



3.1 光量子科学研究が目指すもの Aims of Advanced Photon Science Research

木村 豊秋

日本原子力研究所 関西研究所 光量子科学研究センター
〒619-0215 京都府相楽郡木津町梅美台 8-1

Toyoaki KIMURA

Advanced Photon Research Center, Kansai Research Establishment,
Japan Atomic Energy Research Institute
8-1 Umemidai Kizu-cho, Souraku-gun, Kyoto 619-0215 Japan

The Advanced Photon Research Center (APRC) of Japan Atomic Energy Research Institute is pursuing the research and development of advanced photon sources such as a compact, ultra-short, high intensity laser, x-ray laser, and a superconducting linac-based free electron laser (FEL) and their applications. These compact and high-intensity lasers have various capabilities of producing radiations with distinguishing characteristics of ultra-short pulse, high coherence, etc. Hence, they can provide novel means of research in the field of nuclear energy applications and industrial and medical technologies.

It is important for us to promote these researches on these high-intensity laser applications comprehensively and effectively under the collaborations with nationwide universities and industry. From this point of view it is expected that the APRC plays a role as a COE for these researches. Through these research activities for development of high-intensity lasers and their applications, we will develop "photon science and technology" as a leading key technology in the 21st century and contribute the development of science and technology including nuclear energy technology and production of new industries.

Keywords: Advanced photon science, Compact, ultra-short pulse, high intensity laser, CPA, Titanium- sapphire Laser, X-ray laser, Free electron laser (FEL), Radiation application, Laser-driven ion source, Laser acceleration, Coherent x-ray optics, Photo-nuclear reaction, Quantum control of chemical reaction

1. はじめに

レーザーは、今や広く科学技術や情報・通信、医療、産業に活用されているが、これまでは比較的弱い光を中心とした利用に限られてきた。レーザー媒質中での非線型効果に起因する発熱等、出力向上に対する阻害要因が、1980年代後半にチャープパルス増幅(Chirped Pulse Amplification: CPA)技術[1]の発明によって取り除かれ、その後小型固体レーザーの出力は急速に増大を遂げてきた。近年、ピーク出力1TW、集光強度 $10^{18}\text{W}/\text{cm}^2$ を大幅に越え、ペタワット級の小型レーザーが実現している(図1)。このような高強度レーザーの最近の進歩は、その光子数、波長、位相、波面などの特性を自由に操る制御技術の向上と相俟って、レーザーの持つ優れた特性を十分に引き出した極限レーザーとして、光利用の新たな展開を可能としつつある。こうしたレーザーを物質に照射すると、電子が光の静止質量を超える

エネルギーで運動する「相対論的プラズマ」が生成され、その超高強度場により高エネルギーの光子や粒子の発生、加速が可能となる。

2. 研究開発の現状と最近の成果

光量子科学研究センター(Advanced Photon Research Center: APRC)では、小型極短パルス高強度レーザー(Tキューブ・レーザー¹⁾)、X線レーザー、超伝導リニアック駆動自由電子レーザーなどの先進レーザー開発と、それらの利用研究を行っている。当センターは、原子力研究で培った加速器技術や放射線取扱技術を基に新たなレーザー技術を独自に開拓し、これら高強度レーザーの研究開発において世界をリードしている。こうした高強度レーザーは、極短パルス(発光時間が極めて短い)、高コヒーレント(波の位相がよく揃っている)など新しい性能を持つ放射線源として優れた力を有する。このため、これらは光による核反応を利用した原子核構造の解明、コヒーレント量子制御(後述)による高効率の同位体分離といった原子力への応用をはじめ、産業・医療など広い分野に新たな研究手段を提供することが可能である。

Tキューブ・レーザーの開発研究では、平成14年度には、レーザー増幅のもとになる物質として固体結晶(チタンサファイア)を採用したシステムで、33 fs と極めて短いパルス幅で、小型装置としては世界最高性能のピーク出力(0.85 PW)を達成した(図2)[2]。

当センターではこのTキューブ・レーザーを利用し、加速器の小型化や高品質電子ビームの生成を目指したレーザー航跡場による電子の加速技術の研究開発を進めている。これまで、エネルギー300MeVまでの加速の成功、レーザープラズマ中で20 GeV/mという航跡場の生成を周波数干渉計による直接観測[3]など、加速機構解明につながる基礎研究において成果を得た。これらと併行して、フォトカソード電子銃、マイクロロン加速器など電子源の開発やレーザービーム輸送系の整備を終え、放射線使用施設の変更許可を受け、1 GeVの電子加速の実証を目指した研究を昨年11月から開始している。

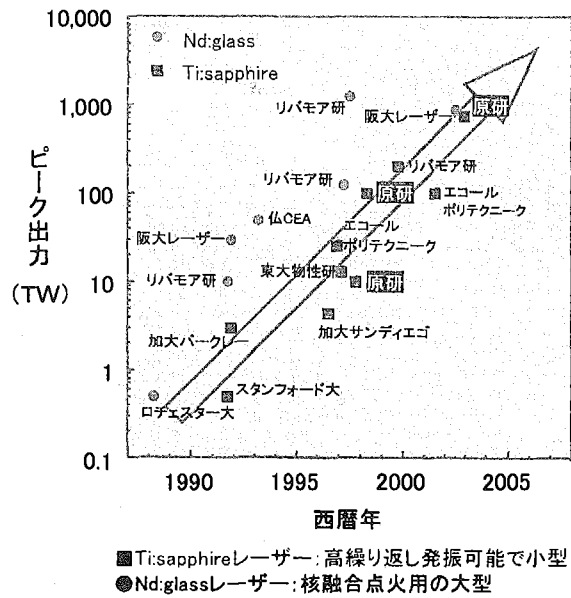
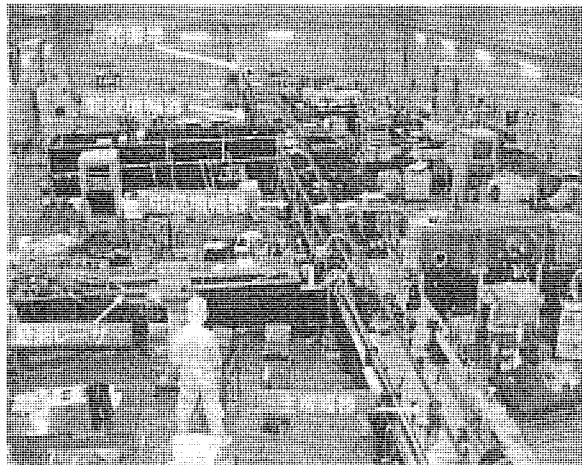


図1. 小型高強度レーザーにおける出力の進展



高強度レーザー光の進行方向

図2. チタンサファイア結晶を用いたペタワット級小型高強度レーザー

1) Table-Top Terawatt Laser (テーブルの上に乗る程度で、テラワット級の強い光が出るレーザー) のこと。頭文字にTが3つ並ぶことから、Tの3乗、すなわちTキューブ・レーザーと呼んでいる。

また、平成 12 年度から「超高強度場科学に関する研究」を開始し、TW 級レーザー装置等を用いた研究において、MeV 級のイオンや電子の生成を確認した。平成 13 年度から

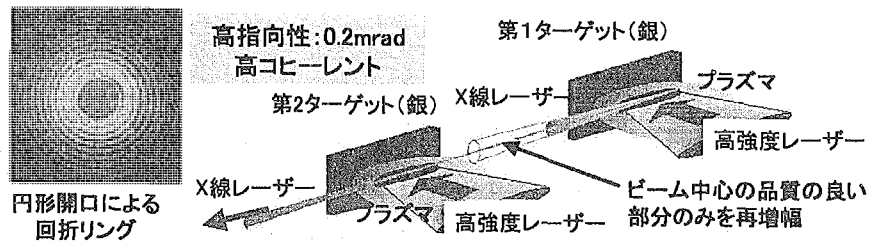


図 3. ダブルターゲット方式による X 線レーザー

は粒子線癌治療用加速器の小型化、普及を目指した開発の一環として、放射線医学総合研究所、東京大学、京都大学などと協力してレーザー駆動イオン源開発の研究を進めている。

また、当センターでは、高強度レーザーを金属表面に線状に集光して、より波長の短い軟X線領域のレーザー光を得る研究にも取り組んでいる。平成 14 年度には、銀をターゲットとして世界で初めて空間的に完全コヒーレントなX線レーザー(波長 13.9 nm)を実現した(図3)[4]。このレーザーは発散角が 0.2 mradと従来に比べ 1 桁以上も小さく、極めて指向性に優れている。この成功は、幅広い科学技術研究への利用を可能とする画期的な成果であり、現在、このX線レーザーを用いる高精度X線干渉計などの利用技術開発や物質微細構造の動的挙動測定などの利用研究を進めている。強誘電体であるチタン酸バリウム表面の微小分極構造の研究では、その動的挙動をピコ秒の時間分解で観察することに成功した[5]。この研究の進展は、不揮発性高密度メモリなどの超高速・超省電力のナノデバイスの開発に繋がり、情報・通信分野発展への貢献が期待できる。また、X線レーザーは、細胞やタンパク質など生体物質の生きたままの観察のための小型で強力な手段として期待されている。

さらに、当センターでは、超伝導リニアックの特性を活かした高密度電流加速による自由電子レーザー出力の高出力化、高効率化を目指した研究開発を行っている。平成 12 年には、世界最高平均出力 2.34 kW を達成した。また、高効率化の研究として、液体ヘリウムの再充填が不要で長期間低温保持が可能な自立式無蒸発型冷凍機を備えたエネルギー回収型超伝導リニアック自由電子レーザー(図4)を開発し、光変換後も電子ビームが有するエネルギーをほぼ完全に回収でき、後続の電子ビームの加速に再利用可能な完全エネルギー回収を実証した[6]。これらの成功は、従来レーザー利用で最大のネックであったレーザー光へのエネルギー変換効率の大幅に改善したものであり、非熱微細加工技術などの産業利用に大きな展開をもたらす画期的な成果である。

3. 新たな課題への取り組みと今後の展望

極短パルス高強度レーザー利用の新たな展開として、コヒーレント量子制御に関する研究を開始している。これは、極短パルス光の周波数や位相、すなわち、波形を制御することにより、物質中の原子のエネルギー状態を選択的に変化させ、化学反応を制御しようというものである。セシウム原子の近接した2つのエネルギー準位への選択励起に関する実験結果を図5に示す。この技術を用いれば、高効率の同位体分離による新たな原子力材料の創製、医療品

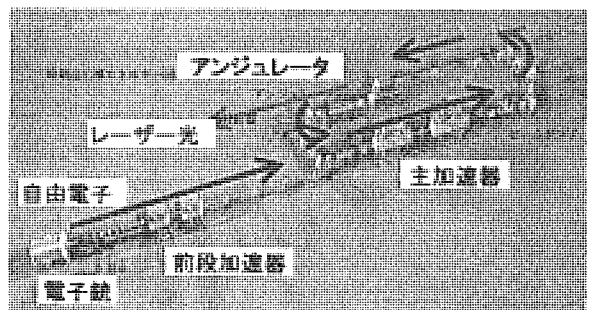


図 4. エネルギー回収型超伝導リニアック自由電子レーザー

や放射化物質の抽出分離剤などの合成に技術革新をもたらす可能性を秘めている。

また、当センターでは、光核反応断面積の測定、光核反応による重元素の合成過程や核構造の解明など、原子力の基盤を成す光核科学に関する研究を開始している。本研究では、レーザーと加速器技術の融合させることにより得られる 10 MeV 級の逆コンプトンガンマ線を用いている。当センターで開発した超伝導リニアック自由電子レーザーで得られる高出力の赤外光を、世界最高性能の放射光施設である SPring-8 の蓄積リングに蓄えられた高エネルギー電子に照射すれば、10 MeV 級のエネルギーを有する高品質の多量のガンマ線が生成でき、光核科学研究を大きく進展させることが可能となる。

4. 光量子科学研究の推進に向けて

高強度レーザーの利用研究の推進にあたっては、関西地域をはじめ全国の大学・産業界や国外の先端研究機関との密接な連携の下、総合的かつ効率的な推進が重要であり、光量子科学研究センターは、このための中核研究拠点(COE)としての役割を果たすことが期待されている[7]。このような観点から、放射線利用研究の一環として、原子力をはじめとする科学技術、医療、環境、産業分野の幅広いニーズに応える利用研究の展開のために、産業界・大学等の共同利用に供する設備・体制を整備していくことが必要であると考えている。当センターは、このような高強度レーザーの開発・利用研究を通して、21 世紀の主導的キーテクノロジー「光科学技術」を涵養し、放射線利用の新たな展開を図り、原子力エネルギー利用の基盤技術をはじめとする科学技術の発展や新産業の創出に貢献していきたい。

参考文献

- [1] D. Strickland and G. Mourou, *Optics Commun.* **56** (1985) 219-221.
- [2] M. Aoyama, K. Yamakawa, Y. Akahane, et al., *Optics Letters* **28** (2003) 1594-1596.
- [3] H. Kotaki, M. Kando, et al., *Physics of Plasmas* **9** (2002) 1392-1400.
- [4] T. Kawachi, M. Kado, et al., *Phys. Rev. A* **66**, 033815-1-7 (2002).
- [5] R. Z. Tai, K. Namikawa, M. Kishimoto, et al., *Phys. Rev. Lett.* **89**, 257602 (2002).
- [6] R. Hajima, N. Nishimori, et al., *Nucl. Instr. and Meth.* **A483**, 113-118 (2002).
- [7] Final Report from the OECD Global Science Forum Workshop on Compact High-Intensity Short-Pulse Lasers: Future Directions and Applications, OECD (2002).

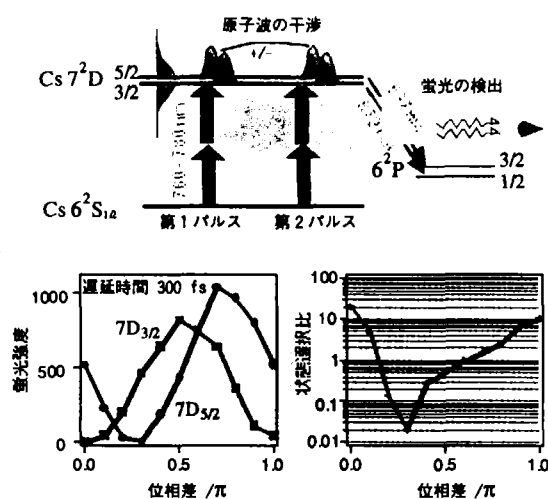


図5. 同位体分離素過程の原理実証実験。極短パルス列と原子波の可干渉性を利用して原子準位選択的な励起を試み、パルス列の位相差制御により選択比のコントラストとして従来より 2 桁大きい 10^3 以上を実現。