

核融合燃料の高密度圧縮の展開

白神 宏之

大阪大学 レーザーエネルギー学研究中心 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

High-Density Implosion of Fuel Target for Laser Fusion

Hiroyuki SHIRAGA

Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received March 1, 2004)

High-density implosion of fuel targets for laser-driven inertial confinement fusion has been intensively studied for many years. High temperature and high density of the imploded core plasmas up to 10 keV and 600 g/cm³, respectively were achieved successfully. Then, hydrodynamically equivalent plasma (HEP) with central spark/main fuel structure has been demonstrated for central spark ignition scheme. On the other way, implosion for fast ignition scheme, particularly nonuniform implosion of target with cone for entrance of heating laser, has recently been studied. Thermonuclear ignition and burn of inertial confinement fusion by laser are expected to take place near the year 2010.

Key Words: Laser fusion, Implosion, Hot spark, Main fuel, Fast ignition

1. 序論—爆縮研究の歴史的概観

レーザーを用いた慣性閉じこめ核融合の研究は、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研究が進められてきた。(Table 1)

最初の爆縮の概念は1972年に米国より提案された¹⁾。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100~1000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、というシナリオである。これを中心点火方式という。燃料の密度・半径積(ρR)が3.5 MeVの α 粒子の飛程0.3 g/cm²を越えればスパーク部でDT核融合反応により発生した α 粒子が主燃料を自己加熱し、点火・燃焼が起こると期待されている。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²⁾、NOVA³⁾、Phebus⁴⁾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、点火に必要なとされる高温(5-10 keV)爆縮^{5,6)}あるいは高密度(固体密度の数100~1000倍)爆縮⁷⁾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⁸⁾と呼ばれる点火方式が提案された。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、従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。

本稿では、主にターゲットを直にレーザーで照射する直接照射爆縮に限って、これまでの研究段階で課せられた課題とその成果、今後の展望について、概観的に述べてみたい。

2. 燃料の高温度圧縮

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十分な温度まで加熱することは、1985年に大阪大学の激光XII号レーザー(波長0.53 μ m, 光出力15 kJ, 12ビーム)による発生中性子イールド10¹²個/ショット⁵⁾の実験、さらに1986年の発生中性子イールド10¹³個/ショット(核融合利得=0.2%)を得た⁶⁾実験で実証されてきた。ここではLHART(Large High Aspect Ratio Target)と呼ばれる直径1 mm, 殻厚1 μ 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

Table 1 Progress of laser-driven fusion study.

Year	Achievements	Country	Institution
Construction of lasers and high-temperature implosions			
Construction of 10-100 kJ class laser systems for implosion study			
1980	OMEGA(24beams, ω :5 kJ, 3ω :3 kJ)	USA	Univ. Rochester
1983	GEKKO-XII(12 beams, ω :20 kJ, 2ω :15 kJ, 3ω :10 kJ)	Japan	Osaka Univ.
1985	NOVA(10 beams, ω :100 kJ, 3ω :50 kJ)	USA	LLNL
1986	Phebus(2 beams, ω :20 kJ, 3ω :10 kJ)	France	Limell
1995	OMEGA-UG(60 beams, 3ω :40 kJ)	USA	Univ. Rochester
High-temperature, high-yield implosion experiments			
1985	10^{12} neutrons, GEKKO-XII, 2ω :15 kJ	Japan	Osaka Univ.
1986	10^{13} neutrons, GEKKO-XII, 2ω :15 kJ, η =0.2%, 10 keV	Japan	Osaka Univ.
1986	2×10^{13} neutrons, NOVA, 3ω :25 kJ	USA	LLNL
1995	10^{14} neutrons, OMEGA-UG, 3ω :30 kJ, η =1.0%	USA	Univ. Rochester
*LLNL: Lawrence Livermore National Laboratory, NRL: Naval Research Laboratory.			
Improvement of irradiation uniformity and high-density implosions			
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, 3ω :3 kJ (cryogenic DD)	USA	Univ. Rochester
1987	100 XLD, NOVA, 3ω :20 kJ (gas DT)	USA	LLNL
1988-90	600 XLD, GEKKO-XII, 2ω :10 kJ (CDT plastic)	Japan	Osaka Univ.
Development of beam smoothing technology and HEP implosion experiments			
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, 3ω :40 kJ), direct drive	USA	Univ. Rochester
1995-	GEKKO-XII, PCL, direct drive	Japan	Osaka Univ.
Construction of ultra-intense lasers and fast ignition experiments			
Construction of ultra short, ultra intense laser beams			
-1996	1 PW laser, 1beam	USA	LLNL
-1997	100 TW laser, 1beam	Japan	Osaka Univ.
-2001	1 PW laser, 1beam	Japan	Osaka Univ.
2003-	10 kJ/1-10 ps (1-10 PW)/laser, 4 beams coupled	Japan	Osaka Univ.
Fast ignition experiments			
2000	Heating demonstrated, GEKKO-XII + 100TW laser	Japan	Osaka Univ.
2002	Heating up to 1 keV, GEKKO-XII + 1PW laser	Japan	Osaka Univ.
Planned ignition/burning projects			
2010?	NF (192 beams, 3ω :1.8 MJ/500 TW), G=10-20, indirect drive	USA	LLNL
2012?	LMJ (240 beams, 3ω :1.8 MJ/500 TW), G=10-20, indirect drive	France	Limell
2010?	FIREX (50 kJ implosion +50 kJ heating), G=1-10, direct drive+fast ignition	Japan	Osaka Univ.
*G:target gain=fusion output./laser energy			

したターゲットが用いられた。これはシェルが薄いので高い爆縮速度になり高温度爆縮を得やすいためである。観測された中性子スペクトルから、イオン温度はほぼ10 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 1×10^8 cm/sでのイオンの運動エネルギーに対応する値であり、設計通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ビームの強度分布の平滑化について、特に何も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 μ m光出力30 kJ, 60ビーム)を用いて中性子イールド 10^{14} 個/ショット(核融合利得=1.0%)が得られている⁹⁾。

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。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は、主燃料を持たない状態での中心スパーク加熱のみを行ったことに相当する。このような模擬として、アスペクト比に対するLHARTの中性子イールド、従って達成された中心スパーク温度の依存性が詳細に調べられた。

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¹⁰⁾から、燃料加熱が成功し1次元球対称シミュレーション通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

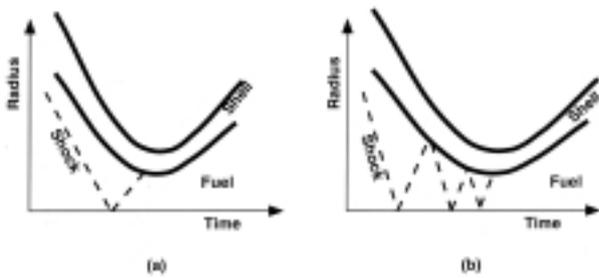


Fig. 1 Flow diagram of imploded core plasma. (a) Stagnation-free implosion. (b) Heavily stagnated implosion.

(Fig. 1 (a))であることがわかった。逆を言えば、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では爆縮球対称性は維持できていないことと結論された。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周辺の密度が比較的高いガラスプラズマの形状が球対称ではなく、そこまで戻った衝撃波は球対称性が乱されて再度DTプラズマの中心に向かって収束することが妨げられ、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す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訳である。

LHARTとは別に内部にDDまたはDTガス燃料を充填したターゲットの爆縮実験においても中性子発生数が1次元シミュレーション予測を下回るについては様々な解釈がなされてきた。たとえば、プッシャー/燃料の流体混合¹¹⁻¹³⁾、コアプラズマの3次元変形¹⁴⁾、それらの合成¹⁵⁻¹⁹⁾、などが考えられてきている。説明するモデルは複数あるが、これらはすべて、爆縮の対称性(あるいは一様性)に関係するものであることがわかる。

3. 主燃料の高密度圧縮

上記の研究を受け、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年に米国ロチェスター大学OMEGAレーザー(0.35 μm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倍の圧縮がなされたと発表された²⁰⁾。これに引き続き、1988年には大阪大学激光XII号(0.53 μm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⁷⁾。この密度は点火プラズマに必要とされる密度(固体密度の数100~1000倍程度)の領域に達しており、実際に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²¹⁾により詳細に報告されているが、LHART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 μm、殻厚4~12 μmの中空重水素化ポリスチレンシェル(C₈D₈)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)²²⁾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、ρR値が放射化法²³⁾を主とした各種方法で測定されたこと、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ρR=0.5 g/cm²、燃料密度は600 g/cm³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、予測通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ることが出来る。即ち、計測された爆縮ρR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加熱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、中心スパーク加熱には成功しなかったと結論された²⁴⁾。

この理由は、爆縮一様性が不十分であったと考えられ、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^{25,26)}などを含めたレイリー・テイラー(RT)不安定性として評価した。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²⁷⁾。

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ρR値はほぼ予想通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。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られるに至っていない。きわめてチャレンジングではあるが、スタグネーション時のコアプラズマ構造の高時間・空間分解計測と多次元シミュレーションコードによる解析が必要になるであろう。

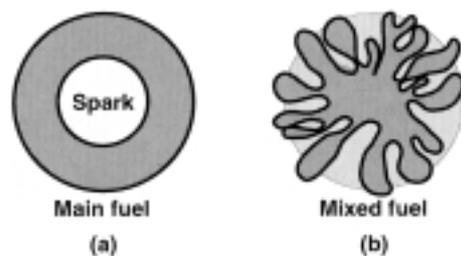


Fig. 2 Schematic structure of core plasmas. (a) Central spark/ main fuel structure. (b) Heavily mixed core plasma.

4. 中心スパーク構造形成

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出来たわけではない。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，これを如何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²⁸⁾に，米国のNIF (National Ignition Facility) では192ビーム²⁹⁾†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ている。ランダム位相板²²⁾，空間インコヒーレンス制御 (Induced Spatial Incoherence: ISI)³⁰⁾ やスペクトル制御による均一化 (Smoothing by Spectral Dispersion: SSD)³¹⁾ の技術，さらに増幅された自然放出光を種とした増幅 (Amplified Spontaneous Emission: ASE)³²⁾，部分コヒーレント光 (Partially Coherent Light: PCL) 技術³³⁾ 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)空間制御を駆使したものであり，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。もちろん，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ーが点火クラスの爆縮と等価³⁴⁾ 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った。

この課題に対し，1994年に米国リバモア研で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。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³⁵⁾。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を指向した一様爆縮の実験が行われた^{36,37)}。また，1995年に稼働を開始したロチェスター大学の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いる。

直接照射方式でこれまでに達成されている成果としては，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 μm のPCL光でDDガス燃料充填CHシェル(直径500 μm ，シェル厚7 μm)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を調べたものがあげられる^{36,37)}。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，乱れていないスパーク部分 (unperturbed) と全体のスパーク部分の体積比で評価されることが解った。さらに，照射非一様性に空間モード1の成分がある場合，スパーク部は主燃料から外部に流出することなども解った³⁸⁾。この実験では半径収縮率 ~ 7 まではほぼ球対称予測通りのスパーク性能が達成されている。

また，これらの総合試験としてのHEP爆縮実権と平行して，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。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³⁹⁾ やX線輸送の利用⁴⁰⁾ により，直接照射でのRT不安定性の成長率は従来より予測よりも小さくできることが示されており，より高い半径収縮率でスパーク構造を維持した爆縮達成に向け，研究が続けられている。

5. 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)⁴¹⁾ により，超短パルスでPW (10^{15} 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，先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に研究されはじめてきている。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よる

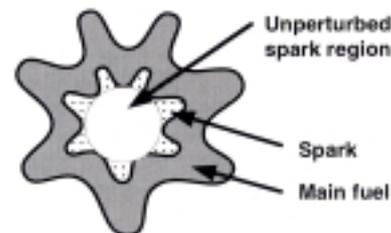


Fig. 3 Effective volume of central spark in distorted core plasma.

†<http://www.llnl.gov/nif/>

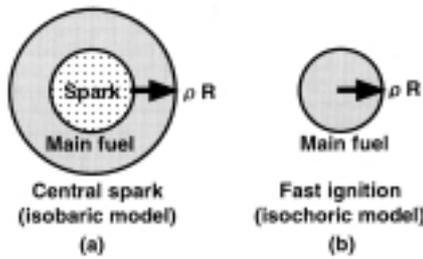


Fig. 4 Structure of core plasmas. (a)Central spark and main fuel (isobaric model). (b)Fast ignition (isochoric model).

点火と見なされることから高速点火⁴²⁾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 ρR 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る。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済む。

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加熱する。高速電子発生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 μm 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高密度のプラズマが存在し、その中を出来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を行わせる方式が提案された。しかし、最近新しい手法として、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、新しいターゲット設計として注目されている (Fig. 5)。大阪大学では1997年に100TW/0.5 ps、2001年に1 PW/1 psのビームラインが完成し、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1 keVまで追加熱するこ

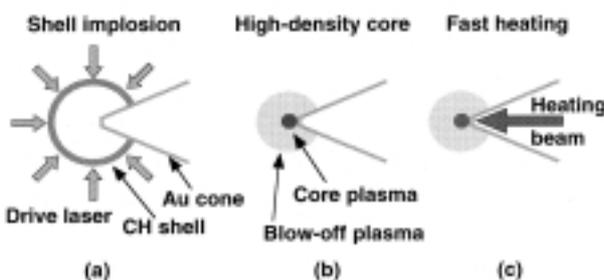


Fig. 5 Fast ignition of a shell with a cone. (a) Implosion of the shell. (b) Formation of the high-density core. (c) Fast ignition by injection of an ultra-short, ultra-intense laser.

とに成功した⁴³⁾。原理的には、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。

当然、このようなコーン付きのシェルターゲットでは、爆縮はコーン方向にモード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、50g/cm³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解ってきている。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。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待たれている。固体密度の数100倍~1000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、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。

6. クライオ燃料の爆縮と今後の展望

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。そのために初期に固体密度のDT層を持ったターゲットを波長0.35 μm のレーザーで照射し、このような密度が得られることを確かめなくてはならない。Fig. 6は計算機シミュレーション結果の一例であるが、半径498 μm のCHシェルにクライオDT燃料層を設けたターゲットを用い、ガウス型波形で50 kJ/3.2 nsの波長0.35 μm レーザーを照射したものである。最大圧縮時に燃料密度は190 g/cm³(固体密度の約1000倍)、燃料 $\rho R = 0.5 \text{ g/cm}^2$ が得られている。このターゲットは、先述した固体密度の600倍の高密度圧縮⁷⁾の実験に用いられたものの、空

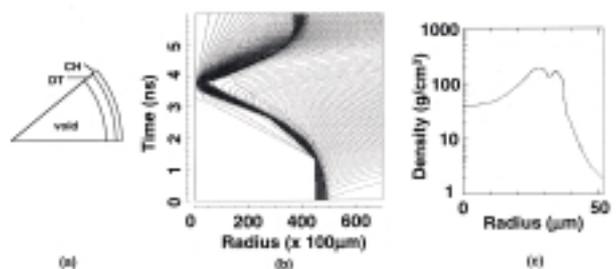


Fig. 6 Simulation of cryogenic DT target implosion. (a) target structure. (b) Flow diagram of implosion. (c) Density structure of the core. (Conditions. Laser: 0.35 μm light, 50 kJ/3.2 ns Gaussian pulse. Target: initial radius = 498 μm , DT/CH thickness=30/14 μm . Results: Core radius=31 μm , core density=190 g/cm³, fuel $\rho R=0.5 \text{ g/cm}^2$).

間スケールで約2倍, 投射レーザーエネルギーで約 $2^3=8$ 倍の流体等価爆縮になっており, 計算結果の信頼性は高いと考えられる. また, このようなターゲットでは, レーザー光の吸収効率を上げ, 燃料のプリヒートを抑制するために, DT燃料層の外側にCHアブレーターが必要であることも解っている. このような設計でレーザーやターゲットパラメータに対する最適化を行い, アブレーションによる流体力学的不安定性の安定化を取り入れれば, さらに高密度の圧縮も可能となろう. 実際のクライオ化燃料ターゲットの爆縮に関しては, 既に大阪大学⁴⁴), ロチェスター大学⁴⁵)でDDの実験がなされている. しかし, 燃料のプリヒートあるいはクライオ重水素燃料層の一様性が十分でないなどの理由により, 満足できる高密度圧縮はまだ達成されていない. 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, 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研究が急務である.

以上のように, 燃料の高温高密度圧縮は段階ごとに知見を得, レーザーの技術を進歩させるなどの成果を生み出し発展してきた. しかし, それでもまだ爆縮プラズマ, 特に爆縮コア内部の詳細なダイナミクスに関しては未解決の課題も多い. 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年頃に間接照射での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.

参考文献

- 1) J. Nuckolls, L. Wood, A. Thiessen, and G. Zimmerman: *Nature* **239** (1972)139.
- 2) C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Kato, K. Mima, K. Nishihara, T. Mochizuki, M. Yamanaka, M. Nakatsuka, et al: *Nucl. Fusion* **27** (1987) 19.
- 3) J. T. Hunt and D. R. Speck: *Opt. Eng.* **28** (1989) 461.
- 4) G. Thiell, A. Adolf, M. Andre, N. Fleurot, D. Friart, D. Juraszek, and D. Schirmann: *Laser part. Beams* **6** (1988) 93.
- 5) C. Yamanaka, S. Nakai, T. Yabe, H. Nishimura, S. Uchida, Y. Izawa, T. Norimatsu, N. Miyanaga, A. Azechi, M. Nakai, et al: *Phys. Rev. Lett.* **56** (1986) 1575.
- 6) C. Yamanaka, K. Mima, S. Nakai, T. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Kato, K. Nishihara, T. Mochizuki, M. Yamanaka, M. Nakatsuka, et al: *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* 1986, vol. 3, p. 33. IAEA, Vienna (1987).
- 7) H. Azechi, T. Jitsuno, T. Kanabe, M. Katayama, K. Mima, N. Miyanaga, M. Nakai, S. Nakai, H. Nakaishi, M. Nakatsuka, et al., *Laser Part. Beams*, **9** (1991) 193; S. Nakai, K. Mima, T. Yamanaka, Y. Izawa, Y. Kato, K. Nishihara, T. Sasaki, M. Nakatsuka, M. Yamanaka, H. Azechi, et al.; *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* 1990, vol. 3, p. 29, IAEA, Vienna (1991).
- 8) 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: *Phys. Plasmas* **1**(1994) 1626.
- 9) T. R. Boehly, R. L. McRory, S. J. Loucks, J. M. Soures, C. P. Verdon, A. Babushkin, R. E. Bahr, R. Boni, D. K. Bradley, D. L. Brown, et al.: *Proc. 16th IAEA Fusion Energy Conference*, paper B1-3, Montreal, October 7-11, 1996.
- 10) H. Takabe, M. Yamanaka, K. Mima, C. Yamanaka, H. Azechi, N. Miyanaga, M. Nakatsuka, T. Jitsuno, T. Norimatsu, M. Takagi, et al.: *Phys. Fluids* **31** (1988) 2884; H. Takabe, et al., *Laser Part. Beams* **7** (1989) 2884.
- 11) M. C. Richardson, P. W. McKenty, R. L. Keck, F. J. Marshal, D. M. Roback, C. P. Verdon, R. L. McCrory, and J. M. Soures: *Phys. Rev. Lett.* **56** (1986) 2048.
- 12) M. Andre, C. Bayer, D. Babonneau, M. Bernard, J. L. Bocher, J. Bruneau, A. Coudeville, J. Coutant, R. Dautray, A. Decoster, et al.: *Laser Part. Beams* **10** (1992) 557.
- 13) T. R. Dittrich, B. A. Hammel, C. J. Keane, R. McEachern, R. E. Turner, S. W. Haan, and L. J. Suter: *Phys. Rev. Lett.* **73** (1994) 2324.
- 14) C. Bayer, M. Bernard, D. Billon, M. Decroisette, D. Galmiche, D. Juraszek, J. Launspach, D. Meynial, and B. Sitt: *Nucl. Fusion* **24** (1984) 573.
- 15) J. D. Kilkenny, M. D. Cable, E. M. Campbell, L. W. Coleman, D. L. Correl, R. P. Drake, R. J. Ellis, S. G. Glendinning, C. W. Hatcher, S. P. Hatchett, et al.: *Proc. 12th International Conference on Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research*, Nice, Paper No. IAEA-CN-50/B-I-3 (1988, Vienna: IAEA).
- 16) F. J. Marshall, S. A. Letzring, C. P. Verdon, S. Skupsky, R. L. Keck, J. P. Knauer, R. L. Kremens, D. K. Bradley, T. Kessler, J. Delettrez, et al.: *Phys. Rev. A* **40** (1989) 2547.
- 17) E. Storm, S. H. Batha, T. P. Bernat, C. Biseau, M. D. Cable, J. A. Caird, E. M. Campbell, J. H. Campbell, L. W. Coleman, R. C. Cook, et al.: *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).
- 18) D. K. Bradley, J. A. Delettrez, and C. P. Verdon: *Phys. Rev. Lett.* **68** (1992) 2774.
- 19) 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, et al.: *Phys. Rev. Lett.* **73** (1994) 2316.
- 20) R. L. McCrory, J. M. Soures, C. P. Verdon, F. J. Marshal, S. A. Letzring, T. J. Kessler, J. P. Knauer, H. Kim, R. L. Kremens, S. Skupsky, et al.: *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion research* 1988 vol. 3, p. 17-27, IAEA, Vienna (1989).
- 21) 宮永 憲明, プラズマ・核融合学会誌別冊 **68** (1992) 49.
- 22) Y. Kato, K. Mima, N. Miyanaga, S. Arinaga, Y. Kitagawa, M. Nakatsuka, and C. Yamanaka: *Phys. Rev. Lett.* **53** (1984) 1057.
- 23) 宮永 憲明, 山中 正宣, 山中 龍彦: プラズマ核融合学会誌 **66** (1991) 357; 山中 龍彦, 宮永 憲明: プラズマ核融合学会誌 **66** (1991) 614.
- 24) H. Takabe, K. Nishihara, K. Mima, S. Nakai, H. Sakagami, A. Nishiguchi, and C. Yamanaka: *Plasma Physics and Controlled Nuclear Fusion Research* 1992, vol. 3, p. 143, IAEA, Vienna (1993).
- 25) H. Takabe, K. Mima, L. Montierth, and R. L. Morse: *Phys. Fluids* **28** (1985) 3676.
- 26) S. Bodner: *Phys. Rev. Lett.* **33** (1974) 761.
- 27) H. Azechi: private communication.
- 28) T. R. Boehly, D. L. Brown, R. S. Craxton, R. L. Keck, J. P. Knauer, J. H. Kelly, T. J. Kessler, S. A. Kumpan, S. J. Loucks, S. A. Letzring, et al.: *Opt. Commun.* **133** (1997) 495.
- 29) J. A. Paisner, J. D. Boyes, S. A. Kumpan, and M. Sorem: LLNL ICF Quarterly Report, UCRL-LR-105821-95-2, Vol. 5, No. 2, pp. 110-118, Lawrence Livermore National Laboratory (1995).
- 30) R. H. Lehberg and J. Goldhar: *Fusion Tech.* **11** (1987) 532.
- 31) S. Skupsky, R. W. Short, T. Kessler, R. S. Craxton, S. Letzring, and J. Soures: *J. Appl. Phys.* **66** (1989) 3456.
- 32) H. Nakano, K. Tsubakimoto, N. Miyanaga, M. Nakatsuka, T. Kanabe, H. Azechi, T. Jitsuno, and S. Nakai: *J. Appl. Phys.* **73** (1993) 2122.
- 33) N. Miyanaga, S. Matsuoka, A. Ando, K. Tsubakimoto, S. Amano, M. Nakatsuka, T. Takabe, T. Jitsuno, and S. Nakai: *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.
- 34) M. Murakami and S. Iida: *Phys. Plasmas* **9** (2002) 2745.
- 35) 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, et al.: *Phys. Rev. Lett.* **73** (1994) 2316.
- 36) Y. Kato, H. Azechi, H. Takabe, N. Miyanaga, T. Kanabe, T. Norimatsu, H. Nishimura, H. Shiraga, M. Nakai, R. Kodama, et al.: *Proc. 12th International Conference on Laser Interaction and Related Plasma Phenomena* 1995, AIP Conference Proceedings 369,

- p.p. 101-107 (1996); H. Shiraga, M. Heya, M. Nakasuji, H. Azechi, N. Izumi, T. Yamagajo, M. Saito, T. Urano, Y. Kitagawa, S. Miyamoto, et al., *ibid.*, p. 108-112 (1996).
- 37) Mima, Y. Kato, H. Azechi, K. Shigemori, H. Takabe, N. Miyanaga, T. Kanabe, T. Norimatsu, H. Nishimura, H. Shiraga, et al.: *Phys. Plasmas* **3** (1996) 2077.
- 38) M. Heya, H. Shiraga, A. Sunahara, M. Nakasuji, M. Nishikino, H. Honda, K. Fujita, N. Izumi, N. Miyanaga, H. Nishimura, et al.: *Laser Part. Beams* **19** (2001) 267.
- 39) K. Shigemori, H. Azechi, M. Nakai, M. Honda, K. Meguro, N. Miyanaga, H. Takabe, and K. Mima: *Phys. Rev. Lett.* **78** (1997) 250; *ibid.*, **80** (1998) 3415.
- 40) S. Fujioka, A. Sunahara, K. Nishihara, N. Ohnishi, T. Johzaki, H. Shiraga, K. Shigemori, M. Nakai, T. Ikegawa, M. Murakami, et al.: to be published in *Phys. Rev. Lett.*
- 41) D. Strickland and G. Mourou: *Opt Commun.* **56** (1985) 219.
- 42) 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: *Phys. Plasmas* **1**(1994) 1626.
- 43) R. Kodama, P. A. Norreys, K. Mima, A. E. Dangor, R. G. Evance, H. Fujita, Y. Kitagawa, K. Kurschhelnick, T. Miyakoshi, N. Miyanaga, et al., *Nature* **412** (2001) 798; R. Kodama, H. Shiraga, K. Shigemori, Y. Toyama, S. Fujioka, H. Azechi, H. Fujita, H. Habara, T. Hall, Y. Izawa, et al.: *Nature* **418** (2002) 933.
- 44) 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** (1995) 2495.
- 45) 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** (2003) 1937.