コンファレンスレポート

短波長レーザー国際シンポジウム報告

山中千代衛^{*,**}・大道博行^{*}・今崎一夫^{*}
植田憲一^{***}・中井貞雄^{*}・山中龍彦^{*}

(1987年12月24日 受理)

Report on the International Symposium on Short
Wavelength Lasers and Their Applications

Chiyo YAMANAKA^{*,**}, Hiroyuki DAIDO^{*}, Kazuo IMASAKI^{*},
Ken-ich UEDA^{***}, Sadao NAKAI^{*} and Tatsuhiko YAMANAKA^{*}

1. はじめに

文部省の支援による国際シンポジウム「短波長レーザーとその応用」が大阪大学レーザー核融合研究センターにおいて昭和62年11月11日から13日まで開催された。このシンポジウムは年来の計画であるレーザープラズマに関する日米セミナーのシリーズを補間するため立案されたシンポジウムの目的は最近とみに注目を集めている短波長レーザーを中心にその科学技術への応用を包括し、世界の研究の第一線を展望することにある。短波長レーザーの領域としてはX線レーザー、エキシマレーザー、自由電子レーザーを中心に波長で言えばUV領域からXUV領域にわたる短波長技術を取り上げ、シンクロトン軌道放射光、レーザープラズマX線も含め、

新形レーザーとしての新構想や短波長光の応用も対象としている。その応用範囲はプラズマ核融合は言うに及ばず、X線リソグラフィや物質プロセッシングも広く展望している。現代の科学技術の要求にきわめて適応していると言えよう。そのため海外よりの参加者は招待者を含め17人に達し、それぞれ研究の第一線の人達である。自由電子レーザーではその創設に関与した。D. Deacon (Deacon Research) L. Elias (UC Santababara) や M. Velghe (Paris Sud), G. Dattoli (ENEA), X線レーザーでは J. Trebes (LLNL) S. Ramsden (Hull), T. Lee (NRL), G. Jamelot (CNRS, Orsay), H. Hora (UNSW), Zhang Zheng Quan (上海), エキシマレーザーでは L. Blair (LANL) A. Offenberger (Alberta), 新形レーザーでは

* 大阪大学レーザー核融合研究センター (〒565 吹田市山田丘2-6)

** (財)レーザー技術総合研究所 (同上)

*** 電気通信大学新形レーザー研究センター (〒182 調布市調布丘1-5-1)

* Institute of Laser Engineering, Osaka University (2-6 Yamada-oka, Suita, Osaka 565)

** Institute for Laser Technology. (ibid)

*** Institute for Laser Science, University of Electro-Communications (1-5-1 Choufugaoka, Choufu, Tokyo 182)

Table I SCHEDULE

Nov. 10 (Tue.)	9:00am-10:30am	11:00am-12:40pm	2:30pm-4:00pm	4:30pm-6:00pm	6:00pm-
					Registration
Nov. 11 (Wed.)	9:00-10:30	11:00-12:40	2:30-4:00	4:30-6:00	
	PLENARY Opening C. Yamanaka (Osaka Univ.) G. Miley (Illinois Univ.)	X-RAY LASER (1) J. Trebes (LLNL) S. Ramaden (Univ. of Hull) H. Kuroda (Tokyo Univ.) T. Oda (Hiroshima Univ.)	FEL & SR (1) D.C. Deacon (Deacon Res. Company) K. Mima (Osaka Univ.) H. Yonehara (Inst. for Molecular Science) G. Dattoli (ENEA, Italy)	EXCIMER LASER L. Blair (LANL) K. Ueda (UEC) Y. Owadano (ETL) S. Watanabe (Tokyo Univ.)	Banquet
Nov. 12 (Thurs.)	9:00-10:30	11:00-12:30	2:30-3:30	4:00-6:00	
	SHORT WAVELENGTH RADIATION IN LASER FUSION A. Offenberger (Univ. of Alberta) S. Nakai (Osaka Univ.) K. Koyama et al. (ETL)	X-RAY LASER (2) T. Lee (NRL) Y. Kato (Osaka Univ.) H. Hara (Riken) T. Fujimoto (Kyoto Univ.)	FEL & SR (2) E. Elias (UC Santa Barbara) M. Velghe (Univ. of Paris-Sud)	Poster & Post Dead Line Papers G. Miley (Univ. of Illinois) K. Koyama (ETL) L. Blair (LANL) T. Kagawa (Nara Women's Univ.) P. Herman K. Imasaki, S. Miyamoto, Y. Kitagawa, T. Yabe, K. Nishihara, R. Kodama, K. Tanaka, H. Nishimura, H. Shiraga (Osaka Univ.)	
Nov. 13 (Fri.)	9:00-10:40	11:00-12:40	2:30-3:50		
	NOVEL LASER APPLICATION W. Sasaki (Univ. of Osaka Pref.) K. Fujii (Ibaragi Univ.) M. Obara, H. Kumagai (Keio Univ.) T. Sato (ETL) M. Maeda (Kyushu Univ.)	X-RAY LASER (3) G. Jansiot (CNRS, Orsay) H. Hora (Univ. New South Wales) Zhang Zheng-Quan (Shanghai Inst. of Opt. and Fine Mechanics) H. Daido (Osaka Univ.)	APPLICATIONS OF SHORT WAVELENGTH RADIATIONS K. Nugent (Univ. of Melbourne) K. Yamashita (Osaka Univ.) K. Tsunemi (Osaka Univ.) K. Endo (Hiroshima Univ.)		
Nov. 14 (Sat.)					

G. Miley (Illinois), D. Giovanielli (LANL) があり短波長光応用では K. Nugent (Melbourne) らが参加し、国内からは約80名が全国的な規模で出席した。

シンポジウムは初日冒頭特別講演として筆者の「エネルギー研究における短波長レーザー」とイリノイ大の G. Miley による「二重媒質核ポンプレザー」とが行われ、そのあと三本の主要テーマの講演すなわち X 線レーザー、自由電子レーザー、エキシマレーザーなどに関し、熱心な討論がつづいた。

シンポジウムの大要は Table I に示すとおりで、これから当日の熱気が立上る感がある。

このようなシンポジウムは世界の進展にいち早く対応するため、まことに重要である。現在世界各国で盛にこのようなトピカルミーティングが開催されているが、わが国が主導的立場にたって行うことはきわめて大きな意義がある。国際的行事である大国際会議もさることながらこのような専門家会合をさらに盛にする必要がある。

この短波長レーザーシンポジウムは参会者の

熱心な討議とともに斬新な内容の発表とあいまって、きわめて成功裡に会議を終了し、国内外の参加者は大きな満足感をもって会場をあとにした。一言附言するならば会議終了後さらに一日インフォーマルミーティングが開かれ、各テーマについてとりまとめ作業が行われた。これもこのシンポジウムの成功を物語る事由の一つであろう。この会議の運営に熱心に協力した大阪大学レーザー核融合研究センターの教職員の皆様に厚く感謝の意を表するものである。

このシンポジウムのプロシーデングは Springer Velag 社より出版されることになっている。おわりに支援を賜った文部省および大学当局に厚く御礼申し上げる。

(山中千代衛)

2. X線レーザー

2.1 はじめに

1980年代に入り大型のレーザー核融合実験装置が各国で建設され稼動を始めた。レーザー光の特徴は言うまでもなく良好な時間、空間コヒーレンスであり、原理的には波長程度の時間

的、空間的エネルギー集束性を有することである。すなわち、超高エネルギー密度の必要とされる種々の応用がこれら大型レーザー装置を用いることにより開かれている。いずれにしてもこれらレーザー光を物質に照射することになるので、計測の対象はプラズマであり、レーザー核融合実験と多くの部分は重なりあっている。プラズマ生成、計測の観点を少しばかり目的に応じて変更するという程度でも、糸口は十分掴むことができる。もちろん実用化までを考えればそれぞれ独自の課題が山積しており、広範な研究を必要としていることは言うまでもない。

X線レーザーは短波長化とともに増大する励起エネルギー密度を達成するため主としてレーザー生成プラズマを用いるものであり、大型レーザー装置の稼動とともに一気に実現した。現在急速に研究が進展しつつあり、本シンポジウムでも3セッション、12件の口頭報告があり、中心的テーマの一つであった。以下に会議のトピックスを各セッション毎に紹介することにする。なお詳細は文中に上げておいた参考文献を参照されたい。

2.2 Xray Laser (1)

本セッションというより本シンポジウムのハイライトはリバモア国立研究所のJ. Trebesの報告であった。この研究所は最も早く極端紫外域から軟X線に至るレーザー動作の信頼しうるデータを発表している¹⁻³⁾。今回は1) 短波長レーザー動作に向けた比例則、2) X線レーザー共振器、3) 光励起レーザー用ポンプ光源、4) X線ホログラフィーについて報告があった。次に1) の短波長レーザー動作の中心的話題を紹介する。これまでSe, Y, Moを用いた電子衝突励起によるNe様イオンの3p-3s遷移を用い波長200~100Åの誘導放出光が得られているが、この方式で生物学的応用等に欠かせない波長44Å以下を達成することは媒質生成用レーザーの規模が実現不可能な位大きくなり、かなり困難であることが報告された。これに変わってNi様イオンの4d-4p遷移を用いると実現可能なレ

ーザーエネルギーで44Å以下の波長のレーザーが得られることが示された。既にNi様Euの電子衝突励起により、波長66, 71Åの誘導放出光が得られている。またNi様Ybの波長50.5Åの利得生成が示されNi様Wによる波長43Åレーザーの可能性が示された。次に取り出しエネルギーの増加、ビーム品質、コヒーレンスの向上が期待できる共振器の実験結果が示された。多層膜球面反射鏡と平面多層膜半透鏡によりNe様Seレーザーに共振器が構成され反射鏡の効果により2ndパルスの出力が1stパルスの7倍にもなっていることが示された。利得時間幅が短かいので3rdパルスは1stパルスと同じ程度の出力強度しか得られていない。一般には短波長化に伴ない利得時間幅は短くなるので、こういったタイプの共振器の使用には限界があろう。この共振器とともに注目されたのはX線ホログラフィーの実証実験である。Fig.1に示すようにGabor型のホログラフィーにより直径8μmの炭素ワイヤーのホログラムが得られている。ゴールドバーのホログラムをHe-Neレーザーで再生することにも成功している。以上のとおり、短波長化、高出力化、高品質ビーム化、応用とすべての面にわたり世界をリードしており、今後の動向に注目する必要がある。

このセッションでは次にHull大学のRamsdenにより英国のX線レーザーの紹介があった⁴⁻⁶⁾。英国では全国の共同利用研究所であるラザフォード研究所に研究者が集まり共同研究を行なって成果を上げている。現在はVULCANという6ビームのガラスレーザーの2倍高調波を用い

Fig.1 The modified Gabor holography.

て実験を行なっているが将来はレーザーパルス幅としてピコ秒の発振器を有するKrFレーザーシステムを用いて研究を行なう予定になっている。

X線レーザーの利得生成機構としてプラズマの再結合に伴ない中間レベルで生ずる反転分布を用いることが特徴である。再結合過程に伴ない反転分布の生成は、リバモア研で用いられている電子衝突励起に比べ、波長100Å近辺では励起効率がずいぶん高いようである。直径7μm程度の炭素ファイバー（その上にLiF, Al, NaCl等をコートする場合もある）をターゲットとして用いており、炭素のバルマーα線(182Å)で利得長積~4が得られている。その他、フランスのグループが提案しているLi様イオンの再結合型レーザーの実験も行なわれておりAl, Cl等で利得が観測されている。また、円筒状にプラズマが膨張することを基礎にした理論解析により、再結合レーザー利得生成に必要な照射レーザーパラメーターの比例則が示された。中規模のレーザー核融合実験装置をきわめて効率良く運用し多くのデータを蓄積している。

東大物性研の黒田からはHe様Al 3→2遷移の反転分布の可能性が示された。広島大学の小田らを中心としたグループからは、磁場閉じ込め、またはzピンチプラズマの中性ガスとの接触冷却による再結合レーザーの可能性が報告された。密度、温度の増大が課題である。

2.3 Xray Laser (2)

このセッションで最初に報告したのは米国海軍研究所(NRL)のT. N. Leeである⁷⁾。レーザーとしてPHAROSⅢガラスレーザーの基本波(波長1.05μm)を用いパルス幅2ns、レーザーエネルギー350—500Jでターゲット照射を行なっている。

X線レーザーのスキームとしてはリバモア研のNe様イオン3p-3s線の電子衝突励起であるが、ターゲット物質としてCu, Ge, GaAs等、リバモア研とは異なった物質を用い、異なったレーザー照射パラメータで利得生成を行なっている。X線レーザーの波長は低い原子番号の物

質を用いているので180~285Åと若干長くなっているが、レーザーパラメーターを大きく動かすことなどにより反転分布生成の詳細な物理的機構を調べている。

次に阪大レーザー研の加藤から激光MⅡ号を用いた再結合励起型の利得生成実験の報告があった⁸⁾。照射レーザー波長は526nm(2倍高調波)、パルス幅150ps、エネルギー100Jである。薄膜ターゲットに長さ15mmの線状集光を行なうことにより、H様C, 3d-2p線(182Å), H様O 3d-2p線(102Å), H様F, 3d-2p線(89.9Å), Li様Al 5f-3d線(105Å), 5d-3p線の利得生成に成功している。これから行なわれる激光Ⅱ号を用いた実験結果が注目される。

理研の原によりLi様Cの再結合レーザーの研究状況が報告された。本格的なガラスレーザーシステムが導入され、レーザー発振に向けた実験が開始されようとしている。

京大の藤本からは、X線レーザー励起の重要な過程の一つである衝突励起の速度定数向上に寄与する物理機構の提案等、プラズマ分光学的見地からの報告があった^{9,10)}。

2.4 Xray laser (3)

このセッションは4件の報告があった。まず、フランスのG. JamelotによりGRECOレーザーを用いた実験が紹介された。この研究所の特徴は、再結合励起型Li様イオンをレーザー媒質に用いていることである。こうすると、より低いレーザー照射光強度で短波長X線レーザーが実現できるとされる。これまでLi様Al 3d-5f線(波長105.7Å)で利得長積2—2.5が得られている。またSを用い波長65.2Å 利得長積1.5—2が得られている。これらはCRモデルを用いたシミュレーションコードにより解析され、比例則の解明が行なわれている。現在レーザーシステムの高出力化を行なっており、Li様Alの利得長6cm、利得長積10—15をめざした実験が1988年1月開始されようとしている。またCaのLi様イオン3d-5f線(波長39.5Å)の利得として1cm⁻¹が予測されており、実験結果が期待

本セッションの最後に阪大レーザー研、大道から大出力CO₂レーザー照射による再結晶型レーザーの報告があった¹⁴⁾。Cプラズマをシリンダー壁で閉じ込め且つ壁への熱伝導で急冷も行うスキームで実験が開始されており、予備の結果として利得長積〜1が報告された。照射レーザーシステムの簡便さ等、実用性まで考えるとこの方式には種々メリットがあるものと考えられる。

本シンポジウムで報告された X 線レーザーの研究は以上のとおりであるが、今回参加しなかったプリンストン大学のグループの研究^{15, 16)}、多光子過程を使った X 線発生¹⁷⁾の研究等、他にも多くの研究が活発に展開されており、今後の発展が大いに期待される。(大道博行)

スタンフォードでは高輝度ビームを開発し、XUV域までのFELの開発を考えている。波長は $2000\text{ \AA} \sim 100\text{ \AA}$ の領域でSPRLと呼ばれる蓄積リングを用いる計画が進んでいる。SPRLの構成をFig. 2, そのときの諸元をTable IIに示す。ウィグラーピッチは、 $11\text{ cm} \sim 6\text{ cm}$ で、磁場強度を変化することにより波長を変える。このとき利得 $10^3 \sim 10^1$ を得る。ウィグラーの長さは、直線部で最長 27 m それ以外に折れまがった直線部を4カ所取ることができるよう考えられており、そのため、レーストラック形をしている。短波長であるため、ミラーの損傷が課題となっており、Al, SiC, Au, Mo/Siを用いる検討がTable II High Brightness Photon Source at the the SPRL.

*) incl. energy spread
 **) photons/sec/mm²/mrad²/0.1%BW

Fig.3 Layout of Twostage FEL.

Table III Parameters of the UCSB Two-Stage Infrared FEL.

	FIRST-STAGE	SECOND-STAGE
Electron beam energy	6 MeV	same
Theoretical emittance	$\epsilon_n = 18$ mm-mrad	same
Current	$I = 20$ A	same
Undulator parameter	$K_0 = 0.373$	$K_p = 4 \times 10^{-3}$
Pump period	$\lambda_p = 20$ cm	$\lambda_p = 703 \mu\text{m}$
Number of periods	$N_0 = 14$	$N_p = 3980$
Wavelength	$\lambda_s = 703 \mu\text{m}$	$\lambda_s = 1.08 \mu\text{m}$
Small signal gain	$G_p = 12\%$	$G_s = 10\%$
Electron beam radius	$r_b = 5$ mm	$r_b = 1$ mm
Optical beam waist	$w_p = 1.98$ cm	$w_s = 1$ mm
Rayleigh length	$Z_p = 1.75$ m	$Z_s = 2.91$ m
Losses	$\alpha_p = 3\%$	$\alpha_s = 2\%$
Satur. flux(watts/cm ²)	$S_p = 4.6 \times 10^7$	$S_s = 1.3 \times 10^6$
Power output (watts)	$P_p = 2 \times 10^6$	$P_s = 1.5 \times 10^4$

行なわれている。

UCSBでは二段階FELを用いてFELの短波長化にとりくんでいる。二段階FELの出力波長 λ_s は初段ウィグラーのピッチ長を λ_0 とすると

$$\lambda_s = \frac{\lambda_0}{\gamma^4}$$

となるため、短波長の発生に有効である。実際の実験配置をFig.3に示す。ヘリカルアンジュレーターを用いて、両端に反射ミラーを設ける

ことにより、二段階FELを構成している。このときのビーム、レーザー出力に関するパラメーターをTable IIIに示す。

UV光を6 MeVの加速器で出すための二段階FELの設計が進行中である。問題はビームの輝度であり、このため大幅なビーム源の改善が考えられる。

日本では大阪大学レーザー核融合研究センターにおけるFEL用誘導加速器の開発、電磁波ウィグラーによる可視領域におけるFELの検出とガス共鳴線の効果、分布フィードバック(DFB)構造による発振ラインの先鋭化、FEL輝度の改善について発表があった。Fig.4にDFB-FELの実験結果を示す。共鳴条件の整合点で、輝度が約1桁上昇している。

岡崎分子研では蓄積リングを用いたUVアンジュレーター光の研究が進行中である。アンジュレーターは平面永久磁石を用いたものと超伝導マグネットの二種を有しており、赤外から軟X線領域での光の発生が考えられている。

全体の印象として短波長FELは、未だ研究が始まったばかりであるが、興味深いテーマであり活発な展開が予想される。

(今崎一夫)

4. エキシマーレーザー

シンポジウムにおけるエキシマーレーザー関連の発表件数は12件で、海外からはBlair (米国ロスアラモス研究所)とOffenberger (カナダアルバータ大)の3件であった。内訳はTable

Fig.4 Output spectrum of ASE without (a) and with (b) DFB structure.

Table IV

大出力KrFレーザーシステム	5
短パルス高出力エキシマーレーザー	2
VUV短波長発生	2
利得計測, ASEなど	3

IVに示した通りである。

Blair (LANL) はLANLで開発中のAUORAシステムの開発状況を報告した。放電型レーザーの出力から、5 ns のパルスを切り出し、多段の時間・空間エンコーダによって96ビームに分離した後、パルスの多重化を行い、500 ns のパルスを合成した。多重化パルスは、前置増幅器 (PA)、中間増幅器 (IA)、大口径増幅器 (LAM) で増幅され、各ビームを分離、遅延時間の調整を行うデコーダを通して48ビーム毎に南北からターゲット上に集光される。電子ビーム励起前置増幅器による増幅結果が示されたが、大きな周期の振幅変調が観測され、ビームバランスに問題がある。Angular Multiplexing は原理的には簡単であるが、多数の光学素子の精密制御が必要なことから、大規模システムに応用されたのはAuroraシステムが初めてである。LANLでは有効面積 $1 \times 1 \text{ m}^2$ の大口径凹面鏡や96ビーム用のセグメントミラーを開発し、自動アライメントによって問題を解決しようとしている。自動アライメント制御によって、3分以内に $5 \mu\text{rad}$ 以内の精度でアライメントできるので、ビーム数が多いことは問題にならないと主張している。 $1 \times 1 \times 2 \text{ m}^3$ の巨大な体積を有する大口径増幅器は、これまでに10.7 kJ, 500 ns の最大出力を発生しているが、最適条件からすればまだ改良の余地がある。来年度には48ビーム1方向照射でターゲット照射実験を開始する予定である。

植田 (電通大) は大規模KrFレーザー用基礎モジュールの開発と関連付けて、KrFレーザーのスケーリングについて報告した。500 kV, 100 kA のモジュール化ダイオード4台で励起される高密度励起テストモジュールは、4.2 kJ の deposition から460 J を発振器モードで発生し、内部効率は11%と高い。2次元的に積層するため

に開発されたモジュール化ダイオードに用いられたベルベットカソードは一定インピーダンスで安定に動作した。3次元ASEコード(佐々木)によれば、大規模KrFレーザーの高効率出力限界を決定する基準は、媒質の1パス縦横利得で与えられる。テストモジュールの場合、 1 MW/cm^3 の高密度励起条件における最適条件であることが分かった。一定利得条件を活用して測定された増幅パラメータ (西岡) から、 $100 \text{ kW/cm}^3 \sim 1.5 \text{ MW/cm}^3$ の励起密度範囲で、内部効率を一定に保つことが可能であることが示された。この結果、励起密度スケーリングを行えば、KrFレーザーの限界出力は低密度励起条件において、500 kJ/パルスに達するとの結論である。

大和田野 (電総研) は建設中の1 kJ システムASHURAの現状を報告した。注入ロック不安定共振器構成のAMP2から230 J, 100 ns を発生し、同軸励起型のAMP3の電子ビーム発生試験中である。ダブルパス増幅を基本にした増幅システムの配置を示し、パルス圧縮はラマン圧縮、Angular Multiplexingの両者を検討している。一方、短パルスTWエキシマーレーザーを開発している渡部 (物性研) によれば、YAG励起色素レーザーを短パルス源とし、KrF, XeClレーザーによって20 ps, 0.5 ps の短パルス増幅が行われた。 $7 \times 7 \text{ cm}^2$ の大口径放電型レーザーを有する4段増幅システムで、350 mJ, 20 ps の出力をKrFレーザーで得ている。短パルス増幅では空間フィルターでも除去しえないASEの発生が問題であり、可飽和吸収体の開発が待たれる。さらに短パルス化を図るとともに、電子ビーム励起増幅器を用いて、0.5 ps, 5 J の10 TW 級出力を発生させる予定である。熊谷 (慶大) は大気圧動作ArFレーザーの利得測定から、1パス増幅器の最適パワー効率が15.7%にも達することを報告した。KrFレーザーよりもさらに短波長であることも考慮して、ICF用レーザーとしてArFレーザーの方がさらに優れていると主張した。

Offenberger (アルバータ大) は、誘導ラマン (SRS) および誘導ブリルアン (SBS) によ

るパルス圧縮を中心にKrFレーザーによる照射実験プログラムについて述べた。2次ストークス光による損失のないSBSでは、15atmのSF₆で高いピークゲイン(71倍)のパルス圧縮をし、短パルス(280ps)の高出力(637MW)を得た。SBSはスペクトル幅に敏感で、 0.008cm^{-1} から 0.005cm^{-1} に狭帯域化すると変換効率は2倍向上した。Al, Au, Be, Formbar ターゲットに照射してX線発生の基礎実験を開始した。照射強度は最大 $1.5 \times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ で、KrFレーザーの吸収は98%と高い。実験結果として100~1000 eVのX線スペクトルを示した。大出力KrFレーザーはLLNLのB-AMP(850J)の全システムを借り受け、予算を獲得し次第、組み立てを開始する予定である。装置のみならず全体の計画として以前にLLNLで計画された研究を、着実にデータを積み上げながら実行しようとしているようだ。

電子ビーム励起ガスエキシマーレーザーの高出力(>10MW)、波長可変の特長とH₂のラマンシフトを組み合わせ、強力な波長可変VUV光源を佐々木(阪府大)らが実現した。N₂Oを光解離して生成したO(¹S₀)と基底状態³P間の反転分布を利用すれば、15MW/cm²程度の励起で反ストークスラマンレーザーが発振するとの予測を示した。また、従来のArに加えて、Neの発振が出来れば、82nm付近まで短波長化が進むと期待される。一方、前田(九大)はエキシマーレーザー励起の色素レーザーの2光子共鳴4光波混合によって50nm程度まで波長可変コヒーレント光源が広がるとの展望を示した。準備中の放電型エキシマーレーザーが稼働すれば、GW色素レーザーが可能になるので、高次の反ラマン光でも短波長化が促進されるだろう。

その他、狭間(電総研)によるX線予備電離XeClレーザー(出力50J)やLANLにおけるサブpsパルスの増幅で、 $10^{18} \sim 10^{20}\text{W}/\text{cm}^2$ の集光パワーを目標とした高輝度エキシマーレーザーシステムなどの報告があった。

(植田憲一)

5. レーザー核融合

短波長ハイパワーレーザーの開発は、レーザー核融合にとって最重要課題の一つである。これまで激光Ⅷ号、シバ、ノバによる実験により、ペレット爆縮の波長依存性が詳細に調べられた。ガラスレーザーの基本波(赤外光)、2倍高調波(グリーン光)を3倍高調波(ブルー光)4倍高調波(紫外光)を用いて、直接照射爆縮、間接照射爆縮(キャノンボール)に関する物理過程が解明された。その結果によると、直接、間接いずれの方式の爆縮においても、短波長レーザーになるほど高効率爆縮が可能であることが判明してきた。

このシンポジウムにおけるレーザー核融合関連の発表は、大別すると三つのカテゴリーに分けられる。核融合用高出力短波長レーザー技術、短波長レーザーによる直接爆縮方式、レーザーによる短波長放射を用いた間接爆縮方式である。オーラル、ポスターを含め全体60件の報告のうち、直接にレーザー核融合と関係のある発表は、約15件であった。これ以外でもエキシマーレーザーにしる、自由電子レーザーにしる、その研究の動機がレーザー核融合のためであったり、X線レーザーのように、核融合研究の成果とみなされるもの等、ほとんどの発表が何らかの形でレーザー核融合と密接な関連にある。これがまさに、レーザー核融合がその波及効果としてハイテクを生み先進科学技術の牽引力として機能していることを示している。

核融合用短波長レーザー技術に関連しては、エキシマーレーザーの最近の進歩が、全世界のほとんど主要な研究グループからの報告によりまとめて討論され、極めて有効なシンポジウムであった。これに関してはエキシマーレーザーの章でまとめて報告される。核融合点火・ブレークイブン実験には、現在すでに技術的に確立したガラスレーザーが用いられる。100kJからMJクラスのレーザーはすでに建設あるいは設計されており、トカマク等に比し極めてコストエフェクティブに臨界核融合実験が可能であ

ることは注目に値する。しかもハイテクへの広範な応用が期待されるのである。

大型ガラスレーザーを核融合研究に用いる場合の最も重要な課題は、短波長への高効率波長変換である。これはまた波長 $1.06\mu\text{m}$ を基本にして、 0.53 (グリーン)、 0.35 (ブルー) 0.26 (紫外) μm と波長を自由にかえて実験に用いることが出来るという大きな特徴である。T. Yamanaka (T-4) により激光Ⅻ号のブルー化 (3 倍高調波) について詳細な報告がなされた。激光Ⅻ号レーザーは、回転ミラーによるビーム切換えによりターゲットチャンバー-1および同-2において並行して実験が可能である。このうちチャンバー1はすでに2倍高調波変換を行い、グリーン光による爆縮実験が実施されている。このたびチャンバー2に3倍高調波変換を行い、ブルー光による実験を開始しようとするものである。すでに1987年5月には2ビームのブルー化を完了し、変換効率、安定性、光損傷波面歪等に関する諸テストを行ない、全12ビームブルー化への技術的な最終確認テストが実施された。直径 35cm の大口径ビームで、かつ4分割アレイタイプにもかかわらず、66%という高効率が達成された。これはレーザービームの均一性、結晶の質が優れていることとともに、結晶カットおよびマウントの精度、セルアライメント精度等が極めて高いことを示している。口径 35cm をわざわざ4分割アレイタイプとして高効率変換に成功したことは、この技術により、現在すでに育成に成功している 40cm 級結晶を用いれば、ビーム径 80cm までの波長変換が可能であることを実証している。大型結晶の育生技術に関しては、すでに 40cm 級結晶の育生に成功した阪大レーザー研クリスタルグループの A. Yokotani (T-p21) により高光耐力化に関する成果が報告された。KDP結晶中における光損傷が、含有されている有機不純物によることをつきとめ、この含有量を低下することにより $20\sim 22\text{J}/\text{cm}^2$ という脅威的な高耐力結晶の育成に成功した。短波長帯における反射、無反射コーティングは、短波長光学システムを構成するうえ

での必須の技術であり、十分な光耐力をもったコーティング膜形成技術は現在急速な進展をみせている分野の一つである。K. Yoshida (T-p22) により種々の表面処理がなされた石英あるいはBK-7の研磨面に、各種誘電体膜を多層コートし、その光損傷しきい値を精度よく測定した結果が報告された。

短波長レーザーによる直接爆縮に関しては、すでにLHART (Large High Aspect Ratio Target) によりスタグネーションフリーの圧縮が実現され、中性子 10^{13} 個、ペレット利得 0.2% が得られ、核融合点火への見通しが確立された。実験データとの対比により信頼性を向上したコードによるシミュレーションによれば、ブルー光 100kJ によりブレイクイーブンが可能であると予測されている。この場合ペレット及び投射レーザー強度の一樣性が重要な因子である。多重衝撃波によるスタグネーションフリーモードでは、一樣性に対する条件が緩和される。この点に関しH. Azechi (T-p11) は核融合反応持続時間を、高速シンチレータとストリークカメラあるいは高速フォトダイオードとを組合せた中性子検知器により計測した。このようにして計測された反応時間を、種々の構造のペレットの爆縮について比較検討することにより、安定な爆縮モードを見いだそうとしている。新しい実験手法を提供するものとして注目される。爆縮の安定性、一樣性に関する研究が、爆縮の中心課題となり、爆縮性能の定量的評価が一段と精度を増してきた。H. Takabe (T-p12) は2DコードILESTA-2Dを開発し、実験結果との詳細な比較を行ない、 100kJ ブルー光によるブレイクイーブン実験に必要な条件を明らかにしている。K. Koyama (T-3) らは、平板ターゲットにより、照射の非一樣性をコントロールしながら、フォイル加速の一樣性を観測し、短波長レーザー投射時の熱伝導による平滑化効果を評価している。レーザーとしてはガラスレーザーの4倍高調波を用い、波数 $0.3\mu\text{m}^{-1}$ ではレーザー照射強度 $5\times 10^{13}\text{W}/\text{cm}^2$ および $1\times 10^{14}\text{W}/\text{cm}^2$ で平滑化率 0.5 および 0.2 を得ている。さら

に非一様性の波数が大きくなるほど平滑化率が大きくなることを観測している。レーザー爆縮において、今後ペレット照射の均一性の向上と、不均一性に強い爆縮モード、ペレット構造の考察が重要な課題となろう。

間接爆縮（キャノンボール）においては、ターゲット上に発生したプラズマによりレーザー光がX線に変換され、このX線によるアブレーションにより燃料ペレットを圧縮する。高密度プラズマにおけるX線の放射、吸収が基礎過程であり、レーザープラズマX線源、X線レーザー等の応用分野を開くものであった。外球上の小孔からレーザー光を入射し、空洞内の強力X線により内球を爆縮するキャノンボールターゲットは、レーザー光に対する吸収率の高いこと、内球表面上のX線照射強度の一様性が高いことが特徴である。キャノンボール爆縮における物理過程と、それぞれについてのこれまでの実験結果および総合的な爆縮性能についてS. Nakai (T-2)によりまとめられた。レーザーによるX線放射に関しては①X線への変換効率、②スペクトル③発生X線特性のレーザーパルスに対する時間的な変化、④方向性、⑤キャビティー内におけるX線の閉じ込め効果等が、X線を吸収し、アブレートする燃料球表面では、①入射X線の吸収、②吸収再放出を伴ったX線輸送、③アブレーション、④吸収長の長いX線成分によるペレットプリヒート等が定量的に明らかにすべき課題である。ガラスレーザー（波長 $1\mu\text{m}$ ）の1, 2, 3, 4倍高調波を用いて、これらの基礎過程についてその波長依存性も含め詳細な実験データが紹介された。特に単純な中空球にレーザーを入射し、X線の閉じ込め効果を検証しようとする阪大レーザー研とマックスプランク研究所との日独共同実験は、激光Ⅻ号の優秀性と、最先端科学研究における国際協力の有効性を広く知らしめることとなった。キャビティー内でのX線の吸収・再放出による実効的なバウンシング回数は2～3と評価されているが、キャノンボールターゲット設計のためのデータベースとしては、さらに定量性のたかい実験が必要で

ある。X線バックライト法による内球のダイナミックス、爆縮による中性子発生、密度、温度等に関し定量的データが得られ、シミュレーションとの対比が試みられている。大まかには、1次元ダイナミックスについては実験とシミュレーションとの一致は得られているが、最終的圧縮コアパラメータについては、まだ解明されない不一致が存在する。このような点に関し、個々の基礎過程について詳細な研究が進められている。理論的には、原子状態も自由電子も非平衡状態にあるプラズマでの緩和過程(T. Yabe, T-p7)、高密度プラズマ中でのイオンの構造(T. Kagawa, T-p8)、X線の発生・輸送に関する研究(K. Nishihara, T-p9)等非平衡、強結合でかつ輻射エネルギー輸送が大きな割合をしめる新しい物性物理の領域が開かれつつある。

実験では、薄膜ターゲットを用いて、表面におけるレーザー吸収、X線発生、そのスペクトル等について、パルス幅、ターゲット材料、表面プラズマの状態等を制御して詳細に測定し、さらに裏面でのX線放射の特性と比較することによりX線、衝撃波、電子熱伝導等のエネルギー輸送過程を解明している。(H. Nishimura, T-p5, K. Tanaka, T-p6)。レーザーX線発生源と、そのX線を投射するホイルターゲットとを分離し、ホイルターゲットへの入射スペクトルと透過スペクトルの時間分解計測により、電離パンスルーを検証している(H. Shiraga, T-p4)。

このように高温、高密度プラズマ中でのX線過程の基礎データが着々と整備されつつあり、この成果のうえに、高効率キャノンボールターゲットの最適化設計が行われる。レーザー核融合研究によりレーザープラズマX線の応用分野が拓かれており、さらに物理の新分野が開拓されているのである。(中井貞雄)

6. その他の短波長レーザー、光学素子、計測技術等

本報告では、短波長レーザーの新しい試み、

短波長用の光学素子，計測技術およびレーザー同位体分離等について述べる。

6.1 短波長レーザーの新しい試み

短波長レーザーの新しい発生法として，イリノイ大学のG. Mileyによる核励起レーザーに関する報告と，茨城大学の藤井によるストロンチウム再結合レーザーの報告がなされた。

核励起レーザーはレーザー媒質中で起る中性子による核反応を利用してレーザー発振を起す方法である。代表的な方法は， ^3He ， ^{10}B ， ^{235}U に中性子を照射し，生成される β 線や核分裂片の作る2次電子でレーザー媒質を励起する。この方法によると核分裂炉や核融合炉よりの中性子を一度電気エネルギーに変換することなく直接レーザーエネルギーに変換出来るため，高い効率期待出来るばかりでなく，大きな体積が励起出来る。このため大出力を高効率で発生する必要がある核融合炉用レーザーとして有望な方法である。

今回報告された方法は，2媒質法(dual-media)と呼ばれる方法で，レーザー媒質とレーザー媒質励起に必要な高エネルギー電子を中性子で作る領域を分離した方式で，電子ビーム励起エキシマレーザーの電子ビーム発生部が中性子による核反応領域に相等する，報告された具体的方法は，1) 核励起フラッシュランプ励起Nd:YAGレーザー，2) 核励起 $\text{O}_2(^1\Delta)$ レーザーである。実験に用いられた核分裂炉はイリノイ大学のTRIGA炉(熱中性子)とサンディア研究所のSPR-III高速パルス炉である。

1) のフラッシュランプ励起方式では， ^3He -Xeフラッシュランプに中性子を照射し，核反応生成粒子エネルギーを利用してXeを発光させ，この光をオプティカルファイバーでNd:YAGに導き励起する。

2) の $\text{O}_2(^1\Delta)$ レーザーは中性子核反応により $\text{O}_2(^1\Delta)$ 励起断面積が最大となる平均エネルギー10eVの電子を生成し， O_2 を励起する方式である。現在 O_2 圧力100Torr以下で～50%の $\text{O}_2(^1\Delta)$ の生成が確認されている。しかし圧力

Fig.5 O_3 生成分解による $\text{O}_2(^1\Delta)$ レーザーの概念図

を高くするとOが発生し $\text{O} + \text{O}_2(^1\Delta)$ の再結合でクエンチされる。高圧動作時の上記問題を解決するために O_3 分解光反応を導入する方式(Fig. 5参照)が提案されている。

ストロンチウム再結合レーザーは青紫領域で高繰返し発振が可能な高平均出力レーザーで，レーザー同位体分離への応用や，銅，金蒸気レーザーとの併用で白色光を発生し，カラープリントへの応用等が期待出来るレーザーである。藤井は， Sr^+ レーザーの出力制限要因についての研究およびその解決法についての提案を行った。

自己加熱型 Sr^+ レーザーは，バッファーガス(He)圧力を増加するとパルス当りのエネルギーは増加するが，最大平均出力を与える放電繰返し周波数は低下するという現象を示す。この現象が放電パルス間での中性原子，イオン，電子の空間分布の緩和速度と関係しているとの考えに基き，これらの空間，時間分解計測と計算機シミュレーションを実施している。またNe-Heバッファーガスのレーザー出力，効率に及ぼす効果を調べNe:He=20:1でレーザー出力が最大になることを見い出している。さらに少量のNe添加は放電とアフターグローの径方向一様性改善に寄与することを見いだしている。

6.2 光学素子及び計測技術

大阪大学山下より多層膜X線反射鏡の開発、吉田より226nm用反射鏡の開発について報告された。また大阪大学常深よりX線用CCDカメラの開発、オーストラリア・メルボルン大学K. NugentよりX-Ray Holography: Coherent or Incoherent?と題する報告がなされた。

山下は、波長1~200Å領域での直入射、斜入射多層膜X線反射鏡の開発を進め、その製法、製作鏡の特性を調べている。Ni/C, Mo/Si, Mo/Si+Cの反射鏡を開発し、その分光反射特性、偏光特性を測定し、設計値との比較を行なった。Mo/C膜でCu-K α 線に対してピーク反射率80% (斜入射)、Mo/Si膜で30%以上の反射率 (直入射) を得ている。

吉田は、酸化物膜、弗化物膜のレーザー損傷を定量的に調べた。単層酸化物膜ではSiO₂が、また単層弗化物膜ではMgF₂が高い損傷しきい値を示すことを見いだした。多層膜構成では、Al₂O₃/SiO₂の組合せが $\sim 1.2\text{J}/\text{cm}^2$ と高い損傷しきい値を示すことを見いだした。

常深は、一般に市販されている可視域のCCDカメラ素子の窓を取りはずし、かつベルチェ素子で冷却し、2~8keV X線域のX線用CCDカメラの開発について述べた。用いたCCDはシャープ製のLZ22187である。ピクセル数は386×488である。素子のX線に対する特性を光子計数モードで測定し、入射光子エネルギーと出力パルス波高の間に直線関係が得られること、および分解能はディプレッション層で生成される初期電子数のバラツキによるものではなく、読み出し部でのノイズで決まることを見い出している。

Nugent はコヒーレント、インコヒーレントホログラフィーの長所、短所を議論し、コーディッドアパーチャーによるインコヒーレント画像計測を用いた画像再成法がX線領域では有効であることを示した。ゾーンプレート法を用いたホログラフィー技術を可視光域で実証した。

6.3 レーザー同位体分離

短波長レーザーの応用の一分野として同位体分離があるが、これに関する報告が大阪大学藤原、仁木、阪部より報告された。

藤原は、同位体分離用の色素レーザー励起に用いる銅蒸気レーザー (CVL) の動作特性、レーザー発振後の下準位の緩和の状態とその径方向分布等の測定結果について報告した。

仁本は、パルスレーザー光が近共鳴媒質中を伝播する時のパルス波形の変化をNa蒸気を用い測定すると共に計算機シミュレーションにより、変形の様子を解析した。

阪部は、レーザー電離法で分離した同位体イオンを取り出す際の、衝突過程による濃縮比の低下割合を作業物質の密度等をパラメーターとして理論的に解析した。

(山中龍彦)

参考文献

- 1) D. L. Matthews et al. Phys. Rev. Lett. **54** (1985) 110.
- 2) B. J. MacGowan et al. J. Appl. Phys. **61** (1987) 5243.
- 3) B. J. MacGowan et al. Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 2157.
- 4) R. J. Dewhurst et al. Phys. Rev. Lett. **37** (1976) 1265.
- 5) D. Jacoby et al. Opt. Commun. **37** (1981) 193.
- 6) C. Chénais-Popovics et al. Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 2161.
- 7) T. N. Lee et al. Phys. Rev. Lett. **59** (1987) 1185.
- 8) Y. Kato et al. ILE Quarterly Progress Report.
- 9) T. Fujimoto and T. Kato, Phys. Rev. Lett. **48** (1982) 1022.
- 10) T. Fujimoto and T. Kato, Phys. Rev. **A35** (1987) 3024.
- 11) P. Jeagle et al. Europhysics Lett. **1** (1986) 555.
- 12) H. Guennon and A. Sureau, J. Phys. B: At. Mol. Phys. **20** (1987) 919.
- 13) P. Jeagle et al. J. Opt. Soc. Am. **B4** (1987) 563.
- 14) E. Miura et al. ILE Quarterly Progress Report ILE-QPR-87-2 p.28
- 15) S. Suckewer et al. Phys. Rev. Lett. **55** (1985) 1753.
- 16) S. Suckewer et al. Phys. Rev. Lett. **57** (1986) 1004.
- 17) A. McPherson et al. J. Opt. Soc. Am. **B4** (1987) 595.