頼性からみて、実験の成功はほぼ確実と思われる。

人類初の制御核融合の点火燃焼実現は、今後 1, 2 年のうちに NIF において達成されるであろう。フランスにおいても NIF とほぼ同様のレーザー装置である LMJ (Laser Megajoule) が約 3 年遅れで追隨しており、2014 年には点火燃焼実験の計画である。

4. 今後の展望

4.1 レーザー核融合炉にむけて

レーザー核融合炉としてどのようなデザインが可能か。わが国では、高繰り返しレーザーとコーン付き燃料の高速点火核融合を基本とした、固体壁または液体壁の炉設計が進められており²⁶⁾、FIREX-2 の後に、200 kJ/1 Hz のレーザーで 2 MWe の正味電気出力を得る実証炉 LIFT (laser inertial fusion test) (図 7) 等を経て、1 MJ/16 Hz のレーザーで 600～1200 MWe を出力する商用プラント KOYO-Fast に至る。

レーザー核融合炉の大きなメリットのひとつに、炉および炉心プラズマとエネルギードライバーであるレーザーを空間的に分離することができる点があげられる。高価なド

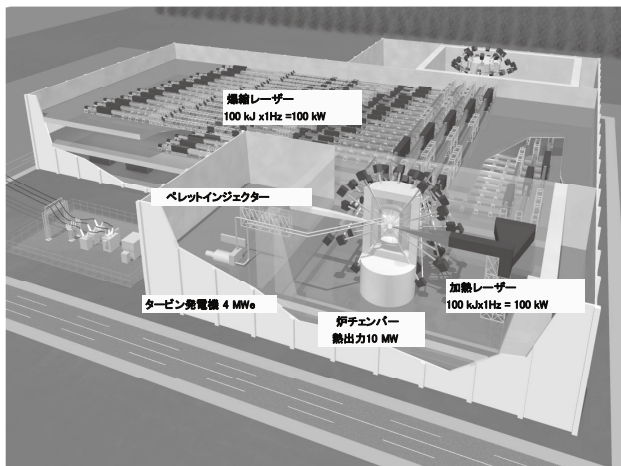


図 7 レーザー核融合発電実証炉 LIFT の概念設計。

ライバーは、炉システムの問題から切り離すことができる。また、ターゲット設計により、炉心プラズマにバリエーションを得やすいことも大きな特徴である。

米国では、NIF の点火燃焼を実現した後の計画として LIFE (laser inertial fusion engine) 計画が提案されている。これは、核融合/核分裂ハイブリッド炉を構成し、核融合反応で生成される豊富な中性子を用いて炉壁部分に装着した使用済み核分裂燃料を照射し、さらなるエネルギー生成と核変換による消滅処理を同時に行うものであり、純粋な核融合炉より効率が高い。核融合炉心プラズマとしては NIF ターゲット設計を基準にし、出力 1 MJ のレーザーを 15 Hz で照射、熱出力 3000 MWth を発生し、30 年間連続運転する。NIF の点火燃焼が成功すれば、その 20 年後には発電炉ができるとの果敢な提案である。

4.2 レーザーに求められるもの

おそらく最も大きな開発課題は、大出力高ピークパワーで高繰り返しレーザー技術であろう。高速点火核融合をベースとした先述の KOYO-Fast でのレーザーの仕様は、爆縮用に効率 13% の 1.1 MJ/32 ビーム、加熱用に効率 5.4% の 100 kJ/1 ビームで、16 Hz 動作となっている。爆縮用レーザーのうちフットパルスはビーム平滑化のため広帯域増幅を必要とするので OPA (光パラメトリック増幅) とし、効率を要する主パルスは狭帯域動作とする。加熱用レーザーも広帯域が必要なので、OPCPA (optical parametric chirped pulse amplification) を採用する。

レーザー核融合炉では、ドライバーレーザーはモジュール化が可能であり、1 台で大出力のレーザーでなくても、ある程度の出力規模のモジュールさえできればあとは台数を増やせばよいという容易さがある。そのようなレーザーの候補として、冷却した Yb:YAG をレーザー媒質とする半導体レーザー励起固体レーザーの開発が進められている²⁷⁾。

セラミックレーザー材料は高繰り返しに適し、長寿命、また Yb は高出力半導体レーザーの発振波長とマッチングがよく、高効率、低コスト化の可能性が高い。セラミック材料技術の最近の進歩により、単結晶に匹敵する材料が得られるようになってきた。励起用の高出力半導体レーザーのコストダウンも大きな要因である。実際、レーザー核融合発電炉のコストのかなりの部分が半導体レーザーによるものになると考えられ、他の産業との関連や量産化が不可欠である。開発技術としては、高輝度半導体レーザー、大型セラミックス材料、高平均出力光学素子、高破壊耐力光学薄膜、低温冷却半導体レーザーなど、多くの課題があり、着実な進展が望まれる。

現在の代表的高出力レーザーである大型ガラスレーザーは、レーザー核融合研究からの要請により開発・建設されてきた。そして、レーザー出力の増強に伴い、レーザー核融合研究が進展してきた。その過程でさまざまな高出力レーザー技術が開発され、それらは、核融合はもとより多方面への応用をもたらした。1960年のレーザー発明から50年を経て、レーザー核融合はいよいよ核融合点火燃焼実験を開始するに至り、それは今後1、2年で達成される見込みである。核融合点火燃焼は、科学技術開発史上の大きな出来事として人々に記憶されることとなるであろう。その時点で、人類のエネルギー資源に関する認識は大きく変わるのではないだろうか。

核融合点火燃焼が達成されれば、レーザー核融合炉の少なくとも炉心プラズマは実現したことになる。ドライバーとしてはさらに高性能・高出力レーザーの開発が求められているが、早ければ2030年ごろには、磁場閉じ込めよりも早くレーザー核融合発電プラントが実現しているかもしれない。

本稿執筆の機会を与您いただきました「光学」編集委員会に深く感謝いたします。また、記述された内容の一部は直接的に著者と共同研究者の方々との協力で生まれたものであり、関係各位に感謝する次第です。

文 献

- 1) J. Nuckolls: "Contribution to the genesis and progress of ICF," *Inertial Confinement Nuclear Fusion: A Historical Approach by Its Pioneers*, ed. G. Velarde and N. Carpintero-Santamaria (Foxwell & Davies, UK, 2007) pp. 1-48.
- 2) T. H. Maiman: "Stimulated optical radiation in ruby," *Nature*, **187** (1960) 493-494.
- 3) J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen and G. Zimmerman: "Laser compression of matter to super-high densities: Thermonuclear (CTR) applications," *Nature*, **239** (1972) 139-142.
- 4) K. Estabrook and W. L. Kruer: "Properties of resonantly heated electron distributions," *Phys. Rev. Lett.*, **40** (1978) 42-45.
- 5) C. Yamanaka, S. Nakai *et al.*: "Laser implosion of high-aspect-ratio targets produces thermonuclear neutron yields exceeding 10^{12} by use of shock multiplexing," *Phys. Rev. Lett.*, **56** (1986) 1575-1578.
- 6) C. Yamanaka, K. Mima, S. Nakai, T. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Kato, K. Nishihara, T. Mochizuki, M. Yamanaka, M. Nakatsuka *et al.*: "Initial confinement fusion research by Gekko Lasers at ILE Osaka and target design for ignition," *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986, vol. 3* (1987) p. 33-46.
- 7) H. Takabe, M. Yamanaka *et al.*: "Scalings of implosion experiments for high neutron yield," *Phys. Fluids*, **31** (1988) 2884-2893.
- 8) H. Azechi, T. Jitsuno *et al.*: "High-density compression experiments at ILE, Osaka," *Laser Part. Beams*, **9** (1991) 193-207.
- 9) Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga, S. Arinaga, Y. Kitagawa, M. Nakatsuka and C. Yamanaka: "Random phasing of high-power lasers for uniform target acceleration and plasma-instability suppression," *Phys. Rev. Lett.*, **53** (1984) 1057-1060.
- 10) H. Takabe, K. Nishihara, K. Mima, S. Nakai, H. Sakagami, A. Nishiguchi and C. Yamanaka: "Theoretical studies on non-linear stages of hydrodynamic instability in laser driven implosion," *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1992, vol. 3* (IAEA, Vienna, 1993) p. 143-150.
- 11) S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler, R. S. Craxton, S. Letzring and J. M. Soures: "Improved laser-beam uniformity using the angular dispersion of frequency-modulated light," *J. Appl. Phys.*, **66** (1989) 3456-3462.
- 12) N. Miyanaga, S. Matsuoka, A. Ando, K. Tsubakimoto, S. Amano, M. Nakatsuka, T. Kanabe, T. Jitsuno and S. Nakai: "Improvement of laser irradiation uniformity in GEKKO XII glass laser system," *Proc. SPIE*, **2633** (1995) 183-191.
- 13) M. D. Cable, S. P. Hatchett, J. A. Caird, J. D. Kilkenny, H. N. Kornblum, S. M. Lane, C. Laumann, R. A. Lerche, T. J. Murphy, J. Murray, M. B. Nelson, D. W. Phillion, H. Powell and D. B. Ress: "Indirectly driven, high convergence inertial confinement fusion implosions," *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1994) 2316-2319.
- 14) D. Mayerhofer: to be published in *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference* (Daejeon, Korea, 2010).
- 15) 山中千代衛: 金剛計画 (第1期) 検討作業報告書別冊 (1983) p. 5. (unpublished).
- 16) D. Strickland and G. Mourou: "Compression of amplified chirped optical pulses," *Opt. Commun.*, **56** (1985) 219-221.
- 17) N. G. Basov, S. Yu. Gus'kov and L. P. Feokistov: "Thermonuclear gain of ICF targets with direct heating of ignitor," *J. Sov. Laser Res.*, **13** (1992) 396-399.
- 18) M. Tabak, J. Hammer, M. E. Glinsky, W. L. Kruer, S. C. Wilks, J. Woodworth, E. M. Campbell, M. D. Perry and R. J. Mason: "Ignition and high gain with ultrapowerful lasers," *Phys. Plasmas*, **1** (1994) 1626-1634.
- 19) K. A. Tanaka, R. Kodama *et al.*: "Studies of ultra-intense laser plasma interactions for fast ignition," *Phys. Plasmas*, **7** (2000) 2014-2022.
- 20) R. Kodama, K. Mima *et al.*: "Fast ignitor research at the Institute of Laser Engineering, Osaka University," *Phys. Plasmas*, **8** (2001) 2268-2274.
- 21) Y. Kitagawa, Y. Sentoku, S. Akamatsu *et al.*: "Petawatt-laser direct heating of uniformly imploded deuterated-polystyrene shell target," *Phys. Rev. E*, **71** (2005) 016403.
- 22) R. Kodama, P. A. Norreys *et al.*: "Fast heating of ultrahigh-density plasma as a step towards laser fusion ignition," *Nature*, **412** (2001) 798-802.
- 23) R. Kodama, H. Shiraga *et al.*: "Nuclear fusion: Fast heating scalable to laser fusion ignition," *Nature*, **418** (2002) 933-934.
- 24) H. Shiraga: to be published in *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference* (Daejeon, Korea, 2010).
- 25) J. Lindl: to be published in *Proc. 23rd IAEA Fusion Energy Conference* (Daejeon, Korea, 2010).
- 26) レーザー核融合炉設計委員会報告書: "高速点火レーザー核融合炉発電プラントの概念設計", 大阪大学レーザーエネルギー学研究所/IFEフォーラム・レーザー核融合技術振興会 (2006).
- 27) 宮永憲明, 河仲準二ほか: "レーザー設計", プラズマ・核融合学会誌, **83** (2007) 3-18.

(2010年10月22日受理)