



解説

米国立点火施設—National Ignition Facility—における レーザー核融合および高エネルギー密度科学研究の展望

MOSES Edward I., KEANE Christopher J., AL-AYAT Rokaya,
REMINGTON Bruce A. and COLLINS Gilbert W.

Lawrence Livermore National Laboratory, Livermore, CA 94550 USA

(原稿受付：2011年3月24日)

米国カリフォルニア州にあるローレンスリバモア国立研究所の国立点火施設 (National Ignition Facility: NIF) が稼働を始めた。NIF は史上最大のエネルギーを有するレーザー装置である。192本の NIF ビームのエネルギーを数ミリのターゲットに集中させることで、従来の実験室では到底作り出すことができなかった極限環境、具体的には惑星や星の内部に匹敵する 1 億度以上の温度、 1000 g/cm^3 以上の密度、一千億気圧の圧力の状態を作り出すことができる。本解説記事では NIF が可能にした新しい科学研究について概説する。慣性閉じ込め核融合方式による核融合点火実証キャンペーン (National Ignition Campaign: NIC) の成果を最初に紹介する。続いて、極限的な高圧・高温状態下における物質の研究、天文現象や一般科学における未解決問題の解明など、NIF によって切り拓かれる高エネルギー密度科学分野の展望について解説する。

Keywords:

ignition, national ignition facility, inertial confinement fusion, national ignition campaign, high energy density science, laboratory astrophysics, fundamental plasma science, material science

1. 国立点火施設 / THE NATIONAL IGNITION FACILITY (NIF)

国立点火施設 (National Ignition Facility: NIF) は米国エネルギー省 (Department of Energy: DOE) が管轄する、慣性閉じ込め核融合 (Inertial Confinement Fusion: ICF) および高エネルギー密度 (High Energy Density: HED) 科学の拠点研究施設である [1]。同等の性能の装置として、フランス原子力庁 (Commissariat à l'Énergie Atomique: CEA) がボルドー市近くに建設している、レーザーメガジュール (Le Laser Mégajoule: LMJ) [2] がある。

NIF 計画は1990年代初頭に立案され、正式に開始したのは1995年である。米国ローレンスリバモア研究所の NOVA レーザー [3]、米国ロチェスター大学の OMEGA レーザー [4]、仏国エコールポリテクニクの LULI レーザー [5]、ラザフォードアップルトン研究所の Vulcan レーザー [6]、そして大阪大学の GEKKO/LFEX レーザー [7] など、大エネルギー高出力レーザーの長年の知見・技術の蓄積に基づき NIF および LMJ は建設された。

NIF の建設は1997年5月27日に開始され、35億 US ドル (100円/US ドル換算で3500億円) の費用をかけ2009年3月に無事完成した。DOEが完成させた科学プロジェクトの中で最も多い2300社以上の企業が NIF の建設に参加した。NIF における優れたプロジェクト運営は高く評価され、プロジェクトマネジメント協会 (Project Management

Institute: PMI) の名誉ある Project of Year に選ばれた [8]。PMI は賞の選定理由として、NIF における画期的技術革新と模範的なプロジェクト管理実績に言及している。

図1は NIF の主要な装置を図解している。192本のレーザービーム (波長 $1.053\text{-}\mu\text{m}$) が設置された二つのレーザー室 (Laser Bay)；レーザービームをターゲットチャンバーに導く切替室 (Switchyard)；レーザー光の波長を紫外線 (波長 $0.351\text{-}\mu\text{m}$) に変換した後、直径 10 m の真空チャンバーの中心に置かれたターゲットに集光するターゲット室 (Target Area)；計測器の操作およびデータ通信を管理する計測建屋 (Diagnostic Building)；レーザー室、レーザー切り替え室、最終光学系の光学素子を交換するための機器 (Line-Replaceable Units: LRU) に組み込むための光学組立室 (Optics Assembly Building: OAB) がある。NIF の建屋は $350,000 \text{ m}^3$ であり、広さは $150 \text{ m} \times 90 \text{ m}$ で高さは10階建て相当である。微小なターゲットにレーザーを正確に当てるには、建屋が安定で振動に強くなければならず、コンクリート床の厚さはターゲット室で 2 m、レーザー室で 1 m である。レーザービームの集光位置と集光品質に対する要求を満足させるために、レーザー室の温度揺らぎは摂氏 ± 0.3 度になるように制御されている。NIF は 33,500 以上の大型・小型の光学素子で構成され、200 万行以上のプログラムで書かれたソフトウェアで 60000 箇所以上が制御されている史上最も大きな光装置でもある。

Inertial Confinement Fusion and High Energy Density Science Experiments at the National Ignition Facility

MOSES Edward I., KEANE Christopher J., AL-AYAT Rokaya, REMINGTON Bruce A. and COLLINS Gilbert W.

corresponding author's e-mail: keane1@llnl.gov



図1 NIFの鳥瞰写真。二つのレーザー室(Laser bay)、切り替え室(switchyard)、ターゲットチャンバー(target chamber area)、計測室(diagnostics building)等で構成されている。

フラッシュランプ励起の固体ネオジウムガラスの増幅器がNIFで用いられている[9, 10]。単一ビームの大きさは $40\text{ cm} \times 40\text{ cm}$ であり、隣合う4ビームの組み合わせを“クアド(quad)”と呼び、上下二つのクアドの組を“バンドル(bundle)”と呼ぶ、6つのバンドルをまとめて“クラスター(cluster)”と呼び、最終的にNIFは4つのクラスターで構成されている。レーザーは一つの発振器、4本のレーザービームを同時に増幅する48台の前増幅器および主増幅器列で構成されている。発振器から最終出力までの光増幅利得はおよそ 10^{15} である。NIFは約5 MJの赤外レーザー光を20ナノ秒のパルスで伝搬することができる。NIFレーザーの能力については参考文献[10]に詳しく書かれている。

切替室を経由してターゲットチャンバーに導かれた赤外波長のレーザー光は、ターゲットチャンバーの外側に置かれたKDP結晶対で $0.351\text{-}\mu\text{m}$ の紫外波長に変換される。(二倍高調波への変換にはKDP: Potassium Dihydrogen Phosphateが用いられ、三倍高調波への変換には重水素化KDPが使われている)[10]。レーザー光を短波長化することによって、ターゲットとレーザーの結合効率が高められる[11]。最初の点火実証実験に向けて、NIFの192ビームの合計エネルギーを1.3 MJにまで上げた運転が行われている。来年中に、NIFの紫外レーザーのエネルギーは設計上限値である1.8 MJに達し、核融合点火および基礎科学研究で必要とされる高い温度、高い密度を実現する予定である。なお、単一バンドル単位での、1.8 MJ相当の出力に成

功している[10]。

直径10 mのNIFターゲットチャンバーには、全レーザービーム用の入射窓、計測器およびターゲットを取り付けるための100個の窓が設けられている。X線および中性子のスペクトル分析器、X線結像素子およびストリークカメラはターゲットチャンバーの赤道および極に取り付けられている[12]。NIFに関するさらに詳細な情報は、文献[1, 8-10]とその引用文献中で見つけることができる。

2. 国家点火キャンペーン／THE NATIONAL IGNITION CAMPAIGN

NIFの最初のゴールは、実験室で慣性閉じ込め方式による核融合点火を実証することである。このことは慣性核融合エネルギーの科学的妥当性を証明することと同時に、高エネルギー密度科学の新しい領域を切り拓くことに繋がる。点火ターゲットの物理に関する詳細な議論は参考文献[11]に記述されている。

NIFにおける核融合点火実証は国家点火キャンペーン-National Ignition Campaign: NIC-として遂行されている。このキャンペーンにはジェネラルアトミックス社(GA)、ローレンスリバモア研究所(LLNL)、ロスアラモス(LANL)およびサンディア国立研究所(SNL)、ロチェスター大学のレーザーエネルギー研究所(LLE)が参加し、ローレンス・バークレー国立研究所(LBNL)、マサチューセッツ工科大学、英国原子力兵器機構(AWE)および仏国原子力庁(CEA)から多くの共同研究者を迎えている。

[13]. NIC は二つの主目的を有している。一つは低温固化した核融合燃料球殻を用いて核融合点火統合実験を遂行すること。もう一つは2012年度までに再現良く点火が起こる信頼性の高い実験環境を構築することである。NIC が扱う課題には、点火に関わる物理研究のみならず、計測技術、ターゲット、ターゲットの冷却技術、位相板や他の光学素子、点火実験時における作業者および環境防御システムの開発が含まれている。国際的な共同利用施設として NIF を運転するために必要な基盤や手順を構築することも NIC の活動に含まれている。

NIF は間接照射の配置で建設され、運転されている(図2左)。この配置では、紫外レーザービームをホーラム(hohlraum)と呼ばれる円筒状のターゲットの内側に照射する。ホーラムの長さおよび内径はそれぞれ約10 mmと5.4 mmである。強いX線を発生させるために、ホーラムの内側には高原子番号物質(典型的には金)が蒸着されている。半径が約1.1 mmの薄いプラスチック球殻が、ホー

ムの中に設置されている(図2および図3)。プラスチック球殻に差し込まれた直径10 μm のガラスチューブを通じて、0.3 mg/cm^3 の重水素(deuterium: D)と三重水素(tritium: T)の混合燃料ガスが封入される。球殻は18.3 Kにまで冷却され、固体のDT燃料層が球殻内面に形成される。

NIC実験では、パルス幅が約20 nsのレーザーでホーラムを照射する。1.3 MJのレーザーパルスで、最大放射温度が約300 eVの整形されたX線パルスを作り出すのが現在の目標設計である[14]。このX線パルスによってDT燃料が充填された球殻は初期の1/40の半径にまで圧縮され核融合点火に至る。この設計で17.5 MJの核融合出力が得られることが1次元流体シミュレーションで予測されている。図3にNIFの点火ターゲットの設計図を示す。

NIFにおける点火実証キャンペーンは4段階に分かれる。第一の駆動パルス調整段階では、燃料球殻を含まない空のホーラムを使い、点火に必要なX線パルス強度・波形を作るための調整を行う。第二段階は燃料調整段階であ

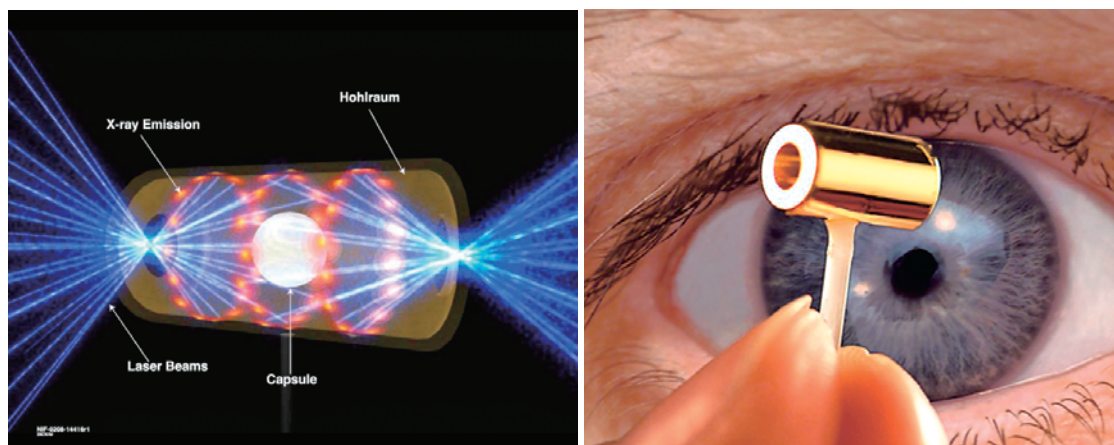


図2 (左)NIFのレーザービームと核融合点火ターゲットの模式図。(右)実際にNIF実験で使用されるホーラムの写真。

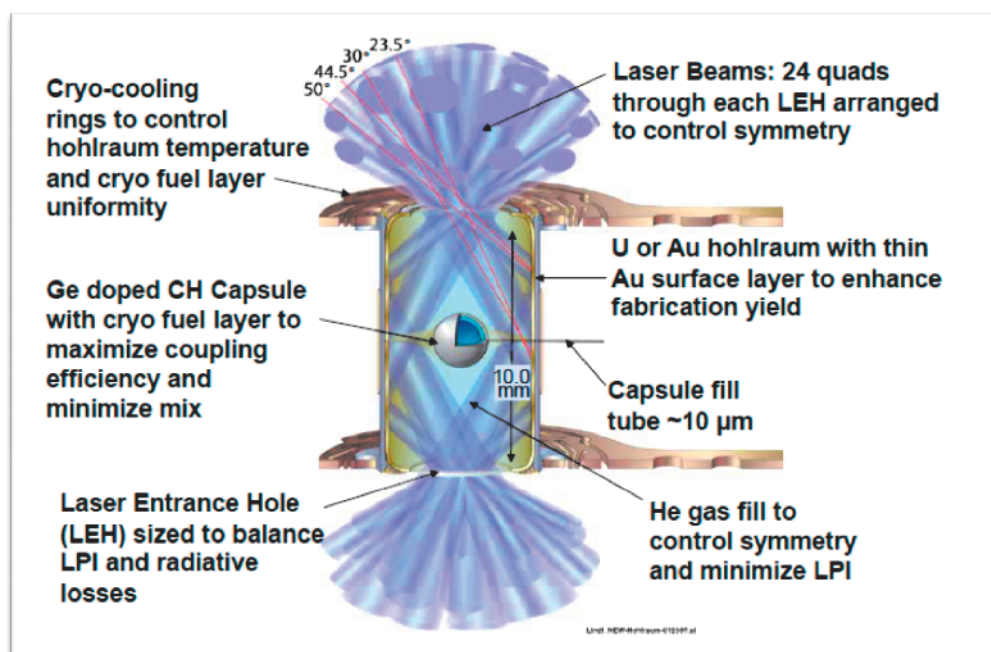


図3 点火ターゲットの模式図。

る。常温および低温の各種球殻ターゲットを用い、X線パルスの強度一様性、衝撃波の伝達時刻、速度、および質量噴出率が点火の要件を満たすように調整する。第三段階では、三重水素 (T)、水素 (hydrogen: H) および重水素 (D) をそれぞれ72%/22%/6%の割合で混合したTHD燃料を低温固化した球殻ターゲットを用いて爆縮実験を行う。DTをHで希釈することで核融合出力 (= 中性子発生数) が低減され、大量の中性子照射によって引き起こされる様々な計測器の障害を避け、燃焼直前における核融合燃料の温度や面密度を計測することができる。最終段階はDTが等量混合された核融合燃料ターゲットを使った点火実証実験である。

2009年秋にNICの第二段階までの実験が実施された。最初の実験はホーラム中でのエネルギー輸送の理解および球殻ターゲットの調整を目的に実施された[15]。球殻ターゲットの爆縮実験では、1.3 MJのエネルギーで、レーザーの吸収率、X線放射温度、一様性の制御が点火の設計値を満たしていることが確認された。特筆すべきことは、入射したレーザーエネルギーの約85%がホーラムでX線に変換され、X線放射温度の最大値が300 eVを越えたことである。X線パルスの照射一様性の調整も行われ、低温冷却ターゲットを用いた実験が実施可能であることも確認された[16]。

NICは二つの主目的のうちの一番目、つまり球殻燃料を用いた最初の慣性核融合統合実験を2010年9月29日に達成した。これはNIFにおける最初の慣性核融合統合実験であり、フルスケールでの点火実験への先駆けとなるものである。図4はNIFにおける最初の慣性核融合統合実験で使用されたターゲットの写真である。この実験ではTHD燃料が用いられ、点火実験に必要なレーザー、低温ターゲット装置、複数の計測器、関連施設が点火実証に向けて順調に動作していることが確認された。全192本のレーザービームのエネルギー1 MJがホーラムの中に注入され、26台の計測機器は順調に動作した。過去に得られた輻射温度 (~290 eV) と矛盾のない結果が得られ、中性子の発生数は 10^{13} 個であった。

2010年10月31日にはNICチームは三回目の中性子計測器

の較正ショットを実施した。このショットでは、重水素と三重水素の混合ガスを封入した極薄球殻 (exploding pusher) ターゲットを極照射モード[17]で121 kJの三倍高調波で照射した。中性子発生数は $\sim 3 \times 10^{14}$ であり、レーザー装置で達成された最高記録を達成した。2010年11月2日に、照射一様性を観測するための球殻 (Symcap) ターゲットを配置した低温のホーラムターゲットに1.3 MJの三倍高調波を入射することに成功した。これはターゲットに照射したエネルギーとして最も大きな値であった。予備的な解析では、ホーラムの温度は300 eV (摂氏約350万度) に達し、間接照射ターゲットで達成された最も高い値を記録した。この1, 2年でDT燃料を封入したターゲットを使い点火実証を行うために、NICチームは現在第四段階に向けた調整を継続している。

3. NIFにおける基礎科学研究/Fundamental Science at NIF

点火実証用の核融合燃料を駆動するX線パルスは、平板や他形状のターゲットを駆動して、極限的な温度・密度・圧力 (温度 $\sim 10^8$ 度; 密度 ~ 1000 gm/cm³, 圧力 10^{11} 気圧以上) を作り出すことにも利用できる。最近発表された米国政府の報告書[18-21]の中で、極限状態における物質科学、いわゆる高エネルギー密度科学は成長著しい重要な科学領域であると言及されている。極限状態を作り出すことができる性能を有するNIFは、まったく新しく未踏の科学の最前線を切り拓き、上述の報告書で議論されている科学的疑問を解決するための魅力的な手段を提供する[18]。NIFにおいて研究される科学分野には、天文学、物性科学、凝縮系物理、流体物理、慣性核融合、プラズマ物理、核物理、およびその他の分野が含まれる。(以下の議論は参考文献[22]に詳しく記述されている。詳細については参考文献[22]およびその引用文献をご覧ください。)

図5 (左) に示した乱流力学、非線形放射流体力学、放射プラズマおよび関係科学の基礎実験の場を提供することで、NIFは実験室天文学の分野で主要な役割を果たすと期待される。実験室天文学という新興分野の重要性は、2010 U.S. National Academy of Sciences Astronomy and Astro-

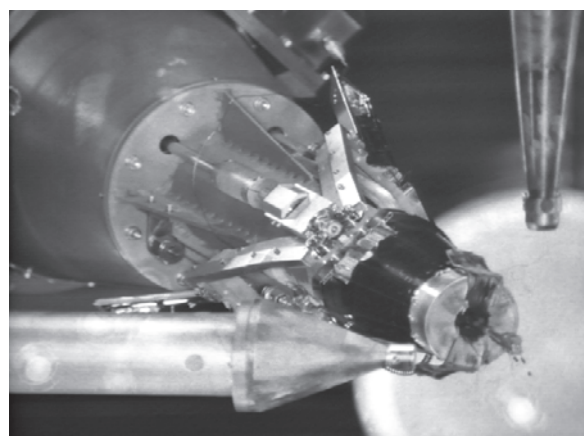


図4 2010年9月29日に使用した低温固化燃料層ターゲットの写真(左)とNIFターゲットチャンバーでのショット直前の写真(右)。

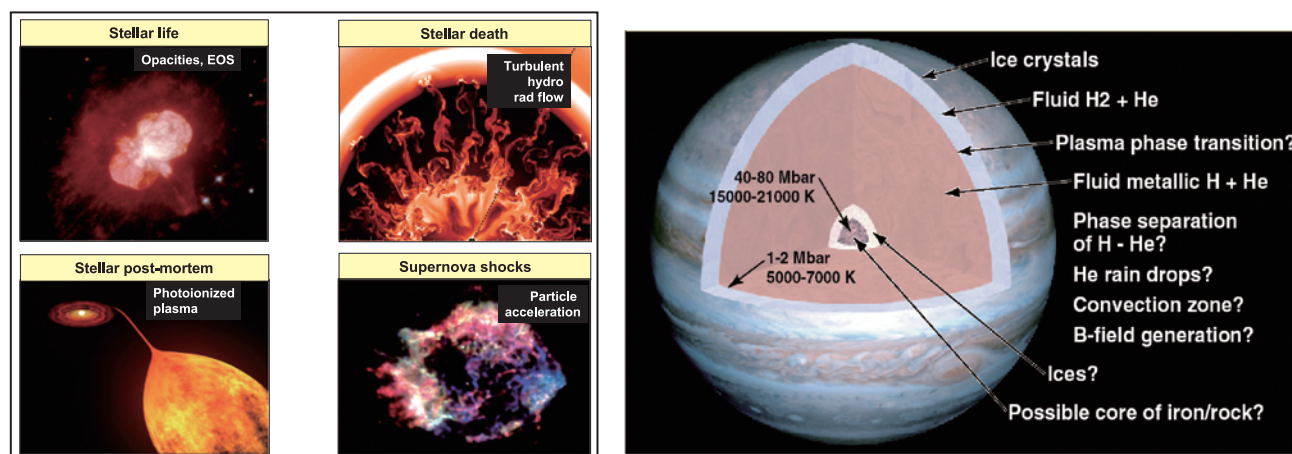


図5 (左)星の生涯における重要な場面と、それぞれの場面においてNIFでの研究対象となる物理過程を示す。(右)木星における重要な特徴と未解決な問題を示した木星の断面図。NIFでは木星内部の圧力を越える環境を作りだすことができる。

physics Decadal Survey[23]の中で言及されている。

基礎科学および実験室天文学分野においてNIFが果たす重要な役割の一つが、圧縮性流体の流体力学に関する実験の場を提供することである。高出力レーザーを使い慣性核融合に関連する流体不安定性の成長率を調べる技術は既に確立されている[24]。この技術は天文学にも応用できることが見いだされ[25]、特に超新星爆発の流体力学[26-28]、わし星雲のような星の形成領域での分子雲の時間的发展[29-32]を調べることができる。

非線形および乱流状態の輻射駆動流体物理のように、これまで調べるのが不可能であった研究がNIFで可能になる。NIFでの達成が期待される典型的な物理量は、レイノルズ数が 10^6 以上で、マッハ数が10以上である。超新星爆発残骸および原始星/宇宙ジェット中で観測されている無衝突衝撃波の研究においてNIFが貢献することは約束されている[33]。これらの実験は、超高エネルギー宇宙線の起源や星の形成過程を解明する助けになると期待される。

流体力学に関する研究に加え、NIFではオパシティーおよび光電離プラズマの実験も行われる。これらの研究は天文物理として興味深い研究であるとともに、他にないX線加熱環境をNIFが提供できるという利点を生かすことで、幅広い科学領域から興味を集める。Z装置で行われた過去の実験では、温度 ~ 150 eV、電子密度 $\sim 8 \times 10^{21} \text{ cm}^{-3}$ のプラズマのオパシティー計測が実施されている[34]。NIFでは太陽中の放射層(電子温度 ~ 200 eV、電子密度 10^{23} cm^{-3})に近い状態でのオパシティーが測定できる。取得したデータを用いて、星の内部のシミュレーションの精度の検証が行われる。NIFでは、Z装置で過去に行われた光電離プラズマ実験も行われると期待される[35]。NIFを使うことで、従来よりも高強度のX線が発生可能であり、高エネルギー天文物理に関連した実験が行われ、放射駆動の中性子星やブラックホール周辺の降着円盤からのX線発光の解析に使われているモデル[36]の検証が実験データを使って行われる。降着円盤は宇宙の主要なX線源の一つであり、国際X線観測(International X-ray Observatory: IXO)[37]では、将来計画の中で主要な観測対象となつて

いる。IXOとNIF実験によってブラックホールの回転、関連物理および大重力の理解が進むと期待される。

核物理も注目されるテーマである。高い中性子線量が低励起状態核の存在比に与える影響を調べ、低励起状態核の存在比が宇宙における重元素の核形成速度や過程に与える影響をNIFで調べることが計画されている。重水素充填ターゲットをNIFで爆縮した時に得られる密度および温度は、漸近巨星分岐星(AGB星)の状態(温度2-12 keV、質量密度 100 g/cm^3)に近く、中性子強度は 10^{17} W/cm^2 に達し 10^{10} 倍であることは注目に値する。加速器実験では不可能な、励起状態を含んだ核断面積の測定が可能である。

惑星内部や凝縮物性の分野では、OMEGAレーザー[4]および他の装置で過去に取得された物性値[38-43]が、巨大惑星の深部の圧力(100 Mbar)に匹敵する高い圧力領域でも測定可能になり、従来は到底調べることができなかった圧縮状態の物質の研究[22]が可能になる。得られた実験結果は、惑星内部に存在する物質の状態方程式やその他の物性値を定量的に理解するのに活用される。このような実験は、表面温度から推定された木星と土星の年齢の差[44]のような長年の疑問に解決の糸口を与える。特に、NIFにおける測定は、木星および土星の内部で起こっているとされている水素とヘリウムの相分離の仮説を検証する助けになる。この仮説が正しければ、惑星の中心部にヘリウムが沈殿していると予測されている[45]。NIFでの測定により、系外惑星の構造を理解するために必要な状態方程式のデータも得られる。緩やかな圧縮法および他の圧縮技術によって、凝縮物性や固体可塑流[46]の分野で未踏の高圧力環境下での研究が可能になる[22]。

上記のような研究環境の場を広く提供するために、NIFにおける実験提案の第一回目の公募を2009年9月に行った[8]。公募は米国並びに海外の研究者から受け付け、多くの提案が届いた。審査会で高い評価が得られた提案について、NIFでの実験に向けた準備が現在進められており、米国、英国、フランスおよび日本からの研究者が参加している。

2011年2月14日に日本学術会議総合工学委員会が主催で

日本学術会議講堂にて「超大型レーザーによる高エネルギー密度科学の展望」のシンポジウムが開催された。産学官および一般から200名を超える参加があり、NIF、激光XII号レーザー、LFEXレーザー等を利用した高エネルギー密度科学分野への注目の高さが伺われた。続く2月15日には泉ガーデンコンファレンスセンターでワークショップが開催され、個々の研究テーマについて専門的な議論が交わされた[47]。

4. まとめ

192本のビームを有するNIFは2009年3月に完成し、世界で最初に運転されたメガジュール級レーザーとなった。NIFの重要な目標は慣性閉じ込め核融合方式による点火の実証であり、米国内外の関係機関からの研究者で構成されたNICチームによって遂行されている。長年の研究開発によって、NIFレーザー、点火に必要な装置、高品質なターゲット、計測機器など点火に必要なものは揃った。低温の核融合燃料球殻は実験現場に供給され、点火実験に必要な全ての技術との組み合わせ調整が行われている。NIC実験による最初の結果は、点火実証を期待させるものである。NIFにおける点火実証は、慣性核融合方式の科学的妥当性を証明し、長期にわたり持続可能な無炭素エネルギーである核融合エネルギーの開発を促進すると期待される。極限的な圧力・温度環境をNIFで作ることが可能になり、天文物理、物性、凝縮物理、流体力学、慣性核融合、プラズマ物理、核科学など、極限的な状態にある物質科学と関わるすべての分野において、新しい現象・物理の発見に繋がる研究環境が誕生した。NIFのみならず各国で各種高出力レーザー装置が完成しており、高エネルギー密度科学の黄金時代、数多くの発見が期待される真にエキサイティングな10年が始まっている。

謝 辞

本研究はLawrence Livermore National Security, LLC, (LLNS) under Contract No. DE-AC52-07NA27344の支援のもと実施された。

本解説はE. I. Moses, C. J. Keane, R. Al-Ayat, B. A. Remington, G. W. Collinsが執筆した英文原稿を大阪大学レーザーエネルギー学研究センターの藤岡慎介が和訳したものである。

参考文献

- [1] G.H. Miller, E.I. Moses and C.R. Wuest, Opt. Eng. **43**, 2841 (2004).
- [2] N. Fleurot, C. Cavailler and J.L. Bourgade, Fusion Eng. Des. **74**, 147 (2005).
- [3] E.M. Campbell, Lasers Part. Beams **9**, 209 (1991).
- [4] 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, F.J. Marshall, R.L. McCrory, S.F.B. Morse, W. Seka, J.M. Soures and C.P. Verdon, Opt. Comm. **133**, 495 (1997).

- [5] See the LULI website; <http://www.luli.polytechnique.fr/>
- [6] See the VULCAN website; <http://www.clf.rl.ac.uk/Facilities/Vulcan/Vulcan+laser/12250.aspx>
- [7] H. Azechi and the FIREX Project, Plasma Phys. Control. Fusion **48**, B267 (2006).
- [8] See the National Ignition Facility web site; <http://www.llnl.gov/nif/>.
- [9] E.I. Moses, Fusion Sci. Technol. **54**, 361 (2008).
- [10] C.A. Haynam, P.J. Wegner, J.M. Auerbach, M.W. Bowers, S.N. Dixit, G.V. Erbert, G.M. Heestand, M.A. Henesian, M.R. Hermann, K.S. Jancaitis, K.R. Manes, C.D. Marshall, N.C. Mehta, J. Menapace, E. Moses, J.R. Murray, M.C. Nstrand, C.D. Orth, R. Patterson, R.A. Sacks, M.J. Shaw, M. Spaeth, S.B. Sutton, W.H. Williams, C.C. Widmayer, R.K. White, S.T. Yang and B.M. Van Wonerghem, Appl. Opt. **46**, 3276 (2007).
- [11] J.D. Lindl, *Inertial Confinement Fusion: The Quest for Ignition and Energy Gain Using Indirect Drive* (Springer, 1998).
- [12] B.C. Stratton and R. Kaita, Rev. Sci. Instrum. **81**, 10D101 (2010), and articles therein.
- [13] "National Ignition Campaign Execution Plan," LLNL report UCRL-AR-213718, NIF-0111975-AA (June 2005).
- [14] N.B. Meezan, L.J. Atherton, D.A. Callahan, E.L. Dewald, S. Dixit, E.G. Dzenitis, M.J. Edwards, C.A. Haynam, D.E. Hinkel, O.S. Jones, O. Landen, R.A. London, P.A. Michel, J.D. Moody, J.L. Milovich, M.B. Schneider, C.A. Thomas, R.P.J. Town, A.L. Warrick, S.V. Weber, K. Widmann, S. H. Glenzer, L.J. Suter, B.J. MacGowan, J.L. Kline, G.A. Kyralla and A. Nikroo, Phys. Plasmas **17**, 056304 (2010).
- [15] S.H. Glenzer, B.J. MacGowan, P. Michel, N.B. Meezan, L. J. Suter, S.N. Dixit, J.L. Kline, G.A. Kyralla, D.K. Bradley, D.A. Callahan, E.L. Dewald, L. Divol, E. Dzenitis, M.J. Edwards, A.V. Hamza, C.A. Haynam, D.E. Hinkel, D.H. Kalantar, J.D. Kilkenny, O.L. Landen, J.D. Lindl, S. LePape, J.D. Moody, A. Nikroo, T. Parham, M.B. Schneider, R.P.J. Town, P. Wegner, K. Widmann, P. Whitman, B.K.F. Young, B. Van Wonerghem, L.J. Atherton and E.I. Moses, Science **327**, 1228 (2010).
- [16] P. Michel, L. Divol, E.A. Williams, S. Weber, C.A. Thomas, D.A. Callahan, S.W. Haan, J.D. Salmonson, S. Dixit, D.E. Hinkel, M.J. Edwards, B.J. MacGowan, J.D. Lindl, S.H. Glenzer and L.J. Suter, Phys. Rev. Lett. **102**, 025004 (2009).
- [17] P.W. McKenty, R.S. Craxton, F.J. Marshall, T.C. Sangster, J.A. Maroza, A.M. Cok, M.J. Bonino, D.R. Harding, D.D. Meyerhofer, R.L. McCrory, J.D. Kilkenny, A. Nikroo, J. Fooks, M.L. Hoppe, J.M. Edwards, A.J. MacKinnon, D.H. Munro and R.J. Wallace, J. Phys: Conf. Series **244**, 032054 (2010).
- [18] National Research Council, *High Energy Density Physics: The X-Games of Contemporary Science* (National Academies Press, Washington, DC, 2003).
- [19] National Task Force on High Energy Density Physics, *Frontiers for Discovery in High Energy Density Physics* (Office of Science and Technology Policy Washington, DC, 2004).
- [20] Interagency Task Force on High Energy Density Physics, *Report of the Interagency Task Force on High Energy Density Physics* (National Science and Technology Council, Committee on Science, Office of Science and Technology

- Policy, Washington, DC, 2007).
- [21] Report of the Workshop on High Energy Density Laboratory Physics Research Needs (R. Rosner, D. Hammer, Chairs), *Basic Research Needs for High Energy Density Laboratory Physics* (U.S. Department of Energy, Office of Science and the National Nuclear Security Administration, 2010).
 - [22] E.I. Moses, R.N. Boyd, B.A. Remington, C.J. Keane and R. Al-Ayat, *Phys. Plasmas* **16**, 041006 (2009).
 - [23] National Research Council, *New Worlds, New Horizons in Astronomy and Astrophysics* (National Academies Press, Washington, DC, 2010).
 - [24] V.A. Smalyuk, S.X. Hu, V.N. Goncharov, D.D. Meyerhofer, T.C. Sangster, D. Shvarts, C. Stoeckl and B. Yaakobi, *Phys. Rev. Lett.* **101**, 025002 (2008).
 - [25] B.A. Remington, R.P. Drake and D.D. Ryutov, *Rev. Modern Phys.* **78**, 755 (2006).
 - [26] B. Remington, J. Kane, R.P. Drake, S.G. Glendinning, K. Estabrook, R. London, J. Castor, R.J. Wallace, D. Arnett, E. Liang, R. McCray, A. Rubenchik and B. Fryxell, *Phys. Plasmas* **4**, 1994 (1997).
 - [27] J.C. Wheeler, J.R. Maund and S.M. Couch, *Astrophys. J.* **677**, 1091 (2008).
 - [28] K. Kifonidis, T. Plewa, L. Scheck, H.-Th. Janka and E. Müller, *Astron. Astrophys.* **453**, 661 (2006).
 - [29] J. Jeff Hester *et al.*, *Astron. J.* **111**, 2349 (1996).
 - [30] M.W. Pound *et al.*, *Astrophys. J. Supp. Ser.* **307**, 187 (2007).
 - [31] A. Mizuta *et al.*, *Astrophys. J.* **621**, 803 (2005).
 - [32] A. Mizuta *et al.*, *Astrophys. J.* **647**, 1151 (2006).
 - [33] H. Takabe *et al.*, *Plasma Phys. Cont. Fusion* **50**, 124057 (2008).
 - [34] J.E. Bailey, G.A. Rochau, C.A. Iglesias, J. Abdallah, Jr., J. MacFarlane, I. Golovkin, P. Wang, R.C. Mancini, P.W. Lake, T.C. Moore, M. Bump, O. Garcia and S. Mazevet, *Phys. Rev. Lett.* **99**, 265002 (2007).
 - [35] R.F. Heeter, J.E. Bailey, M.E. Cuneo, J. Emig, M.E. Foord, P.T. Springer and R.S. Thoe, *Rev. Sci. Instrum.* **72**, 1224 (2001).
 - [36] D.A. Liedahl and D.F. Torres, *Can. J. Phys.* **83**, 1177 (2005).
 - [37] See the IXO website; <http://constellation.gsfc.nasa.gov/>
 - [38] D.G. Hicks, T.R. Boehly, P.M. Celliers, D.K. Bradley, J.H. Eggert, R.S. McWilliams, R. Jeanloz and G.W. Collins, *Phys. Rev. B* **78**, 174102 (2008).
 - [39] D.K. Bradley, J.H. Eggert, R.F. Smith, S.T. Prisbrey, D.G. Hicks, D.G. Braun, J. Biener, A.V. Hamza, R.E. Rudd and G.W. Collins, *Phys. Rev. Lett.* **102**, 075503 (2009).
 - [40] D.K. Bradley, J.H. Eggert, D.G. Hicks, P.M. Celliers, S.J. Moon, R.C. Cauble and G.W. Collins, *Phys. Rev. Lett.* **93**, 195506 (2004).
 - [41] J.H. Eggert, D.G. Hicks, P.M. Celliers, D.K. Bradley, R.S. McWilliams, R. Jeanloz, J.E. Miller, T.R. Boehly and G.W. Collins, *Nature Phys.* **6**, 40 (2010).
 - [42] P.M. Celliers, P. Loubeyre, J.H. Eggert, S. Brygoo, R.S. McWilliams, D.G. Hicks, T.R. Boehly, R. Jeanloz and G.W. Collins, *Phys. Rev. Lett.* **104**, 184503 (2010).
 - [43] R.S. McWilliams, J.H. Eggert, D.G. Hicks, D.K. Bradley, P.M. Celliers, D.K. Spaulding, T.R. Boehly, G.W. Collins and R. Jeanloz, *Phys. Rev. B* **81**, 14111 (2010).
 - [44] J.B. Pollack, A.S. Grossman, R. Moore and H.C. Graboske, Jr., *Icarus* **30**, 111 (1977); D. Stevenson and E.E. Salpeter, *Astrophys. J., Suppl.* **35**, 239 (1977); A.S. Grossman, J. Pollack, R. Reynolds, A. Summers and H. Graboske, *Icarus* **42**, 358 (1980).
 - [45] J.J. Fortney and W.B. Hubbard, *Icarus* **164**, 228 (2003).
 - [46] R.E. Rudd *et al.*, *MRS Bulletin* **35**, 999 (2010).
 - [47] 村上匡且：プラズマ・核融合学会誌 **87**, 287 (2011).