



## 解説

- 1. レーザー核融合研究の進展
- 1.2 レーザー核融合プラズマ研究の進展
- 1.2.2 流体爆縮研究の進展

# 爆縮研究の進展

白神 宏之

(大阪大学レーザーエネルギー学研究中心)

## Progress of Laser-Driven Implosion

SHIRAGA Hiroyuki

*Institute of Laser Engineering, Osaka University Suita 565-0871, Japan*

(Received 25 March 2005/Revised 17 June 2005)

"Implosion" of a spherical target is the key concept in inertial confinement fusion. The progress of implosion research is reviewed in this paper. Direct- and indirect-drive implosions have been intensively investigated for more than 30 years. Numerous milestones, including the achievement of high-temperature, high density, central spark structure, as well as heating of the compressed plasma by injected energy from an external source as the Fast Ignition have been reached through these programs. Ignition and burn will be demonstrated in the near future.

### Keywords:

implosion, inertial confinement, laser fusion, central ignition, fast ignition.

### 1. はじめに

核融合反応を起こしエネルギーを発生するためには、よく知られているように核融合燃料を高温・高密度状態にする必要がある。このような熱平衡状態での反応は熱核融合と呼ばれ、加速器により原子核を高速のビームとしてターゲットに照射するビーム核融合反応と区別する。熱核融合では原子核に与える平均的な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裾（熱外エネルギー）にある高速の原子核衝突により核融合反応を発生することが可能となるため、ビーム核融合よりも効率が高い[1]。これは熱平衡状態におけるマクスウェル速度分布の性質、すなわち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高くないがプラズマを閉じ込めて反応時間を長くし反応数を確保するのに対して、レーザー核融合を含む慣性核融合では密度を極端に高くすることで、時間は短くとも衝突頻度を上げて反応総数を稼ぐ。超高温・超高密度、すなわち超高压力状態になったプラズマは当然瞬時にして熱的に膨張し飛び散るが、それまで慣性でとどまっている間だけ反応が続くことになる。これを閉じ込める装置は地上では実現不可能であるので、飛び散るにまかせる。その意味で慣性「閉じ込め」核融合という言葉はトリッキーである。慣性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として「自己点火」がある。圧縮燃料をなるべく冷たいままで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、燃料の一部のみが核融合点火すれば、そこから発生し

た核融合反応粒子は衝突過程を通じて周辺部を加熱し燃料全体が燃え広がる。これを燃焼波伝搬という。自己点火するためには圧縮燃料の密度・半径積 ( $\rho R$ ) が、例えば DT 反応なら発生するアルファ粒子の飛程 ( $0.3 \text{ g/cm}^2$ ) 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[2]。

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、取り扱い可能な程度に小規模なパルスマイクロ熱核融合反応装置の実現であり、超高密度状態を作るために超高パワー密度のドライバーを用いた「爆縮 (implosion)」という手法を用いる。爆縮はレーザー核融合の根幹をなす概念である。また、爆縮実験はレーザー核融合の統合的実験としての役割を担い、その達成度がそのままレーザー核融合研究の成果の指標となる。レーザーを用いた慣性閉じ込め核融合の研究は、爆縮による高温・高密度燃料プラズマの実現可能性を探るべく、これまで爆縮の科学的原理実証にその重点を置いて日米欧各国で研究が進められてきた (Table 1)。

爆縮の概念は1972年に米国より初めて公表された[3]。これは断熱圧縮により主燃料である DT プラズマを固体密度の数100-1,000 倍程度の高密度に圧縮し、その中心部に 5 keV 程度以上の高温中心スパーク部分を形成する、というシナリオ (「中心点火 (central ignition)」) である。これを目指した爆縮研究を目的として、1970年代後半から1980年代前半にかけて日本、米国、ヨーロッパ各国において激光 XII 号[4]、NOVA[5]、Phebus[6] などの大型レーザーが次々に建設された。これらのレーザー装置により1990年頃までに、点火に必要とされる高温 (5-10 keV) 爆縮[7,8]

author's e-mail: shiraga@ile.osaka-u.ac.jp

Table 1 Progress of laser-driven fusion research.

| Year  | Achievements +   | Country | Institution*    |
|---|--|---------|-----------------|
| <b>Construction of lasers and high-temperature implosions</b>                 |  |         |                 |
| Construction of 10 – 100 kJ class laser systems for implosion study           |  |         |                 |
| 1980  | OMEGA (24beams, $\omega$ : 5 kJ, $3\omega$ : 3 kJ)                             | USA     | Univ. Rochester |
| 1983  | GEKKO-XII (12 beams, $\omega$ : 20 kJ, $2\omega$ : 15 kJ, $3\omega$ : 10 kJ)   | Japan   | Osaka Univ.     |
| 1985  | NOVA (10 beams, $\omega$ : 100 kJ, $3\omega$ : 50 kJ)                          | USA     | LLNL            |
| 1986  | Phebus (2 beams, $\omega$ : 20 kJ, $3\omega$ : 10 kJ)                          | France  | Limeil          |
| 1995  | OMEGA-UG (60 beams, $3\omega$ : 40 kJ)   | USA     | Univ. Rochester |
| High-temperature, high-yield implosion experiments                            |  |         |                 |
| 1985  | $10^{12}$ neutrons, GEKKO-XII, $2\omega$ : 15 kJ                               | Japan   | Osaka Univ.     |
| 1986  | $10^{13}$ neutrons, GEKKO-XII, $2\omega$ : 15 kJ, G=0.2%, 10 keV               | Japan   | Osaka Univ.     |
| 1986  | $2 \times 10^{13}$ neutrons, NOVA, $3\omega$ : 25 kJ                           | USA     | LLNL            |
| (1995   | $10^{14}$ neutrons, OMEGA-UG, $3\omega$ : 30 kJ, G=1.0%                        | USA     | Univ. Rochester |
| <b>Improvement of irradiation uniformity and high-density implosions</b>      |  |         |                 |
| Technology development for improvement of irradiation uniformity              |  |         |                 |
| 1984  | RPP (Random phase plate)   | Japan   | Osaka Univ.     |
| 1987  | ISI (Induced spatial incoherence)  | USA     | NRL             |
| 1989  | SSD (Smoothing by spectral dispersion)   | USA     | Univ. Rochester |
| High-density implosion experiments  |  |         |                 |
| 1987 – 88   | 200 x liquid density (XLD), OMEGA, $3\omega$ : 3 kJ (cryogenic DD)             | USA     | Univ. Rochester |
| 1987  | 100 XLD, NOVA, $3\omega$ : 20 kJ (gas DT)                                      | USA     | LLNL            |
| 1988 – 90   | 600 XLD, GEKKO-XII, $2\omega$ : 10 kJ (CDT plastic)                            | Japan   | Osaka Univ.     |
| <b>Development of beam smoothing technology and HEP implosion experiments</b> |  |         |                 |
| 1993 –  | GEKKO – XII, ASE (Amplified spontaneous emission)                              | Japan   | Osaka Univ.     |
| 1994  | NOVA, indirect drive   | USA     | LLNL            |
| 1995 –  | NIKE (KrF, nonuniformity=0.2%), direct drive, planar target                    | USA     | NRL             |
| 1995 –  | OMEGA-UG (60 beams, 2D-SSD, $3\omega$ : 40 kJ), direct drive                   | USA     | Univ. Rochester |
| 1995 –  | GEKKO-XII, PCL (partially coherent light), direct drive                        | Japan   | Osaka Univ.     |
| <b>Construction of ultra-intense lasers and fast ignition experiments</b>     |  |         |                 |
| Construction of ultra short, ultra intense laser beams                        |  |         |                 |
| – 1996  | 1 PW laser, 1beam  | USA     | LLNL            |
| – 1997  | PWM laser (100 TW, 1beam)  | Japan   | Osaka Univ.     |
| – 2001  | PW laser (1 PW, 1beam)   | Japan   | Osaka Univ.     |
| 2003 –  | LFEX laser (10 kJ/1 – 10 ps (1 – 10 PW), 4 beams phase-coupled)                | Japan   | Osaka Univ.     |
|   | OMEGA – EP laser (5 kJ/10 ps)  |         |                 |
| Fast ignition integrated experiments  |  |         |                 |
| 2000  | Heating demonstrated, GEKKO-XII + 100TW laser                                  | Japan   | Osaka Univ.     |
| 2002  | Heating up to 1 keV, GEKKO-XII + 1PW laser                                     | Japan   | Osaka Univ.     |
| (2005)  | Heating of imploded cryo D2 fuel, GEKKO-XII + PW laser                         |         |                 |
| <b>Planned ignition/burning projects</b>                                      |  |         |                 |
| (2010)  | NIF (192 beams, $3\omega$ : 1.8 MJ/500 TW), G=10 – 20, indirect drive          | USA     | LLNL            |
| (2012)  | LMJ (240 beams, $3\omega$ : 1.8 MJ/500 TW), G=10 – 20, indirect drive          | France  | CEA             |
| (2008)  | FIREX-1 (10 kJ implosion +10 kJ heating), G=0.1, direct drive+fast ignition    |         |                 |
| (2013)  | FIREX-2 (50 kJ implosion +50 kJ heating), G=1 – 10, direct drive+fast ignition | Japan   | Osaka Univ.     |

( ) : planned +G:target gain=fusion output/laser energy

\*LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory, NRL: Naval Research Laboratory,  
Limeil: Centre d'Etudes de Limeil – Valenton, CEA: Commissariat à l'Energie Atomique

あるいは高密度（固体密度の数100–1,000倍）爆縮[9]の達成に成功し、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。その後、爆縮の一様性が重要との認識からレーザー光の均一照射技術の向上が計られ、点火・燃焼へ向けて高密度爆縮燃料プラズマ中に高温のホットスパーク部を同時形成する研究が進められた。

一方、近年新たに、超高強度短パルスレーザーを用いて爆縮燃料プラズマに対する外部からの追加熱を行う「高速点火 (fast ignition)」と呼ばれる点火方式が提案された[10, 11]。この方式では中心点火に比べ加熱・点火の効率を大幅に向上できる可能性がある。高速点火では燃料の高密度爆縮と加熱を別々に行うため制御性が向上し、また中心スパークを内部に形成しないため主燃料のみの比較的小規模の燃料プラズマ、したがって小規模の所要レーザー出力での点火燃焼が期待される。これはレーザー核融合炉設計の観点からも炉出力の設定に自由度を与えるため好ましい。

本稿はこのような爆縮核融合に関する研究がいかに展開され、どのような成果がこれまでに得られたかを課題ごとに概観し、今後の核融合点火・燃焼に向けた研究開発計画について概略を示すことを目的としている。

## 2. 爆縮概念の歴史的発端

燃料の圧縮により超高密度を実現し核融合エネルギーを発生する概念は、1972年どころか、実は既に1960年代のレーザーの発明以前に考えられていた。Heppenheimerの1984年の書物[12]によれば、米国ローレンスリバモア国立研究所でTellerのもとで研究していたNuckollsが1957年頃までに「原爆を用いなくて水爆をどれだけ小さくできるか」について検討し、1960年までには「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。そのキポイントが燃料の高密度圧縮であり、内容は、微量の核融合燃料に高エネルギー密度の注入を行い、高密度に圧縮し自己燃焼させるというものである。彼らのバックグラウンドに水爆があったのは当然で、その応用問題としてマイクロ爆発を考えたことは容易に推察される。所定の $\rho R$ を達成するためには球対称燃料の半径圧縮率（＝初期半径／最終半径）を必要だけ高くすればよい。したがって圧縮時の流体力学的不安定性の克服・制御がもっとも大きな課題となる。Nuckollsのアプローチではエネルギードライバーの種類は白紙であり、高パワー密度のみが必要とされた。そしてその少し後の1960年にMaimanによってルビーレーザーが発明されたが[13]、Maimanはリバモアで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、レーザーの出現後、リバモア研では直ちにマイクロ慣性核融合の爆縮ドライバーにレーザーを採用することが着想されたようである。その状況はリバモア研のLindlによる1998年の書物にも記述されている[14]。同時期に旧ソ連においてもBasovらによりレーザーを核融合に用いることが考えられたが、彼らの当時の考えはプラズマの直接加熱であって、爆縮の概念はなかったようである。

核融合燃料の圧縮加熱によるという共通点を持つ水爆とレーザー核融合は、反応の規模においてその両極端にあると言える。水爆ではドライバーたる原爆の出力は莫大であるが、レーザー核融合では可能な限り小さいレーザーエネルギーで自己点火に至らしめることを目指す。その結果、水爆とレーザー核融合（発電炉級の爆縮としても）では単発の出力エネルギーの規模は $10^8$ – $10^9$ 倍ほども違うことになり、原理には共通点があるもののハードウェアとして関連するテクノロジーは全く異なるものとなる。

## 3. 直接照射と間接照射

レーザーを慣性核融合の爆縮用エネルギードライバーとして用いる場合、レーザー光で直接ターゲットを駆動する「直接照射駆動 (direct drive)」と、いったん高原子番号物質に照射してそのエネルギーを軟X線輻射に変換し、輻射でターゲットを駆動する「間接照射駆動 (indirect drive)」の2つの方法がある。後者は水爆研究においてドライバーである原爆の出力を輻射エネルギーとして利用することに類似して取られた手法である。直接照射には効率が高いがレーザー光のコヒーレンスに起因した照射強度の非一様性が発生するという懸念があり、間接照射にはインコヒーレントであるため本質的に照射一様性は良いが効率が劣り所要のレーザーエネルギーが大きくなるという欠点がある。ターゲットの駆動に関する物理として、直接照射ではエネルギー媒体が光および加熱された比較的高温の電子、間接照射では軟X線および加熱された比較的低温の電子ということで、エネルギー輸送および駆動するアブレーションの様相が変わる。

Nuckollsらにより公表されたNature誌の論文[3]は直接駆動に関するものであったが、1960年頃に彼自身が検討した内容は間接駆動であった[12, 14]。リバモア研ではその後Kidderが直接照射を、Nuckollsが間接照射を主張し、結局1975年頃までに間接照射を選択し、以後の計画は間接駆動を主体に進められることとなった。その判断の主たる理由は、水爆の輻射駆動との共通点もあるが、物理としては点火を阻害する原因となる爆縮中の流体不安定性の成長の観点から間接照射のほうが有利であるということであった[14]。もちろん彼らは直接照射に関する基礎研究も並行して行っていたが、その後の大阪大学における直接照射爆縮研究、高速点火研究の進展を見ると、核融合研究としては果たして本当に賢明な判断であったと言えるだろうか。あるいは、間接照射を選択した米国から見て、100–300 kJで直接照射という1990年代前半頃までの大阪大学の金剛計画[15]は、対案としては魅力的だったのではないだろうか。その後、米国においては1990年のNational Academy of Science[16]、Fusion Policy Advisory Committee[17]などでの評価・議論のステップを経てNational Ignition Facility (NIF)に至る間接照射のプロジェクト展開が図られた。しかし、先のLindlの著作[14]の序文によれば、米国がNIF計画に踏み切ったのは直接照射爆縮の大きな進展によるところが大きいとされているのは興味深い。

1980年代よりも前の時代の直接照射および1990年頃まで

の間接照射の爆縮研究を簡単に振り返っておく。ただし、米国における間接照射に関する経過は Lindl の著作[14] およびその後のレビュー論文[18]に詳細に書かれているのでここでは割愛する。

まず、直接照射についてだが、米国で最初にレーザーによる爆縮実験がなされたのは1974年、KMS Fusion 社による2ビームでのガラスマイクロバルーンの実験である[19]。ここですでにガス封入されたDT燃料からの中性子発生が観測されている。その後、リバモア研で1975年に2ビーム15JのJanusレーザーで[20]、1977年に2ビーム130JのArgusレーザーで[21]爆縮による熱核融合反応を確認している。一方我が国でもほぼ同時期に大阪大学で、1975年に2ビームの激光II号レーザーによるガラスマイクロバルーンの圧縮実験が開始され、爆縮による核融合中性子を発生している[22]。1978年には4ビーム400Jの激光IV号レーザー[23]、1980年に2ビーム700Jの激光M-II号での同様の実験[24]が行われ、中性子発生数の増加が検証された。またこの時期には上記のガラスレーザーと並行して2ビーム400Jの炭酸ガスレーザー烈光II号でも同様の圧縮実験が行われた。これらはいずれも「イクスプローディング・プッシャー・ターゲット(exploding pusher target)」と呼ばれる、薄い球殻を短いパルス幅のレーザー照射で爆発的に膨張させ内部のガス燃料を圧縮する方式であった。これは高速電子によるプレヒートが大きく高密度圧縮には繋がらないが、爆縮により燃料プラズマを高温に圧縮し熱核融合反応を実現したことに大きな意義があった。また、当初から爆縮実験の測定結果を計算機シミュレーションコードの結果と比較しながら進める研究手法が取られていることも、レーザー核融合研究の特徴として注目すべき点である。

高密度圧縮に至る爆縮には、アブレーションによる球殻の内側へのロケット加速を用いた「アブレイティブ爆縮(ablative implosion)」[25]が必要であった。ここでは燃料プレヒートの原因となる高速電子を発生させないため、 $10^{14}$  W/cm<sup>2</sup>程度の比較的照射強度で、しかも0.53  $\mu$ mや0.35  $\mu$ mという短波長のレーザーで駆動する必要があった。その結果、飛程の長い高速電子がターゲット中を走り回って一様な加熱ができたexploding pusher targetとは異なり、爆縮はレーザー照射強度の非一様性を大きく反映したものとなった。アブレイティブな爆縮実験はexploding pusherが成功した直後から各国で試みられたが、この時期には高密度爆縮研究はスムーズには進まなかった。アブレイティブな高密度爆縮の達成には、後述の様々な問題の克服を待たねばならなかった。

これらの直接照射爆縮の研究が進展する一方で、我が国においても間接照射爆縮の研究もやや遅れてスタートした。発端は1980年の疇地らによる「キャノンボールターゲット(Cannonball target)」の提案であった。これは、2重球殻の間隙にレーザー光を注入し、発生したプラズマの圧力で内球を圧縮するという概念で、そのままいわゆる輻射駆動を利用する間接照射とは言えないが、図らずもNuckollsが1960年当時考案したマイクロ核融合のター

ゲット[12]とそっくりの構造を持つものとなっていた。この論文は当初、米国のPhysical Review Letters誌に投稿されたが、かなりの時間を経た後に査読者の査読拒否が理由で著者に返却されたという経緯がある。結局この論文はJapanese Journal of Applied Physics誌に再投稿され、掲載された[26]。当時米国においては慣性核融合研究の大部分、特に間接照射については機密扱いであり、その後米国物理学会などでも全く議論ができないという状況が長く続いた。

我が国での最初の輻射駆動による爆縮の研究は1982年から激光IV号レーザーを用いて行われた。球ターゲットのアブレイティブ爆縮[27]、その駆動源としてのレーザー照射高原子番号プラズマの輻射特性[28]、ターゲットの高エネルギー輻射成分によるプレヒート[29]、輻射駆動プラズマの特性[30]などに関する実験が行われ、球ターゲット照射の一様性[31]、アブレーション構造[32]などがシミュレーションにより研究されている。続いて激光M-II号レーザーでは1983年にプラズマ駆動型および輻射駆動型のキャノンボールターゲットの爆縮実験が行われた[33]。また、1986年からは輻射駆動アブレーションによる衝撃波発生[34]とアブレーションの物理的機構[35]に関する研究がなされている。これらは、先行する米国での研究成果が機密政策のため全く公表されていなかった中で我が国において独自になされたものであり、結果的にはせいぜい5年ほどと米国にさほど時期を遅れず研究が進められた。研究成果は最初は日本の学術誌に、その後は米国の学術誌にも発表されるようになったが、米国の研究が公表されなかったため、論文としては我が国の成果の方が早く発表されたことになる。

その後、大阪大学で激光XII号が完成しキャノンボールターゲットの実験が多くなされたが、輻射駆動爆縮としての本格的な研究は3倍高調波(波長0.35  $\mu$ m)が使用できるようになってから開始された。X線閉じ込めキャビティからの輻射[36]については、特にドイツのMax-Planck量子光学研究所との共同研究を含めて研究が進められ、輻射閉じ込め効果など多くの成果が得られた[37]。また、輻射駆動アブレーションにおけるエネルギー輸送[38]や燃料ターゲットの輻射駆動爆縮とその一様性制御[39]などの研究が行われた。激光XII号での実験がなされた時期には米国ではNOVAレーザーで間接駆動爆縮の研究が大々的になされており、機密解除が徐々に進んだので、学会等である程度の議論が可能となっていた。1993年12月に米国でレーザー核融合に関するかなりの部分が機密解除になった[40]時点でその内容はほぼ明らかになったが、それは規模・量的に圧倒的である点を除けば大阪大学で推定していた内容とさほど異なるものではなかった。

#### 4. 高温爆縮

1980年代に入って、本格的爆縮実験を目的とした大型レーザーが日、米、仏に相次いで建設されると、レーザー核融合研究の様相は一変した。直接照射法において、DT燃料プラズマを爆縮時の多重衝撃波の集中により核融

合点火に十分な温度 (5–10 keV) まで加熱することは、1985年に激光 XII 号レーザー (波長 0.53 mm, 光出力 15 kJ, 12ビーム) による中性子発生数 $10^{12}$ 個/ショットの実験[41], さらに1986年の中性子発生数 $10^{13}$ 個/ショット (核融合利得=0.2%) を得た実験[42] で実証された。ここでは LHART (Large High Aspect Ratio Target) と呼ばれる直径 1 mm, 殻厚 1  $\mu\text{m}$  程度という比較的大きなアスペクト比 (=初期燃料ペレット半径/シェル厚さ) のガラスマイクロバルーンにガス状態の DT 燃料を封入したターゲットが用いられた。これはアブレイティブ爆縮ではあるが、シェルが薄いので高い爆縮速度になり高温爆縮を得やすい。観測された中性子スペクトルから、イオン温度はほぼ 9 keV を達成したことが確認された。これは別途計測された爆縮速度  $7.5 \times 10^7$  cm/s でのイオンの運動エネルギーに対応する値であり、設計どおりの高温爆縮プラズマがターゲット中心で達成されたことになる。この当時のレーザーは最近の高密度圧縮達成に不可欠であるレーザー光の強度分布の平滑化について、特に何も対策はなされていなかった。このことを考えても爆縮核融合で燃料を高温に加熱すること自体は比較的容易であることが示された。なお、この成果に基づき1995年に米国ロチェスター大学 OMEGA 増力レーザー (0.35  $\mu\text{m}$  光出力 30 kJ, 60ビーム) を用いて中性子発生数 $10^{14}$ 個/ショット (核融合利得=1.0%) が得られている[43]。

このように高温化達成が実証された LHART 爆縮方式ではあるが、このままでは慣性核融合に必要な高利得ターゲットには外挿することはできない。なぜなら LHART 爆縮方式では爆縮中に燃料温度が上がってしまうので高密度圧縮は望めないためである。見方を変えると LHART 方式は、主燃料を持たない状態での中心スパーク加熱のみを実証したことに相当する。

発生中性子数と 1 次元球対称シミュレーションによる予測値との比較[44]から、燃料加熱が成功し 1 次元球対称シミュレーションどおりの中性子発生が得られるのは、爆縮コアが減速相をほとんど持たない、すなわち、減速後のプラズマのターゲット中心でのスタグネーション (滞留) 状態をほとんど持たない、「スタグネーションフリー」の爆縮 (Fig. 1(a)) であることがわかった。逆に言えば、本来高密度爆縮に要求されている減速相を持つような場合 (Fig. 1(b)) には当時のレーザーのビーム品質では爆縮球対称性は維持できていないと結論された。その原因は、レーザー照射の非一様性などの理由により、減速が始まる段階での密度が比較的高い周辺のガラスプラズマの形状が球対称ではなく、中心で反射した後にそこまで戻った衝撃波は球対称性が乱され、再度 DT プラズマの中心に向かって収束することが妨げられてそれ以降の加熱が途絶えたから、と考えられた。減速以前の 1 回目の衝撃波通過による DT プラズマ加熱は容易であるが、衝撃波がコア内部で多数回反射を繰り返し燃料を断熱圧縮する減速相まで含めた球対称性の良い爆縮の実現は思っていたより難しいことが示唆されたわけである。

内部に DD または DT ガス燃料を充填したターゲットの

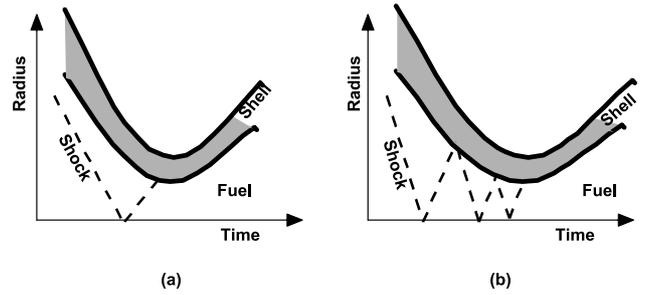


Fig. 1 Flow diagram of imploded core plasma. (a) Stagnation-free implosion. (b) Heavily stagnated implosion.

多くの爆縮実験において中性子発生数が 1 次元シミュレーション予測を下回ることに伴って、様々な解釈がなされてきた。たとえば、プッシャー/燃料の境界面における流体混合[45-47], コアプラズマの 3 次元変形[48], それらの複合効果[49-53], などである。説明するモデルは多数提出されたが、これらはすべて、爆縮の非対称性 (あるいは非一様性) による加熱の中断に関係するものである。

### 5. 主燃料の高密度爆縮

上記の研究成果を受け、中空の比較的厚いシェルターゲットを用いて主燃料プラズマを固体密度の数百倍の高密度に圧縮する研究がなされた。1987年に OMEGA レーザー (0.35  $\mu\text{m}$  光, 出力 3 kJ) では固体重水素燃料ターゲットを用い、固体密度の 100–200 倍程度の圧縮がなされたと発表された[54]。これに引き続き、1988年には激光 XII 号 (0.53  $\mu\text{m}$  光, 出力 8 kJ) で重水素化プラスチックシェルターゲットを用いて固体密度の 600 倍の圧縮が実証された[9]。この密度は点火プラズマに必要な密度 (固体密度の数 100–1,000 倍程度) の領域に達しており、実際にレーザーによる高密度爆縮が可能であることが実験的に初めて実証されたことになる。

激光 XII 号による成果は、宮永[55]により詳細に報告されているが、LHART 方式の場合と比べて大きく変わったところは、ターゲットとして直径 500  $\mu\text{m}$ , 殻厚が 4–12  $\mu\text{m}$  と厚い中空重水素化ポリスチレンシェル ( $\text{C}_8\text{D}_8$ ) を用い、真球度および殻厚一様性に 99% 以上を確保したこと、各ビームの集光レンズ直前にランダム位相板 (Random Phase Plate: RPP) [56] を導入し球ターゲット表面上での照射レーザー強度の一様性を向上させたこと、 $\rho R$  値が放射化法[57]を主とした各種方法で正確に測定されたこと、などである。

この実験で特筆すべきは、CD プラズマではあるが  $\rho R = 0.5$  g/cm<sup>2</sup>, 燃料密度は 600 g/cm<sup>3</sup> が達成され、1 次元球対称シミュレーションの値ともほぼ一致したことである。つまり、予測どおりの高密度圧縮がなされたことになる。ただし、温度に関しては中心の高温スパーク部から発生すると期待された中性子発生数は球対称シミュレーションの 1–3 桁程度低い値に留まっていた。

本来の核融合燃料ターゲットと対比させて考えると、この爆縮された高密度 CD 層は重水素で構成される主燃料部を模擬し、またその内部に形成されるべき比較的高温・低

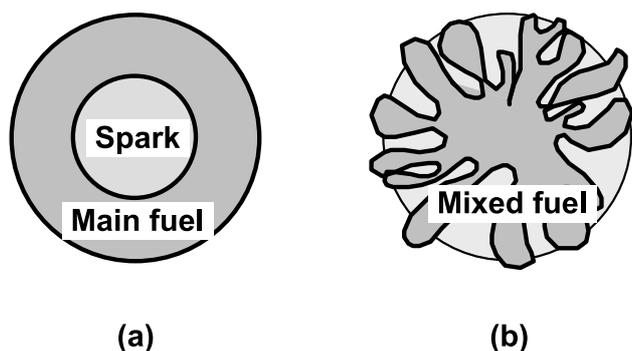


Fig. 2 Schematic structure of core plasmas. (a) Central spark/main fuel structure. (b) Heavily mixed core plasma.

密度のCDプラズマ領域が中心スパークを模擬していると考えられる。即ち、計測された爆縮 $\rho R$ 値が主燃料爆縮の成否を、スパーク部分からの中性子発生数が中心スパーク形成の成否を表すことになる。上の結果は、主燃料の高密度爆縮は達成されたが、中心スパーク形成には成功しなかったと結論された[58]。

この理由は、爆縮一様性が不十分であったためと考えられ、その定量的解析が試みられた。具体的には、爆縮非一様性の原因を、照射強度の非一様性に起因する不均一加速、アブレーションによる成長の抑制効果[59, 60]などを含めたレイリー・テイラー(RT)不安定性として評価された。その結果、爆縮コア形成時までのRT不安定性成長によるシェル表面の非一様性の振幅は、爆縮時のシェル厚さと同程度かそれ以上となると評価された[61]。

中心スパーク部分については、先のLHART実験と同様に、球対称性が崩れた中心スパークでは最初の衝撃波以降の加熱が持続しないため中性子発生数が低下するとして説明できた。一方、それではなぜ主燃料部の $\rho R$ 値はほぼ予想どおりの値が達成されたのか。残念ながらこの質問に対する明確な答えは得られていない。RT不安定性の成長により、シェルはFig. 2に示すように一様なシェル状態(Fig. 2(a))ではなく、バラバラな部分の集合体(Fig. 2(b))となっていると考えられるが、このような状態での爆縮コアの特性、ダイナミクスを説明する明確なモデルを得るに至っていない。スタグネーション時のコアプラズマ構造の高時間・空間分解計測[62]と多次元シミュレーションコード[63]による解析が必要である。

## 6. 中心点火のための爆縮と流体等価プラズマの形成

前節までの高温爆縮、高密度爆縮により達成された温度・密度は個々にはそれぞれ慣性核融合に必要なとされる値を十分に達成しており、その意義は大きい。これらは同時達成ではないため本来の中心点火シナリオで目指している主燃料内部に高温スパークをもつという二重構造ができたわけではない。しかし、これらの結果から、爆縮の非一様性が最も重要な問題と認識され、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。このことは、その後のレーザーシステムの建設動向にも反映されている。すなわちロチェスター大学のOMEGAレーザー増力では

ビーム数を60ビーム[64]に、米国のNIF(National Ignition Facility)では192ビーム[65]と、多ビーム化により照射一様性を確保する試みがなされている。一方、レーザー光の照射パターン自体を均一にするためにも多くの研究が行われた。ランダム位相板[56]、空間インコヒーレンス制御(Induced Spatial Incoherence: ISI)[66]やスペクトル制御による均一化(Smoothing by Spectral Dispersion: SSD)[67]の技術、さらに増幅された自然放光を種とした増幅(Amplified Spontaneous Emission: ASE)[68]、部分コヒーレント光(Partially Coherent Light: PCL)技術[69]等が開発されている。これらのビーム平滑化技術は、レーザー光の強度、位相の時間(周波数)空間(波数)制御を駆使したものであり、単にコヒーレントな光というレーザー光の概念からはかなりかけ離れたものとなっている。

このようなレーザー照射一様性技術を用い、次なる課題として「流体等価プラズマ(Hydrodynamic Equivalent Plasma: HEP)」の実現があげられた。これは、高密度な主燃料部とその内部の高温の中心スパーク構造を同時に実現することを意味している。レーザーの総エネルギーは、まだ点火クラスには達しているわけではないが、照射一様性を向上し、寸法以外の燃料密度、爆縮効率、半径収縮率(=燃料ターゲットの初期半径/最小圧縮半径)、流体力学的不安定性などの流体力学的パラメータが点火クラスの爆縮と等価[70]な爆縮で主燃料/中心スパーク構造を作ることを目指した。この課題は、点火・燃焼に必要な高精度の爆縮シナリオを総合的に確かめるというだけでなく、詳細な実験データを高利得ターゲット設計を行うための計算コードにフィードバックし、高利得爆縮の設計精度を高くする目的もある。

この課題に対し、1994年に米国リバモア研ではNOVAレーザーを用いて、レーザー光を軟X線エネルギーに変換してターゲットを照射する間接照射爆縮においてHEPが実現できたと発表した。これは一様性を確保するために爆縮の効率を犠牲にした状態ではあったが、NIF計画へのステップとなった[71]。

直接照射では、大阪大学で1994年から激光XII号に12ビームのパワーバランス制御と先述の部分コヒーレント光化を導入し、半径収縮率10程度の条件下でHEPを目指した一様爆縮の実験が行われた[72-74]。ピケットパルス付きのフラットトップパルスとした波長0.53 $\mu\text{m}$ のPCL光でDDガス燃料充填CHシェル(直径500 $\mu\text{m}$ , シェル厚7 $\mu\text{m}$ )を照射、爆縮し、ピケットパルスのタイミングを変えて流体不安定性の成長度を制御して主燃料内部のスパーク形成が調べられた。スパーク加熱の成否を示す中性子発生数に着目し、さらに照射非一様性と流体不安定性の成長率から見込まれる爆縮コアの乱れの大きさをいくつかのターゲットパラメータで見積もった。その結果、1次元球対称シミュレーションで予測した中性子発生数と実験で得られた値の比は、Fig. 3に示されるような、乱れないスパーク部分(unperturbed)と全体のスパーク部分の体積比で評価されることがわかった。さらに、照射非一様性に空間モード1の成分が残存する場合、スパーク部は主燃料から外部に

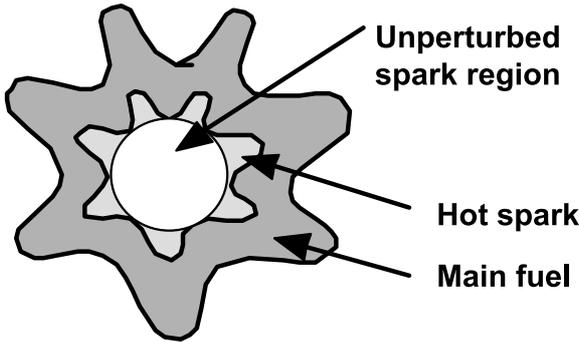


Fig. 3 Effective volume of central spark in distorted core plasma.

流出することなどもわかった[75]. この実験では半径収縮率 $\sim 7$ まではほぼ球対称予測どおりのスパーク形成が達成されている.

1995年に稼働を開始したOMEGA増力レーザーの主たる実験目的は半径収縮率20程度での直接照射方式におけるHEP研究であるとされており, クライオ重水素燃料を用いた爆縮実験が精力的に進められている. 最近になって, 低アイゼントロープ ( $a = \text{プラズマ圧力} / \text{フェルミ縮退圧力} \sim 4$ ), 半径収縮率約20で重水素の  $\rho R = 0.1 \text{ g}\cdot\text{cm}^2$  の爆縮が達成されたと報告された. スパーク部からの1次反応中性子発生数が1次元シミュレーションコードの10%程度, 2次元コードではほぼ再現していること, 中性子発生の時間履歴および2次反応中性子発生数も同様であることからみて, 中心スパークと主燃料層の構造ができており, 信頼性の高い結果と考えられる[76]. クライオ重水素層の表面精度の改善 ( $1 \mu\text{m rms}$ ), 高精度位相板による低次モード ( $\sim 6$ ) のレーザー照射非一様性の抑制などが改善の要因とされている.

また, これらの総合試験としてのHEP爆縮実験と平行して, 爆縮一様性について照射強度の不均一性ととも重要な物理である, レイリー・テイラー不安定性などの流体力学的不安定性や, ごく初期のレーザー不均一により形成される表面の擾乱のインプリントに関する研究も精力的に進められてきた[77]. その結果, レーザーアブレーションにおける電子熱伝導の運動論的効果[78]やX線輸送の利用[79]により, 直接照射でのRT不安定性の成長率は従来の予測よりも小さくできることが示されており, これらの効果が爆縮ターゲット設計に取り入れられつつある.

### 7. 高速点火における爆縮コア

1985年に提案されたチャープパルス増幅法 (Chirped pulse amplification: CPA) [80]により, 超短パルス ( $\sim \text{ps}$ ) でPW (ペタワット  $= 10^{15} \text{ W}$ ) オーダーの高いピークパワーのレーザーが得られるようになった. このようなレーザー技術の進展に伴い, 前述の中心点火方式に対し, 新しい点火の方法が提案され精力的な研究がなされている. これは高密度に圧縮された爆縮コアプラズマに, 爆縮の最終段階で高出力超短パルスレーザーを用い, 瞬時にエネルギーを注入する方法である. この方式は外部からの急速な追加熱に

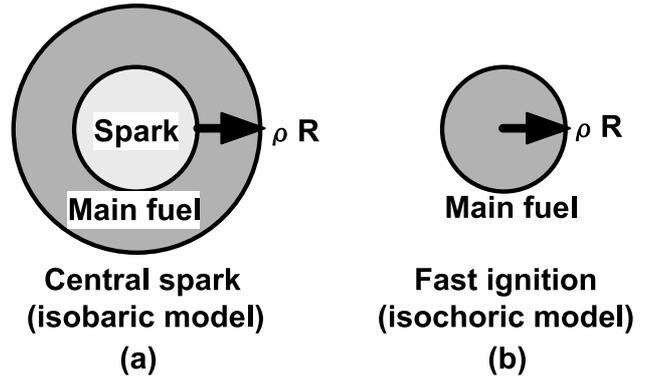


Fig. 4 Structure of core plasmas. (a) Central spark and main fuel (isobaric model). (b) Fast ignition (isochoric model).

よる点火と見なされることから高速点火[10, 11]と呼ばれている. Fig. 4に中心点火と高速点火での圧縮コアを模式的に示す. 中心点火の場合は, コアの構造は等圧的になるようにスパーク部と主燃料部が共存しており, 等圧であるため中心部に密度を落として温度を上げたスパークが存在する. ここで, 点火ターゲットの設計では中心スパーク半径は主燃料の厚さとほぼ同じ程度である. 一方, 高速点火の場合には, 中心部に温度の高い領域を作る必要がないため燃料半径が半分程度になると考えれば, 同じ密度で同じ  $\rho R$  値を達成するのに燃料総量は  $1/(2^3 - 1) = 1/7$  と1桁近く小さい量の燃料の圧縮でよいことになり, それに比例して燃料圧縮に要するレーザーエネルギーも少なくてすむ.

高速点火では外部から超高強度超短パルスレーザーを照射し, 高速電子などを発生させ, そのエネルギーで圧縮コアプラズマを追加加熱する. 高速電子発生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, 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[81]を行わせる方式が提案された. また, 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 (Fig. 5), 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100TW ( $50 \text{ J}/0.5 \text{ ps}$ ), 2001年に1PW ( $1 \text{ kJ}/1 \text{ ps}$ )

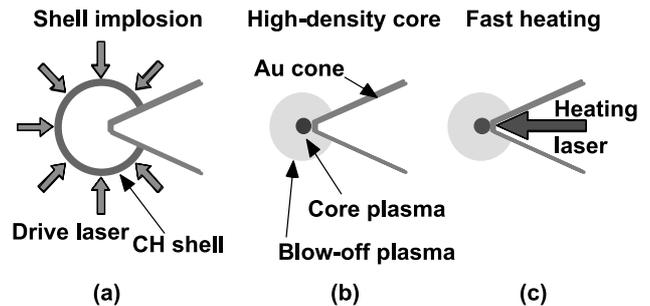


Fig. 5 Fast ignition of a shell with a cone. (a) Implosion of the shell. (b) Formation of the high-density core. (c) Fast ignition by injection of an ultra-short, ultra-intense laser.

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ュ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 1 keV まで追加熱することに成功した[82]。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 10 keV まで加熱できれば、点火・燃焼が既存技術で確実に達成できると考えられている。そのため現在、10 kJ / 1-10 ps の加熱用レーザーの建設が進められている。

このようなコーン付きのシュルターゲットでは、爆縮はコーン方向に空間モード 1 の大きな非対称性を持つ。そのような非対称爆縮で本当に必要な高密度が得られるのか？これは大きな疑問であり、それを可能にすることは今後の大きなチャレンジのひとつである。これまでの実験結果からは、50 g/cm<sup>2</sup> 程度の圧縮コアの場合は、1 次元球対称シミュレーションで予測された爆縮コア全体平均での密度と、固体密度の数倍以上の領域に対する X 線バックライト像と残留質量評価により見積もられた爆縮コア全体を平均した密度とは良く一致していることがわかってきている。ただしこの評価では、コア内部のより高密度領域の構造は解らない。コーンシュルターゲットの非対称構造を含む爆縮コアダイナミクスについてのより詳細な研究が、日米の協力により OMEGA レーザーを用いてなされている[83]。超高速の X 線画像計測技術[84]および 2 次元シミュレーションにより、爆縮プラズマの構造、コアからコーン先端への衝撃波およびプラズマジェットが発生などのコアダイナミクスが解明されつつある。

なお、超短パルスレーザーを用いて外部から加熱する高速点火とはやや異なるが、「衝撃点火 (impact ignition)」という手法が提案されている[85]。これは、球ターゲットの一部を高速点火のようにコーンで仕切り、その内部は周辺の主燃料爆縮用のシェルとは異なる LHART 方式のような比較的薄くて大半径のシェルとし、別のレーザーで超高速爆縮させ主燃料コアに衝突させて点火部分を形成しようというものである。超短パルスレーザーが不要、関与する物理が基本的に流体物理のみである、などの利点があり、今後の研究が期待される。

固体密度の数 100 倍～1,000 倍もの高密度爆縮で非対称なコア内部の密度構造を高時間・空間分解し測定するには、多次元シミュレーションと対比できる、より高度なプラズマ診断技術が求められる。さらに、このような高密度で比較的低温 (<1 keV) のプラズマは縮退状態にあると考えられている。そのような領域での X 線分光画像計測や核反応粒子計測のデータ解析手法が開発されなくてはならない[62]。

## 8. 核融合点火・燃焼実験の計画

先述のように、物理的研究としての爆縮実験には常温で容易に使用できるプラスチック (CH) を用いた模擬ターゲットが多く使用されたが、本来のレーザー核融合では不純物を含まないクライオ DT 燃料の高密度圧縮が必要である。実際のクライオ化重水素燃料ターゲットの爆縮に関しては、既に大阪大学[86]、ロチェスター大学[76, 87]で DD

の実験がなされている。しかし、燃料のプレヒートあるいはレーザー照射やクライオ重水素燃料層の一様性が十分でないなどの困難があったため、満足できる高密度圧縮はやっと目処がつけかけた段階である。最終的にはターゲットはクライオ重水素・三重水素 (DT) 層を持つ CH シェルあるいはクライオ DT を含ませたスポンジ状の低密度フォームシェルと考えられている。今後、クライオターゲット技術、レーザー照射平滑化技術、高密度プラズマ診断技術、多次元シミュレーションコードの開発とともに、低原子番号物質である重水素プラズマ中でのエネルギー輸送、流体不安定性の制御などの基礎過程の研究の展開が待たれる。

米国では 1.8 MJ のレーザー NIF の建設が順調に進行しており、192 ビーム中の最初の 4 ビームは既に稼働している。2009 年頃に全システムが完成し、2011 年頃には間接照射・中心点火方式での利得 = 10 程度の点火・燃焼を実現する爆縮実験がなされるであろう。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見て、実験の成功はほぼ間違いと思われ、人類最初の制御核融合はレーザー核融合で実現されるだろう。やや遅れてフランスにおいても同様の計画である LMJ レーザーの建設が進められている。

我が国においては、それらとは別に直接照射・高速点火方式による核融合点火・燃焼を目指して FIREX 計画が進められている。前半の FIREX-1 では 2007-2008 年頃に、10 kJ レーザー (激光 XII 号) によるコーン付きクライオ重水素フォームシェルの爆縮コアに 10 kJ の加熱用レーザー (LFEX) を注入し、10 keV 程度まで加熱、後半の FIREX-2 では 2013 年頃に 50 kJ の爆縮用レーザーと 50 kJ の加熱レーザーにより利得 = 1-10 の点火・燃焼を目標とした計画が提案されている。

## 9. おわりに

レーザー核融合における核融合燃料の高温高密度爆縮は段階ごとに知見を得、レーザー技術の進歩とあいまって成果を生み出し発展してきた。現在、米国の NIF、仏国の LMJ などの大型レーザーが建設途上にあり、いずれも 2010 年頃に間接照射方式による点火燃焼を目指している。一方、大阪大学ではクライオ燃料ターゲットを用いた高速点火実証に向けて FIREX 計画が進められている。これらを用いた今後の爆縮核融合研究の進展が期待される。

ここで見てきたような爆縮プラズマは、超高密度 (>10<sup>26</sup> cm<sup>-3</sup>)、超高温 (5-10 keV)、すなわち超高圧力状態 (>100 Gbar) の物質であり、高エネルギー密度物理学としての幅広い研究展開が望まれる。

## 謝辞

本稿の執筆の機会を与えていただいた学会編集委員会に感謝します。これまでの筆者の研究に様々な形でご協力いただいた方々、また初期の爆縮研究に関し Heppenheimer の著作を筆者に紹介して下さった高部英明氏に感謝します。

## 参考文献

- [ 1 ] 例えば, 内田岱二郎・井上信幸:核融合とプラズマの制御(上)(東京大学出版会, 1980).
- [ 2 ] 疇地(Chap.1.1, in this issue); S. Atzeni and J. Meyer-ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion* (Oxford University Press., 2004).
- [ 3 ] J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen and G. Zimmerman, *Nature* **239**, 139 (1972).
- [ 4 ] C. Yamanaka *et al.*, *Nucl. Fusion* **27**, 19 (1987).
- [ 5 ] J.T. Huntand and D.R. Speck, *Opt. Eng.* **28**, 461 (1989).
- [ 6 ] G. Thiell, A. Adolf, M. Andre, N. Fleurot, D. Friart, D. Juraszek and D. Schirmann, *Laser Part. Beams* **6**, 93 (1988).
- [ 7 ] C. Yamanaka *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 1575 (1986).
- [ 8 ] C. Yamanaka *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986*, vol. 3, p. 33. IAEA, Vienna (1987).
- [ 9 ] H. Azechi *et al.*, *Laser Part. Beams* **9**, 193 (1991); S. Nakai *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1990*, vol. 3, p. 29, IAEA, Vienna (1991).
- [10] N.G. Basov, S.Yu. Gus'kov and L.P. Feokistov, *J. Sov. Laser Res.* **13**, 396 (1992).
- [11] M. Tabak *et al.*, *Phys. Plasmas* **1**, 1626 (1994).
- [12] T.A. Heppenheimer, *The Man-Made Sun* (Omni Press, 1984) p.117-118.
- [13] T.H. Maiman, *Nature* **187**, 493 (1960).
- [14] J.D. Lindl, *Inertial Confinement Fusion* (AIP Press, 1998) Chapter 2.
- [15] 「金剛計画」, 大阪大学レーザー核融合研究センター(1990年9月)(unpublished).
- [16] *Review of the Department of Energy's Inertial Confinement Fusion Program-Final Report*, National Academy of Science (National Academy Press, September, 1990).
- [17] Fusion Policy Advisory Committee (FPAC)-Final Report, Department of Energy (September, 1990).
- [18] J.D. Lindl, *Phys. Plasmas* **11**, 339 (2004).
- [19] P.M. Campbell, G. Charatis and G.R. Monttry, *Phys. Rev. Lett.* **32**, 74 (1975).
- [20] Y.W. Slivinsky *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **35**, 1083 (1975).
- [21] E.K. Storm *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **40**, 1570 (1978).
- [22] *Annual Progress Report on Laser Fusion Program September 1975-August 1976*, Institute of Laser Engineering, Osaka University (1976); *ibid.*, *September 1976-August 1977* (1977).
- [23] *Annual Progress Report on Laser Fusion Program September 1977-August 1978*, Institute of Laser Engineering, Osaka University (1978); *Annual Progress Report on Laser Fusion Program 1979* (1980).
- [24] *Annual Progress Report on Laser Fusion Program 1981*, Institute of Laser Engineering, Osaka University (1982).
- [25] R. E. Kidder, *Nucl. Fusion* **8**, 3 (1968).
- [26] H. Azechi, N. Miyanaga, S. Sakabe, T. Yamanaka and C. Yamanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **20**, 20 (1981).
- [27] T. Mochizukii, S. Sakabe, K. Okada, H. Shiraga, T. Yabe and C. Yamanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L133 (1983).
- [28] K. Okada, T. Mochizuki, M. Hamada, N. Ikeda, H. Shiraga, T. Yabe and C. Yamanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L671 (1983); T. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev. A* **33**, 525 (1986); R. Kodama *et al.*, *J. Appl. Phys.* **59**, 3050 (1986).
- [29] H. Shiraga, S. Sakabe, K. Okada, T. Mochizuki and C. Yamanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L383 (1983).
- [30] T. Mochizuki *et al.*, *Phys. Rev. A* **36**, 3279 (1987); R. Kodama *et al.*, *Phys. Rev. A* **37**, 3622 (1988).
- [31] T. Mochizuki, S. Sakabe and C. Yamanaka, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L124 (1983); S. Sakabe, *Jpn. J. Appl. Phys.* **27**, L1344 (1988).
- [32] K. Nozaki and K. Nishihara, *J. Phys. Soc. Jpn.* **48**, 993 (1980); K. Nishihara, *Jpn. J. Appl. Phys.* **21**, L571 (1982); T. Yabe *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L88 (1983).
- [33] N. Miyanaga, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **22**, L551 (1983).
- [34] T. Endo, H. Shiraga, K. Shihoyama and Y. Kato, *Phys. Rev. Lett.* **60**, 1022 (1988).
- [35] T. Endo, H. Shiraga and Y. Kato, *Phys. Rev. A* **42**, 918 (1990).
- [36] K. Kondo *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **28**, 1695 (1989).
- [37] R. Sigel *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **65**, 587 (1990); G.D. Tsakiris *et al.*, *Phys. Rev. A* **42**, 6188 (1990); H. Nishimura *et al.*, *Phys. Rev. A* **44**, 6188 (1991); R. Sigel *et al.*, *Phys. Rev. A* **45**, 3987 (1992).
- [38] T. Endo *et al.*, *Phys. Rev. E* **49**, R1815 (1994); K. Eidmann *et al.*, *Phys. Rev. E* **52**, 6703 (1995).
- [39] Y. Kato *et al.*, *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1994*, vol. 3, p. 45 (1995).
- [40] B.G. Levi, *Phys. Today* **47**, 17 (September, 1994).
- [41] C. Yamanaka *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 1575 (1986).
- [42] C. Yamanaka *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research 1986*, vol. 3, p. 33. IAEA, Vienna (1987).
- [43] T.R. Boehly *et al.*, in *Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference*, paper B1-3, Montreal, October 7-11, 1996.
- [44] H. Takabe *et al.*, *Phys. Fluids* **31**, 2884 (1988); H. Takabe *et al.*, *Laser Part. Beams* **7**, 2884 (1989).
- [45] M.C. Richardson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **56**, 2048 (1986).
- [46] M. Andre *et al.*, *Laser Part. Beams* **10**, 557 (1992).
- [47] T.R. Dittrich *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2324 (1994).
- [48] C. Bayer *et al.*, *Nucl. Fusion* **24**, 573 (1984).
- [49] J.D. Kilkenny *et al.*, in *Proc. 12th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Nice, Paper No. IAEA-CN-50/B-I-3 (1988, Vienna: International Atomic Energy Agency).
- [50] F.J. Marshall *et al.*, *Phys. Rev. A* **40**, 2547 (1989).
- [51] E. Storm *et al.*, in *Proc. 13th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Washington DC, Paper No. IAEA-CN-53/B-II-3 (1990, Vienna: International Atomic Energy Agency).
- [52] D.K. Bradley, J.A. Delettretz and C.P. Verdon, *Phys. Rev. Lett.* **68**, 2774 (1992).
- [53] M.D. Cable *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2316 (1994).
- [54] R.L. McCrory *et al.*, in *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion research 1988* vol. 3, p.17-27, IAEA, Vienna (1989).
- [55] 宮永憲明: プラズマ・核融合学会誌別冊 **68**, 49 (1992).
- [56] Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga, S. Arinaga, Y. Kitagawa, M. Nakatsuka and C. Yamanaka, *Phys. Rev. Lett.* **53**, 1057 (1984).
- [57] 宮永憲明, 山中正宣, 山中龍彦: プラズマ・核融合学会誌 **66**, 357 (1991); 山中龍彦, 宮永憲明: プラズマ・核融合学会誌 **66**, 614 (1991).
- [58] H. Takabe, K. Nishihara, K. Mima, S. Nakai, H. Sakagami, A. Nishiguchi and C. Yamanaka, in *Plasma Physics and*

- Controlled Nuclear Fusion Research 1992*, vol. 3, p. 143, IAEA, Vienna (1993).
- [59] H. Takabe, K. Mima, L. Montierth and R.L. Morse, *Phys. Fluids* **28**, 3676 (1985).
- [60] S. Bodner, *Phys. Rev. Lett.* **33**, 761 (1974).
- [61] 疇地宏：プラズマ・核融合学会誌別冊 **68**, 31(1992).
- [62] 中井 (Chap.1.3.4, in this issue).
- [63] 長友 (Chap.1.3.2.1, in this issue).
- [64] T.R. Boehly *et al.*, *Opt. Commun.* **133**, 495 (1997).
- [65] J.A. Paisner *et al.*, in *Proc. First Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion 1995*, SPIE Proceedings Series vol. 2633, p.2-12 (1995); J.A. Paisner, J.D. Boyes, S.A. Kumpan, M. Sorem, *LLNL ICF Quarterly Report*, UCRL-LR-105821-95-2, Vol. 5, No. 2, p.110-118, Lawrence Livermore National Laboratory (1995);近況は <http://www.llnl.gov/nif/> を参照.
- [66] R.H. Lehmberg and J. Goldhar, *Fusion Tech.* **11**, 532 (1987).
- [67] S. Skupsky, R.W. Short, T. Kessler, R.S. Craxton, S. Letzring and J. Soures, *J. Appl. Phys.* **66**, 3456 (1989).
- [68] H. Nakano *et al.*, *J. Appl. Phys.* **73**, 2122 (1993).
- [69] N. Miyanaga *et al.*, in *Proc. First Annual International Conference on Solid State Lasers for Application to Inertial Confinement Fusion 1995*, SPIE Proceedings Series vol. 2633 (1995) p.183-190.
- [70] M. Murakami and S. Iida, *Phys. Plasmas* **9**, 2745 (2002).
- [71] M.D. Cable *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **73**, 2316 (1994).
- [72] Y. Kato *et al.*, in *Proc. 12th International Conference on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena 1995*, AIP Conference Proceedings 369, p.101-107 (1996).
- [73] H. Shiraga *et al.*, in *Proc. 12th International Conference on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena 1995*, AIP Conference Proceedings 369, p.108-112 (1996).
- [74] K. Mima *et al.*, *Phys. Plasmas* **3**, 2077 (1996).
- [75] M. Heya *et al.*, *Laser Part. Beams* **19**, 267 (2001).
- [76] F. Marshall *et al.*, *presented at the 46th Annual Meeting of the Division of Plasma Physics*, American Physical Society, Nov. 15-19, 2004, Savannah, USA (*to be published in Phys. Plasmas*).
- [77] 重森, 他 (Chap.1.2.2.2, in this issue).
- [78] K. Shigemori *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **78**, 250 (1997); *ibid.*, **80**, 3415 (1998).
- [79] S. Fujioka *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **92**, 195001 (2004).
- [80] D. Strickland and G. Mourou, *Opt. Commun.* **56**, 219 (1985).
- [81] K. A. Tanaka *et al.*, *Phys. Plasmas* **7**, 2014 (2000); R. Kodama *et al.*, *Phys. Plasmas* **8**, 2268 (2001); Y. Kitagawa *et al.*, *Phys. Rev. E* **71**, 016403 (2005).
- [82] R. Kodama *et al.*, *Nature*, **412**, 798 (2001); R. Kodama *et al.*, *Nature*, **418**, 933 (2002).
- [83] R. Stephens *et al.*, *Phys. Plasmas*, **12**, 056312 (2005).
- [84] H. Shiraga *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **75**, 3921 (2004).
- [85] M. Murakami and H. Nagatomo, *Nucl. Instrum. Meth. in Physics Research, Section A*, **544**, 67 (2005).
- [86] K.A. Tanaka, T. Yamanaka, K. Nishihara, T. Norimatsu, N. Miyanaga, H. Shiraga, M. Nakai, Y. Kitagawa, R. Kodama, T. Kanabe *et al.*, *Phys. Plasmas* **2**, 2495 (1995).
- [87] T.C. Sangster, J.A. Delettrez, R. Epstein, V.Yu. Glebov, V.N. Goncharov, D.R. Harding, J.P. Knauer, R.L. Keck, J. D. Kilkenny, S.J. Loucks *et al.*, *Phys. Plasmas* **10**, 1937 (2003).