

シリーズ

## 短波長自由電子レーザーによる原子分子光物理 第一回 極紫外自由電子レーザーの原理と利用研究

永園充\*, 田中隆次, 矢橋牧名, 田中均, 石川哲也

理化学研究所 播磨研究所

\* nagasono@spring8.or.jp

平成 23 年 9 月 27 日原稿受付

SCSS 試験加速器が発生する極紫外 (EUV) 領域の自己増幅自発放射型の自由電子レーザー (SASE-FEL) の利用に関する情報提供を目的として, SASE-FEL の原理と光特性, および共用基盤設備について解説する. 共用基盤設備は使用頻度の高いガスアッテネータ, ガスモニター, 集光システム, 同期レーザーシステムについて述べる. また, SCSS 利用研究の 1 例として, EUV-FEL 照射によって, 量子光学効果の 1 つである超蛍光現象が観測されたことについて紹介する. この研究成果は, X 線自由電子レーザー照射による X 線超蛍光の発生を示唆するものである.

### 1. はじめに

真空紫外よりも短波長領域の高強度な実用光源として, シンクロトロン放射光 (以下, 放射光) が広く用いられている. 放射光の利用実験は, 当初, 高エネルギー実験用加速器に寄生する形で始まり (第一世代放射光), その有用性が認知されるのに伴い, 放射光利用実験専用の蓄積リング型加速器が建設されるに至った (第二世代). その後, さらに一層の高輝度化を目指して, 挿入光源 (アンジュレーター: 周期磁場発生装置) 利用に最適化された第三世代放射光源が建設され, 広く普及している. 第一世代では, 各種分光実験技術の開発とそれを用いた物理・化学の基礎研究が主流であったが, 世代が進む (高輝度化) とともに利用分野も広がり, 生物科学や材料科学などを中心に様々な分野で利用され, 数多くの成果が上がっていることは周知の通りである. しかしながら, 第三世代放射光源も, 輝度は高いものの所詮カオス光源である. レーザーのようにコヒーレンス度が高い光や, 第三世代放射光源よりも更に高輝度で, なおかつ短パルス性も有する, いわゆる第四世代光源の開発を目指す動きは, 1990 年代から 2000 年代にかけて大きく進展した.

自由電子レーザー (Free Electron Laser: FEL) は, 波長の制約がないコヒーレント光源とし

て 1970 年代に提案された [1]. その発生原理は, アンジュレーター内における光と電子ビームの相互作用により, 電子を光の波長間隔に整列させ, 整列した電子がコヒーレントに運動することによって, コヒーレントな電磁波を放射するというものである. 当初は, アンジュレーターの両側に高反射率ミラーを設置して共振器を構成する, 光共振器型の自由電子レーザーが実用化され, 赤外から紫外領域で応用された. しかしながら, より短波長の領域には高反射率ミラーがないという技術的問題があった. その問題解決方法として, 共振器に代えて長いアンジュレーターを利用する自己増幅自発放射 (Self-Amplified Spontaneous Emission: SASE) 型自由電子レーザー (2 章参照) が 1980 年代に提案された [2,3].

SASE-FEL の提案により短波長領域への制約がなくなったことで, 第四世代光源の一つの可能性として, X 線自由電子レーザー (XFEL) の検討が 1990 年代から進められ, 2000 年代より日米欧において建設が開始された. 米国では, スタンフォード国立加速器研究所にて LCLS (Linac Coherent Light Source) と呼ばれる XFEL 施設が建設され, 2009 年春に世界で最初の硬 X 線 (波長  $1.5\text{\AA}$ ) の FEL 発振に成功した. 2009 年秋からはユーザー利用が開始された. ヨーロッパで

は、ドイツのハンブルクにて **European XFEL** 施設が2015年の利用開始を目指して建設が進められている。日本では、2006年からの5ヵ年計画で理化学研究所と高輝度光科学研究センターにより組織された XFEL 計画合同推進本部にて XFEL 施設が建設され、2011年6月に X 線(波長  $1.2\text{\AA}$ )の増幅に成功した。現在、2011年度内の供用開始に向けて調整運転が行われている。この XFEL 施設は、**SACLA (Spring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser)**と名付けられた。ごく最近、韓国、スイスにおいても、XFEL 施設の建設計画がスタートしており、他の国でも続々と計画が検討されているようである。

日本とドイツでは、XFEL 施設の建設に先立つプロトタイプとして、極紫外 (**Extreme Ultraviolet: EUV**) 領域の自由電子レーザー施設が建設され、現在もユーザー利用実験が展開されている。

ドイツでは、ドイツ電子シンクロトロン研究施設、**DESY** で当時進められていた **TESLA (TeV Energy Superconducting Linear Accelerator)** 計画の中で超電導加速空洞の試験施設 **TTF (Tesla Test Facility)** が建設され、**SASE-FEL** の基礎研究が行われた。TTF 施設では、2000年に波長  $109\text{ nm}$  の **SASE-FEL** が発振し[4]、最初の **SASE-FEL** 利用実験も行われた[5]。その後、DESY が高エネルギー物理から光科学へと研究の重心を移す中で、TTF の技術をベースに EUV から軟 X 線領域の **SASE-FEL** 利用実験施設、**FLASH (Free-Electron Laser in Hamburg)** を建設し、2005年8月からユーザー利用が始まった。現在(2011年10月)、 $1.25\text{ GeV}$  の電子ビームで波長  $4.12\text{ nm}$  までの利用が可能である。

日本では、2001年にコンパクトな XFEL 光源を目指した開発研究 **SCSS (Spring-8 Compact SASE Source)** プロジェクトが策定され、その原理実証のため、2005年に **SCSS** 試験加速器が建設された。2006年には波長  $49\text{ nm}$  のレーザー増幅を観測し、2007年に波長  $51\sim 61\text{ nm}$  の真空紫外領域の **SASE-FEL** の発振と出力飽和を達成し

た[6]。並行して、加速器運転の安定化を目指した加速器コンポーネントの改良が行われた[7]。さらに次世代 FEL であるシード FEL の研究も進められている [8]。一方、**SCSS** 試験加速器の利用研究は、XFEL の利用機器の基盤開発としての役割と、各方面から寄せられた EUV 領域における新たなサイエンス開拓への期待を受け、2007年度より利用研究のためのビームライン整備が進められ、2008年度からユーザー利用が開始された。

本稿は、**SCSS** 試験加速器からの **EUUV-FEL** 利用に関する情報提供を目的とする。まず、**SASE-FEL** の発生原理、及び **EUUV-FEL** の光特性について、第2章及び第3章に述べる。第4章では利用基盤設備について紹介し、第5章では利用の概要を記す。最後に利用研究の一例として、“**EUUV-FEL** 励起による超蛍光の観測”[9]について第6章に紹介する。なお、XFEL 施設 **SACLA** に関しては、紙面の都合上紹介しない。興味がある方は、理研のホームページ等を参照していただきたい[10]。

## 2. SASE 型 FEL の原理

一般的に **FEL** は、光を閉じこめる光共振器と光を増幅する媒質という、従来型レーザーと同様の構成をとる。ただし、高エネルギーかつ高密度の電子ビームと、アンジュレータと呼ばれる周期磁場発生装置が増幅媒質の役割を果たす。原理的には波長を自由に選択でき、かつ光を吸収する媒質が必要でないことから、短波長レーザーの実現を目指した **R&D** が進められてきた。しかし、 $100\text{ nm}$  以下の波長領域で十分な反射率を有する実用的なミラーがなく、これが「従来型」**FEL** の実質的な短波長限界を決めてきた。**SASE** 型 **FEL** はこの限界を打ち破るために提案された方式であって、光共振器で光を閉じ込めて媒質との相互作用の距離を稼ぐのではなく、媒質自体(即ちアンジュレータ)を長くすることによって高いレーザー利得を得るという概念に基づいている。

**FEL** の原理を理解するにはコヒーレント光の概念が重要であるので、図1を用いて簡単に説明す

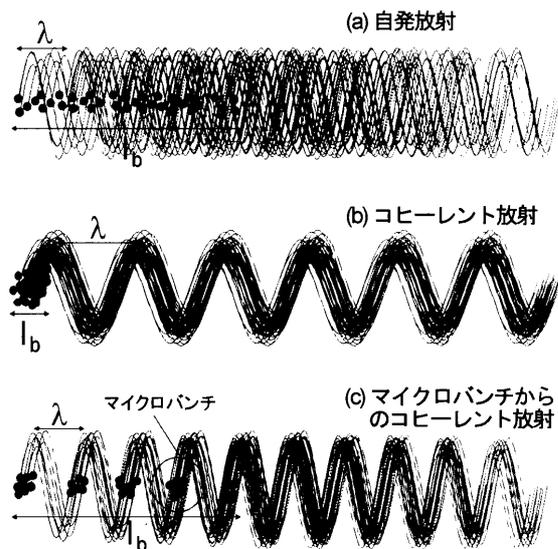


図 1. 自発放射とコヒーレント放射

る。青丸が電子ビームを形成する個々の電子，赤線が各電子から放出される光，即ち電磁波を示す。(a)のように電子ビームの長さ  $l_b$  が放出される光の波長  $\lambda$  よりも長い場合，個々の光の位相には相関がなく，電子ビームから放出される光の強度は単一電子からのその電子数 ( $N$ ) 倍である。一方，(b)のように  $l_b$  が  $\lambda$  よりも短い場合は殆どの光の位相が一致し，電磁波の振幅として  $N$  倍，光の強度としては  $N^2$  倍となる。一般的に (a) を自発放射，(b) をコヒーレント放射と呼ぶ。コヒーレント放射が起こるためには， $l_b$  が  $\lambda$  よりも短いことが必要であるが，一つだけ例外がある。即ち，(c)のように，電子の塊が光の波長と同じピッチで規則正しく並んでいる場合，言い換えると電子密度が  $\lambda$  の周期で変調されている場合である。これをマイクロバンチと呼ぶ。マイクロバンチが形成された電子ビームからは，(b)と同様に波長  $\lambda$  において光の位相が整合し，やはりコヒーレント放射が起こる。FEL とはこのように，マイクロバンチが形成された電子ビームから放出されるコヒーレント放射であると言い換えることができる。

マイクロバンチは次の3つの過程を経て形成される。

- ① 電子ビームと同期した光(シード光)がアンジュレータに入射される。
- ② 光との相互作用により，波長と同じ周期でのエネルギー変調が電子ビームに誘起される。

- ③ アンジュレータを進むにつれて，エネルギー変調が密度変調(マイクロバンチ)へと変換される。

SASE 型 FEL におけるシード光は，アンジュレータ入口付近において生成された自発放射光であるが，これは電子ビームに不可避免的に存在するショットノイズ(分布のばらつき)に起因するものであり，空間的にも時間的にもインコヒーレントな光である。電子ビームがアンジュレータを進む増幅過程で空間コヒーレンス(空間的に異なった光の可干渉性)は劇的に改善し，いわゆるレーザー出力飽和に至った時点でほぼ 100%となる。即ち，回折限界光(集光サイズが波長程度まで可能な光)に近づく。一方，出力飽和状態でも時間コヒーレンス(光進行方向の可干渉性)は 100%まで改善されることはなく，光パルスの時間構造やスペクトルは多数のスパイク(モード)から構成される。

SASE 型 FEL のこの欠点を改善する手法として期待されているのがシーディングである。即ち，ショットノイズを起源とする自発光の代わりに，コヒーレンスの高い単一モードレーザをシード光として電子ビームに同期して入射する。この場合，増幅される光の特性は保存されるため，単一モードの大強度レーザが得られることになる。ただし，入射するレーザーパワーがある閾値(自発光のパワーに依存)より低い場合は，レーザーではなく自発放射がシード光として機能するため，SASE 型 FEL へ帰着する。

### 3. SCSS 試験加速器 EUV-FEL の光特性

SCSS 試験加速器は，電子ビームエネルギー 250 MeV の線形加速器と周期長 15mm の短周期真空封止アンジュレータを組み合わせで構成された SASE 型 FEL である。表 1 に SCSS 試験

表 1. SCSS 試験加速器 EUV-FEL の光特性

Radiation wavelength at saturation condition	51 ~ 61 nm
Spectral width (FWHM)	1 %
Pulse energy average	~ 30 $\mu$ J/pls
Intensity fluctuation	< 10 %
Pulse duration (FWHM)	~ 100 fs
Polarization	Horizontally linear
Repetition rate	30 Hz

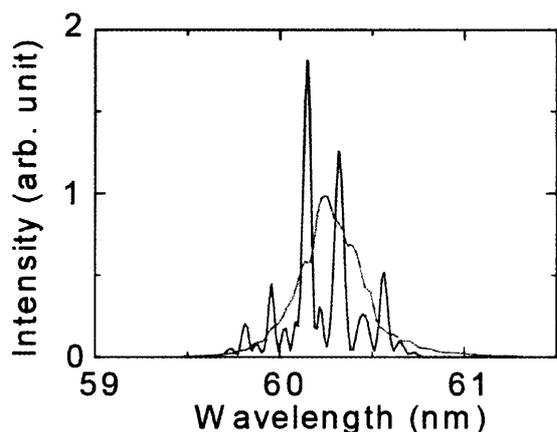


図2. EUV-FEL のスペクトル

青線: シングルショット, 赤線: 50 ショット平均

加速器からの SASE-FEL の光特性を示す。基本波の波長領域は 51~61nm の EUV 領域である。中心波長 60 nm の極紫外自由電子レーザー (EUV-FEL) 光のスペクトルを図 2 に示す。青線はシングルショット, 赤線は 50 ショットの平均スペクトルである。EUV-FEL 光は, 設定波長を中心に異なったスペクトラムの光を発振し, スペクトル幅の平均は約 1% (FWHM) である。スパイク状のスペクトル構造は, SASE-FEL が原理的に時間方向に多モードで発振されているからである。

#### 4. 共用基盤設備

共用基盤設備は, EUV-FEL 光の利用実験を効率良く遂行するために整備された機器システムであり, ビームライン, 同期フェムト秒レーザーシステム, 共用実験装置などである。また, ここで開発された基盤機器の一部は SACLA の基盤機器として応用されている。本章ではビームラインと同期フェムト秒レーザーシステムについて紹介する。

##### 4.1. ビームライン

ビームラインは, SCSS 試験加速器で発生した EUV-FEL 光を実験目的に応じて加工しながら実験ステーションまで輸送するシステムであり, 加速器収納部から EUV レーザー実験棟までつながっている。加速器収納部内のビームラインは, 輸送系ビームラインと光診断システムがある。輸送系ビームラインは, 2 枚の平面ミラー (M1, M2) により EUV レーザー実験棟 (9 m × 14 m) へ FEL 光を導く。光診断システムには, 上流側ミラー (M1) の

退避により FEL 光が導かれ, パルスエネルギーとスペクトルが測定される [11]。EUV レーザー実験棟内のビームラインは, ビームライン基盤機器としてアッテネーター (ガス・固体), パルスセレクター [12], 4象限スリット, ガスモニター, 分岐チャンパー, 集光システム [13], 光プロファイルモニターなどが整備されている (図 3 参照)。ここでは, 使用頻度の高い 3 つのビームライン基盤機器 (ガスアッテネータ, ガスモニター, 集光システム) を紹介する。

ガスアッテネータは, 光強度 (パルスエネルギー) を広範囲に制御するために用いられる。EUV-FEL 光と物質の相互作用による非線形光学現象の研究において, 観測対象となる信号の光強度依存性測定はもっとも重要な実験であり, ガスアッテネータが使用されている。ガスアッテネータシステムは, ビームラインに差動排気装置 2 つを 1.2 m の離して設置することで真空障壁なしのガスセルを構築し, そのガスセルに圧力制御可能なガス導入バルブを介して Ar ガスを導入でき, ガス圧を変えることにより FEL 光の透過率を制御する。EUV-FEL 光の基本波の透過率が 100 % ~ 1 % 程度まで制御可能である。透過率が 1 % より小さい領域では, 透過 FEL 光の主成分は 3 次高調波となる。これは, 基本波の光エネルギーが Ar のイオン化ポテンシャル付近にあり, 高調波成分に比べて光吸収断面積が非常に大きいことに起因している。つまり, ガスアッテネータは, 高調波成分を通すハイパスフィルターとしても機能する。

ガスモニターは, ショット毎の光強度 (パルスエネルギー) を非破壊計測する基盤機器である。EUV-FEL 光は, ショット毎に光強度は 10% 程度の変動幅があり, 非線形光学現象などの光強度に敏感な実験ではショット毎のデータが必須である。このために, FEL 光の 1% 程度だけを利用して光強度を計測し, ほとんどの光をビームライン下流側へ供給可能なガスモニターが開発された。ガスモニターシステムは, ガスアッテネータと同様に 2 つの差動排気装置を用いた真空障壁なしのガスセルに Ar ガスを  $10^{-2}$  Pa 導入し, FEL 光照射

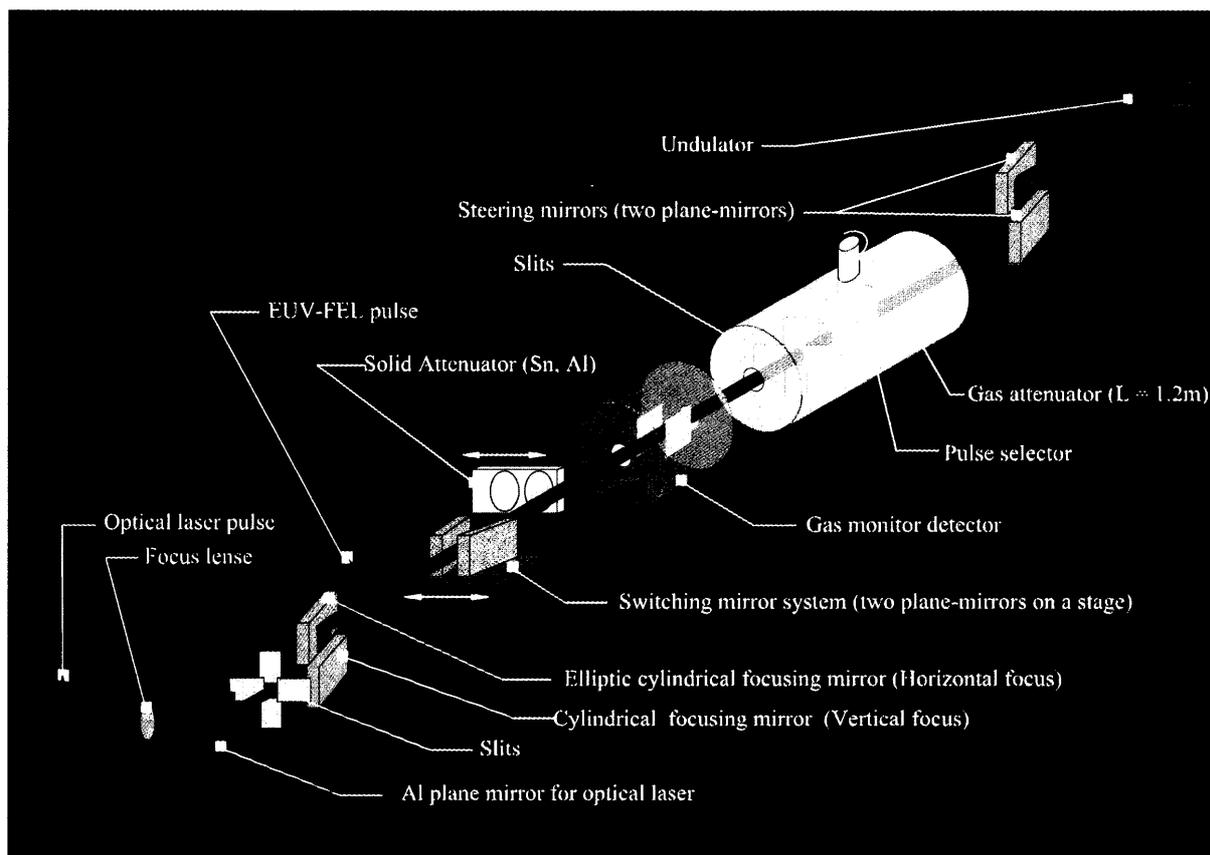


図 3. EUV-FEL ビームラインの概略図

により生成した Ar イオンを電極で捕集し、検出信号をプリアンプで増幅、A/D コンバータを経てデータ収集系に送り、ショット毎に記録する。記録された値からパルスエネルギーへの較正は、産総研のカロリメータ、ドイツの PTB/DESY のガスモニターを用いて行われた[13]。

集光システムは、FEL 光を集光することにより非常に高い光電場を生成し、FEL 光による非線形光学現象や光誘起反応などの観測実験に使用される。EUV-FEL ビームラインに整備された集光システムは、FEL を2枚のミラーによりそれぞれ水平及び垂直方向に集光する[x1]。ミラー中心から焦点(試料位置)までの距離を 1m と長くし、また水平面内で出射にすることで、多様な実験に対応できるようにした。集光サイズは  $10 \mu\text{m}$  程度 (FWHM) である。集光システムの透過率(ミラー2枚の反射率)は 56%であった。パルスエネルギー  $10 \mu\text{J}$  の EUV-FEL 光を集光した場合、そのピーク強度は  $100 \text{ TW/cm}^2$  を超える。

#### 4.2. 同期フェムト秒レーザーシステム

EUV-FEL の短パルス性を生かした利用実験として、フェムト秒レーザーパルスと組み合わせたポンプ・プローブ法による時間分解計測が期待されている。ポンプ・プローブ法は、強力なポンプ光により変化(励起)した状態を、プローブ光の遅延時間を変化させて観測することで、光励起過程におけるダイナミクスを計測する方法であり、レーザーパルスをポンプ光、FEL からの EUV 光をプローブ光とし、光電子分光法や、吸収分光法などで、光励起状態の電子、原子、構造の情報を得ることができる。

EUV レーザー実験棟内に設置された光学レーザー用のクリーンブース内にチタンサファイアレーザーをベースとしたフェムト秒レーザーシステムが収容されている。このシステムは、モード同期オシレータと増幅器から構成されている。モード同期オシレータは、100 fs 以下のパルス列を 79.3 MHz で発生する。共振器長を制御することで、加速器のタイミング基準 RF 信号に対し同期をとって

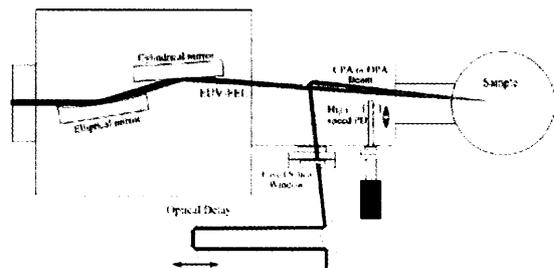


図4. 同期レーザー導入システム

いる。増幅器で、電子バンチのタイミングに同期した1パルスを切り出し、数mJまで増幅する。増幅中の損傷を防ぐため、波長ごとに遅延を加えパルス幅を伸ばし、増幅後にパルス圧縮を行うチャープパルス増幅法を用いている。発生するレーザーの波長は800 nmである。また、光パラメトリック増幅器(OPA)を用いることで近赤外～紫外領域のレーザー光を供給することも可能である。

同期レーザー光は、光学遅延器を経てEUV-FEL ビームラインに導きかれ、集光システム下流に設けた同期レーザー導入用ミラーを用いて、FEL 光に対し約 $2^\circ$ の角度で照射される(図4)。同期レーザー光とFEL 光の照射タイミングは、電気的な位相遅延器と光学遅延器を用いることでそれぞれ1 ps, 7 fsの精度で調整できる。

## 5. 利用の概要

EUV-FEL 利用の目的は、既述したようにXFEL 施設 SACLA の利用のため実験技術の研究開発と EUV 領域の新しいサイエンスの開拓である。SCSS 試験加速器施設の基盤整備として開発されたパルスセレクターや同期フェムト秒レーザー、利用推進研究で進められたコヒーレント散乱イメージング[15]などの成果は、SACLA の基盤整備に活かされている。一方 EUV 領域のサイエンスでは、EUV-FEL の光子エネルギーが、ヘリウム以外の全元素のイオン化領域であり、従来の光学レーザーで観測されてきた多光子吸収などの非線形光学現象の過程とはまったく異なった物理過程が生じることが期待され、新しい分野を拓く可能性は十分にある。

利用研究は、2008 年度に開始され、公募により年3回(1期:4月～7月, 2期:9月～12月, 3

期:1月～3月)のペースで行われている。これまでの3年半(2008年度第1期～2011年度第1期)で申請課題数は111件あり、国内研究グループに加えて、海外の国々(ドイツ, フランス, イタリアなど)の研究グループからの申請も含まれている。研究分野は、原子・分子科学分野, 固体光物性科学分野, イメージング分野など幅広い。とくに原子・分子科学分野からの申請課題数は、全申請課題数の半分以上を占めている。

これまでの SCSS 試験加速器の利用開始から3年間での成果として、論文発表が30件ある[9,14-25]。成果内容としては、FEL 光の高強度と短パルス性を活かした非線形光学現象の観測実験が多くを占めている。これら利用成果の1つとして、“EUV-FEL 励起による超蛍光の観測”[9]を後述する。

課題申請は、利用期間に合わせて年3回行われ、申請書を web よりダウンロード、必要事項を記載。メールで受け付けている。申請された課題は、課題審査を受け、採択された場合に実施可能となる。利用に関心のある方は、是非ご連絡いただきたい[10]。

## 6. EUV-FEL 励起による超蛍光の観測

超蛍光とは、量子光学現象の1つであり、励起原子が蛍光を放出して脱励起する際に、“原子集団”として振る舞う現象である[26]。通常、孤立した一つの励起原子からの自発放射(蛍光)が多数の原子から独立に起こる場合、その強度は励起状態の寿命に特徴付けられる指数関数的な減衰曲線を描く。一方、超蛍光の場合には、ある遅延時間の後に発光強度は最大となり、励起寿命よりも遙かに短い時間幅を有するパルス形状の強度曲線となる。ここで、遅延時間と時間幅は、集団で脱励起する励起原子数  $N$  の逆数に比例し、超蛍光のピーク強度は  $N$  の二乗に比例する。

超蛍光の観測実験は、He 原子を試料として行われた[9]。1s1s→1s3p 共鳴励起相当の EUV-FEL 光を高濃度の He 原子に照射し、その 1s3p→1s2s 脱励起過程にともなう蛍光(波長=501nm)の時間発展をガス濃度の関数としてストリ

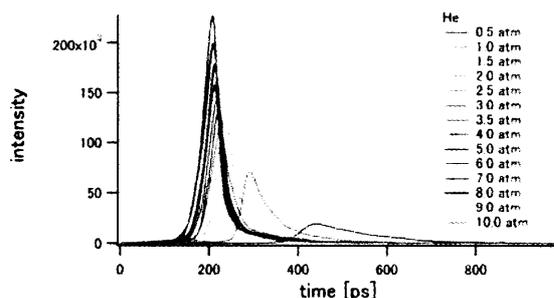


図 5. 超蛍光のストリーク像の試料濃度依存性

ークカメラ(極めて短時間に生じる高速な光の強度変化を計測する超高速光検出器)により計測した。図 5 にストリーク像の He ガス濃度依存性を示す。He 原子濃度が高くなるに従い、遅延時間が短くなり、パルス幅も狭くなっている様子が明確に見て取れる。観測結果の詳細な解析により、EUV-FEL 光により励起された He 原子が、原子集団として蛍光を放出する、超蛍光現象が起きていることが確認された。なお、半導体検出器による強度測定から、入射 EUV-FEL 光強度に対する超蛍光の変換効率は約 10 %と見積もられた。超蛍光の観測は、FEL の利用研究としては現時点までで唯一のものである。EUV 励起による超蛍光は、今回のような可視発光のみならず、 $1s3p \rightarrow 1s1s$  脱励起による EUV 発光においても同様の振る舞いが観測されている。超蛍光は、特殊な環境下で起こる集団的発光現象であり、条件さえ整えば、XFEL 励起による X 線超蛍光の観測も可能であると考えられる。SACLA の利用により、研究が大きく進展することが期待される。

## 7. おわりに

本稿では、SASE 型 FEL の原理と SCSS 試験加速器施設の EUV-FEL の利用に関して簡単に報告した。EUV-FEL の利用は、XFEL 施設 SACLA の利用機器の開発研究と EUV 領域の新しいサイエンスの開拓を目的に行われた。利用開始から3年経過して、機器開発では、SACLA のビームラインだけでなくユーザー実験装置などにも EUV-FEL の利用実験での経験が活かされているものが少なくない。一方、EUV-FEL のサイエンスにおいても、非線形光学現象を中心にいく

つもの新しい発見があり、新しい分野が展開されていることがわかる。

XFEL 施設 SACLA の利用はすぐそこまできている。新しいサイエンスの扉が今開こうとしている。

## 謝辞

本稿の執筆にあたって、理化学研究所播磨研究所 XFEL 研究開発部門より資料を提供していただいた。SCSS 試験加速器の運転と保守およびビームライン整備は、理化学研究所播磨研究所 XFEL 研究開発部門エンジニアリングチームの協力を受けている。EUV-FEL 励起による超蛍光の観測実験は、James Harries 博士(原子力研究機構)、繁政英治准教授、岩山洋士助教(分子研)、登野健介博士、富樫格博士、大橋治彦博士、仙波泰徳博士(JASRI)との共同研究によるものである。ここに感謝の意を表する。

## 参考文献

- [1] J.M.J. Madey, *J. Appl. Phys.* **42**, 1906 (1971).
- [2] R. Bonifacio, C. Pellegrini, and L.M. Narducci, *Optics Commun.* **50**, 373 (1984).
- [3] K-J. Kim, *Nucl. Instrum. Methods A* **250**, 396 (1986).
- [4] J. Andruskow *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **85**, 3825 (2000).
- [5] H. Wabnitz *et al.*, *Nature* **420**, 482 (2002).
- [6] T. Shintake *et al.*, *Nature Photonics* **2**, 555 (2008).
- [7] T. Shintake *et al.*, *Phys. Rev. Spec. Top. Accel. Beams* **12**, 070701 (2009).
- [8] T. Togashi *et al.*, *Opt. Express* **19**, 317 (2009).
- [9] M. Nagasono *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **107**, 193603 (2011).
- [10] <http://xfel.riken.jp>
- [11] M. Yabashi *et al.*, *Proceedings of FEL 2006*, 785 (2007).
- [12] T. Kudo *et al.*, *Rev. Sci. Instrum.* **80**,

093301 (2009).

[13] H. Ohashi *et al.*, Nucl. Instrum. Meth. A **649**,163 (2011).

[14] N. Saito *et al.*, Metrologia **47**, 21 (2010); M. Kato *et al.*, Metrologia **47**, 518 (2010); M. Kato *et al.*, Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **612**, 209 (2009).

[15] Y. Nishino *et al.*, Appl. Phys. Express **3**, 102701 (2010).

[16] Y. Hikosaka *et al.*, Phys. Rev. Lett. **105**, 133001 (2010).

[17] T. Sato *et al.*, Appl. Phys. Lett. **92**, 154103 (2008); T. Sato *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 161001 (2011).

[18] N. Miyauchi *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **44**, 071001 (2011).

[19] H. Fukuzawa *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **43**, 111001 (2010); A. Yamada *et al.*, J. Chem. Phys. **132**, 204305 (2010); K. Motomura *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **42**, 221003 (2009); H. Fukuzawa *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **42**, 181001 (2009); H. Fukuzawa *et al.*, Phys. Rev. A **79**, 031201 (2009); K. Motomura *et al.*, Nucl. Instrum. Method A **606**, 770 (2009); X.-J. Liu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **80**, 053105 (2009).

[20] M. Yao *et al.*, Euro Phys J. Special Topics, **196**, 175 (2011); H. Iwayama *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **43**, 161001 (2010); K. Ngaya *et al.*, J. Electr. Spectrosc. Relat. Phenom **181**, 125 (2010); H. Iwayama *et al.*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **42**, 134019 (2009).

[21] S. Y. Liu *et al.*, Phys. Rev. A **81**, 031403 (2010).

[22] Y. Inubushi *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **81**, 036101 (2010); H. Yoneda *et al.*, Opt. Express **17**, 23443 (2009).

[23] N. A. Inogamov *et al.*, J. Opt. Tech. **78**, 473 (2011); N. A. Inogamov *et al.*, Contrib.

Plasma. Phys. **51**, 419 (2011).

[24] T. Shimizu *et al.*, Appl. Phys. Express **4**, 062701 (2011); K. Yamanoi *et al.*, Opt. Mater. **32**, 1305 (2010); T. Shimizu *et al.*, Rev. Sci. Instrum. **79**, 033102 (2010).

[25] R. Bachelard *et al.*, Phys. Rev. Lett. **106**, 234801 (2011).

[26] R. H. Dicke, Phys. Rev. **93**, 99(1954); J. Okada *et al.*, Opt. Communications **27**, 321-323 (1978); R. G. Devoe and R. G. Brewer, Phys. Rev. Lett. **76**, 2049 (2011); E. Pradis *et al.*, Phys. Rev. A **77**, 043419 (2008)

**Principles of SASE-FEL and the present status of the EUV-FEL beamline at the SCSS test facility.**

**Mitsuru Nagaosno, Takashi Tanaka, Makina Yabashi, Hitoshi Tanaka, Tetsuya Ishikawa**

The SCSS test facility is described for the benefit of present and future users. The facility provides coherent, brilliant, ultra-short pulses in the extreme ultra-violet spectral region, and is based on a self-amplified spontaneous emission free-electron laser scheme. An introduction is given to the common utilities available at the beamline, including the gas absorption attenuator, the gas ionization photo intensity monitor, the focusing mirror system, and the synchronized fs-laser system. As an example of recent research at the facility, the observation of collective spontaneous emission (superfluorescence) is described. This work hints at a method for creating monochromatic, coherent x-ray radiation pulses using an x-ray SASE-FEL.