

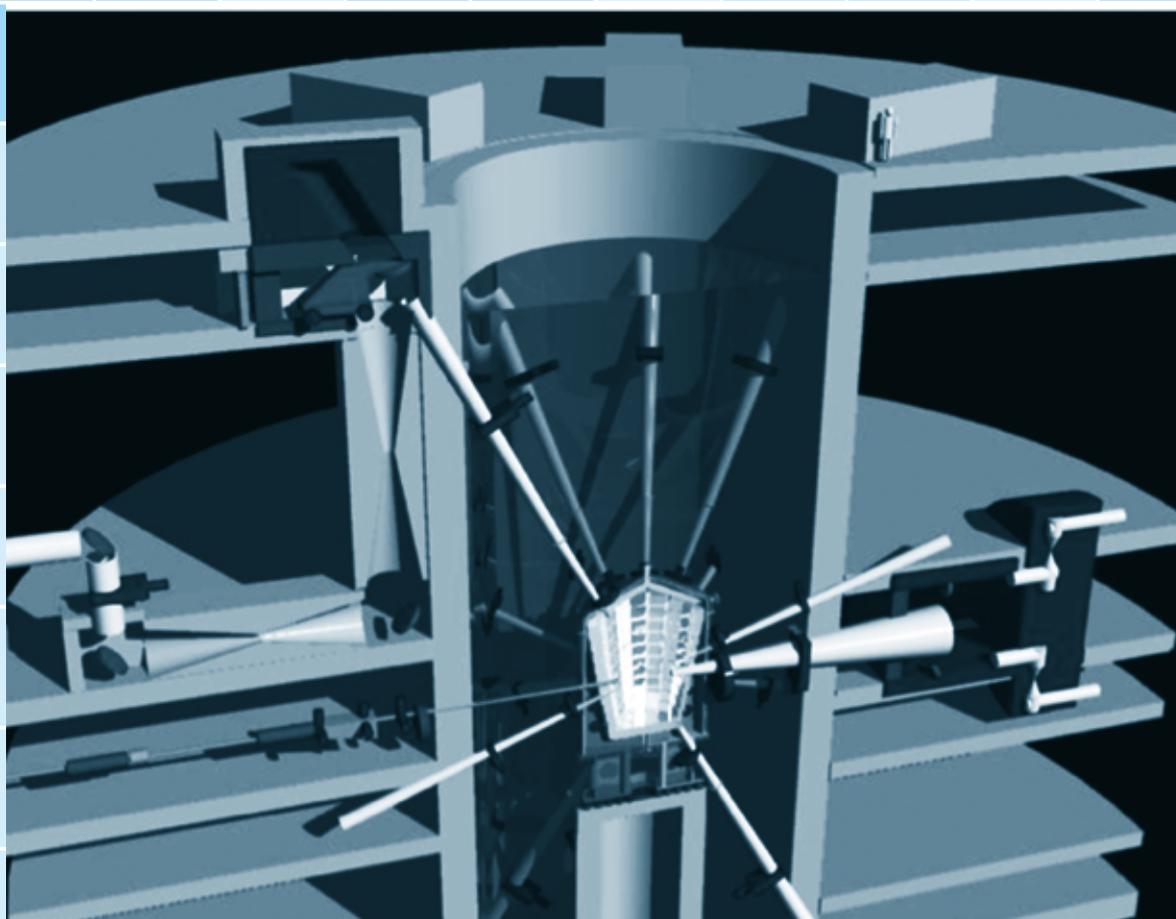
IFEフォーラム

レーザー核融合技術振興会

2014.4.8

No. 79

# FORUM FLASH



レーザー核融合実験炉フェイズⅢのチェンバー周辺のイメージ

IFE  
FORUM

IFEフォーラム

# レーザー核融合実験炉設計委員会 炉システム部会中間報告

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター 教授 乗松 孝好

## 【1】初めに

平成25年2月、IFEフォーラム支援の下にレーザー核融合実験炉設計委員会が組織された。委員会は評価部会、炉心シミュレーション部会、レーザー部会、燃料系部会、炉システム部会で構成されている。炉システム部会では磁場核融合の炉工関係者の協力を得て、レーザー核融合実験炉のあるべき姿を議論している。極論すると単ショットで点火燃焼が実証され、燃焼物理が確認されたならその高繰り返し化を行うことで核融合発電を実現できるわけである。そのためには多くの技術、材料開発を行わなければならない。本委員会は点火燃焼後に発電実証を行う実験炉の概念を明らかにし、商用炉へ向けた研究、開発方針を明らかにすることを目的としている。点火燃焼の物理、ターゲット製作供給技術、レーザー照射精度に対する利得のスケールアップ、高平均出力レーザーの建設見通しが立っていることが実験炉建設の要件となる。

現在実験炉は3つのフェイズに分けて進めることを考えている。基本方針としては、必要なレーザーは初めに製作し、チェンバー(炉)のみ各フェイズの目的に合った最も合理的なものを製作する。炉心部会、レーザー部会の報告に見られる様に、圧縮レーザー500kJ、点火レーザー100kJで繰り返しは1~4Hzを考えている。フェイズIは繰り返し照射による利得発生証明を目的とし、1Hzで100ショットを行う。チェンバーはブランケットを持たず、現在のレーザー核融合実験設備とほぼ同様のイメージである。フェイズIIは発電実証を目的とし、1Hzで1~2週間連続運転し、蒸気タービンで発電する。チェンバーは固体壁で、ブランケットは現在磁場核融合で研究され

ているリチウムタイトネートのペレットを用い、ヘリウムを介して水冷するシステムを採用する。フェイズIIIは長期運転を実証することを目的とし、4Hzで半年程度連続運転を行う。フェイズIIIでは商用炉で採用される液体壁チェンバーが採用され、液体壁に伴う技術課題の検証と合わせてトリチウム製造、液体金属循環による腐食の試験、商用炉に向けた材料試験が行われる。

## 【2】フェイズI／繰り返し核融合燃焼

フェイズIのチェンバーは半径4mのステンレス鋼で作られる。圧縮用レーザーのビーム配置は各フェイズ共通で27本のビームで加熱の一様性99%を達成できる円柱対称のレイアウトが採用される。チェンバーの上にはミラーを配置しないレイアウトが可能で、メンテナンスを容易にすることができる。追加熱レーザーは水平ポートから導入される。100ショット後のチェンバーの平均温度は200°C程度上昇する。真空排気系にトリチウム回収装置を設置するが、リアルタイムでのトリチウムの再使用は考えない。100ショットは燃料充填の1バッチ分に相当し、燃料容器の製作も現在の家内工業の延長に近い体制で対応可能である。レーザー照射技術、波面制御によるビームステアリングの検証が最大のポイントになると思われる。レーザーとターゲットがどのような位置関係で照射されているか、全ショットに対して確認する計測技術の開発が重要な課題である。レーザー核融合で課題とされる最終光学系は、この段階では炉心より5m程度の位置に設置でき、100ショット後の中性子負荷が $4 \times 10^{-6}$ dpa(注1)程度となるので、透過型を使用可能である。1シリーズ運転後のチェンバーの放射化は10mSv/h(注2)程度と評価され、被曝量管理の上で

人がアクセス可能である。

注1 dpa, dislocation per atom の略で、簡単に言うと中性子との衝突で原子が何回移動したかを表します。実際に直接中性子と衝突し散乱を受ける原子の数はこの値より桁違いに小さく、ほとんどの場合は一瞬溶けてすぐ固まるだけです。物質によりますが、中性子の照射量が $10^{24}$ 個 $1\text{m}^2$ ぐらいが1dpaに相当し、多くの金属ではこのあたりから物性値が変化し始めます。光学ガラスの場合シリコンが析出し黒化するので0.01dpaでも影響があります。

注2 Sv, Sievert (シーベルト) 放射線の人体に対する影響を表す国際基本単位です。日本の自然放射能のは $1\text{mSv}/\text{年}$ 程度。放射線業務従事者の年間被曝最の限度は $50\text{mSv}$ です。

### [3] フェイズII / 発電実証

発電実証を行うフェイズIIでは、将来のレーザー核融合発電所に必要な核融合燃焼に関する全ての機能が要求される。連続運転時間は1週間程度を想定している。レーザーは $500\text{kJ}+100\text{kJ}$ 、 $1\text{Hz}$ でターゲット利得80、核融合出力 $50\text{MW}$ 、発電効率は30%として $15\text{MW}$ の発電量を想定している。レーザー運転電力、その他を差し引き $5\text{MW}$ 程度を送電することを考える。チェンバーは半径 $4\text{m}$ の低放射化鋼で製作される。タンゲステンアーマーは不要である。表面は繰り返し加熱による細かい亀裂は発生すると思われるが、表面近傍に局在し成長しないことが知られている。 $\alpha$ 粒子によるプリスタリングは1シリーズ運転した段階でそろそろ発生し始めるレベルである。従って壁保護用のガスは導入しない。ブランケットは磁場核融合で研究されている直径 $2\text{mm}$ 程度のトリチウムタイトネートのペレットを詰め、Heガスで熱伝導とトリチウム回収を図り、水冷するタイプのものが採用される。レーザー核融合炉は全立体角に対するビームポートや真空排気系の占める割合が少ないため、高いトリチウム増殖率を確保できる。中性子の反射材や、 ${}^6\text{Li}$ の濃縮などをしなくても1.3程度の増殖率を確保できる。トリチウムは基本的には運転期間中に回収して再利用されるが、炉本体に相当量のトリチウムが溶け込むことが予想され、どのタイミングで燃料として回収可能になるかは今後検討が必要である。

炉全体は水の中に沈め、周辺の建物などが放射化しないようにする。水は放射化しても半減期数秒であるので、中性子の遮蔽材としては最適である。炉からのト

リチウムの拡散と天然に含まれている重水素の放射化を考え、汚染水としての取り扱いが必要である。炉本体の1週間運転後の放射化のレベルは $200\text{Sv}/\text{h}$ 程度と推定され、人はアクセスできない。ロボットによる改良作業技術開発も合わせて進める必要がある。

### [3] フェイズIII / 長時間運転

フェイズIIIでは半年程度の長時間運転を実証すると共に、商用炉に向けた各種技術の検証、材料試験、トリチウムの増殖を行い、商用炉の経済性を議論することのできるデータを取得することを目的とする。本誌の表紙に掲載の画像は、フェイズIIIのチェンバー周辺のイメージである。チェンバーは商用炉で想定されている液体壁を採用し、液体壁固有の課題、すなわち、照射後のチェンバー内の排気、液体金属による腐食、最終光学系への金属蒸気の影響などを検証する。フェイズIIIの運転時間は、最終光学系の使用限界程度の連続運転を想定している。商用炉では最終光学系を2ヶ月に1度程度交換することが想定されるので遠隔自動交換システムの検証をフェイズIIIで行う。冷却系は液体LiPbのループと水ループで構成され、熱交換器を通したトリチウムの拡散の防止対策などもテストされる。半年間運転した時のLiPb表面での放射線レベルは $300\text{Sv}/\text{h}$ 程度と推定される。フェイズIIとそれほど差がないのは放射化生成各種の半減期が比較的短いためである。フェイズIIIでの着目点は最終光学系支持機構のスエリングによる経時変化であろう。レーザー照射の様子を時々モニターし、補正をかけるシステムを実証しなければならない。

### [4] 終わりに

点火燃焼を実現した後、レーザー核融合発電を実証するためには多くの技術的課題をクリアする必要がある。しかし、そのほとんどは現在の技術の改良で対応可能と考えられ、少なくともフェイズIIIまでは現存の技術の改良と現存する材料で建設可能と考えている。最終的に核融合エネルギーを実用化する商用発電プラントの建設のためには、フェイズIIIクラスのシステムでの材料試験データの蓄積が必要になる。

# 国家プロジェクト 「レーザー核融合エネルギー開発」の 実現を目指して

光産業創成大学院大学 特任教授 三間 園興

1993年、IFEフォーラムの前身「ICFフォーラム」は中井貞雄元大阪大学レーザー核融合研究センター長の提案により設立された。当時、大阪大学では、レーザー爆縮により固体の1000倍に達する超高密度プラズマの発生に成功し、レーザー核融合による点火燃焼の実証を目指す機運が高まっていた。

その後、米国において1995年より国家点火実験施設(National Ignition Facility: NIF)の建設が開始された。一方、我が国では大阪大学が中心になり、短パルス超高強度レーザーを激光XIIレーザーに付設し、爆縮プラズマを加熱する高速点火研究開発プログラムが開始された。2001年には加熱の原理実証となる実験成果が世界最高の学術誌ネイチャーに掲載される等実績をあげ、2003年に現在進行中の高速点火実証実験プロジェクト(Fast Ignition Realization Experiment)が立ち上がった。

2006年、このような状況の下、IFEフォーラムは我が国の核融合研究の現状と動向、レーザー核融合研究の学術と産業分野への波及効果について検討し、以下の結論を得た。

- 1) レーザー核融合は、磁場核融合とは異なる原理、技術に基づく方式であり、魅力的な実用炉を実現出来る可能性が高いため、レーザー核融合炉の開発をITERの建設計画と共に、我が国のエネルギー開発のナショナルプロジェクトとして並行して進める必要がある。
- 2) レーザー核融合技術は、光技術など多岐にわたる先進科学技術を含み、その研究開発の推進は我が国の将来を支える国家的知的財産を生み出すもの

であり、世界に先行して戦略的国産技術として開発を進める必要がある。

- 3) 我が国のレーザー核融合の研究レベルは世界の第一線に位置しており、人材育成を含んだレーザー核融合エネルギー開発研究の国家的推進により、今後とも日本が世界に向けて情報を発信し、国際社会に貢献することができる。

上記結論にもとづき、以下を提言した。

1. レーザー核融合研究を、炉心技術は言うに及ばず、高繰り返しドライバ技術、炉技術を含めた総合的なプロジェクトとして推進する。
2. レーザー核融合の学術研究・人材養成のための研究・教育施設の整備充実を図る。

この提言以降、我が国では、大阪大学においてレーザーエネルギー学研究センターの全国共同利用施設化、FIREXプロジェクトとEUVプロジェクトが推進された。また海外では、米国のNIFの完成と点火実験キャンペーンの開始、ヨーロッパのHiPERプロジェクトやExtreme Light Infrastructure (ELI)が立ち上がった。

2011年2月14日、第1回日本学術会議の国際シンポジウム「超大型レーザーによる高エネルギー密度科学の展開」が開催され、米国との研究協力の重要性和我が国の研究のさらなる活性化の重要性が確認された。

その後の大型レーザーによる高エネルギー密度科学研究は米国の超大型レーザーNIF(National Ignition Facility)、世界最高エネルギーの超高強度レーザーLFEX(Laser for Fusion Experiment)の本格稼働、

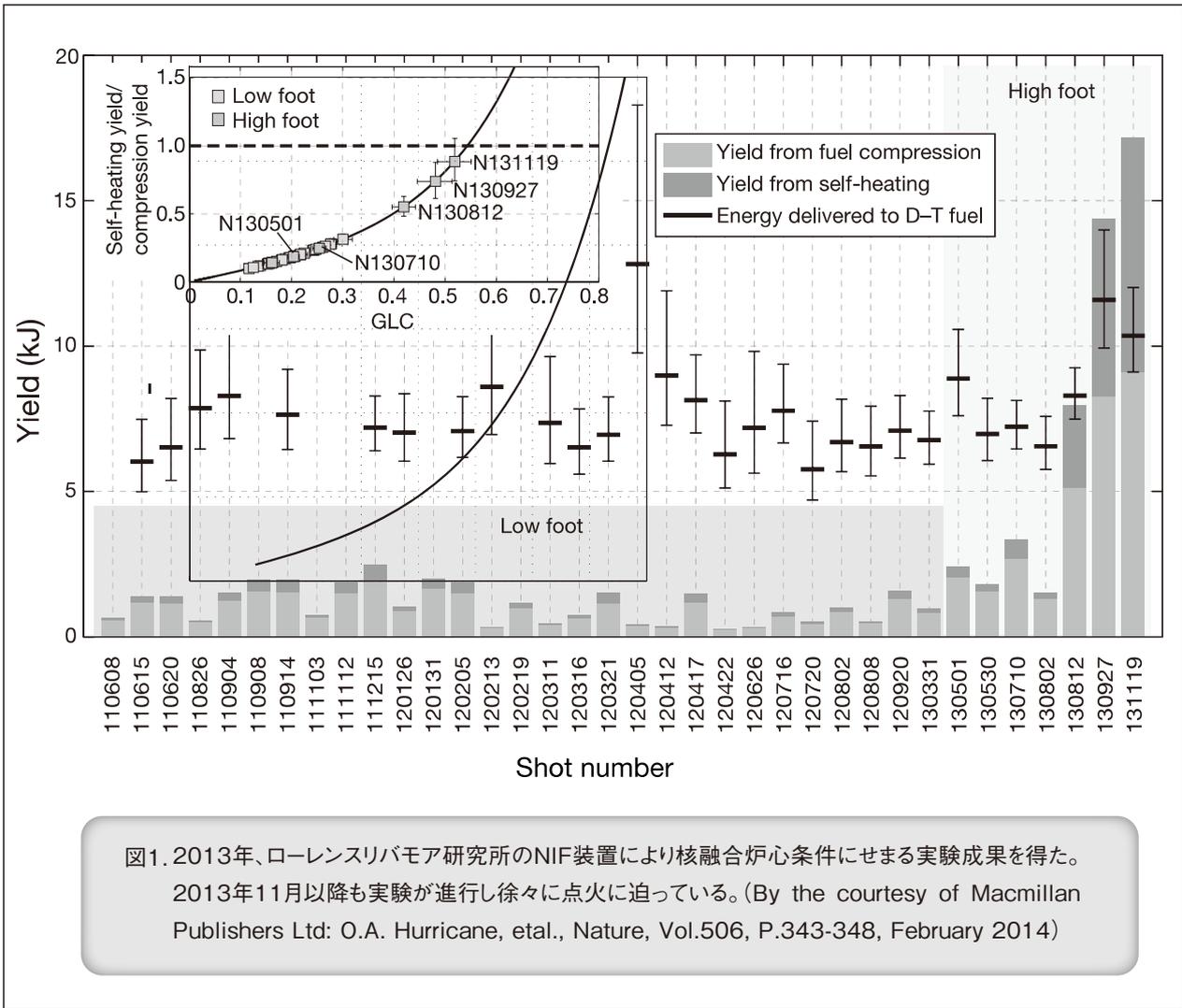


図1. 2013年、ローレンスリバモア研究所のNIF装置により核融合炉心条件にせまる実験成果を得た。2013年11月以降も実験が進行し徐々に点火に迫っている。(By the courtesy of Macmillan Publishers Ltd: O.A. Hurricane, et al., Nature, Vol.506, P.343-348, February 2014)

ヨーロッパのELIプロジェクトの進捗で、新局面を迎えている。エネルギー開発では、近い将来米国の国立点火施設NIF (National Ignition Facility)における人類初の制御されたレーザー核融合点火の実現が見込まれている。図1に掲げるように、NIFによる点火実験では核融合による自己加熱が顕著になり、点火実証が指呼に迫っている。我が国では、LFEXによる先進レーザー核融合や大規模相対論プラズマの研究が展開している。

これらの動向から、実現まで長い道のりがあるとされていたレーザー核融合が身近なものとなりつつあり、今後のエネルギー開発とレーザー科学に大きな変革をもたらす事が予想される。しかしながら、点火成功後に予想されるエネルギー開発と関連する高エネルギー密度科学の国際的な研究体制の変化への我が国の対応ができていな

い。我が国が率先して今後想定される変化に適切に対応するため、2013年9月8日、日米の有識者17名が一堂に会し円卓会議を開催した。また、2014年6月2日には、第2回日本学術会議国際シンポジウムを企画している。

これらの活動を基盤として、大型レーザーによるレーザー核融合研究の推進方策につき各界の意見を集約する有識者会議を組織し、我が国における大型レーザーによる高エネルギー密度科学とレーザー核融合を国家基盤科学技術とすることを目指す。有識者会議は、2011年2月と2014年6月の2回の日本学術会議国際シンポジウムや2013年9月の日米円卓会議の賛同者を中心にIFEフォーラム委員も含め組織し、2015年度に活動を開始する予定である。

## 編集後記

今年の冬は未曾有の大雪に見舞われるほど大変な寒さでしたが、ようやく桜も咲き始め、ほっとする季節となりました。

3月12日に行なわれたIFEフォーラムの講演会では、招待講演者の森英介衆議院議員から、核融合エネルギーの開発は全力ですすめたいとの心強いお言葉を頂きました。(この講演会の報告は次号以降にさせて頂く予定です。)大阪大学の激光XIIは30年間稼働している装置であるため老朽化に悩まされてきたのですが、この度アベノミクスにあやかる事が出来、およそ1600台の大型コンデンサーが全て新品に交換されました。

つい先日、全段のコンデンサーの充電・放電試験が無事完了しました。また今年度はLFEXレーザーもいよいよ4ビームすべてが稼働できるようになる予定です。高速点火核融合原理実証実験FIREXプロジェクトも大詰めです。私たち核融合に携わる若手研究者は、今こそ力を振り絞って、核融合エネルギー実現に向けて着実に一步一步研究を進めて行きたいと思えます。今年度も皆様方のご支援、ご鞭撻のほどよろしくお願い申し上げます。

編集委員 山畑 和樹(関西電力)、 乗松 孝好(大阪大学)  
清水 俊彦(大阪大学)、 佐野 孝好(大阪大学)  
有川 安信(大阪大学)

### 連絡先

公益財団法人 レーザー技術総合研究所  
IFEフォーラム/レーザー核融合技術振興会事務局

〒550-0004 大阪市西区靱本町 1-8-4  
大阪科学技術センタービル4F  
TEL (06) 6443-6311  
FAX (06) 6443-6313  
URL:<http://www.ilt.or.jp/forum/index.html>