

レーザー核融合の開発動向と将来展望

Present Status of Laser Fusion Research and Future Prospects

三 間 圀 興*

Kunioki Mima

1. はじめに

レーザー核融合研究は1960年代初頭のレーザー発振の成功^{1) 2) 3)}の後まもなく、アメリカとソ連においてレーザー核融合研究の計画が立てられ、1964年には、ソ連のパゾフがガラスレーザーを重水素リチウムに照射し、中性子の発生に成功している。我が国でもレーザープラズマの研究が1963年頃より開始され、パラメトリック不安定性等の異常吸収現象の研究が進められた。その後、激光IV号やⅫ号(大阪大学)、シバヤノバ(米国LLNL)等の大型ガラスレーザーが次々に建設され、固体密度の1000倍に近づく高密度プラズマの発生に成功し、レーザー核融合の科学実証へ向けてのマイルストーンが築かれた(図-1参照)。

レーザー核融合研究は1990年頃より新しい段階に入った(表1参照)。すなわち、レーザー爆縮により実現

される高密度プラズマ^{4)~6)}中にホットスパークを形成するための研究が集中的に行われるようになった。これは、超均質レーザー照射技術が進歩し^{7)~10)}、レーザービーム数を増加することによる「セントラルスパーク点火」の条件が明らかになりつつあることと、CPA(チャープパルス増幅)法の発明に基づく超高強度レーザー技術の発展で「ペタワットレーザー」の建設が可能となり、「高速点火」^{11) 12)}が現実的になったことによる(図-1参照)。一方、レーザー核融合炉の実現に向けて不可欠な技術である炉用ドライバーについても、DPSSL(ダイオード励起固体レーザー)^{13)~15)}やKrFレーザー¹⁶⁾の開発が進み、急速な研究の展開が見られている。また、1993年の米国におけるICF研究の機密解除を受けて、ヨーロッパにおいて本格的なレーザー爆縮核融合研究を開始する動きがあり、後で概要を紹介するように、Nature¹⁷⁾でESTA(European Science Technology Assembly)のレポートが話題となった。

2. 研究の現状

高速爆縮による温度1億度の達成とエネルギー利得；(核融合出力エネルギー) / (レーザーパルスエネルギー) 0.3%が1986年に実現された¹⁸⁾。さらに、小さいレーザーエネルギーで核融合点火を起こすための高密度圧縮を実証し、固体密度の600倍に達する超高密度プラズマを1990年実現した^{4, 5)}。これらの結果をふまえて、レーザー核融合研究は数年前より新しい段階に入った。すなわち、「レーザー爆縮により発生する超高密度プラズマ中にいかにホットスパークを形成するか」が研究の中心テーマとなっている。

上述の高密度圧縮実験では、D、TとCの混合プラズマではあるが、点火条件の面密度； $\rho R = 0.4\text{g/cm}^2$ 以上を実現した。しかし、ペレット中心部に発生するべきホットスパークが形成されなかったため、中性子発生数は球対称圧縮のシミュレーション結果に比

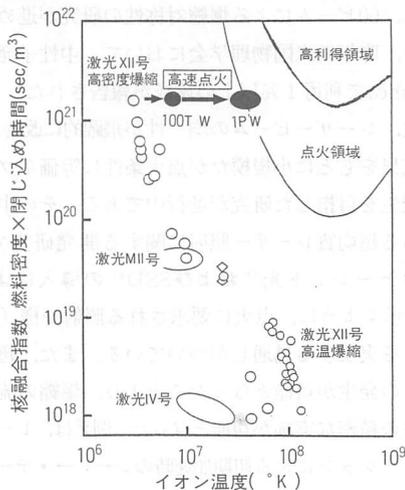


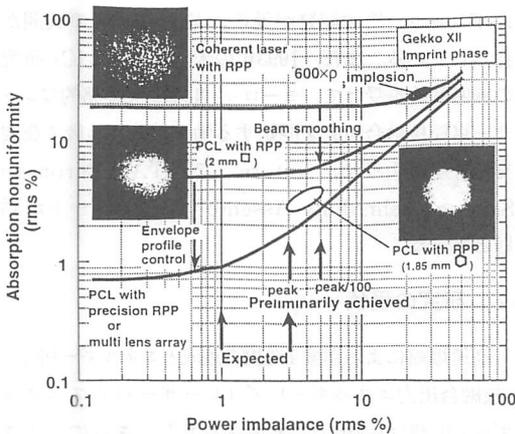
図-1 点火・高利得へのアプローチ

* 大阪大学核融合研究センター教授、センター長

〒565 大阪府吹田市山田丘 2-6

表1 最近のレーザー核融合研究の進歩

年 度	達 成 項 目
1983~1988	本格的レーザー爆縮実験装置の完成 レーザー波長スケリング (高エネルギー結合) 高温爆縮; 1億度, 中性子発生 (10^{13} /shot) 利得 (0.3%)
1980~1985	OMEGA (ロチェスター大学; 5kJ/1.06 μ m, 3kJ/0.35 μ m)
1983~1987	激光XII号 (阪大レーザー研; 30kJ/1.06 μ m, 10kJ/0.35 μ m)
1985~1988	NOVA (LLNL; 100kJ/1.06 μ m, 50kJ/0.35 μ m)
1988~1992	高精度レーザー照射 (RPP技術開発) 爆縮高密度炉心プラズマ発生 爆縮の安定性, 球対称性の改善 →
1987~1988	クライオD ₂ シェル 200倍圧縮 (ロチェスター大)
1988~1990	CDTプラスチックシェル 600倍圧縮 (阪大レーザー研)
1987~	DTガス 100倍圧縮 (LLNL)
1989	DDPSSL
1990	「光陽」の概念設計
1994	超均質レーザービーム発生技術開発「高速点火」の提案
1995~	点火実証実験装置の開発 NIF (米) (1.8MJ/0.35 μ m, 192ビーム) 計画 リメールの装置 (仏) (1.8MJ/0.35 μ m) 計画
1996	ベタワットレーザー (米) (1.25PW/0.5ps) 完成
1997	激光XII号用高速点火レーザー開発 100TWレーザー (日) (100TW/1 ps) 3月末完成予定



集光したレーザービームのパターンの一様化がレーザービームの空間的, 時間的コヒーレンスを一部取り除くことにより実現される。図中, RPPはランダム位相板により空間的インコヒーレンスを導入したもの。PCL (Partially Coherent Light)は空間, 時間的に一部インコヒーレントにしたものであり, RPPの場合にくらべてスペckルが時間的に平均化され, より一様なビームが得られる。

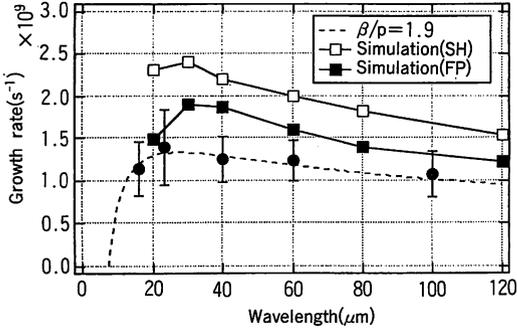
図-2 新しいレーザービームの平滑化技術による高い照射一様性の実現

べ, $1/1000$ 以下であった^{4, 5)}。これは, 爆縮の球対称性が不十分であり, 超高密度低温プラズマとホットスパークの乱流混合が起こったことによるものと考えられている⁶⁾。このため, 高精度ベレット製作技術開

発とともに, 超均質レーザー照射技術開発が進められている^{6, 7, 8, 9)}。「セントラルホットスパークによる核融合点火」の実現には, レーザービーム数を100ビーム程度まで増加することが必要である。昨年より「OMEGA-Upgrade」¹⁹⁾がロチェスター大学で稼働を開始し, 60ビームによる爆縮対称性の研究が進められている。昨年の米国物理学会において, 中性子発生数 10^{14} /shotで利得1%以上の達成が報告された。

最近, レーザービームの均一性が飛躍的に改善され, その成果をもとに小規模だが点火条件に等価なプラズマの発生を目指した研究が進行中である。その中心課題である超均質レーザー照射に関する開発研究では, 部分コヒーレント光⁸⁾およびSSD⁹⁾の導入により, 図-2に示すように, 点火に要求される照射一様(1%以下)を実現する見通しがついている。また, 超均質ビームの発生が可能となったことより, 爆縮の流体不安定性の精密な実験が可能となった。例えば, レーザーアブレーションによる初期加速時のレーリー・テラー不安定性に関する実験では, 成長率が従来の予測より小さいことが確認された²⁰⁾。これは, レーリー・テラー不安定性へのレーザーアブレーションにおける電子熱輸送の運動論効果によるもので, 爆縮の安定性に関する照射一様性の条件を緩和するものである。

図-3に示すように, 20 μ mから100 μ mまで, 波長



20 μmから100 μmまで5種類の波長に対し、波長率を計測した。計測結果とシミュレーション結果を比較している。

図-3 レーリー・テラー不安定性の分散関係

をかえて、レーリー・テラー不安定性の成長率を測定した。実験結果と通常の熱輸送 (Spitzer-Harm Conductivity) もしくはFokker-Planck方程式の記述による熱輸送を用いた2次元流体シミュレーションの結果を比較した。その結果、従来の成長率に比べ、最も危険なレーリー・テラーモードに対し、実験の成長率は約60~70%になった。通常、爆縮の初期から最大圧縮まで500倍程度の増幅を予想してターゲット設計をおこなってきたが、今回の結果によると、レーリー・テラーの増幅は100倍以下に抑制されることになる。このことは、より高い圧縮率の爆縮を利用することが可能になることであり、点火に必要なレーザーエネルギーが小さくなる。

3. 新しいレーザー技術と新方式点火

新しいレーザー技術開発の進展により、レーザー核融合において新しい研究の展開があった。1985年、チャープパルス増幅法 (Chirped Pulse Amplification: CPA)²¹⁾が発明され、テラワット (10¹²W) からペタワット (10¹⁵W) を超えるレーザー出力が実現可能となった^{21, 22, 23, 24)}。すなわち、爆縮プラズマの膨張時間 (数十ピコ秒) より十分短い間に数キロジュールのレー

ザーエネルギーを高密度プラズマに注入することが可能となった。この結果、セントラルホットスパークの形成を要求しない核融合点火の道が開かれた。これを「高速点火」と呼ぶ¹²⁾。

「高速点火」の科学実証は、超高強度レーザーとプラズマの相対論的相互作用の解明など多くの課題を伴うが、照射均一性の緩和や必要なレーザーエネルギーの低減などが魅力的であり、大阪大学レーザー核融合研究センターの最重点課題となっている。

大阪大学では、600倍の固体密度のプラズマを発生することが可能であり、ペタワットレーザーによる追加加熱での飛躍的な中性子発生数の増加を目指している。高速点火が実現すれば図-1のように、圧縮と加熱を分離した「点火」から「高利得」、「レーザー核融合炉」への道が開かれる。

大阪大学レーザー核融合研究センターにおいて、新激光XIIと連動する超高強度レーザーを建設している。これは後述する高速点火方式核融合の研究を目的としたものであり、ペタワットまでの増力が可能である。発振器はダイオード励起モードロックガラスレーザーを使用し、パルス幅200fs (2 × 10⁻¹³s) で100mW程度のCW光を発振する。これを単一グレーティングにより、パルス幅1.5ns (1.5 × 10⁻⁹s) まで引き延ばす。このとき、1パルスあたりのエネルギーはnJ以下である。これをTi:サファイア再生増幅器により、スペクトルの利得狭帯化がほとんどない状態で数mJまで増幅する。その後、ガラス増幅器により100J~kJ程度まで増幅し、大型グレーティングを備えたコンプレッサにより1ps程度に圧縮する。本ガラス増幅システムは効率よく増幅ができるように工夫されており、3nsの通常のレーザー光においては5kJ以上の出力が可能である。

高速点火方式を実現させるためには、効率よい追加加熱が必要である。図-4は、高速点火方式の一つのシナリオである¹¹⁾。まず第1段階として、必要となる面密

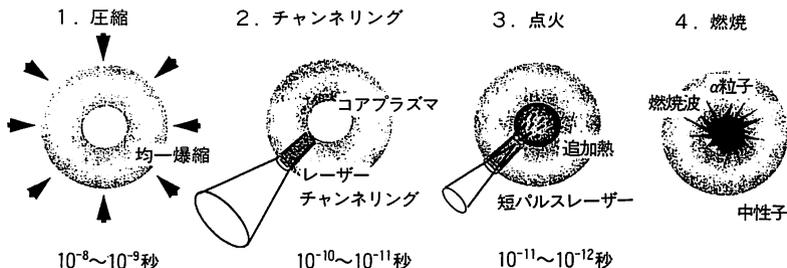


図-4 高速点火方式のシナリオ

度を持った燃料層をレーザー爆縮により形成する。第2段階において追加熱用の高強度レーザーが効率よくコアプラズマ近傍で吸収できるように高密度領域までチャンネルングを形成する。第3に追加熱用の高強度レーザーを照射し、コアプラズマを効果的に追加熱できる高エネルギー粒子を発生する。第4に高エネルギー粒子によるコアプラズマの追加熱・点火を行う。

4. レーザー核融合炉「光陽」とLD励起固体レーザードライバー

我が国の炉工学専門家およびエネルギー関連企業の協力を得てレーザー核融合炉「光陽」²⁵⁾(図-5)が設計され、各構成要素の開発目標、技術的物理的課題が明確になった。

レーザー核融合炉「光陽」用として、波長351nm、出力4MJ、繰り返し率12%のLD励起固体レーザードライバーが概念設計された²⁶⁾。レーザー材料としてNd:ガラス(HAP4)を用いた場合、強度 $1.32\text{kW}/\text{cm}^2$ の $1\text{cm} \times 1\text{cm}$ LDアレイ(波長802nm)を 8×10^7 個用いて励起すれば、351nmの出力4MJが得られ、それをペレットターゲットに照射できる。

本概念設計では、寸法 $1.5 \times 30 \times 55\text{cm}^3$ のHAP4ガラス板を30枚用いた1ビームライン(波長1,054nmで出力約8kJ、繰り返し率12Hz、電気・光変換効率15%)を800本用いてドライバーを構成し、その出力をHD*Pで第3高調波(351nm)へ80%の変換効率で変換する。

LD励起固体レーザードライバーのコストの目標値は\$200/Jであるが、ドライバーコストは固体レーザー材料の蛍光寿命(τ)が長いほど、エネルギー蓄積効率が大きくなるので安くなる。HAP4($\tau=0.35\text{ms}$)に比べて準3準位レーザーであるYb:S-FAPは $\tau=1.1\text{ms}$ と約3倍長く、LDアレイに必要とされ

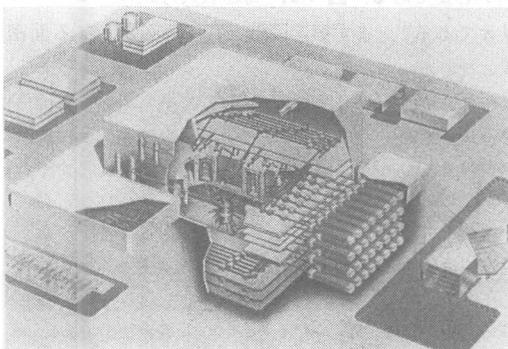


図-5 レーザー核融合炉「光陽」の概念図

るコスト低下率はHAP4の1/500に比べて1/100で良くなる。したがって米国ローレンスリヴァモア国立研究所(LLNL)では、Yb:S-FAP結晶を用いたLD励起固体レーザードライバーの概念設計を1995年に行った¹³⁾。

5. レーザー核融合の海外の動向

米国のレーザー核融合実験装置には、ローレンスリヴァモア国立研究所(LLNL)のNOVA、ロチェスター大学のOMEGA、ナーバルリサーチ研究所(NRL)のNIKEがある。NOVA、OMEGAはガラスレーザーで、3倍の高周波(波長 $0.35\mu\text{m}$)の出力エネルギーはそれぞれ約50kJと30kJである。NOVAは10本ビームで、レーザーエネルギーを軟X線に変換し、その軟X線で燃料ターゲットを圧縮する間接照射型ターゲットの実験を主に行っている。1993年にレーザービーム照射位置制度などの高精度化改良が行われた。OMEGAは1995年に増力化改良が行われ、ビーム数は60本で主に直接照射型ターゲット実験を行っている。増力後、 10^{14} 個のDT中性子発生を記録した。この核融合出力は照射レーザーエネルギーの2%に相当する。現在2次元SSD(Smoothing by Spectral Dispersion)の導入によるビームスムージングやパワーバランスの改良などが行われており、来年(1997)から核融合点火に必要な条件などを明らかにするための本格的な実験が行われる。LLNLやロシアアラモス国立研究所(LASA)との共同研究で間接照射型ターゲット実験も計画されている。さらに、クライオターゲット実験も計画されている。NIKEはKrFレーザー(波長248nm)で、1995年に完成し、56本のビームで出力エネルギーは3kJとなっている。この実験装置の主な目的は、ISI(Induced Spatial Incoherence)を用いた非常に均一性の高いビームにより流体力学的不安定性の定量的評価を行うことである。

米国では、2002年に完成予定の国立点火装置(NIF: National Ignition Facility)の建設計画が進んでいる。予定されているデザインはガラスレーザーの3倍の高調波で出力エネルギー1.8MJ、最大出力500TW、パルス幅20ns、ビーム数192本である。この装置のプロトタイプであるBeamletはすでに完成し、設計通りの性能が確認されている。この装置を用いて核融合点火を行い、レーザーエネルギーの20倍以上の核融合出力を実証することが目的である。点火実現は2004~2006年を予定している。現在LLNLを中心に

詳細な設計が進められている。建設費用は\$1.07B(約1,000億円)が見込まれており、運転費用は年\$60M、実験費用は年\$100Mと概算されている。

このNIF計画のほかに、超短パルス高強度レーザーの開発も精力的に行われており、今年(1996)の夏にはLLNLで650J、500fsで1.25PWを実証している。また、DPSSLの開発も行われている。NIFでの点火実証、DPSSLの開発が成功すれば、2025年頃にレーザー核融合の実証炉建設がより具体的なものとなる。

フランスでは2010年頃に完成予定のガラスレーザーLMJ(Laser Mega Joule)の建設計画が進んでいる。レーザー装置の開発は米国との同時研究となっており、その仕様もビーム数を除き米国のNIFと同じである。すなわち、ガラスレーザーの3倍の高調波出力エネルギーが1.8MJ、最高パワー500TW、ビーム数240本となっている。既にサイトが決定され、プロトタイプビーム(60kJ)LIL(Laser Intequarion Line)を2001年に完成させる予定である。LMJはCEL-V(Center d'Exudes de Limeil-Valenton)の計画であるがリメール研究所にはPHEBUSとOCTALのガラスレーザーがあり、3年程前から、ヨーロッパの共同研究装置としても使用されている。

そのほか、ヨーロッパには、英国のラザフォード研究所、フランスのエコールポリテクニック大学、ドイツのMPQ(Max-Planck-Institute fuer Quantenoptik)などでレーザー核融合に関連した実験が行われている。しかしながら、リメール研究所の装置を除くと球状のターゲットを用いた爆縮実験を行うのは困難である。

ヨーロッパでは核融合戦略全体を見直す動きがあり、ESTA(European Science and Technology Assembly)がEC(European Commission)に対して次の様な報告書をまとめた。

「ヨーロッパの制御核融合予算(約\$250M/年)の殆どは磁場閉じ込め核融合(MCF)にのみ使われており、慣性核融合(ICF)を無視するという間違いをおかしてきた。今後は少なくとも10%の予算をICFに注ぎ込みバランスのとれた戦略を立てるべきである。」具体的な計画は今後議論されることになる。

中国では1993年に7つのNational High Technology Programの一つとしてICFプログラムが設定され、中国工学物理アカデミー(CAEP=China Academy of Engineering Physics)としてShenguang IIレーザーの建設が行われている。約6kJのガラス

レーザーである。また、2003~2005年にShenguang IIIとして60kJ(32ビームまたは60ビーム)の建設が計画されている。

6. おわりに

CPA法によるPWレーザーの実現、レーザー核融合炉用レーザーとしてDPSSLの技術開発などレーザー技術の進展は著しく、これらの技術に支えられ、米国、フランスでは核融合燃焼の点火実験装置の建設が2000年代初頭に計画されている。また、ヨーロッパ、中国でも新しい装置の建設が議論されている。

参考文献

- 1) J. H. Maiman, Nature, 187, 493 (1960)
- 2) A. Javan et al, Phys. Rev. Lett. 6, 106 (1961)
- 3) R. N. Hall et al, Phys. Rev. Lett. 9, 366 (1962)
- 4) H. Azechi et al, Laser and Particle Beams, 9, 193 (1991)
- 5) S. Nakai et al, Proc. of 15th Conf. on Plasma Phys. and Cont. Nucl. FUSio Res., Seville, Spain, 26 Sept.~1 Oct, 1994, IAEA-CN-60/B-1-I-1
- 6) K. Mima, Phys. Plasmas 3 (5), 1 (1996)
- 7) N. Miyanaga et al, Laser Interaction and Related Plasma Phenomena, 10, edited by G. H. Miley and H. Hora (Plenum Press, NY, 1992) P.251
- 8) H. Nakano et al, Opt. Commun. 73, 123 (1990)
- 9) S. Skupsky et al, J. Appl. Phys. 66, 3456 (1989)
- 10) Y. Kato et al, Phys. Rev. Lett 53, 1057 (1984)
- 11) M. Tabak, et al. Phys. Plasmas, 1, 1626 (1994)
- 12) P. Norrey, Phys. Rev. Lett.
- 13) Orth, C. Do and Payne, S. A. : Proc. Ist Annual Int. conf. solid state Lasers for Applcoaiton to ICF, SPIE, 2633 (1994)
- 14) Naito, K. et al. : Jpn. J. Appl. Phys., 31, 259 (1992)
- 15) 菅博文他：レーザー研究, 23, 541 (1995)
- 16) Y. Owadano et al., Laer and Particle Beams 11, 347 (1993)
- 17) Nature, News, 380, 655 (1996)
- 18) C. Yamanaka et al Phys. Rev Letters 56, 1575 (1986)
- 19) T. Boely et al, "Initial Performance Results of the OMEGA Laser System" to be published in Optics Communications
- 20) K. Shigemori, et al. Phys. Rev. Lett. 78, 250 (1997)
- 21) D. Strickland and G. Mourou, Opt. Commun. 56, 219 (1985).
- 22) K. Yamakawa et al., Opt. Lett. 16, 1593 (1991).
- 23) C. Sauteret et al., 16, 238 (1991); C. Rouyer et al., 18, 214 (1993).
- 24) M. D. Perry and G. Mourou, Science 264, 917 (1994).
- 25) レーザー核融合炉「光陽」概念設計, 大阪大学レーザー核融合研究センター (1994年12月)
- 26) Naito, K. et al. : Appl. Phys. Lett., 64 1186 (1994).