Progress of Laser Fusion

-from NIF to DPSSL-

中井貞雄 (阪大レーザー研)
Sadao NAKAI (ILE, Osaka University)

[レーザー核融合の新展開]

米国で2003年に完成予定で建設が進められているNIF(National Ignition Facility)は2005~10年にはレーザー爆縮による核融合点火・燃焼・エネルギー利得を実証するものと期待されている。これまでの世界各国における高温、高密度圧縮、レーザープラズマ相互作用、アブレーション、流体不安定性等に関するデータが検討され、実験結果に裏打ちされたシミュレーション及び理論予測により、目標達成の確度が高いものと考えられている。この後には高効率、高繰り返しの高出力レーザー開発を中心とする炉工学技術の開発が、レーザー核融合動力炉へと続く。さらにこれらの技術は新しい学術、科学技術、産業技術を拓くものとして注目されており、エネルギー開発とともに、これらを包含したスケールの大きな構想が必要な段階に達した。

レーザー核融合研究の意義と目的

- (1) 新エネルギー開発 (環境保全・安全性、資源量、経済性)
- (2) 新しい学術、科学分野の開拓 (高密度、高エネルギー密度、高速)
- (3) 新しい産業の創成 (ホトンテクノロジー)

[レーザー爆縮の進展と展望]

成果と現状

- (爆縮物理) ・爆縮性能: 1000倍圧縮、1億度、中性子 10^{14} /ショット達成
 ・爆縮制御: エントロピーコントロール、スタグネーションフリー圧縮
 ・流体不安定性の同定: 安定化機構の解明、非局所熱伝導等
 ・高速点火の物理: ホールホーリング、電子・イオンビームへの変換
- (技術) ・ドライバー: MJレーザー技術の確立、一様照射技術、
 ・超短パルス・高強度レーザー技術
 ・燃料ペレット技術: 真球形、均一性で必要性能達成
 ・計測技術: 10ps、 μm のX線画像計測、分光計測、高分解中性子計測

課題

- (1) 中心点火におけるゲインスケリングと高利得のための必要仕様の解明(図1)(図2)
 - ・ドライバー技術: 照射一様性(<1%) (図3)、パルス波形制御
 - ・燃料ペレット技術: 爆縮効率向上、安定化設計・製作技術 (図4)
- (2) 高速点火における高密度・高温点火領域形成の原理実証
 - ・ホールホーリングの深さと安定性
 - ・電子・イオンビームへのエネルギー変換効率と局所エネルギー散逸
- (3) 統合シミュレーションコード開発
 - ・3D、非局所熱輸送、輻射流体、オパシティー、EOS

展望

- (1) NIF (1.8MJ/192ビーム) の完成・稼働により、レーザー爆縮による点火・燃焼エネルギー利得は2005~2010に実現されよう。
- (2) 激光XII号均一照射系(ハイパー)により、各種流体不安定性の定量的解明が進み、ハイブリッドスキーム等各種安定化ターゲット、高効率ターゲットに関する定量的評価がなされる。これにより高利得ペレットの仕様が確立する。
- (3) 高速点火の物理過程の解明とフィジビリティの評価
 ベタワットレーザーの建設、これを用いた高速点火の原理実証実験は、関連して極めて興味深い高エネルギー物理現象を提供する。
- (4) 統合シミュレーションコード開発により高効率、安定爆縮ペレット設計が可能となるとともに、宇宙物理等の解明にも資することとなる。学際的研究協力推進のコアとなる。

図3 The drive uniform can be improved by the larger beam number, the optimized beam arrangement (geometrical factor), the beam smoothing, the envelope profile control (single beam factor) and the precise power balance.

図1 The next step in the development of ICF is to experimentally map out the ignition and gain curves for multiple target concepts and demonstrate the scientific feasibility of laboratory scale ICF.

図2

Normalized implosion performance as a function of the computational convergence ratio of the core area. (a) The measured areal mass density normalized by the value obtained with a one-dimensional simulation code. (b) The same but for fusion neutron yield.

図4

Concept of indirect-direct hybrid drive. An X-ray prepulse irradiates the capsule surface to generate a preformed plasma, which mitigates the initial imprint caused by the PCL foot and SSD main drive. Thus coherency of the pulses increases sequentially. For comparison, nominal direct drive (a) and indirect drive (c) schemes are shown.

Design Selection of IFE Power Plant and Design Studies at ILE

Implosion	Driver	Chamber	Power Plant
Direct	DPSSL	Dry wall	New design
Hybrid	KrF	Wetted wall (+thick guided flow)	KOYO
Fast Ignition	Pulse power	Pebble	
Indirect	HIB	Thick liq. flow	SENRI

図5

[レーザー核融合動力炉へ向けて]

実用核融合動力炉の概念設計は炉心となる爆縮プラズマ生成に関する研究の進歩とともに、世界的にも数多く実施されるようになってきた。最近では、具体的な炉工学技術の課題について開発研究も実施されるようになってきた。

レーザー核融合動力炉の主要な構成要素は次の四つからなる

- ①燃料サイクル（ペレット設計・製造、トリチウム分離・精製等）
- ②爆縮ドライバー（DPSSL、KrF、Pulse power、HIB）
- ③炉チャンバー（ドライウォール、ウェットウォール、流体容器等）
- ④熱・発電サイクルおよび制御・安全管理システム

レーザー核融合動力炉の特長は、上記四つの要素の組み合わせに自由度がある(図5)ことと、それぞれが独立しており、別の建屋に収納できかつ独立に開発が進められることである。これにより開発戦略の効率化が図られるとともに、プラントシステム設計における最適化が可能となる。

動力炉がエネルギーシステムとして成立するためには、レーザー効率 η_d 、核融合エネルギー利得 Q 、発電効率 η_g 、発電電力のうちドライバー運転など所内電力として使用する再循環率 ϵ として

$$\eta_d Q \eta_g \epsilon = 1$$

これより実用的な値として、 $\eta_g = 40 \sim 50\%$ 、 $\epsilon = 25 \sim 30\%$ とすると、 $\eta_d Q > 5 \sim 10$ となり、ゲインカーブより数MJのレーザーエネルギーで $Q=100$ を実現するとし、レーザー効率 $\eta_d > 5 \sim 10\%$ が必要となる。しかも数Hzで繰り返し動作可能な長寿命で安価なレーザーが必要なのである。

発光効率の高い(50~60%)半導体レーザーを駆動に用いたDiode Pump Solid State Laser (DPSSL)の出現とその後の進歩により炉用ドライバーとしての仕様を満たしうる高出力レーザー実現の見通しが出てきた。すでに10J×10Hzのレーザーが完成しレーザー特性とともに熱用機械的特性を明らかにし、その高出力への見通しを明らかにしつつある。(図6)(図7)

[研究開発の戦略](図8)(図9)

- (1) 核融合と軍事研究 歴史的に核融合は水爆のエネルギー発生反応であることから、当初より世界的に機密裏に研究が進められた。1955年ジュネーブ会議で核融合については一斉に公開されたがその中には機密にすべき何ものもないことは、その後の核融合研究で国際協力が果たした役割を見れば明白である。1972年慣性核融合における爆縮の概念が公開された。その後もX線駆動の間接爆縮については、我が国から発表されるキャノンボールに類似のものと類推されていたが長年機密にされていた。1993年には、これも遂に公開され、レーザー核融合については世界的に研究を進める上での制約は完全になくなった。1991年からはIAEAでの国際協力が開始され、情報交換、交流、共同作業等の活動が活発になりつつある。
- (2) NIFは確かに米国エネルギー省のディフェンスプログラムとして予算が確保されている。しかしその目的としては①SBSS(Science Based Stockpile Stewardship)、②核融合エネルギー開発、③科学技術の新分野の開拓の三つをあげている。しかも②、③は①とは何ら関係なく、完全にオープンになされるとのことである。軍事関連研究にも使用しようという一面のみを見て、核融合用レーザーの建設が遅れるとしたら、学術的にこれほど大きな損失はない。
- (3) 学術における新分野の開拓未踏の高密度、高エネルギー密度状態が生成可能であり、高密度物性、輻射流体力学、宇宙物理、核物理等において新しい物理過程を提供している。
- (4) 新しい産業の創成光加工・処理、光化学、光計測、宇宙エネルギー伝送、レーザー推進や誘雷、宇宙デブリ除去、等々すでに産業界で実用され、さらに拡大しつつある技術から、夢とともに研究が進められている分野まで、核融合をターゲットとしたレーザー技術開発は大きな期待を集めている。さらにレーザー核融合研究の成果に直接関連した高輝度X線、γ線源、中性子源等もそれぞれ新しい応用分野を拓こうとしている。

図6

Scale-Up Version of IFE Driver

● Small scale version of IFE driver laser, 10 J x 10 Hz DPSSL system was designed and performance is being studied.

図7

Inertial Fusion Energy (IFE) Development & Related Technology

図8

Application and Spin-off of ICF

図9