

## 超高強度レーザーが拓く新しい熱核融合

兒玉了祐\*

Innovative Approach of Thermonuclear Fusion with Ultra-Intense Lasers

Key Words : thermonuclear fusion, ultra-intense laser, laser fusion, plasma, ignition

### 1. はじめに

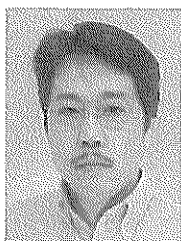
地球温暖化などの環境問題に関する関心が高まる一方化石燃料が枯渇していく中で、核融合は夢の代替エネルギーとして長い間期待されながらも人類は、このエネルギーをいまだ我が物としていない。エネルギーを取り出すことを目的とした制御熱核融合は、如何に核融合燃料を1億度以上の高温プラズマに加熱し、十分な核融合反応を起こす状態に保持するかということである。世界的には大きく分けて2つの主要なアプローチがある。1つは磁場核融合といわれるもので、磁場の力で高温プラズマを1定時間以上保持しようとするものである。もう1つが慣性核融合で主にレーザーを使って超高密度に燃料を圧縮して瞬間的に核融合燃焼させ、これを繰り返し行う方式である。前者は燃焼し続けるボイラー、後者はパルス運転するエンジンに例えられる。

近年高出力レーザーの技術が急速に進み、コンパクトで経済的な新しいレーザー核融合の可能性が現実味をおびてきている。超高強度レーザーという新しいレーザーを使って核融合エネルギー開発に絶好の道筋を作ると期待されているこの新しい核融合点火方法の原理実証へ向け、精力的な研究が進められている。最近、日英国際協力によりこの新しい核融合点火法につながる画期的な実験の成功があった<sup>[1]</sup>ので、その成果を中心に超高強度レーザーを使った

新しいレーザー核融合研究の概要を述べる。

### 2. 先進的な核融合点火方法

レーザー核融合の概念が提案されたのは1970年代である<sup>[2]</sup>。球状の燃料を周りからレーザーで照射、高温化しアブレーションという現象で球殻燃料を中心に向かって加速し圧縮する爆縮という概念で、核融合燃料を固体密度の1000倍近い超高密度に圧縮し点火・燃焼させ方式である。これを実現するため各国で大型レーザーが建設された。日本でも、80年代から90年代にかけ核融合点火に必要な超高密度(固体密度の千倍)<sup>[3]</sup>と超高温(一億度)の状態を別々に達成した。その後90年代より点火燃焼に向けた大型装置が欧米で計画され、2010年ごろ人類初の核融合点火を目標として、メガジュールのエネルギーを超える超大型レーザー装置の建設がはじまった。一方、よりコンパクトな新しい点火方法<sup>[4,5]</sup>がレーザー技術の進歩に伴い現実味を帯びてきている。レーザーのエネルギーを1兆分の1秒の時間に集中させることで、ピーク強度が世界電力の数百倍にもなる超高強度レーザーを使う方法である。この新しいレーザー技術を使って、これまでよりはるかに小さなエネルギーで効率的に核融合点火燃焼を起こす可能性が追求されている。これは、図1に示すように圧縮した核融合燃料を外部から強制的に、超高強度レーザーで加熱・点火しようとする方法である。従来の方法が、ピストンで燃料を圧縮し自然に点火させるディーゼルエンジンに例えられるのに対して、新しい点火方法はちょうどガソリンエンジンのように点火プラグで圧縮燃料を強制的に点火し燃焼させる方法である。圧縮と加熱を別々に最適化できるため効率的な核融合が理論的に予測されている。これを実現するためには2つの大きな技術の進展が必要である。1つは点火プラグに相当する超高強度レーザー技術で



\* Ryusuke KODAMA  
1961年4月25日生  
1990年大阪大学大学院工学研究科電気  
工学専攻後期課程修了  
現在、大阪大学・レーザー核融合研究  
センター、助教授、工学博士、プラズ  
マ理工学  
TEL 06-6879-8754  
FAX 06-6879-8752  
E-Mail ryo@ile.osaka-u.ac.jp

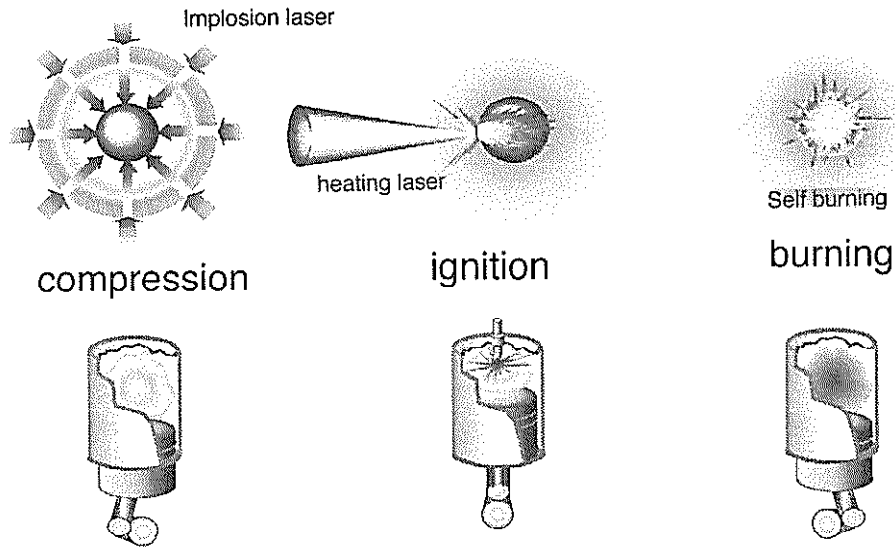


図1 新しいレーザー核融合の概念図。爆縮用のレーザーで核融合燃料を高密度に圧縮し、加熱用超高強度レーザーで点火する。その原理はガソリンエンジンに似ている。

あり、現在、ペタワットの出力を得るようになった。もう1つは点火プラグである超高強度レーザーで効率的に高密度核融合燃料を加熱させるプラズマ制御技術である。

### 3. 高密度プラズマ加熱

効率的な加熱を実現するためには、超高強度レーザーとプラズマとの複雑な相互作用を理解する必要がある。超高強度レーザーの電界の強さは電子を光のスピードに近づけ、電磁力の強さは1000億気圧にも達し地上で最も高い圧力を生み出す。このような極限状態において、これまででない様々な物理現象が発見されている<sup>[6]</sup>。この基礎物理過程を理解した上で最も効果的に高密度プラズマを加熱する方法が考案された。レーザー圧縮した燃料の周りには厚い雲のようにプラズマが存在し、普通の光はそこで

侵入を遮断される。図2に示すように超高強度レーザーのような極めて強い光を照射すれば、光の圧力や相対論効果という非線形効果でレーザー光は厚い雲を突き破って高密度の燃料プラズマが存在する領域まで到達できる。しかし取り囲むプラズマによって超高強度レーザーが高密度の燃料プラズマにエネルギーを投下する効率が下がる。こうした問題を取り除く新しい爆縮の幾何学的配置を有したターゲットが考案された<sup>[1]</sup>。図3に示すように球殻の燃料ターゲットに中空の金属コーンを取り付けた配置である。コーンの先端は金属薄膜で仕切られている。このコーンの先端に爆縮で高密度の燃料プラズマをつくり、中空を保たれたコーンの内部に超高強度レー

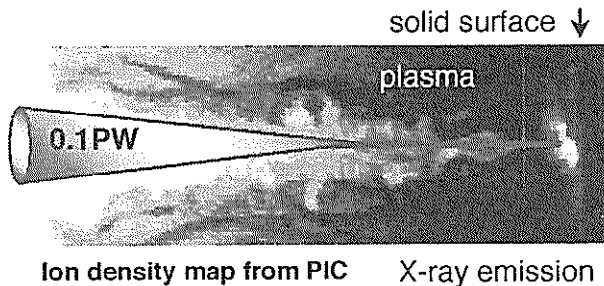


図2 2次元粒子シミュレーションで得られたイオン密度分布と固体表面までレーザーが伝搬してエネルギーを投下した状態を示すX線像。

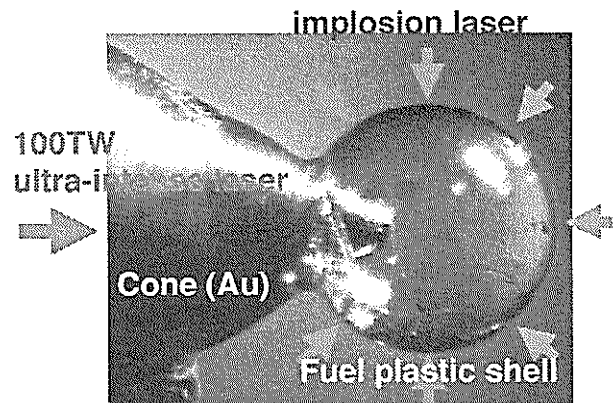


図3 レーザー核融合における燃料圧縮と効率的な加熱を同時に可能にした新しいターゲット配置。

表1 様々な加熱方法における中性子発生数.

Implosion laser/Heating laser			Neutrons
1.2 kJ (9 beams)	/ 0.06 kJ (w/cone)	1.3 kJ	$1-3 \times 10^5$
1.2 kJ (9 beams)	/ 0 kJ (w/cone)		$0.8-1 \times 10^4$
2.6 kJ (12 beams)	/ 0 kJ (w/o cone)	2.6 kJ	$3 \times 10^5$

レーザーを照射すれば高密度プラズマを効率よく強制加熱できる。これまでこのようなターゲット配置で高密度プラズマができると思われていなかった。しかし実際には安定にコーンの先端に高密度のプラズマを生成することができた。このターゲットを使用することで、レーザーで圧縮した燃料プラズマを比較的容易に強制加熱することが可能となった。その結果、表1に示すように全レーザーエネルギーの僅かに5%程度の超高強度レーザーをコーン内に照射することで核融合反応率は1桁増大した。また従来の自然加熱の方式に比べ半分のレーザーエネルギーで同様の核融合反応が得られることが実験的に明らかにされた。将来さらに大きなエネルギーを使えばより効率的な反応が期待される。つまりこの方法により効果的な圧縮と加熱を同時に実行できるようになり、効率的な核融合エネルギー生産への1つの可能性が示されたことに成る。

#### 4. おわりに

この新しい点火方法で点火燃焼装置を考えたとき、従来のエネルギーに比べはるかに小さなレーザーエネルギーで点火燃焼が可能と期待される。従来の点火方法で必要とされる超大型レーザーによる実験装置に比べコンパクトで経済的な装置が期待される。さらにレーザー技術の進歩で、容積率は従来のレーザー装置に比べ4分の1程度にコンパクト化される。このように日進月歩する新しい技術、新しい点火方法を採用したレーザー核融合点火燃焼装置ができれば、将来のコンパクトで経済的な先進的核融合炉に大きく前進できることとなる。

#### 参考文献

- [1] R. Kodama et al., Nature 412, 798(2001).
- [2] J. Nuckolls et al., Nature 239, 139(1972).
- [3] H. Azechi et al., Laser and Part. Beams 9, 193(1991).
- [4] 慣性核融合研究計画：実験プロポーザル(昭和58年大阪大学レーザー核融合研究センター内部資料)
- [5] M. Tabak et al., Phys. Plasmas 1, 1626(1994).
- [6] R. Kodama et al., Phys. Rev. Lett. 77, 4906(1996); R. Kodama et al., Phys. Rev. Lett. 84, 674(2000); R. Kodama et al., Phys. Plasmas 5, 2268(2001).

