

# 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

当研究室はX線自由電子レーザー（X線FEL）に必須の加速器技術、すなわち低エミッタンス電子銃と入射器、パンチ圧縮部、主加速部、電子軌道制御、ビームモニター等広範な技術の開発を担当しており、平成17年度は、その技術実証機であるSCSS試験加速器において、波長49 nmのレーザー発振に成功を収め、当研究室にて開発された技術の信頼性が実証された。これを元に実機8GeVのX線自由電子レーザーの設計を行い、当研究室はその建設に全面的に取り組んでいる。

### 1. 低エミッタンス電子入射器の開発研究

(1)単結晶 CeB6 熱カソードを用いた電子銃の開発（渡川、稲垣、東谷、新竹）

X線FELを実現するために必要となる低エミッタンス電子ビーム源を開発することが、当研究室の第1の目標であり、昨年までにその基礎技術を開発することが出来た。

本年度はこの技術を実用化するために、SCSS試験加速器(エネルギー250 MeV)に導入してビーム試験を行った。次節に述べる速度集群方式の入射器の技術を併用して、低エミッタンスの高密度電子を生成し、さらにCバンド加速器によって250 MeVまでに加速し、アンジュレータに通して波長49 nmでのSASEモードのレーザー発振に成功して。これによって、単結晶 CeB6 カソードを用いたX線FEL用の電子銃が実用に耐えるものであることを実証することができた。

(2)速度集群方式の電子入射器、及びシュケイン磁場によるパンチ圧縮技術の開発（渡川、稲垣、大竹、田中均、新竹）

熱カソードから得られる電子ビームの電流値は、X線FELに必要なキロアンペアという電流よりも何桁も低いため、速度集群方式とシュケイン磁場によるパンチ圧縮技術によって、ピーク電流をキロアンペアまで高めることが必要となる。

まず相対性理論による座標変換を用いた理論解析によって次のことがわかっている。加速器の中で、電子のエネルギーが上昇するに従って、ほぼエネルギーに逆比例して電子パンチの長さを圧縮すると、電子系座標から観測するパンチの長さが一定となり、1000倍以上のパンチ圧縮を行っても、電子ビームのエミッタンスを破壊することなく加速が可能である（T. Shintake, 2001）。

この理論をもとに、SCSS試験加速器の電子入射器を設計し、コンピュータシミュレーションによって電子ビームの軌道計算を行い、電子ビームのエミッタンスが大きく

破壊されないことを確認した。これをもとに、具体的に電子入射器を設計し、2004-2005年にかけ試験加速器を建設、先に述べた2006年のレーザー発振によって、入射器が設計どおりの性能であることを確認した。

### 2. Cバンド加速器技術の開発研究

X線FELにCバンド周波数帯(5712MHz)の主加速器を用いることにより高加速勾配が得られ、短い距離で高いエネルギーを得ることが可能となる。すなわちCバンドを用いると、従来のSバンド加速器の2倍の加速ゲインがえられ、結果的に加速器の長さは半分で済み、建設コストが大幅に削減できる。Cバンド周波数の加速器技術はKEKの将来加速器技術開発の一環として、1996年度より開発を開始し50 MW クライストロン、チョークモード型空洞、導波管システム、インバータ充電方式モジュレータ電源、3連空洞によるRFパルスコンプレッサーを開発した。

このCバンド技術をさらに発展させて、今回のX線FELの主加速器を建設するわけである。すでに試験加速器にて2台のCバンド加速器（クライストロン2本、加速管4本）が稼動しており、加速電界35 MV/mにてビームエネルギー250 MeVを安定に供給している。

現在、 $10^{-4}$ 台の加速エネルギー安定度を達成すべく、次の開発を行っており、平成19年10月までに量産化のめどを付ける予定である。

- (a) 100 ppm オーダーの安定度を持つインバータ方式の高電圧電源
- (b) クライストロンタンク一体型のモジュレータ電源（EMI対策、温度安定化、長寿命化）
- (c) 100 ppm/degCの安定度を持つ高電圧モニター

### 3. 各種加速器要素技術の開発

当研究室では、X線FELに必要であり、その他の加速器に普遍的に応用可能な加速器要素技術の開発を継続的に行っている。これらは、すでに完成の域に達しているものから、開発段階のものまで含まれる。またその種類の多さから、加速器が如何に総合的に広範な技術を要するかが理解されよう。開発項目を列記すると、

#### サブナノ秒立ち上がりの進行波型キッカー

- 半径可変のビームコリメータ
- 周波数安定化 238 MHz サブハーモニック空洞
- 476 MHz ブースター加速空洞
- 低エミッタンス保存の APS(Alternating Periodic Structure)型 S バンド加速管
- 集積型立体回路 (磁場カップリングの高安定 R F ピックアップ)
- 空洞型ビーム位置モニター(Cavity-BPM)
- HeNe レーザーをガイドとするアライメントシステム
- 「ゆかとけんさく」コンクリート床研削装置
- 低熱膨張コージライトセラミックを用いた安定架台
- ミリ波帯の Transition Radiation による波長計を用いたリアルタイムのパンチ長モニター
- グラナイトテーブルを利用した低振動の架台
- 高精度 (0.01 ) の分散型、冷却水温度制御システム
- IQ (In-phase-Quadrature) phase detector
- 差動入力方式の超高速 ADC (12bit, 238MHz clock)
- 高安定 R F マスターオシレータ
- 4 並列ソリッドステートアンプ (238MHz, 12kW)
- 476MHz, IOT 高周波増幅システム

これらの技術のうちいくつかはすでに海外の加速器にて採用されたり、加速器以外の分野へ応用されている。

\*1 研修生、\*2 基礎科学特別研究員



図 1 SCSS 試験加速器

The main mission of our laboratory is to develop accelerator technology for X-ray FEL machine. In FY2006, big achievement was made. We firstly observed the lasing at 49 nm of SASE mode FEL at SCSS test accelerator, which was constructed during 2004 ~ 2005. At SPrin-8 site, 8 GeV X-ray FEL is under construction, in which our laboratory is deeply involved in building low emittance injector and C-band main accelerator.

#### 1. Low emittance electron injector system

(1) CeB6 single crystal thermionic cathode for low emittance gun.

Single crystal CeB6 has high emission density ( $>100$  A/cm<sup>2</sup>) and long life time ( $>5,000$ ), with very flat cathode surface. Evaporation of material from cathode surface provides self-cleaning effect, and forming a flat surface along (110) crystal orientation, which is very important to obtain low emittance beam. The slice emittance of emitted electron is equal to the intrinsic thermal emittance, which is  $4\pi$ .mm.mrad for 3 mm diameter. According to the theoretical analysis, the slice emittance from the thermionic gun is held constant during beam acceleration in DC field in the gun, followed by velocity bunch compression, rf acceleration up to high energy. Only when the beam is over compressed, the emittance is broken due to mixing beam tails into core part.

The 500 kV gun with 3 mm diameter CeB6 cathode has been installed in the 250 MeV SCSS test accelerator, and provided low emittance beam into the injector and contributed the first lasing.

(2) Development of injector complex based on velocity bunching, and chicane bunch compressor.

The beam current intensity available from the thermionic cathode is a few Ampere, which is much smaller than the peak current required at the undulator for SASE-FEL. Therefore, bunch compression is necessary to increase the peak current by factor of  $10^3 \sim 10^4$ . We have to maintain low emittance beam through this compression, and this is one of the most important technical challenge.

According to the relativistic theory of motion, we know that the bunch length on the electron rest frame can be kept constant when we compress the bunch length as inversely proportional to the beam energy, thus the high beam quality is maintained.

Based on this theory, beam dynamics was analyzed using computer simulation, and the injector system was designed, which was installed in the SCSS test accelerator.

From the FEL power gain, we evaluated the electron beam quality, and we found the beam brightness being  $200$  A/(mm.mrad)<sup>2</sup>, which is close to the design value. Through this analysis, we confirmed our injector system showed design performance, which meets the requirement for the X-ray FEL at Angstrom wavelength range.

#### 2. C-band Accelerator Technology Development

By using C-band accelerator, higher accelerating gradient is available, thus we can make shorter the X-ray FEL facility, which is about two times smaller as compared to traditional S-band accelerator. C-band accelerator technology was developed by H. Matsumoto and T. Shintake at KEK under the e+e- linear collider R&D during 1996~2000. We have developed 50 MW C-band klystron, the choke-mode accelerating structure (HOM damping structure), C-band

waveguide system, the inverter type high voltage capacitor charger for PFN, RF-pulse compressor using three-coupled-cavity chain.

After moving to RIKEN, we choose the C-band system in our X-ray FEL project to accelerate beam up to 8 GeV within 400 m long accelerator tunnel. Already, two C-band systems were installed in the SCSS test accelerator (two 50 MW klystrons, and four accelerating tubes), and provided a 250 MeV beam at 35 MV/m accelerating gradient.

In order improve beam stability of the accelerator, we are performing following R&D.

- (1) Highly stable inverter type high voltage capacitor charger.
- (2) Compact klystron power supply. Modulator and pulse transformer are housed in one tank made by steel frame, which provide superior EM shield and better temperature stability.
- (3) Highly stable high voltage monitor having very low temperature coefficient < 100 ppm/deg-C.

### 3. Accelerator Technology Development

Our laboratory is performing following technology R&Ds. They are not only required for X-ray FEL, but also applicable to other accelerators and also industrial products.

- Beam deflection kicker having sub-nanosecond raise time.
- Frequency stabilized 238 MHz sub-harmonic buncher cavity.
- 476 MHz sub-booster cavity.
- APS(Alternating Periodic Structure) for low emittance beam acceleration.
- Integrated waveguide system. Magnetic coupled power pickup.
- Cavity-BPM for sub-micron meter resolution and micron-meter absolute accuracy.
- Alignment system using HeNe laser beam.
- Concrete floor grinding machine “Yuka-to-Kensaku”
- Stable support using cordierite ceramic.
- Bunch length monitor using transition radiation at mm wave.
- Stable granite table for injector parts.
- High precision distributed temperature control for water cooling system.
- IQ( In-phase-Quadrature) phase detector
- Fast ADC (12 bit, 238 MHz) having differential signal input port.
- Phase stabilized RF master oscillator.
- Four parallel solid state amplifier (12 kW).
- 476 MHz, IOT rf amplifier.

Some of those developed technology has been employed in to other accelerator, and also industrial applications.

---

## Staff

### Head

Dr. Tsumoru SHINTAKE

### Members

Dr. Yuji OTAKE, Dr. Kazuaki TOGAWA

Dr. Takahiro INAGAKI, Dr. Hirokazu MAESAKA

Dr. Chikara KONDO\*1)

\*1 Special Postdoctoral Researcher

### *in collaboration with*

Dr. Tetsuya ISHIKAWA (Coherent X-Ray Optics Lab.)

Dr. Hideo KITAMURA (Coherent Synchrotron Light Source Physics Laboratory)

### *Visiting Members*

Noritaka KUMAGAI, Hitoshi BABA, Dr. Takeaki ENOTO

Dr. Syusuke NISHIYAMA, Dr. Hideki KAWAGUCHI

Dr. Satoshi TOMIOKA, Yoshihiro ASANO, Koujiro KASE

Dr. Ryotaro TANAKA, Dr. Toru FUKUI, Dr. Toru OHATA

Dr. Naoyasu HOSODA, Naoaki IKEDA, Dr. Hitoshi TANAKA

Haruo TAMASO, Kazuhisa MAEKAWA, Kazuyuki SATOU

Dr. Jong-Seok OH, Kazuyuki ONOE, Masanobu KITAMURA

Satoru KOJIMA, Kazuma NAKASHIMA, Kousaku TAIDEN

Sumitaka IWAI, Seiichi INDO

### *Trainees*

Kathrin GOLDAMMER

---

## 誌 上 発 表 Publications

### [ 雑誌 ]

( 原著論文 ) \* 印は査読制度がある論文誌

Togawa K., Shintake T., Inagaki T., Onoe K., and Tanaka T.,  
Baba H. and Matsumoto H., “CeB6 Electron Gun for  
Low-emittance Injector”, Phys. Rev. ST Accel. Beams 10,  
020703 (2007). \*

Yabashi M., Tamasaku K., Tanaka Y., Hara T., Tanaka T., Goto  
S., Shintake T., Kitamura H., and Ishikawa T.: “Roles of  
X-ray Optics in the Next Generation X-ray Source”, Acta  
Cryst. A 61, No. a1, pp.C20-- (2005). \*

### ( 総説 )

新竹 積: “ 線FEL試験加速器 レーザー増幅実験成功を  
支えた人間と技術 ( Test Accelerator for the X-FEL in  
Japan: First Lasing, Technology and People ) ”, 加速器学  
会誌3巻3号2006年 p 284-295

### ( その他 )

Shintake T., Kitamura H., and Ishikawa T.: “X-ray FEL project  
at SPring-8 Japan”, AIP Conf. Proc. 705, 117--120 (2004).

### [ 単行本 ]

( 原著論文 ) \* 印は査読制度がある論文誌

Togawa K., Tanaka T., Onoue K., Inagaki T., Baba H., Shintake  
T., Ohata T., and Matsumoto H.: “Emittance measurement  
on the CeB6 electron gun for the SPring-8 compact SASE  
source FEL project”, Proceedings of the 3rd Asian Particle  
Accelerator Conference (APAC 2004), Gyeongju, Korea,  
2004-- 3, Phohan Accelerator Laboratory, Phohan,  
pp.158--160 (2004).

Fukui T., Tanaka R., Ohata T., Takeuchi M., Otake Y., Kitamura  
M., Ishikawa T., Kitamura H., and Shintake T.: “Status of  
the SCSS control system: first phase of an 8GeV XFEL  
project in SPring-8”, Europhysics Conference Abstracts  
Vol.29J: 10th ICALEPCS Conference, Geneva,  
Switzerland, 2005-- 10, The European Physical  
Society, France, pp.MO3.2-1O-1--MO3.2-1O-6 (2005).

Shintake T., Tanaka T., Hara T., Tsuru R., Iwaki D., Shirasawa  
K., Togawa K., Onoue K., Kimura H., Inagaki T., Otake

- Y. ,Kitamura H. : "Status of R&Ds for SCSS project",  
Proceedings of 27th International Free Electron Laser  
Conference (FEL 2005), Stanford, USA, 2005-- 8,  
JACoW, Stanford, pp.75--78 (2005).
- Lambert G. ,Bougeard M. ,Boutu W. ,Berger P. ,Carre  
B. ,Couprie M. ,Garzella D. ,Merdji H. ,Monchicourt  
P. ,Salieri P. ,Hara T. ,Kitamura H. ,and Shintake T. :  
"Seeding the FEL of the SCSS phase 1 facility with the 13th  
laser harmonic of a Ti:Sa laser produced in Xe gas",  
Proceedings of 27th International Free Electron Laser  
Conference (FEL 2005), Stanford, USA, 2005-- 8,  
JACoW, Stanford, pp.224--227 (2005).
- Togawa K. ,Shintake T. ,Baba H. ,Inagaki T. ,Onoue K. ,Tanaka  
T. ,and Matsumoto H. : "Low emittance 500kV thermionic  
electron gun", Proceedings of LINAC 2004 (CD-ROM),  
Luebeck, Germany, 2004-- 8, DESY, GSI, Hamburg,  
pp.261--265 (2005).
- Lambert G. ,Carré B. ,Couprie M. ,Garzella D. ,Mairesse  
Y. ,Salieri P. ,Doria A. ,Giannessi L. ,Hara T. ,Kitamura  
H. ,and Shintake T. : "Seeding high gain harmonic  
generation with laser harmonics produced in gases",  
Proceedings of the 26th International Free Electron Laser  
Conference (FEL 2004) and 11th FEL Users Workshop,  
Trieste, Italy, 2004-- 8~9, Comitato Conferenze  
Elettra, Trieste, pp.155--158 (2005).
- Togawa K. ,Shintake T. ,Baba H. ,Inagaki T. ,Onoue K. ,Tanaka  
T. ,and Matsumoto H. : "Emittance measurement on the  
CeB6 electron gun for the SPring-8 compact SASE source",  
Proceedings of the 26th International Free Electron Laser  
Conference (FEL 2004) and 11th FEL Users Workshop,  
Trieste, Italy, 2004-- 8~9, Comitato Conferenze  
Elettra, Trieste, pp.351--354 (2005).
- Hara T. ,Shintake T. ,and Kitamura H. : "Electron beam  
simulations on the SCSS accelerator", Proceedings of the  
26th International Free Electron Laser Conference (FEL  
2004) and 11th FEL Users Workshop, Trieste, Italy,  
2004-- 8~9, Comitato Conferenze Elettra, Trieste,  
pp.439--442 (2005).

(その他)

(技術資料)

- 渡川 和晃, 新竹 積, 田中 隆次, 馬場 斉, 稲垣 隆宏, 松本  
浩 : "CeB6電子銃のエミッタンス測定結果とX線FELへ  
の応用について", 第1回日本加速器学会年会/第29回リ  
ニアック技術研究会論文集, 船橋, 2004-- 8, 日本  
大学量子科学研究所, 船橋, pp.93--95 (2004).
- 新竹 積, 大竹 雄次, 渡川 和晃, 稲垣 隆宏, 田中 隆次, 原  
徹, 北村 英男, 矢橋 牧名, 玉作 賢治, 石川 哲也, 馬  
場 斉, 尾上 和之, 加瀬 耕二郎, 小嶋 寛, 関口 芳弘,  
都留 理恵子, 白澤 克年, 江口 重文, 備前 輝彦, 清家  
隆光, マレシャル ザビエル, 川島 祥孝, 高嶋 武雄, 松  
井 佐久夫, 張 超, 惠郷 博文, 高橋 直, 工藤 統吾, 福  
井 達, 大端 通, 田中 良太郎, 井上 忍, 浅野 芳裕, 高  
城 徹也, 後藤 俊治, 木村 洋昭, 呉 樹奎, 熊谷 教孝,  
松本 浩, 西山 修輔 : "理研SCSS X線FEL計画の現状",  
第2回日本加速器学会年会/第30回リニアック技術研  
究会論文集, 鳥栖, 2005-- 7, 日本加速器学会, 鳥栖,  
pp.13--15 (2005).
- 松本 浩, 稲垣 隆宏, 馬場 斉, 白澤 克年, 新竹 積, 北村  
英男, 石川 哲也 : "Operational experience with a klystron  
50kV/30kW inverter power supply", 第2回日本加速器学  
会年会/第30回リニアック技術研究会論文集, 鳥栖,  
2005-- 7, 日本加速器学会, 鳥栖, pp.296--298 (2005).

口 頭 発 表 Oral Presentations  
(国際会議等)

- Togawa K. ,Baba H. ,Inagaki T. ,Onoe K. ,Shintake  
T. ,Tanaka T. ,and Matsumoto H. : "Low emittance 500kV  
thermionic electron gun", 22nd International Linear  
Accelerator Conference (LINAC 2004), (DESY, GSI),  
Luebeck, Germany, Aug. (2004).
- Yabashi M. ,Tamasaku K. ,Tanaka Y. ,Hara T. ,Tanaka  
T. ,Goto S. ,Shintake T. ,Kitamura H. ,and Ishikawa T. :  
"Roles of X-ray Optics in the Next Generation X-ray Source",  
20th Congress of the International Union of Crystallography  
(IUCr2005), Florence, Italy, Aug. (2005).
- Lambert G. ,Bougeard M. ,Boutu W. ,Berger P. ,Couprie  
M. ,Garzella D. ,Merdji H. ,Monchicourt P. ,Salieri  
P. ,Carre B. ,Hara T. ,Kitamura H. ,and Shintake T. :  
"Seeding the FEL of the SCSS phase 1 facility with the 13th  
laser harmonic of a Ti:Sa laser produced in Xe gas", 27th  
International Free Electron Laser Conference (FEL 2005),  
(Stanford Linear Accelerator Center), Stanford, USA,  
Aug. (2005).

(国内会議)

- 新竹 積, 稲垣 隆宏, 大竹 雄次, 渡川 和晃, 尾上 和之, 馬場  
斉, 北村 全伸, 小嶋 寛, 加瀬 耕二郎, 前坂 比呂和, 原 徹,  
田中 隆次, 備前 輝彦, ザビエル マレシャル, 白澤 克年,  
清家 隆光, 岩城 大介, 都留 理恵子, 谷川 貴紀, 田中 義人,  
東谷 篤志, 田原 和彦, 桐村 知行, 木村 洋昭, 矢橋 牧名,  
後藤 俊治, 高橋 直, 大橋 治彦, 望月 哲朗, 松下 智裕, 広  
野 等子, 井上 忍, 呉 樹奎, 福井 達, 大端 通, 竹内 政雄, 田  
中 良太郎, 川島 祥孝, 高嶋 武雄, 大島 隆, 細田 直康, 惠  
郷 博文, 松井 佐久夫, 張 超, 高城 徹也, 浅野 芳裕, 松本  
浩, 石川 哲也, 北村 英男 : "SCSS試験加速器の建設と  
現状(2)", 第19回日本放射光学会年会・放射光科学合  
同シンポジウム, 名古屋, 1月 (2006).
- 新竹 積, 原 徹, 木村 洋昭, 稲垣 隆宏, 大竹 雄次, 渡川 和晃,  
尾上 和之, 馬場 斉, 北村 全伸, 小嶋 寛, 加瀬 耕二郎, 前  
坂 比呂和, 田中 隆次, 備前 輝彦, ザビエル マレシャル,  
白澤 克年, 清家 隆光, 岩城 大介, 都留 理恵子, 谷川 貴紀,  
田中 義人, 東谷 篤志, 田原 和彦, 桐村 知行, 矢橋 牧名,  
後藤 俊治, 高橋 直, 大橋 治彦, 望月 哲朗, 松下 智裕, 広  
野 等子, 井上 忍, 呉 樹奎, 福井 達, 大端 通, 竹内 政雄, 田  
中 良太郎, 川島 祥孝, 高嶋 武雄, 大島 隆, 細田 直康, 惠  
郷 博文, 松井 佐久夫, 張 超, 高城 徹也, 浅野 芳裕, 松  
本 浩, 石川 哲也, 北村 英男 : "SCSS試験加速器の建設  
と現状(1)", 第19回日本放射光学会年会・放射光科  
学合同シンポジウム, 名古屋, 1月 (2006).