

# 新竹電子ビーム光学研究室

## Advanced Electron Beam Physics Laboratory

主任研究員 新竹 積  
SHINTAKE, Tsumoru

播磨研究所において計画されている X 線自由電子レーザー（波長 1 Å 硬 X 線、電子エネルギー 8 GeV、以下 XFEL と呼ぶ）の技術開発と試験加速器の建設を担当している。X 線領域において XFEL を動作させるには、反射ミラーを用いない自己増幅型自由電子レーザー（SASE）方式が最適と考えられているが、技術的に極めて高品質の電子ビームを、安定に加速し、長さ数十メートルに及ぶアンジュレータの中を精度良く通過させる必要がある。当研究室では、低エミッタンス電子源、C バンド高電界加速器、高精度ビーム位置制御技術などの技術開発を行っている。電子エネルギー 250 MeV の SCSS 試験加速器を中心になって建設している。

**1. SCSS 試験加速器の建設**（新竹、大竹、稲垣、渡川、馬場 \*1、尾上 \*2、松本 \*3、小嶋 \*4、北村、加瀬 \*2、芦屋 \*4）

本格的な X 線自由電子レーザーを実現するために現在まで行ってきた技術開発の成果を取りまとめ、総合試験、性能評価、技術的問題点の洗い出しを行うため、実機の 20 分の 1 スケールの試験加速器を建設している。電子ビームの最高エネルギーは 250 MeV と実機の 32 分の 1 であるが、(1) 低エミッタンス電子源、(2) C バンド加速器、(3) シュケイン磁場型バンチ圧縮器、(4) 真空封止アンジュレータ、(5) 高精度ビーム位置モニターと位置フィードバック系、(6) 波長 60 nm の軟 X 線評価利用システム、(7) 制御システム、(8) 放射線シールドトンネル、(9) 高精度冷却水システムなどすべて、実機に必要な要素をそなえている。なお、この試験加速器の建設は、播磨研究所の石川 X 線干渉光学研究室、北村 X 線超放射研究室との共同チームにて実施しており、2005 年 11 月末の試験運転を目指し、一丸となって建設に当たっている。また、高輝度光科学研究センター（JASRI）からの応援も大きな力となっており、今後のさらなる共同体制が本格的 X 線 FEL の実現に大変に重要である。

**2. 低エミッタンス電子銃と入射器の開発研究**（新竹、大竹、稲垣、渡川、馬場 \*1、尾上 \*2、松本 \*3、小嶋 \*4、北村、加瀬 \*2、芦屋 \*4）

このテーマに関しては、電子銃単体では昨年度までに目標の成果を達成しており、本年度は入射器システムを構成する要素機器の開発を行った。X 線 FEL には、規格化エミッタンスにして  $1\pi$ .mm.mrad という、従来の加速器で実現されていたエミッタンスの 10 分の 1 という、極めて高品質の電子ビームが要求される。エミッタンスを小さくする目的から直径 3 mm という小面積の CeB6 単結晶を熱カソード材料に採用し 40 A/cm<sup>2</sup> 程度の高電流密度で電子を発生させ、さらに空間電荷によるエミッタンス増大を抑えるため、500 kV というきわめて高い電圧で、電子を一気に加速する方式とした。昨年度までに電子銃 1 号機を開発し、平成 15 年 12 月より運転を開始した。その結果、ビームエミッタンス  $1.1\pi$ .mm.mrad (at 1 Amp., 500 kV) ときわめて優れた性能が得られた。

本年度は電子銃の下流に設置する、ビームデフレクター、プレバンチャー空洞、ブースター空洞、S バンド APS 空洞、S バンド加速管、またこれらを駆動する高周波電源、パルスモジュレータ、インバータ電源、制御機器、制御ソフト、トリガーシステムなどの機器につき、基本設計、各担当メーカーとの詳細設計、製造、評価を行っている。

**3. C バンド高電界加速器の要素開発**（新竹、大竹、稲垣、渡川、馬場 \*1、尾上 \*2、松本 \*3、小嶋 \*4、北村、加瀬 \*2、芦屋 \*4）

X 線 FEL では、できるだけ装置の全長を短くする目的から、C バンド周波数の高電界加速器を設計に取り入れている。C バンドは新竹等が KEK（高エネルギー加速器研究機構）にてリニアコライダー計画向けに 1995 年度より開発した技術である。50 MW ピーク出力の C バンドクライストロン 2 本を並列運転し、パルスコンプレッサーを通して 4 本の 1.8 m 長加速管に RF を供給すると、設計では 35 MV/m 以上の加速電界が得られる設計となっている。8 GeV ビームは約 230 m にて得られることになり、従来の半分以下の長さで済むため、施設のコストが大幅に削減できるメリットがある。

昨年度までに一通り C バンドに必要な機器（インバータ高電圧電源、パルスモジュレータ、C バンドクライストロン、加速管）の機器開発を終了している。

本年度は、C バンドの加速管に大電力 RF を投入し、その高電界での性能試験を実施した。その結果、目標の 30 MV/m レベルの運転では、大きな放電による機器停止は見られず安定して運転可能であることが分かった。しかし、予想外に大きな暗電流が加速管内部の銅材料の表面から発生することが分かり、これを除去するためのビームコリメータの設計を強化した。

また、線型加速器を用いた X 線 FEL では、クライストロンの電源電圧の変動が直接に X 線のスペクトルに影響するため、その安定化が非常に重要である。IGBT 素子を用いたスイッチング形式の 50 kV 高電圧電源をメーカーと共同開発し、 $3 \times 10^{-4}$  安定度が得られている。X 線 FEL の実機建設までには、 $3 \times 10^{-5}$  を実現したい。これには、スイッチングノイズの適切なるフィルター、電磁シールドの最

適設計が必要となる。

#### 4. 機器安定設置技術の開発 (新竹, 大竹, 稲垣, 渡川)

X線をアンジュレータの中で増幅し,十分に飽和まで持っていくためには,電子ビームの軌道をできる限り直線に保持しなくてはならない。このため,昨年度までに高感度の電子ビーム位置モニター(以下BPM)とHeNeレーザー光によるアラインメントシステム,さらに温度変化に対して安定なコーズライトセラミックを使用した安定架台の開発を行った。これに引き続き本年度は,このコーズライト架台を安定に設置する技術として,次の技術開発を行った。

##### (1) 床面研削装置

従来,加速器などの機器をコンクリートに設置する際に,鉄製のベースプレートを床面に設置した後,この上に鉄製の架台を設け,さらにその上に機器を固定して,アライメント望遠鏡にて測量したのち,架台に設けた調整ネジによって位置合わせを行っていた。この方法では,各インターフェースの不完全さのため,地面振動,冷却水振動,周辺機器からの横圧力などにより,機器の位置が変動することが問題であった。そこで,コンクリート床をダイヤモンドホイールにて研削する床面研削装置(愛称:ゆかとけんさく)を理研とメーカーにて共同開発し,通常コンクリートの床面を平坦度 $30\mu\text{m}/\text{m}$ ,水平度 $30\mu\text{m}/\text{m}$ 以下に研削することが可能となった。この研削した床面上記のコーズライト架台を設置し,振動測定を行い優れた性能を得ている。これは,研削した床面とコーズライト架台の底板との密着性が高いためである。

##### (2) エアーパッド位置調整方式の開発

上記のコーズライト架台を研削した床面に設置すると密着性が高く安定であるが,実用上大きな問題が発生する。その位置調整である。密着性が高くそのままでは水平位置の調整ができない。そこで,コーズライト底板と研削された床面の間に圧縮空気を強制的に注入すると,コーズライト架台は床面から約 $10\mu\text{m}$ ほど浮き上がり,わずかの力で非常に滑らかに移動が可能となる。物体の位置と方向については $(x, y, z, x', y', z')$ という6自由度があるが,この方式によって $(x, z, y')$ の3自由度に減少されているために非常にアライメント作業が容易になっている。

このふたつの技術は,広く産業界にて応用できる可能性がある。

---

\*1 協力研究員, \*2 共同研究員, \*3 客員主管研究員, \*4 業務協力員

The Advanced Electron Beam Physics Laboratory is developing key technologies for X-ray Free Electron Lasers of an 8 GeV energy scale, to be constructed at the RIKEN SPring-8 site as a future SR source in the near future. XFEL, based on SASE (Self Amplified Spontaneous Emission Mode Free Electron Laser), is the only realistic way of creating X-ray lasers with Angstrom wavelength. It requires a long undulator section ( $\sim 80\text{m}$ ) and a low emittance electron beam ( $\sim 1\pi\text{.mm.mrad}$ ) with high peak current ( $\sim 2\text{kA}$ ), and very tight trajectory straightness ( $< 10\text{micron-m}$ ). We are developing all these technologies except the undulator. In order to demonstrate SASE mode

FEL operation, verify the key components, and debug, we are constructing a test FEL accelerator of 250 MeV electron energy. The first lasing is scheduled for November 2005.

#### 1. Construction of the test XFEL accelerator

Before the 8 GeV XFEL construction, it is definitely necessary to check the basic design for SASE mode FEL, debug the hardware in detail, and feedback onto the technical design. For this purpose, we are constructing a test FEL accelerator at the SPring-8 site, which is about 1/20 downsize, and has beam energy as low as 250 MeV. However, it will be equipped with all the required hardware items: (1) low emittance electron source, (2) C-band high-gradient accelerator, (3) chicane type bunch compressor, (4) in-vacuum undulator, (5) high performance beam position and profile monitor, (6) soft-X-ray detection and test application station, (7) control system, (8) radiation shield tunnel, (9) high precision cooling water system. The construction is being carried out in collaboration with Chief Scientists Kitamura and Ishikawa and their group. Fortunately we have strong support from a JASRI team with technical aspects and manpower. This will be much more important in the 8 GeV XFEL construction.

#### 2. Low emittance electron gun and injector development

In the X-ray FEL, we need to generate a high quality electron beam, whose normalized emittance should be lower than  $1\pi\text{.mm.mrad}$ , which is a much lower value than in any existing machine. We have developed an HV electron gun with a CeB6 thermionic cathode which is 3 mm in diameter. The first model started operation in Dec. 2003, and we found beam emittance lower than  $1.1\pi\text{.mm.mrad}$  at 1 A current and 500 kV extraction voltage.

In 2004, we designed the following hardware components, and some of them have been already fabricated: (1) beam deflector (2 nsec portion will be removed), (2) pre-buncher cavity (238 MHz), (3) Booster cavity (476 MHz), (4) S-band APS structure for buncher, (5) S-band traveling wave structure to accelerate the beam to 30 MeV, (6) all the high power amplifiers required for those cavities, (7) control system and software, (8) trigger and RF reference distribution system. All these components will be installed into the test accelerator this year (2005).

#### 3. C-band high gradient accelerator system development

Hardware R&D on the C-band 5712 MHz RF acceleration system was originally started by T. Shintake in 1996 at KEK for the  $e^+e^-$  Linear Collider project. Using two 50 MW C-band klystrons, a very high accelerating gradient of 35 MV/m will be generated in four accelerating structures. An active length of just 230 m will be enough for 8 GeV acceleration.

In 2004, we tested the accelerating structure with high power. So far, we did not see any serious HV breakdown up to a 31 MV/m accelerating gradient. However, we found that the dark-current emission was rather higher than our expectation, that is, the emission charge per rf pulse reached the same order as the main beam charge of 0.5 nC. Fortunately, all of the dark-current is generated at the metal surface, the phase space distribution of which is  $(r, r')$ , and which has a blank hole at the center where the main beam is located, enabling us to cut all dark-current by means of a properly designed collimator. Motor-controlled collimators will be installed at various

locations in the test accelerator.

In the XFEL machine, the voltage fluctuation of the klystron power supply directly affects the X-ray spectrum wavelength, so we need a highly stable power supply. An IGBT switching inverter HV generator for capacitor charging is under R&D. Recently a voltage ripple as low as  $3 \times 10^{-4}$  has been achieved. Before the XFEL construction starts, we wish to complete R&D for a power supply with stability  $3 \times 10^{-5}$  and ripple  $1 \times 10^{-5}$ .

#### 4. Stable installation technology development

In the undulator section, the electron beam trajectory has to be very straight, in order to maintain enough power gain of FEL action. Until 2004, we worked on developing a high precision cavity type BPM, HeNe laser alignment system, temperature stable stand using cordierite ceramic. We continued this R&D and developed the following instrument in 2005.

##### (1) Concrete floor-grinding machine

In order to place equipment stably on the floor, we decided to make a flat surface by grinding the concrete floor. For this purpose we developed a new machine, which has a rotating grinder with a diamond compound inside, and is mounted on a precise mover which can be digitally controlled in the x, y, and z directions. This new machine can grind concrete to a very flat surface: the flatness is better than 30 micron-m/m, and the tilt is lower than 30 micron-m/m.

##### (2) Air-pad mover for precise alignment

The flat floor will provide a very stable setting for the support stands. However, since the surface contact is so good, it is rather hard to move the equipment without lifting it. But, for the alignment process, it is better to move it horizontally and not lift it. To accomplish this, we put air-pads on all the bottom sides of the stands. With a pressurized air supply, even a heavy mass like the klystron and its tank (in total 3 ton) can be moved smoothly. These two technologies can also be used in industrial applications.

## Staff

### Head

Dr. Tsumoru SHINTAKE

### Members

Dr. Yuji OTAKE

Dr. Kazuaki TOGAWA

Dr. Takahiro INAGAKI

Mr. Hitoshi BABA\*

---

\* Contract Researcher

*in collaboration with*

Dr. Takashi TANAKA (Coherenet Synchrotron Light

Phys. Lab.)

Dr. Toru HARA (Coherenet Synchrotron Light Phys. Lab.)

Dr. Yoshito TANAKA (Coherent X-ray Opt. Lab.)

Dr. Makina YABASHI (Coherent X-ray Opt. Lab.)

## Visiting Members

Mr. Youhei ASHIYA (Tempstaff Co., Ltd.)

Dr. Takeaki ENOTO (Hokkaido Univ.)

Mr. Kojiro KASE (TOYAMA Corp.)

Dr. Hideki KAWAGUCHI (Hokkaido Univ.)

Mr. Masanobu KITAMURA (NICHIZOU Corp.)

Mr. Satoru KOJIMA (Staff Japan Corp.)

Dr. Noritaka KUMAGAI (JASRI SPring-8)

Dr. Hiroshi MATSUMOTO (KEK)

Dr. Syusuke NISHIYAMA (Hokkaido Univ.)

Mr. Kazuyuki ONOE (ULVAC Corp.)

Dr. Satoshi TOMIOKA (Hokkaido Univ.)

---

## 誌上発表 Publications

[雑誌]

(原著論文) \*印は査読制度がある論文

Tanaka T., Kitamura H., and Shintake T.: "Consideration on the BPM alignment tolerance in X-ray FELs", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **528**, 172-178 (2004). \*

## 口頭発表 Oral Presentations

(国際会議等)

Lambert G., Carre B., Couprie M., Garzella D., Doria A., Giannessi L., Hara T., Kitamura H., and Shintake T.: "Seeding high gain harmonic generation with laser harmonics produced in gases", 9th European Accelerator Conf. (EPAC 2004), (European Physical Society Interdivisional Group on Accelerators), Lucerne, Switzerland, July (2004).

Lambert G., Carre B., Couprie M., Garzella D., Mairesse Y., Salieres P., Doria A., Giannessi L., Kitamura H., Shintake T., and Hara T.: "Seeding high gain harmonic generation with laser harmonics produced in gases", 26th Int. Free Electron Laser Conf. (FEL 2004) and 11th FEL Users Workshop, (Sincrotron Trieste (ELLETRA)), Torieste, Italy, Aug.-Sept. (2004).

(国内会議)

渡川和晃: "SPring-8 軟 X 線自由電子レーザー計画に用いる CeB6 電子銃の開発", 第 28 回リニアック技術研究会, (日本原子力研究所, 東京大学大学院), 茨城県東海村, 7-8 月 (2003).