

## STATUS OF X-FEL/SPRING-8 MACHINE CONSTRUCTION

Tsumoru Shintake<sup>1,A)</sup>

Representing Joint XFEL Project Team<sup>A,B)</sup>

<sup>A)</sup> RIKEN, XFEL Joint Project / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan

<sup>B)</sup> JASRI, XFEL Joint Project / SPring-8

1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

### Abstract

XFEL/SPring-8: the X-ray free electron laser facility is under construction, which is aiming at generating coherent, high brilliance, ultra-short femto-second X-ray pulse at wavelength of 1 Å or shorter. Thanks to the unique features, new science applications are expected, such as, the single bio-molecular imaging, the pump-probe experiment in femto-second resolution, the high-density plasma experiment and basic physics in high electro-magnetic field. Year of 2008 is the third year of the project, the facility building construction is going well as scheduled, Contract of most of all hardware components has been made, near 20 % of accelerator structures and klystrons have been delivered. Main installation will be started in April 2009, and the beam commissioning will start in March 2011.

## X線自由電子レーザー計画の現状

### 1. はじめに

2006年より、SPring-8にX線自由電子レーザー施設 [1] (XFEL/SPring-8、ここでXFELはX-ray Free Electron Laserであり、以下X線FELと略す) が平成22年度の完成を目指して建設中である (図1は完成予想図)。X線FELの目的は、飛躍的に高い輝度 (ピーク輝度で $\sim 10^{33}$  photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%BW)、極短パルス ( $\sim 100$  fsまたはそれ以下) の空間的にコヒーレントな、すなわちビーム断面で位相がそろっているX線を波長1 nm  $\sim$  0.1 nm以下の範囲 (可変) で発生させるものである。そのX線を発生させるために使用されている技術は、最新の加速器技術によってはじめて実現可能となった自然放射の自己増幅型FEL (Self-Amplified Spontaneous Emission FEL, SASE-FEL) である。低エミッタンス電子銃から発生させた電子ビームを線型加速器にて8 GeVまで加速し、長さ100 mにも及ぶアンジュレータに通してX線波長にてSASE-FELを動作させ、アンジュレータ内の自然放

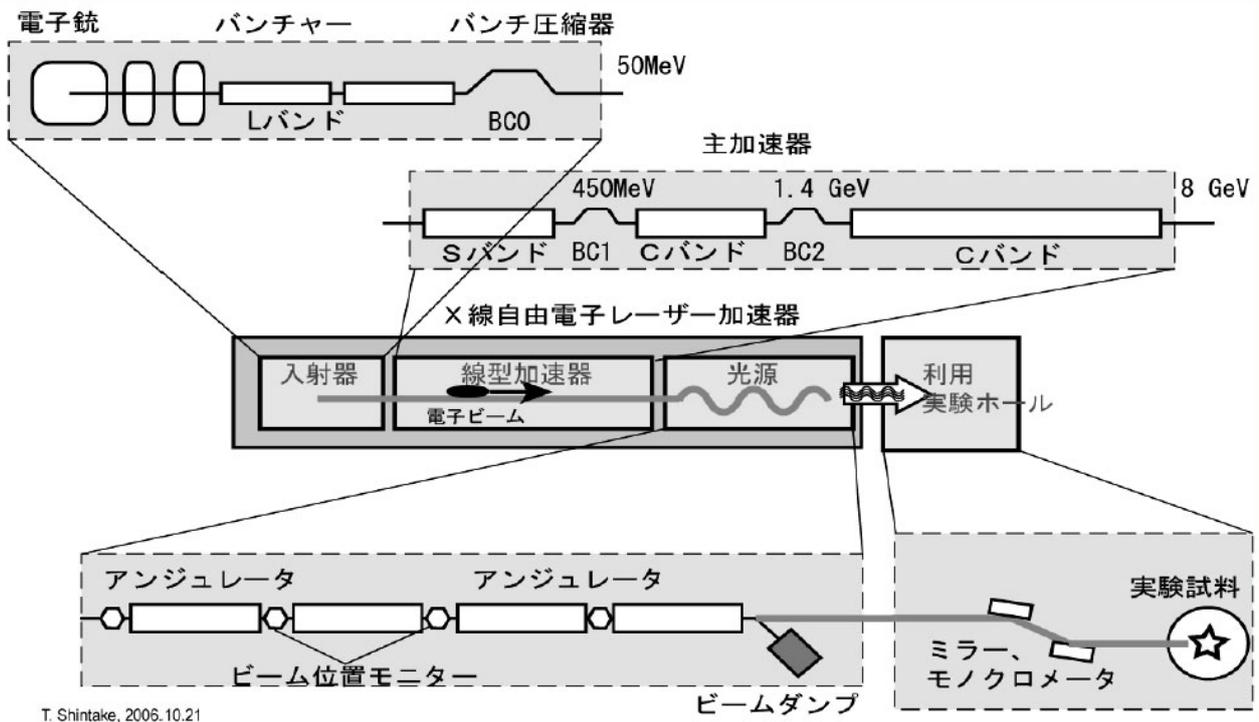
射を増幅し、飽和レベル ( $\sim 10$  GW以上) に達したX線を実験に提供する。計画の初期は1本のアンジュレータ・ビームラインにてスタートするが、将来は5本のアンジュレータ・ビームラインが増設できるスペースを確保した。

この新しいX線利用施設によって、材料科学、プラズマ物理、宇宙物理、化学、構造生物学、生命化学などに優れた基礎科学の成果が期待され、核融合や触媒などを含む広い分野の技術に大きな波及効果が予想されている。幸いに、日本で開発された3つの重要な技術によって、米国とヨーロッパにて建設中の同様のプロジェクトよりも早期の成果が期待できる。すなわち、日本の計画では、(1) 真空封止型の短周期アンジュレータ、(2) 高電場のCバンド加速器技術 (35MV/m)、そして(3) CeB<sub>6</sub>単結晶を用いた低エミッタンス熱電子銃の技術を有し、他の計画よりも小規模の加速器施設で波長1 Å以下のX線FELが早期に実現可能となる。これは計画の総予算がヨーロッパの計画の数分の一で済んでいることから伺えよう。2001年にX線FELに向けた技術



図1 XFEL/SPring-8完成予想図

<sup>1</sup> E-mail: shintake@spring8.or.jp



T. Shintake, 2006.10.21

図2 XFEL/SPring-8加速器の構成

開発をスタートしたとき、上記の特色を表すためにSCSS: SPring-8 Compact SASE Sourceプロジェクトと名づけた。民間の優れた製造技術ともあいまって比較的短期間で加速器が建設できる(2010年度建設終了、2011年度運転開始予定)。

一方、SCSS試験加速器は順調に稼働しており、本年より真空紫外線(50~60 nm)にてユーザー利用実験を開始している。なお昨年より本年にかけ、加速器の性能向上を行い、50~60 nmにてFEL飽和が達成された[2]。

## 2. 加速器の構成

図2により詳しい加速器の構成を示す。500 kVのパルス熱電子銃から発生した、低エミッタンスの電子ビームをプレバンチャー、バンチャーシステムにて速度バンチングして、Sバンドにて50 MeVまで加速し、シュケイン磁場のバンチ圧縮器によって数ピコ秒のパルスとする。引き続き、Sバンドにて450

最短X線波長	1 Å 以下
出力X線ピークパワー	~ 20 GW
スポットサイズ、電場強度@50 m下流 (100 nm スポットに集束後)	0.2 mm FWHM, 14 GV/m = 1.4 V/Å (100 nm FWHM, 30 TV/m = 3000 V/Å)
X線パルス長	~ 20 fsec FWHM
光パルスエネルギー@1Å	0.4 mJ (photon energy 12 keV)
パルス光子数@1Å	$2 \times 10^{11}$ photons/pulse
最高ピーク輝度 @1Å	$1 \times 10^{33}$ photons/mm <sup>2</sup> /mrad <sup>2</sup> /0.1%BW
最高光パルス繰り返し 50 bunch x 60 Hz	3000 pps
マシンパルス繰り返し	10 ~ 60 pps
電子ビームエネルギー	8 GeV
加速電荷量	0.3 nC/bunch
規格化エミッタンス slice (projected)	0.8 πmm · mrad (1.2 πmm · mrad)
エネルギー分散 slice (projected)	$0.8 \times 10^{-4}$ ( $1 \times 10^{-3}$ )
アンジュレータ周期長、Kパラメータ	18 mm, K = 1.9
アンジュレータ有効長	90 m

表1 マシンパラメータ

MeVへ加速、パンチ圧縮、Cバンドにて1.4 GeVへ加速、パンチ圧縮、さらにCバンドにて8 GeVへ加速し、長さ100mのアンジュレータラインを通過させ、X線波長にてSASE-FEL動作によりコヒーレントなレーザーX線を発生させる。マシンパラメータを表1に示す。

我々は熱電子銃のカソード材料としてCeB<sub>6</sub>を用いているが、SCSS試験加速器において運転開始から2万時間をすぎた本年の1月、エミッションが急激に50%低下したため、交換を行った。使用済みのカソード表面は凹面状に窪んでおり、その中央の深さはCeB<sub>6</sub>の分解蒸発速度から予測される深さ200 μmと一致した。電子顕微鏡によるカソード表面の観測では表面は大変に滑らかであった、また若干のカーボン成分が観測されたが、これとエミッション低下との数値的な関係は明らかとなっていない。今回の経験を踏まえて、カソードを毎年1回、夏のシャットダウンにて交換することとした。

### 3. 加速器コンポーネント量産

8 GeVの線型加速器は、やはり大型施設である。特にCバンド加速器が物量共に大きく、量産の如何がプロジェクトの成否を決定する。現在、加速管、導波管系は三菱重工業にて大量生産が進行中であり、すでに30%近くが納入された。クライストロンは東芝那須電子管にて量産が進行中であり、やはり30%近くが納入された。そのパルス電源系はニチコンが受注し、本年度より量産に取り掛かっている。集束磁石と電源、高周波制御、機器制御の設計が終了して、メーカー各社にて量産が開始されている。

アンジュレータは、重要な課題であった、真空チェンバ内での磁場測定技術(SAFALI)が開発され実用化された。これによって、磁石列を真空チェンバ外で組み上げて磁場調整を行った後、いったんセグメントごとに分解し、真空チェンバ内に再組み立て

する際の磁場エラーが確実に修正可能となった。試作の後、アンジュレータの量産は来年度より開始の予定である。

### 4. 建屋建設

図3に加速器トンネル(マシン収納部)とアンジュレータホール(光源収納部)の建設状況を示す。2006年に400m加速器トンネルの基礎工事をスタートし、地盤調査に基づいて、最長50mの杭を総数136本、硬岩上に固定した(収納部は直径1.5mと1.6mを7.5m間隔で、ギャラレ一部は直径1.5mを15m間隔)。杭の頭頂部と鉄筋とを連結しながら基礎部をコンクリート打設。この上にシールドトンネルの両側壁を建設。現在、加速器上流部の天井が完成し、一部、床面の最終コンクリート打設がスタートした。また光源収納部は、2007年に建設を開始し、アンジュレータの上流部に当たる基礎が軟弱地盤であったため、硬岩部に到達するまで、軟弱な地盤を掘削除去し、ここを碎石置換し(2.5%コンクリート入)人工的に安定な地盤とした。現在、基礎工事、床、側面等の工事が終了し、天井部の工事が進行中である。

### 5. まとめ

現在まで、建屋建設、加速器構成部品の設計、製作等、ほぼスケジュールどおりに進行している。来年の3月には加速器建屋が竣工し、機器の納入を開始する。2010年の秋には機器の設置を終了し、加速管のエージングや制御プログラムチェック等を開始する。そして2011年の3月をめどに、電子ビームをアンジュレータ部に通過させる予定である。X線波長でのレーザー発振には精密な電子ビーム制御が必要であり、仕様性能を満足するには、数ヶ月から1年に及ぶビームチューニングを要するであろう。

### 参考文献

[1] XFEL/SPring-8、X線自由電子レーザー計画については、次のホームページを参照：

<http://www.riken.jp/XFEL/>

[2] T. Shintake, et al., "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region", Nature Photonics advanced online publication, 27 July 2008 (doi:10.1038/nphoton.2008.134).

[3]試験加速器の状況、XFELの建設、加速器機器の開発、量産状況について本学会に20本以上の論文が発表されているので、詳細はそちらを参照されたい。



図3 加速器トンネル、アンジュレータ収納部の建設状況