

高次高調波によるシード型自由電子レーザー

富樫格¹, 矢橋牧名^{1,2}, 田中隆次^{1,2},
原徹^{1,2}, 田中均^{1,2}, 石川哲也²

¹財団法人 高輝度光科学研究センター

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

²独立行政法人 理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター

〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

要旨 SCSS 試験加速器において、波長160 nm, 61 nm のシード型自由電子レーザー (free electron laser: FEL) の発振に成功した。高強度 Ti : sapphire レーザーを Xe ガスセルに集光して得られる 5 次高調波 (160 nm), 13 次高調波 (61 nm) をアンジュレータに入射することで実現している。極端紫外領域では、世界初のシード型 FEL である。

1. はじめに

近年、自由電子レーザー (Free Electron Laser: FEL) は、極端紫外 (Extreme Ultraviolet: EUV)~硬 X 線領域の高強度コヒーレント光源として期待されている。ドイツ・ハンブルグの DESY にある FEL 施設 FLASH¹⁾では、2005年から、EUV-FEL として利用運転が開始されており、隣接して XFEL 施設である European XFEL の建設が進められている。アメリカ・国立 SLAC 加速器研究所の LCLS (Linac Coherent Light Source)²⁾では、2009年に波長1.5 Å の発振に成功し、様々な X 線の利用実験が行われている。日本では、2011年3月に XFEL 施設が完成し、8 GeV の加速エネルギーに到達した電子ビームによって発生するアンジュレータからの硬 X 線 (波長0.8 Å) 自発光の観測に成功した。施設名称も SACLA (Spring-8 Angstrom Compact free electron LASer) と決まり、2011年度内に供用運転が開始される予定である。

これらの FEL では、共振器を持たない自己増幅自発放射 (Self-Amplified Spontaneous Emission: SASE) 方式^{3,4)}が採用されており、光学素子による波長制限がないため EUV~硬 X 線の発振が可能である。しかしながら、ノイズ (自然放射) を種光としているため、その統計的な特性から、発振するレーザー光の時間分布やスペクトルがスパイク状に複数のピークを持ち、それがショット毎に変化するという原理的な課題を抱えている。

これを解決するため、外部より時間的・空間的に高いコヒーレンスを有するシード光を入れて増幅を行うシード型 FEL が提案されており、DESY や、イタリア・ELETTRA の FEL 施設 FERMI などでも実験が始められている。

本研究では、フェムト秒高強度レーザーからの高調波をシード光として用いアンジュレータで増幅するシード型

FEL を、深紫外領域の波長160 nm⁵⁾、極端紫外領域の波長61 nm⁶⁾において実現した。実験は、XFEL プロトタイプ機である SCSS 試験加速器⁷⁾で行われた。

2. 放射光, SASE 型, シード型 FEL の比較

光速まで加速された電子バンチがアンジュレータ中に入射すると、アンジュレータが作る磁場により、放射光 (Synchrotron Radiation: SR) が発生する。磁場と放射光電場との相互作用により、電子バンチの密度変調と光強度の指数関数的な増幅が行われ、最終的に飽和状態に達する。この方式を SASE 型 FEL というが、SASE 型 FEL では、自然放射を増幅しているため、電子バンチの縦モードにスパイク状の時間プロファイル・スペクトルが観測される (Fig. 1(a))。一方で、コヒーレントな光源をシード光として外部から入射し、シード光の電場で電子バンチに初期変調を加えると、一様な密度変調が生成し、フルコヒーレントな光になる。Fig. 1(b)に、アンジュレータ距離に対する SASE 型 FEL とシード型 FEL の放射光強度を数値計算により求めた結果を示した。数値計算は、SCSS 試験加速器をもとに 3D FEL シミュレータ “SIMPLEX”⁸⁾で行った。シード型 FEL では、SASE 型 FEL に比べ増幅率が高く、短い距離で飽和に達する。これは、アンジュレータの距離を短く設計できるため、FEL の小型化にも有効である。

3. 160 nm シーディング

はじめに、波長160 nm のシーディング実験を行った⁵⁾。シード光は、フェムト秒 Ti : sapphire レーザーの 5 次高調波を用いた。この領域では、後述する高次高調波と

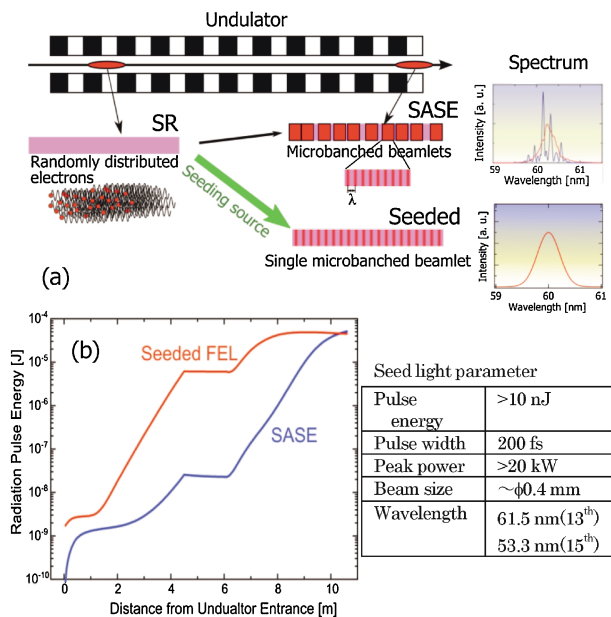


Fig. 1 (a) Schematic image of SR, SASE and Seeded FEL. (b) Radiation power growth of SASE and Seeded FEL in SCSS test accelerator.

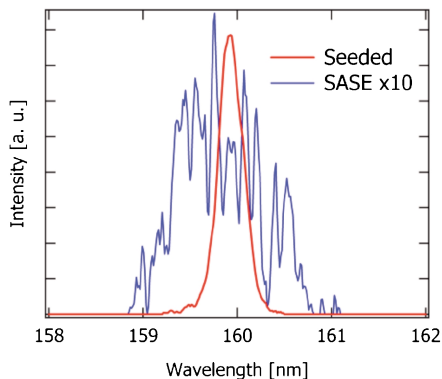


Fig. 2 Spectra of 160-nm seeded (red line) and SASE (blue line) FEL.

発生プロセスが異なり、その非線形感受率は摂動論に従うので、次数の上昇に伴い発生効率は急激に減少する。5次高調波では、比較的低い次数であるから発生効率も高く、 10^{-5} 程度の発生効率が見込める。また、高反射の誘電体多層膜ミラーや CaF_2 , MgF_2 などの窓材も使用できるため、比較的扱いやすい波長域である。

20 mJ, 100 fs (10 Hz) の Ti : sapphire レーザーを、焦点距離 $f=7$ m の集光レンズで Xe ガスセルに集光することで、約 $1 \mu\text{J}$ の 5 次高調波が得られた。発生した 5 次高調波は、凹面ミラー対でコリメート、集光し、 45° 入射誘電体多層膜ミラーでアンジュレータに入射している。

SCSS 試験加速器の通常オペレーションでは、加速エネルギー 250 MeV で、波長 50–61 nm の SASE 光が得られる。加速エネルギーを 150 MeV に下げ、アンジュレータを 1 台のみ使用することで波長 160 nm のオペレーションを行った。電子ビームのパルス幅は 1 ps であった。Fig. 2 にシーディング効果が見られた出力光のスペクトルを示す。

4. 61 nm シーディング

高次高調波は、時間・空間ともに完全なコヒーレンスを有する短波長光源として注目されている。これを用いて、シーディング実験を行った⁶⁾。高次高調波発生は、レーザー光とガス媒質を用いた波長変換プロセスであり、発生波長域は極端紫外から軟 X 線域にまで渡る。高次高調波はレーザー光とはほぼ同様のコヒーレンスを有する一方で、発生効率と単色光の強度が大変低いため利用実験の足かせになっている。高次高調波をシード光とするアンジュレータの増幅を行うことで、これを解決することもできる。

Fig. 1(b) に示す数値計算により、アンジュレータ中で必要な高次高調波強度を求めた (Fig. 1 表)。Fig. 3 に 61 nm シーディングの全システム図を示す。

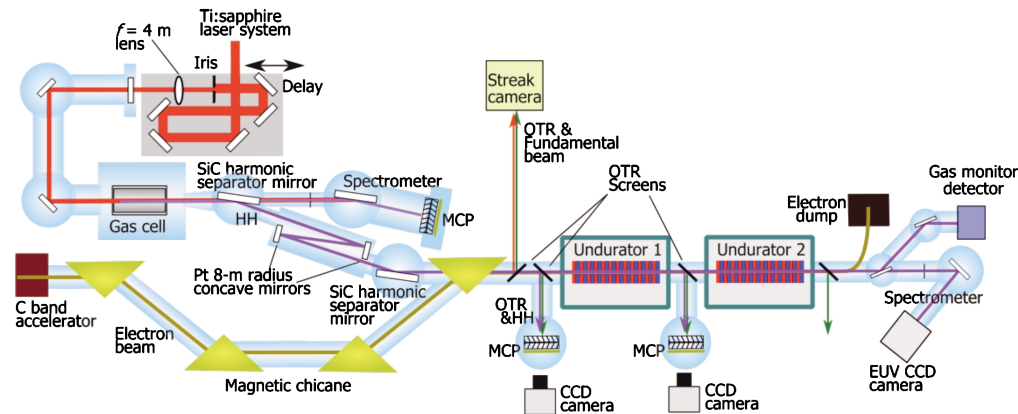


Fig. 3 Experimental setup of 61-nm seeding.

4.1 高次高調波の発生及び輸送ライン

高次高調波は、高強度フェムト秒レーザーを希ガスに集光することで発生する⁹⁾。希ガスの空間対称性から奇数次の高調波のみ発生するため、スペクトルは、基本波の光子エネルギーに対して2倍の間隔をもった離散的なピークになり、それぞれ高調波次数に対応する。また、摂動論を超えた9次以降、上昇と共に強度がほとんど変わらないプラトー領域が現れ、さらに高次では、強度が急激に減少しこれ以上高次の高調波が発生しないカットオフが存在する。一般的にプラトー領域以降を高次高調波と称している。カットオフは、P. B. Corkumの3-stepモデル¹⁰⁾により説明でき、高次高調波のカットオフエネルギー（波長）は次式で表される。

$$h\nu_{\max} = I_p + 3.17U_p \quad (1)$$

I_p は希ガスのイオン化ポテンシャル、 U_p はレーザー電場が作るボンデロモーティブポテンシャルで、自由電子が振動場から受ける平均的な振動エネルギーを示しており、

$$U_p = \frac{e^2 E^2}{4m\omega^2} \quad (2)$$

(e : 電子の電荷量, m : 電子の質量, E : 基本波レーザー電場, ω : 基本波光子の角振動数)

$$U_p [\text{eV}] = 9.33 \times 10^{-14} \cdot I [\text{W/cm}^2] \cdot \lambda^2 [\mu\text{m}] \quad (2')$$

(I : 基本波レーザー強度, λ : 基本波波長)

である。現在、TW級の高強度レーザーを用いると 10^{16} W/cm²のレーザー強度を作り出すことができ、イオン化ポテンシャルの一番大きいHeを発生媒質として用いた場合、数百eVの軟X線が発生する。

文献¹¹⁾によると、発生媒質の吸収長 L_{abs} ($L_{\text{abs}} = 1/\sigma\rho$, σ : イオン化断面積, ρ : ガス密度) よりもコヒーレント長 L_{coh} ($L_{\text{coh}} = \pi/\Delta k$, $\Delta k = k_q - qk_0$: 位相不整合量, q : 高調波次数, k_0, k_q : それぞれ基本波, q 次高調波の波数ベクトル) が遙かに大きい系においては、相互作用長 $L_{\text{med}} = 3L_{\text{abs}}$ のとき、高次高調波の発生効率が最大になる。効率よく発生する方法として、中空ファイバを用いる方法¹²⁾や、媒質長の長いガスセルに数mの長い焦点距離で集光する方法¹³⁾が採用されている。相互作用長は、前者ではファイバ長で調整できるが、ファイバの損傷閾値により、挿入できるレーザー強度が制限される。後者では、レーザービームの焦点深度とガスセル長の整合性が重要になるが、本実験では、発生する高次高調波の強度をレーザー強度でスケールアップできる後者を採用した。また、波長61nmの領域では、非線形感受率の大きいXeを用いた。発生した高次高調波をアンジュレータへ導く輸送光学

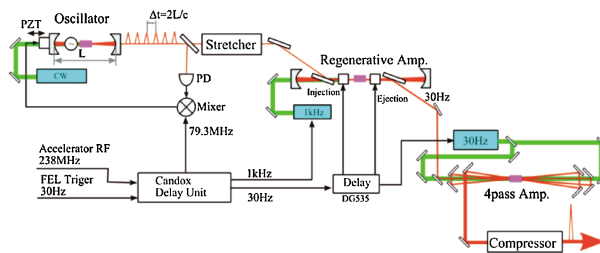


Fig. 4 Laser system for high order harmonic generation based on chirped pulse amplification. The system consists of a mode-locked oscillator synchronizing to FEL RF, stretcher, regenerative amplifier, 4-pass amplifier and compressor. The system generates 100-mJ, 150-fs pulses at 30 Hz.

系 (Fig. 3 参照) を考慮すると、ガスセル中で数 μJ 程度の高調波強度を発生する必要がある。

上記の高調波強度を実現するため、高強度Ti : sapphireレーザーシステムの開発を行った。システム構成図をFig. 4に示す。レーザーシステムは、チャープパルス増幅 (Chirped Pulse Amplification: CPA) 方式を採用しており、加速器RF同期モード同期オシレータ、ストレッチャー、再生増幅器、4パス増幅器、コンプレッサーから構成される。モード同期オシレータは、238 MHz加速器RF信号を3分周した79.3 MHzの信号に対して同期を行っている。モード同期オシレータの繰り返し周波数は共振器長で決まるため、PZT素子に取り付けた共振器ミラーを用いて周波数差を0にするようにフィードバック制御を行う。CPAでは、79.3 MHzのパルス列からFELの繰り返し周波数である30 Hzに間引いて増幅している。増幅、パルス圧縮後の出力は100 mJであり、自己相関器による測定から、パルス幅は150 fsであった。

SCSS試験加速器トンネル内にレーザーシステムからの出力パルスを通し、高次高調波発生用ガスセルに $f = 4$ mの集光レンズで集光する。ガスセルは、真空チャンバー内に設置されており、長さ50 mmのセルにレーザービーム入射、高調波出射用に直径1 mmのピンホールが空けてある。セル内のガス圧は分極の位相に関わるため、集光による空間的な位相シフトに調和するように、発生する高次高調波の強度、発散角を確認しながら調整する。発生した高次高調波のスペクトルをFig. 5(a)に示す。

発生した高次高調波は、SiCビームスプリッターで基本波から分離される。このSiCビームスプリッターは、基本波 (波長800 nm) に対してブリュースター角 (69°) で入射するよう配置されており、波長30 nm以上の極端紫外領域に対しては、約60%の反射率が得られる¹⁴⁾。その後、 $R = 8$ mの直入射Ptコート凹面ミラー対を用いてコリメート及び集光し、斜入射SiCコートミラーを経て、アンジュレータに入射している。アンジュレータ入射口での13次及び15次高調波のビーム径は横0.80 mm、縦0.53 mmであった (Fig. 5(b))。

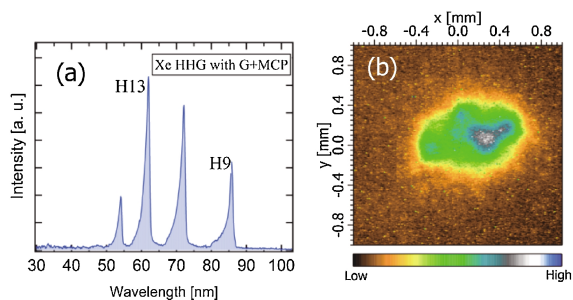


Fig. 5 (a) Spectrum of the high order harmonics. (b) Beam profile of 13th and 15th high order harmonics measured by MCP and CCD camera. These harmonics were selected by Sn.

アンジュレータを通過した高次高調波を、SCSS 試験加速器下流にある分光器とフォトダイオードで検出し、ガス強度モニタ¹⁵⁾で校正を行ったところ、約 2 nJ のパルスエネルギーであった。基本波の光強度と Xe のイオン化レートを考慮すると、高次高調波のパルス幅は 50 fs と見積もられる¹⁶⁾。Fig. 5(b) で示すビーム径から、アンジュレータ中での高次高調波強度は、約 20 kW である。

シーディングを実現する上で、電子バンチと高次高調波パルスが時間的、空間的に精度良く重なっていることが必要である。空間的な重なりを調整するため、ビームモニタをアンジュレータ 1 の入口及び出口に設置した (Fig. 3)。電子ビームの軌道に 45° に傾けた金コートミラーを挿入し、電子ビームが当たることで発生する発光 (Optical Transition Radiation: OTR) と、そこから反射される高次高調波を、蛍光スクリーン付 MCP と CCD カメラで測定する。高次高調波ビームライン Pt 凹面ミラー対に取り付けた高精度ゴニオステージより、位置 100 μm、角度 100 μrad の精度で調整が可能である。

時間的な重なりに関して、OTR と、金コートミラーから反射されるレーザー基本波パルス光を可視用ストリークカメラで同時に測定し、2 つのパルスが重なるように遅延時間の調整を行った。

Fig. 1(b) のシミュレーションから、アンジュレータ中の増幅過程において、飽和まで達した場合、SASE の成長も見られ、シーディング効果による強度の優位性が見られない。よって、飽和まで達しないようにアンジュレータ 1 のみを使用した。アンジュレータの発振波長も、高次高調波の波長とほぼ一致しなければならないため、下流の分光器で測定し、アンジュレータギャップの調整も行った。

4.2 実験結果、解析

Fig. 6 に通常の SASE 光 (a) と高次高調波をアンジュレータに入射した場合 (b) のスペクトル比較を示す。これらは、連続した各ショットのスペクトルを測定しており、50 ショットを表示している。(b) においてシーディング効果による強度の増大が見られた。(b) の赤線は、SASE 光

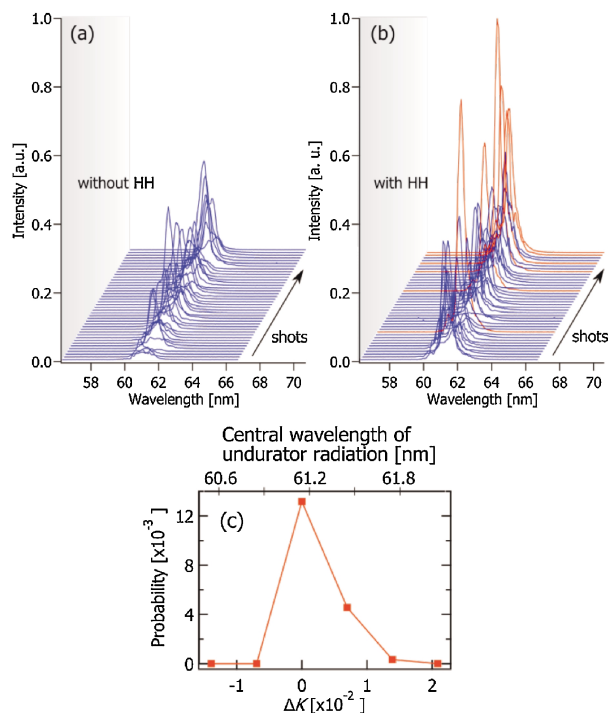


Fig. 6 Spectra of FEL radiation in fifty successive shots without (a) and with (b) HH injection. The red lines in (b) show profiles that have higher intensities above the threshold level. (c) An appearance probability of the high-intensity condition as a function of the deviation of K-value, $\Delta K = K - 1.37944$ (lower axis), and the central wavelength of the undulator radiation (upper axis).

強度の平均値に対して 3 倍以上の強度を持つスペクトルを示しており、この尖頭値の偏差は、SASE 光の強度揺らぎに対して 4σ (σ : SASE 光強度の標準偏差) に相当する。但し、電子バンチとレーザーパルスのジッターがパルス幅より 10 倍以上大きく、遅延ドリフトも見られるため、シーディング効果の出現頻度は 1% 程度であった。更に、アンジュレータのギャップを調整し、Fig. 6(c) に示すような共鳴効果を確認した。横軸にギャップから換算される K 値、及び、発生する SASE 光の中心波長、縦軸にシーディング効果の出現頻度を示している。また、シーディング効果の現れる条件では、SASE 光特有のスパイク構造は見られず、中心波長 61.2 nm の単一ピークスペクトルになっていることがわかった。Fig. 7(a) にシーディング効果を示す典型的なスペクトル (赤線) と SASE 光のスペクトル (青線)、高次高調波のスペクトル (緑線) を示す。

シーディング効果の優位なスペクトルの積分強度は、SASE 光のバックグラウンドに対し約 2 倍の増加であった。このとき、ビームライン下流ガス強度モニタで測定した SASE 光の出力は、0.7 μJ であったことから、シーディング効果により 1.3 μJ のパルス出力が得られている。また、分光器、フォトダイオード、及び、ガス強度モニタの校正により、アンジュレータ中の 13 次高調波強度は、約 2 nJ

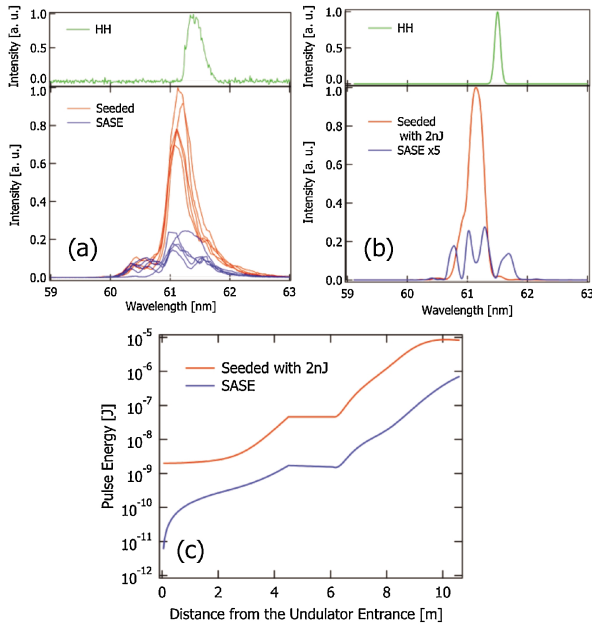


Fig. 7 Spectra of seeded (red lines) and unseeded (blue lines) conditions, as well as that of HH radiation (green line), given by experiment (a) and simulation (b). (c): Intensity growths along the undulator for seeded (red line) and unseeded (blue line) conditions.

であった。よって、高次高調波の入力に対して、650倍の増幅がアンジュレータにより得られた。

定量的な議論を進めるため、“SIMPLEX”⁸⁾による数値計算を行った (Fig. 7(b), (c))。Fig. 7(b)は、実験を行った際の電子ビーム、アンジュレータ条件で発生する SASE 光のスペクトル (青線)、及び、緑線で示す高次高調波を入射した場合でのシーディング効果 (赤線) を表している。(c)は、この条件におけるアンジュレータでの増幅過程を示している。(a)と(b)を比較すると、スペクトル形状ではよい一致をしており、実験条件を反映しているが、シーディング効果で発生する光強度がシミュレーションに比べ 1/5 程度になっている。これは、アンジュレータ中において、高次高調波のビーム形状が電子ビームに対して空間的に一致していないためであると考えられる。また、入射する高次高調波の中心波長が 61.5 nm に対し、シーディング効果で発生する光の中心波長は 61.2 nm になり、0.3 nm のシフトが見られる。これは、電子バンチの持つエネルギーチャープにより、シード光で生成される密度変調が圧縮されるためであり、シミュレーションでも再現されている。

5. 短波長化に向けた展望

SASE 方式での XFEL が完成し、現在、利用実験も開始されているが、次世代 FEL として、軟 X 線から硬 X 線を見据えたシード型 FEL の短波長化を議論する必要がある。

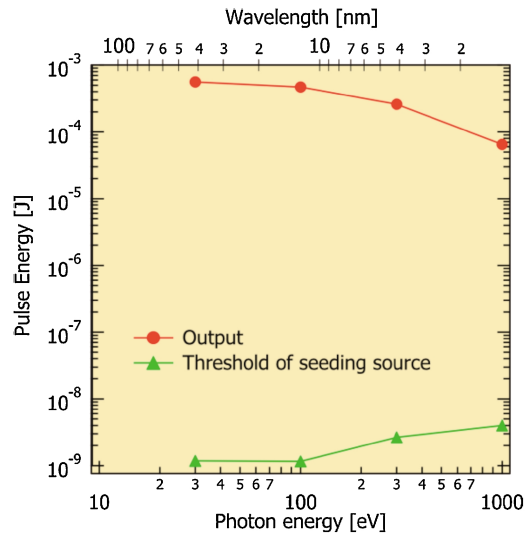


Fig. 8 The intensity threshold of the seeding source (green line) and output intensity after FEL amplification (red line), as a function of photon energy (lower axis) and wavelength (upper axis).

ある。Fig. 8 に、発振波長に対して、シード型 FEL に必要な高次高調波強度閾値と発生するシード型 FEL の強度を示す。電子バンチのエネルギー及びピーク電流は 2 GeV, 1.4 kA と、アンジュレータのパラメータを発振波長に合わせてシミュレーションを行った。これから、10 nm 以上の極端紫外領域では、数 nJ の高次高調波パルスエネルギーで十分であり、今回の実験に採用した高次高調波発生スキームで 30 nJ 以上に達成していることから¹⁷⁾、実現可能であることがわかる。しかしながら、波長数 nm の軟 X 線領域になると、2~3 倍の高次高調波パルス強度が必要になる。更に、この領域では、高次高調波発生においてカットオフ近傍に当たるため、効率が低く (~10⁻¹⁰)、sub-pJ 程度しか得られない。

最近、高橋、緑川らによって、赤外領域のレーザーシステムを用いた新しいスキームにより 2~4 nm の“水の窓”といわれる軟 X 線領域において、sub-nJ の高次高調波発生に成功した¹⁸⁾。式(2')に示すように、1~2 μm の赤外レーザーを使用することでカットオフを短波長に拡張している。このスキームを用いて、レーザーシステムを数百 mJ 程度の出力にアップグレードすることで、シーディングに必要な数 nJ の高次高調波発生が可能であると考えられる。また、極端紫外領域の高次高調波を入射し、アンジュレータ中の高調波成分を増強する High Gain Harmonic Generation (HGHC)¹⁹⁾ という手法も有効な方法として提案されている。硬 X 線領域のシード型 FEL に関しては、シード光として使用できるコヒーレント光源がないので、アンジュレータ中の高調波をアンジュレータからの X 線をフィルターなどで単色化し、シード光とする Self-seeding と、HGHC の多段組み合わせなどが検討されている。

SACLA では、2011年度に硬 X 線ビームラインと広帯域ビームラインが完成し、ユーザー利用が開始される。現在、SACLA におけるシーディングの設備構築検討を本格的に始めているところである。

6. おわりに

SCSS 試験加速器において、波長160 nm、波長61 nm のシード型 FEL の発振に成功した。これは、極端紫外領域において、世界初めてのシード型 FEL 実現であり、物理化学研究所の XFEL とエクストリームフォトンクス研究グループという2つの光科学プロジェクトを中心として、日本原子力研究機構、東京大学を始めとする日本の光科学の拠点機関が結集して行った成果である。本研究成果は、光科学分野における日本の高い技術力を示すものであり、空間、時間において光の位相が揃ったフルコヒーレントの高強度軟 X 線光源を用いた基礎科学研究のための重要な一歩になるだろう。

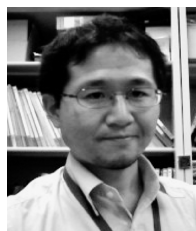
理研エクストリームフォトンクス研究グループ、高橋栄治専任研究員、緑川克美グループヘッドには、高次高調波発生について全面的なご支援をいただいた。日本原子力研究機構、青山誠研究副主幹、山川孝一研究主幹には、高強度 Ti : sapphire レーザーシステム開発において多大なご協力をいただいた。東京大学、佐藤亮洋研究員（現・理研 XFEL）、岩崎純史助教、山内薫教授には、共同で実験に参加いただき、多くのご助言、ご指導をいただいた。フランス・Synchrotron SOLEIL、Dr. M. E. Couprie らのグループには、160 nm シーディングにおいて多大なご協力をいただいた。また、理研・JASRI、XFEL 合同推進本部の皆様には多くのご支援、ご協力をいただいた。ここに厚く御礼申し上げる。

参考文献

- 1) W. Ackermann, G. Asova, V. Ayvazyan, A. Azima, N. Baboi, J. Bähr, V. Balandin, B. Beutner, A. Brandt, A. Bolzmann, R. Brinkmann, O. I. Brovko, M. Castellano, P. Castro, L. Catani, E. Chiadroni, S. Choroba, A. Cianchi, J. T. Costello, D. Cubaynes, J. Dardis, W. Decking, H. Delsim-Hashemi, A. Delseyrieys, G. Di Pirro, M. Dohlus, S. Düsterer, A. Eckhardt, H. T. Edwards, B. Faatz, J. Feldhaus, K. Flöttmann, J. Frisch, L. Fröhlich, T. Garvey, U. Gensch, Ch. Gerth, M. Görler, N. Golubeva, H.-J. Grabosch, M. Grecki, O. Grimm, K. Hacker, U. Hahn, J. H. Han, K. Honkavaara, T. Hott, M. Hüning, Y. Ivanisenko, E. Jaeschke, W. Jalmuzna, T. Jezynski, R. Kammering, V. Katalev, K. Kavanagh, E. T. Kennedy, S. Khodyachykh, K. Klose, V. Kocharyan, M. Körfer, M. Kollwe, W. Koprek, S. Korepanov, D. Kostin, M. Krassilnikov, G. Kube, M. Kuhlmann, C. L. S. Lewis, L. Lilje, T. Limberg, D. Lipka, F. Löhler, H. Luna, M. Luong, M. Martins, M. Meyer, P. Michelato, V. Miltchev, W. D. Möller, L. Monaco, W. F. O. Müller, O. Napieralski, O. Napoly, P. Nicolosi, D. Nölle, T. Nuñez, A. Oppelt, C. Pagani, R. Paparella, N. Pchalek, J. Pedregosa-Gutierrez, B. Petersen, B. Petrosyan, G. Petrosyan, L. Petrosyan, J. Pflüger, E. Plönjes, L. Poletto, K. Pozniak, E. Prat, D. Proch, P. Pucyk, P. Radcliffe, H. Redlin, K. Rehlich, M. Richter, M. Roehrs, J. Roensch, R. Romaniuk, M. Ross, J. Rossbach, V. Rybnikov, M. Sachwitz, E. L. Saldin, W. Sandner, H. Schlarb, B. Schmidt, M. Schmitz, P. Schmüser, J. R. Schneider, E. A. Schneidmiller, S. Schnepp, S. Schreiber, M. Seidel, D. Sertore, A. V. Shabunov, C. Simon, S. Simrock, E. Sombrowski, A. A. Sorokin, P. Spanknebel, R. Spesyvtsev, L. Staykov, B. Steffen, F. Stephan, F. Stulle, H. Thom, K. Tiedtke, M. Tischer, S. Toleikis, R. Treusch, D. Trines, I. Tsakov, E. Vogel, T. Weiland, H. Weise, M. Wellhöfer, M. Wendt, I. Will, A. Winter, K. Wittenburg, W. Wurth, P. Yeates, M. V. Yurkov, I. Zagorodnov and K. Zapfe: *Nat. Photonics* **1**, 336 (2007).
- 2) P. Emma, R. Akre, J. Arthur, R. Bionta, C. Bostedt, J. Bozek, A. Brachmann, P. Bucksbaum, R. Coffee, F.-J. Decker, Y. Ding, D. Dowell, S. Edstrom, A. Fisher, J. Frisch, S. Gilevich, J. Hastings, G. Hays, Ph. Hering, Z. Huang, R. Iverson, H. Loos, M. Messerschmidt, A. Miahnahri, S. Moeller, H.-D. Nuhn, G. Pile, D. Ratner, J. Rzepiela, D. Schultz, T. Smith, P. Stefan, H. Tompkins, J. Turner, J. Welch, W. White, J. Wu, G. Yocky and J. Galayda: *Nat. Photonics* **4**, 641, 647 (2010).
- 3) R. Bonifacio, C. Pellegrini and L. M. Narducci: *Opt. Commun.* **50**, 373 (1984).
- 4) K.-J. Kim: *Phys. Rev. Lett.* **57**, 1871 (1986).
- 5) G. Lambert, T. Hara, D. Garzella, T. Tanikawa, M. Labat, B. Carre, H. Kitamura, T. Shintake, M. Bougeard, S. Inoue, Y. Tanaka, P. Salieres, H. Merdji, O. Chubar, O. Gobert, K. Tahara and M.-E. Couprie: *Nat. Physics* **4**, 296 (2008).
- 6) T. Togashi, E. J. Takahashi, K. Midorikawa, M. Aoyama, K. Yamakawa, T. Sato, A. Iwasaki, S. Owada, T. Okino, K. Yamanouchi, F. Kannari, A. Yagishita, H. Nakano, M. E. Couprie, K. Fukami, T. Hatsui, T. Hara, T. Kameshima, H. Kitamura, N. Kumagai, S. Matsubara, M. Nagasono, H. Ohashi, T. Ohshima, Y. Otake, T. Shintake, K. Tamasaku, H. Tanaka, T. Tanaka, K. Togawa, H. Tomizawa, T. Watanabe, M. Yabashi and T. Ishikawa: *Opt. Exp.* **19**, 317 (2011).
- 7) T. Shintake, H. Tanaka, T. Hara, T. Tanaka, K. Togawa, M. Yabashi, Y. Otake, Y. Asano, T. Bizen, T. Fukui, S. Goto, A. Higashiya, T. Hirono, N. Hosoda, T. Inagaki, S. Inoue, M. Ishii, Y. Kim, H. Kimura, M. Kitamura, T. Kobayashi, H. Maesaka, T. Masuda, S. Matsui, T. Matsushita, X. Maréchal, M. Nagasono, H. Ohashi, T. Ohata, T. Ohshima, K. Onoe, K. Shirasawa, T. Takagi, S. Takahashi, M. Takeuchi, K. Tamasaku, R. Tanaka, Y. Tanaka, T. Tanikawa, T. Togashi, S. Wu, A. Yamashita, K. Yanagida, C. Zhang, H. Kitamura and T. Ishikawa: *Nat. Photonics* **2**, 555 (2008).
- 8) T. Tanaka: *Proc. FEL* **2004**, 70 (1994).
- 9) F. Krausz and M. Ivanov: *Rev. Mod. Phys.* **81**, 163 (2009).
- 10) P. B. Corkum: *Phys. Rev. Lett.* **71**, 1994 (1993).
- 11) E. Constant, D. Garzella, P. Breger, E. Mével, Ch. Dorrer, C. Le Blanc, F. Salin and P. Agostini: *Phys. Rev. Lett.* **82**, 1668 (1999).
- 12) A. Paul, R. A. Bartels, R. Tobey, H. Green, S. Weiman, I. P. Christov, M. M. Murnane, H. C. Kapteyn and S. Backus: *Nature* **421**, 51 (2003).
- 13) E. Takahashi, Y. Nabekawa and K. Midorikawa: *Opt. Lett.* **27**, 1920 (2002).
- 14) E. J. Takahashi, H. Hasegawa, Y. Nabekawa and K. Midorikawa: *Opt. Lett.* **29**, 507 (2004).
- 15) M. Kato, N. Saito, T. Tanaka, Y. Morishita, H. Kimura, H.

-
- Ohashi, M. Nagasono, M. Yabashi, K. Tono, T. Togashi, A. Higashiya and T. Ishikawa: Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **612**, 209 (2009).
- 16) J. L. Krause, K. J. Schafer and K. C. Kulander: Phys. Rev. A **45**, 4998 (1992).
- 17) E. J. Takahashi, Y. Nabekawa and K. Midorikawa: Appl. Phys. Lett. **84**, 4 (2004).
- 18) E. J. Takahashi, T. Kanai, K. L. Ishikawa, Y. Nabekawa and K. Midorikawa: Phys. Rev. Lett. **101**, 253901 (2008).
- 19) L.-H. Yu, M. Babzien, I. Ben-Zvi, L. F. DiMauro, A. Doyuran, W. Graves, E. Johnson, S. Krinsky, R. Malone, I. Pogorelsky, J. Skaritka, G. Rakowsky, L. Solomon, X. J. Wang, M. Woodle, V. Yakimenko, S. G. Biedron, J. N. Galayda, E. Gluskin, J. Jagger, V. Sajaev and I. Vasserman: Science **289**, 932 (2000).

● 著者紹介 ●

**富樫 格**

超高輝度光科学研究センター XFEL 研究推進室先端利用グループ 研究員

E-mail: tadashit@spring8.or.jp

専門：非線形光学，量子エレクトロニクス，光物性

【略歴】

2001年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了，博士(工学)，同年理化学研究所基礎科学特別研究員，2003年理化学研究所播磨研究所研究員，2007年理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部，2009年超高輝度光科学研究センター利用研究促進部門，理化学研究所・高輝度光科学研究センター X 線自由電子レーザー計画合同推進本部兼務，2011年4月より現職。

**矢橋牧名**

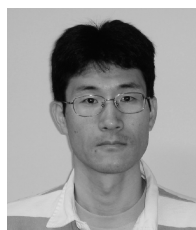
理化学研究所 播磨研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門ビームライン研究開発グループ グループディレクター

E-mail: yabashi@spring8.or.jp

専門：X 線光学

【略歴】

1996年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻，2003年博士(工学)，1996年超高輝度光科学研究センター，2007年理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部，2011年4月より現職。

**田中隆次**

理化学研究所 播磨研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門加速器研究開発グループ先端ビームチーム 専任研究員

E-mail: ztanaka@spring8.or.jp

専門：挿入光源

【略歴】

1996年京都大学大学院工学研究科博士課程原子核工学専攻修了，博士(工学)，同年財団法人高輝度光科学研究センター，1999年4月理化学研究所，2011年4月より現職。

**原 徹**

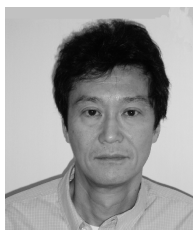
理化学研究所 播磨研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門加速器研究開発グループ先端ビームチームチームリーダー

E-mail: toru@spring-8.or.jp

専門：挿入光源

【略歴】

1995年パリ第11大学博士課程修了，理学博士，1995年理化学研究所入所後 SPring-8 挿入光源の開発に従事，2003年同先任研究員，2007年同専任研究員，2007年理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部チームリーダー，2011年4月より現職。

**田中 均**

理化学研究所 播磨研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門部門長

E-mail: tanaka@spring8.or.jp

専門：ビーム動力学

【略歴】

1982年東京工業大学総合理工学研究科化学環境工学専攻修了，1999年12月博士(原子核工学，東京工業大学)，1982年日揮株式会社 原子力事業本部，1989年理化学研究所 サイクロトロン研究室，1999年財団法人高輝度光科学研究センター 加速器部門 副主席研究員，2005年同部門 主席研究員，2006年理化学研究所 X 線自由電子レーザー計画推進本部，2010年高輝度光科学研究センター XFEL 研究推進室室長，2011年4月より現職。

**石川哲也**

理化学研究所 播磨研究所 所長

E-mail: ishikawa@spring8.or.jp

専門：X 線干渉光学

【略歴】

1982年東京大学大学院工学系研究科物理工学専攻博士課程修了，工学博士。同年，日本学術振興会特定分野(光子物理学)奨励研究員，1983年高エネルギー物理学研究所放射光実験施設測定器研究系助手，1989年東京大学工学部物理工学科助教授，1995年理化学研究所マイクロ波物理学研究室主任研究員，1997年理化学研究所播磨研究所 X 線干渉光学研究室主任研究員，2005年理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター・副センター長兼務，2006年同センター長，2003年から SPIE Fellow，2010年4月より現職。

Seeded free electron laser by high order harmonics

Tadashi TOGASHI¹, Makina YABASHI^{1,2}, Takashi TANAKA^{1,2},
Toru HARA², Hitoshi TANAKA², Tetsuya ISHIKAWA²

¹JASRI, Sayo, Hyogo 679-5198 Japan

²RIKEN SPring-8 Center, Sayo, Hyogo 679-5148 Japan

Abstract We succeeded in generating the seeded free electron laser (FEL) with wavelengths of 160 nm and 61 nm at the SCSS test accelerator. The 5th (160 nm) and 13th (61 nm) harmonics generated by focusing the high peak power Ti : sapphire laser to the Xe gas cell was directed to the undulator. This is first realization of the seeded FEL in extreme ultraviolet region.
