

# LASER CROSS

ISSN 0914-9805

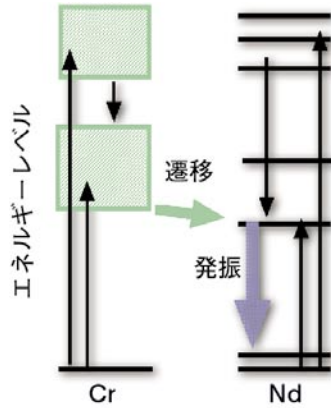
Institute for Laser Technology

レーザー・クロス

2006, Sep.  
No. 222

## CONTENTS

- 太陽励起レーザーの応用研究
- レーザー核融合と超高エネルギー密度物理の最新動向
- 29th ECLIM (European Conference on Laser Interaction with Matter, Madrid, Spain, June 11-16, 2006) に出席して
- 【光と蔭】ILEとILTとOEL
- 太陽光励起半導体レーザーの研究



【図1：左】CrおよびNdの励起と量子遷移のメカニズム、Crに吸収されたエネルギーは量子遷移をへてNdの励起準位に移行しNd発振が集中的に起こる  
【図2：右】自然太陽光での発振実験装置

## 太陽励起レーザーの応用研究

レーザーエネルギー研究チーム 今崎一夫、佐伯 拓

### ■経済的なエネルギー物質創成の可能性

われわれは太陽エネルギー有効利用の一方式として新たに太陽励起レーザーを提案してきた。このレーザー方式は大面積の太陽光を集積し、これを極小点に収束するので極めて高温の達成が可能である。また効率もよく比較的安価なレーザーを使うので、経済的なエネルギー物質水素創成が望まれる。

### ■予想以上に高効率

この太陽励起レーザーは予想以上に高効率であることが判明した。また一般にレーザーは高収束性を持ちかつ極めて長距離の伝搬が可能である。大面積(10,000m<sup>2</sup>以上)の太陽エネルギーを収束し太陽励起レーザーを励起し、レーザーエネルギーを高効率変換(40~50%)する。この出力はピーク時では数MWに達する。このレーザー光を送りし小さな熱絶縁体に集約すれば容易に10<sup>10</sup>J/Hrcm<sup>2</sup>以上のエネルギー密度が達成され、温度も1,000~2,000Kを上回る。これは化石燃料エネルギー密度の10~100倍以上に達し、この熱源を用いた水素発生への応用は十分可能である。

### ■光が熱伝搬の役目を担う

この方式の特徴は熱を伝搬する必要がないことである。すなわち光が熱伝搬の役目を担うという特徴がある。このため利用率は極めて高いと期待できる。またレーザー自体は、セラミックタイプで比較的安価である。またレーザーは集中性が高いため水素生成レベルまで高温化することによりエネルギーを蓄積する。このため経済性も高く取れる。この水素は家庭燃料電池発電や燃料電池自動車などの分散エネルギーへの利用が可能である。

### ■大面積の太陽エネルギー利用に適する

この方式はレーザーの本質的な特性から、屋根置

方式ではなく大面積の太陽エネルギー利用に適している。そのため太陽電池-電力発生方式とは相補的である。本方式による経済性の高い再生可能クリーンエネルギーとして期待している。

一般に光励起レーザーの効率は低い。この原因は電気放電エネルギーの一部の発光を励起に使うためである。しかし太陽光励起方式はこの過程が全く無く直接太陽光を励起に使うため高励起効率が見込まれる。

### ■エネルギーから励起までの効率が100%

一般の放電励起レーザーでは最初のエネルギー(電力)から励起までの効率は20%程度になる。しかし太陽励起ではこの効率が100%であると考えてよい。また放電光は4πに拡散するが太陽光ははるかに拡散角度が小さい。大気散乱を除けば10mradのレベルである。これを考慮すると吸収率は太陽光の方がより一般的な放電励起に比べて高く取れる。実際には太陽光の集光効率が問題である。これらは今後の課題であり実際の太陽光とレーザーの空間的な結合性や集光性をより詳しく調べる必要がある。

太陽の表面温度はよく知られているようにほぼ6,000Kであり、これに相当する黒体放射を仮定した場合の太陽光発光スペクトルは紫外線領域から急激に立ち上がり500nm付近にピークがあり、その後、なだらかに赤外領域まで減衰する。

### ■吸収性を持った複合ドープが可能

この太陽光スペクトルの広領域における吸収性を持った複合ドープが可能である。Nd/Cr:YAGの波長に対する吸収係数を図2に示す。NdおよびCrのYAG中での吸収はこの領域において互いに相補的である。そのため両者を合わせると可視-近赤外領域を幅広く吸収する。一方ある程度ドープ量が高い条件ではCr(3+価のイ

次ページへつづく▶

オン)に吸収された光は量子遷移を通じてNdに移る。このような場合NdおよびCrのYAG中での励起による遷移は図1に示されるようになる。Crに吸収されたエネルギーは量子遷移を経てNdの励起準位に移行しNd発振が集中的に起こる。この結果、太陽光スペクトルの広領域を吸収し、このエネルギーを集めて集中発振する。これにより高効率発振が可能となる。

この考えに基づき、高効率モデルを考案しシミュレーション設計を行った。これらはCrやNdなどの太陽光スペクトルの広領域において吸収する複数物質を高濃度ドープすることにより得られた結果である。

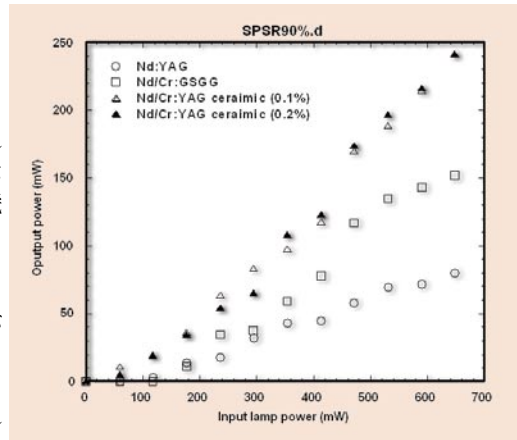
■屋外での太陽励起発振の実験

このレーザーの野外での太陽光励起発振も確認している。図2にこの実験装置を示す。また雲などで日が陰っても発振は確認している。しかし実際は太陽光の揺動が大きく定量的な効率では求められなかった。

発振効率やそのメカニズムの解析には模擬太陽光(アークメタルハライドランプ)を用いた。この時の結果を示す。模擬太陽光からレーザーへ40%の変換効率を得ている。

この結果は全く同じ形状のNd:YAG結晶、Nd/Cr:GSGG結晶、Nd/Cr:YAGセラミックを用いて実験を

行った。セラミックが最も高い値を示している。これは図1に示した励起機構が有効に働きかつセラミックのドープ量が高く取れることによると考えられる。



【図3】NdおよびCr供ドープYAGセラミック体出力とYAG、およびGSGG結晶における実験結果の比較

ドープ率をより高くすることは技術的に可能であるのでより強収束の太陽励起が期待される。この時、熱の問題が誘起される。高温におけるレーザー材料の利得減少や冷却は今後の重要な課題となる。

REPORT

レーザー核融合と超高エネルギー密度物理の最新動向

29th ECLIM (European Conference on Laser Interaction with Matter, Madrid, Spain, June 11-16, 2006)に出席して

光産業創成大学院大学 中井貞雄



【図1】フランス・ボルドー地区におけるレーザー核融合施設LMJをコアとするハイテク光産業団地

◆歴史

標記ヨーロッパ会議は第1回が1966年イタリア・フラスカッチにて開催されて以来、世界で唯一のレーザー核融合に関する専門家会議として、この分野の歴史そのものをつ

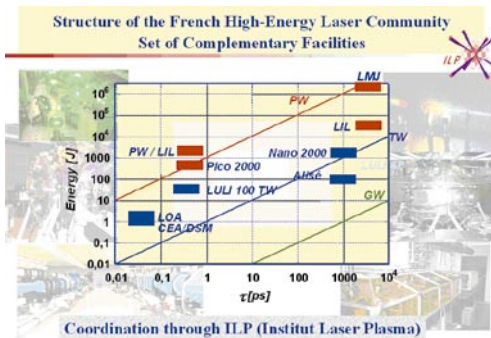
くり、そして綴ってきた。研究発表の機会に恵まれなかった機密解除以前の米国、旧ソ連の研究者にも研究と発表の場を提供し、超高エネルギー密度物理という全く新しい学問分野を開き、その応用としてのレーザー核融合開発を担ってきた会議である。特に今回は、レーザー核融合分野を創ってきたパイオニア達の記録「Inertial Confinement Fusion -Historical Approach by its Pioneers」の編纂を記念してパイオニアセッションが設けられ、ロシアのバズフ、米国のナコルズ、レイキダー、わが国の山中千代衛先生等先達たちの業績が本人から、あるいはその後継者達から紹介されたのはけだし圧巻ではあった。新しい学問分野、科学技術の分野を世界の仲間達とともに、歴史として時代の新しい流れをつくってきたわが国の寄与は大きく、発表して痛快でもあった。

◆新しい展開

これまでのレーザーと物質との相互作用、燃料ペレット爆縮の物理に関する長年の研究、ハイパワーレーザー技術を中心とする関連技術の進歩により、レーザー核融合は、その本来の目的である核融合エネ

ルギー開発の方向に向け、新しい展開を見せ、新しい研究開発の段階に踏み出したことが強く印象づけられた会議であった。

会議冒頭のリバモア研(LLNL)からの報告によると、出力1.8MJ、192ビームのNIF (National Ignition Facility)の建設は順調に進み、全体として90%は完成している。さらに1モジュール8ビームについては発振器からチャンバーまで通して動作させ150 kJの出力を達成し、それらのビームを用いてターゲット実験を実施している。レーザー動作、ターゲット実験ともNIFによる点火実験計画の当初のパラメータが実現されることを確認している。NIFのフルシステムは2009年に完成し、2010年よりNational Ignition Campaign (NIC)として核融合点火実験を開始する。1960年のレーザーの発明より半世紀を記念して、全米を挙げてのレーザー核融合の新しい時代の幕開けであると誇らしげに宣言している。現状およびこれまでの成果よりみて、人類最初の実験室における核融合点火が2010年に実現されることは確実であろう。その方式は間接照射爆縮による中心点火であり、エネルギー利得は数十倍の中間利得領域の実現である。その後高性能化爆縮実験として、燃料ターゲットの最適化とともに、直接照射方式、高速点火方式等を順次テストしていくとのことである。そのための予備実験を行うためロチェスター大学におけるOMEGA-EP 60ビーム、30 kJの直接照射爆縮用レーザーに2~3 kJのPW高速点火用レーザーを連動させた実験を行うべく2008年完成を目指して建設を進めている。米国における国家プロジェクトNIFと並行してフラ



【図2】フランス施設設備

る。フランス独自のプログラムとは言え、米国との共同開発で進めてきた計画でもあり、確実にその目標は達成するものと思われる。

### ◆EUの新しい動き

フランスは、トカマクの国際共同プロジェクトITERを、EUのバックアップを力にしてカダラッシュに持っていった。並行してメガジュールレーザー核融合計画(LMJ)をボルドーにおいて進めているのである。図1に示すように、Laser Megajouleを中心として、光技術を中心とする一大ハイテク団地を形成しつつある。さらに注目すべきことは、国家機密に強く関係するCEA(Commissariat al Energie Atomique)が建設する高出力レーザー LMJに大学、民間の研究者がアクセスするための組織としてILP (Institut of Laser and Plasma)を設立し、すでに全フランスの30研究所、300人の研究者がこの組織に所属して活動し、LMJのプロト機LIL

ンスもボルドーにおいて240ビーム、出力1.8MJのLMJの建設を進めており、2010年にはレーザーを完成させ、2012年に最初の核融合実験を実施する予定である。

を使った実験等に参画している。原子力発電が全電力の80%を占めるフランスの核融合エネルギーにける確固とした国家戦略の意思が感じられる。特に今後の先進産業の基盤を支えるであろうハイパワーレーザー技術を中心とする光技術を、レーザー核融合を牽引力として推進しようとしているのは明らかである。図2にレーザー出力のパルス幅、エネルギー等においてよく組織化されたフランスの施設設備がみてとれる。

### ◆HiPER: a Laser Fusion Facility for Europe

英国ではラザフォード・アップルトン研究所(RAL)において高出力レーザーが整備され、National Users Facilityとして全国の研究者の使用に供してきたことは、よく知られている。レーザー技術とレーザー核融合の新しい時代を迎えつつあるいま、EUを通して全ヨーロッパに働きかける新しい計画を策定している。HiPER: a Laser Fusion Facility for Europeの名のもとに図3に示すような概要の施設の概念設計がEUの9カ国、22研究所からの50人の研究者によりなされた。図にあるように主要レーザーは爆縮用ナノ秒レーザー200~300 kJ、加熱用ピコ秒レーザー70 kJで、高速点火によりほぼ動力炉用のエネルギー利得が実現するパラメータである。さらに150ペタワット( $10^{15}$ W)、2エクサワット( $10^{18}$ W)という超高強度も視野にすえたものである。高速点火方式レーザー核融合を主計画とし、超高エネルギー密度に関する未踏の物理領域を開拓するものである。2006年秋を目途に詳細設計を実施している。ドイツ、ロシア等も、戦略的取り組みと集中的な投資を必要とする未踏領域への挑戦には国としての取り組みがなされている。

山中千代衛



## ILE とILT とOEL

大阪大学レーザーエネルギー学研究センター(Institute of Laser Engineering-ILE)は1972年開設の大阪大学工学部レーザー工学研究施設を1976年に改組拡充し、大阪大学レーザー核融合研究センターとして発

足した。2005年に現在の名称のもとで超伝導フォトンクス研究センターと合併し、全国共同利用研究センターに改組された。

現在の研究組織はレーザー核融合部門、高エネルギー密度科学研究部門、パワーフォトンクス研究部門、レーザーテラヘルツ研究部門、光・量子放射学研究部門からなっている。夙に国際的な存在でレーザーによる慣性核融合の研究で世界をリードしている。さらに関連するパワーフォトンクス研究を広く展開している。

このILEにより研究開発された光科学技術を広く産業界にスピノフし、わが国の活性化を推進する目的で1987年財団法人レーザー技術総合研究所(Institute for Laser Technology-ILT)が産学官の支援を受けて設立された。研究部門としてはレーザービーム伝送研究チーム、レーザープロセス研究チーム、レーザー環境計測研究チーム、レーザーバイオ研究チームと理論シミュレーション研究チームの5部門から構成されている。

EUV光源開発、IT用デバイスのレジスト処理、レーザーフェムト秒加工による周期構造の形成、白色光ライダーによる大気観測、環境汚染物質の分解処理、レーザー・電子ビームによるγ線を用いた核変換(原子炉廃棄物処理)、レーザー誘雷、レーザーによるフェムト秒時間分解分光測定のパイオ応用、低侵襲X線がん治療研究、太陽光レーザーの開発などを実施している。

特筆すべきは今年、又賀昇バイオ研究チームリーダーが「光励起分子の分子間相互作用と化学反応ダイナミクスの研究の業績」で学士院賞に輝いた。ILTもILEと並んで斯界の評価が高いのである。

さてILTの業績の企業化を目指してベンチャー(有)オプトエレクトロニクスラボラトリOEL(略称 オトラボ)が2001年に設置された。これは政府の大学発ベンチャー1,000社計画に応える事業で、すでに設立5カ年を経過した。

この間OELとしては程々興味ある製品を送り出している。OELマイクロチップ固体レーザー、レーザーパターン目視カード、レーザービーム伝搬計算コード「LOCCO」などが市場に出ている。

巷間よく言われているようにベンチャーの経営には研究開発にかかわる人材と営業販売にかかわる人材が必要である。OELでは前者に関しては全く問題がないが、後者に関しては対策が必要と思われる。

大学においても工学部の教育は経理、運営の知識を授けることがきわめて大切であろう。このあたりの充足が今後の産学官連携のため最も大切な肝所である。 【(財)レーザー技術総合研究所 研究所長】

## ◆核融合動力炉開発へ

国際原子力機関(IAEA)は2000~2004年にコーディネイト・リサーチプロジェクト(CRP)として「IAEA-CRP on the Elements of Power Plant Design」を実施した。動力炉を構成するドライバー、チャンバー、ターゲット等の主要エレメントに関する国際共同研究プロジェクトである。その成果と、この間のレーザー技術の進歩、爆縮や高速点火に関する物理やシミュレーションの進歩、そしてなによりも2010~2015年にNIFあるいはLMJにより核融合点火、燃焼、エネルギー利得実現が確実なものとして見えてきた状況を受け、新しいCRPをスタートさせた。そのテーマは「Pathway to Energy from Inertial Fusion - An Integrated Approach」というものである。世界中からすでに20件の応募があり、13件が採択され、残りも審査中である。2006年11月に各チームの代表者による第1回Research Coordination Meetingがウィーンにて開催され、上記タイトルのもとに連携した研究が推進されることになる。

米国は、点火・燃焼を目指したNIF計画と並行してHAPL計画(High Average Power Laser)を推進している。これは高繰り返し、高効率の炉用レーザーの開発

とともにチャンバー、燃料ペレット開発等も含む動力炉開発へ向けた全米連合プロジェクトである。

## ◆まとめ

かつて世界最高出力・性能のガラス【図3】ラザフォード・アップルトン研究所レーザー激光を中心として立案されているHiPER: a XIIを建設しLaser Fusion Facility for Europe計画(1983年)爆縮核融合の記録を次々と塗り替えていったわが国は、その成果によりレーザー核融合の世界的な推進役を果たしてきた。いま、いよいよ動力炉、レーザー核融合エネルギー実現への新しい時代を迎えようとしている。新エネルギー開発というわが国の最重要課題に対する国家戦略にもとづいた対応がいまこそ必要である。

HiPER : preliminary specifications



1. Implosion energy:  
200-300kJ/5ns/3 $\sigma$   
40 beam irradiation  
10 m chamber

2. PW beamlines:  
70kJ 10ps, 1 or 3 $\sigma$

3. OPCPA configuration to provide 150 PW beam (probe) and for 2 EW (driver)

4. Enhanced support infrastructure & cooperation required throughout Europe



## INFORMATION

# 太陽光励起半導体レーザーの研究

光産業創成大学院大学 藤田和久

## 1. 宇宙における太陽光エネルギーの利用

環境負荷の小さい自然エネルギーを利用した発電は、政策誘導もあって近年増加してきています。中でもわが国の太陽光発電事業は、生産量、導入量、ともに世界トップレベル、一般家庭への太陽光発電システム導入の補助金事業も役割を終えたとして昨年度で終了、それでも販売数は確保されており産業として自立の段階に入りました。単位面積当たりの発電量上限は発電効率と日射量で決まり、前者は多くの研究がなされていますが、後者はお天道様次第です。そこで曇りや夜、大気のない宇宙に行って年間平均約10倍のエネルギー(密度)を得ようというのが、宇宙航空研究開発機構(JAXA)が中心となって検討している宇宙エネルギー利用システム(Space Solar Power System: SSPS)の考え方です。

これは太陽光エネルギーを供給地に向けてレーザーで無線伝送するシステムです。この技術は最近話題の月面活動(2020年日本人月探査、米国の基地計画など)におけるモバイル探査および固定基地でのエネルギー源としても高い有用性があるとの認識が高まっています。それは水(氷)があるといわれているクレーター永久陰領域の探査や2週間続く「夜」に対応する必要がありますからです。

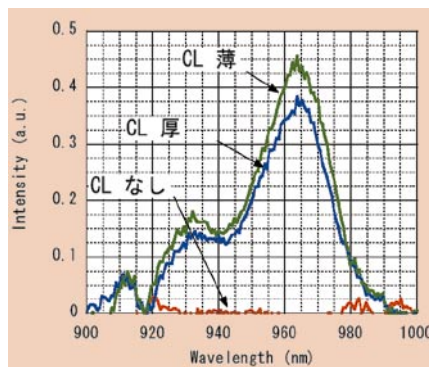
## 2. 半導体を使って太陽光をレーザー光に

太陽光を1つの材料でレーザー光に変換する太陽光励起レーザーは、太陽電池経由で無線エネルギーを送出するシステムに比べ電源管理などの付帯設備を極力少なくできます。宇宙への高い輸送コストから軽くて大きい出力を出すシステム、材料が望まれます。固体バルク材料ではおよそW/g程度なのに対し、電流注入の

高出力半導体レーザーでの最高値は16kW/gと格段に大きく、これが太陽光励起型でどこまで可能かが研究対象となります。半導体を用いた太陽光励起レーザーは設計提案程度の研究は過去にありますが、実験的研究や実現報告はありません。

## 3. 最近の進捗

既存のダブルヘテロ型半導体レーザーの構造をベースに、模擬太陽光照射時の蛍光強度特性を評価対象として、その構造依存性を調べています。いろいろな構造にすることによって蛍光強度が大きく変化することが分かってきました。図に一例を示します。半導体レーザーのクラッド層(CL)の厚みを変化させると、レーザー波長付近の蛍光スペクトル強度が大きく変化しています。他の構造依存性も明らかになってきており、共振器構造の導入などを現在進めているところです。これらの実験結果の解釈や設計に活躍しているのがシミュレーションコード



【図】模擬太陽光を照射したときの蛍光スペクトル

です。レーザー総研の古河裕之副主任研究員に開発いただいたもので、世界に2つとないこのコードと実験的研究の2つの武器で世界初の太陽光励起半導体レーザーの実現を目指しています。