

Status of XFEL/SPring-8 Project

Tsumoru Shintake^{1,A)}, Joint Project Team for XFEL/SPring-8^{A,B)}

A) SPring-8 Joint-Project for XFEL/RIKEN, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5148

B) SPring-8 Joint-Project for XFEL/JASRI, 1-1-1 Kouto, Sayo, Hyogo, 679-5198

Abstract

XFEL/SPring-8 project has been started in FY2006, which is aiming at generating 1 Angstrom X-ray laser beam based on SASE-FEL principle. Unique machine configuration: thermionic electron gun, C-band high gradient accelerator and in-vacuum undulator was chosen to make the machine size smaller as to fit within available site length of 700 m. We proved validity of this configuration in the SCSS project, where the SASE lasing was successfully made in 2006 at SCSS test accelerator using 250 MeV beam generated from CeB6 single crystal cathode. XFEL/SPring-8 uses 64 C-band klystrons of 50 MW peak at 5712 MHz, in which each klystron drives two accelerating structures of 1.8 m long, which accelerates electron beam at 35 MV/m field gradients up to 8 GeV within 400 m long accelerator tunnel. Mass production of the accelerator components started in FY2006, and civil construction of accelerator tunnel has been started in FY2007. It will take another three years to complete accelerator construction. The first X-ray beam will be generated in FY2010.

X線自由電子レーザー建設の現状

1. はじめに

昨年度よりSPring-8地区において、国家基幹プロジェクトであるX線自由電子レーザーの建設が開始された。これは8 GeVのCバンド線型加速器によるSASE型FELであり、強力なレーザーX線を発生させ、X線顕微鏡の実現、フェムト秒の時間分解能を持つ構造解析が可能となるものと大きな期待が寄せられている。

海外においては、すでに米国SLAC-LCLS計画が進行中であり、2008年の秋には最初のX線を発生させ、翌年には実用化を目指している。もっとも注意すべき競争相手である。ヨーロッパでは、本年6月5日、正式にEuro-XFELの建設をスタートすると宣言。こちらは主加速器に超伝導を用いるため長期の建設期間を要するため、最初のX線が見られるのは2013年になる見込み。が、しかし、DESYにはILC超伝導空洞の試験加速器TTFを用いた軟X線SASE-FELがあり、昨年これをFLSAHと改名し、すでにユーザー運転を開始、数々の優れた実験がなされていることは注目に値する。

さて、国内においても諸外国の動きに遅れることなく2006年度にX線FELの予算化がなされ、すでに主加速器の加速管、導波管、クライストロン等が量産にはいつている。本年度中にはほとんどすべての加速器機器の量産に入る予定である。完成予定は2010年度末であり、SPring-8リングに隣接して長さ700 mの施設が出現する。

なお海外のプロジェクトの状況、日本の位置については、参考文献1がよくまとめられている。

2. 加速器の概要

図2に加速器の構成を示す。X線レーザーは、低エミッタンスの電子入射器、主加速器、そしてアンジュレータの3つで構成される。XFEL/SPring-8では、日本独自の技術を駆使して、諸外国のプロジェクトに対して数分の1の長さでX線レーザーを実現しようとしている。電子ビームエネルギー8 GeVにて、波長1 AngstromのX線レーザーを得るものである。図3により詳しい加速器の構成を示す。設計の詳細は、原徹、田中均、渡川和晃等^[2]の本会発表を参照願いたい

2.1 電子入射器

CeB6単結晶のカソードを用いた500 kVのパルス電子銃から発生する低エミッタンスの電子ビーム（1 Ampere）を、2枚の平行電極による高速キッカーを

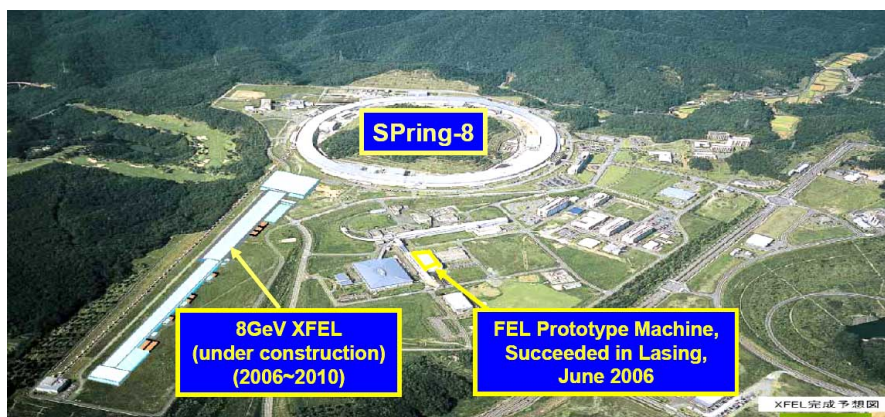


図1 8 GeV, XFEL/SPring-8 (想像図) と試験加速器 (既存建屋)

¹ E-mail: shintake@spring8.or.jp



図2 XFEL/SPring-8を構成する三要素。

用いて約 1nsec分を取り出し、これをすぐ下流の 238 MHzプリバンチャー空洞、476MHzブースター空洞にて 1 MeVまで加速し、Lバンドの定在波空洞にて 10 MeVへ、そしてLバンド進行波管にて 30 MeVまで加速し、最初のシュケイン磁場にてバンチ長さ

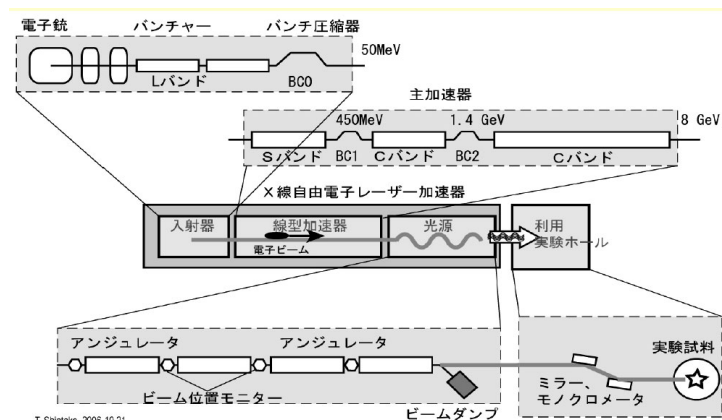


図3 XFEL/SPring-8加速器の構成

を5倍圧縮する。ここまでが入射器である。

この入射器の基本的な性能はSCSS試験加速において、すでに確認されている。特に昨年の 49 nmレーザー発振によって^[3]、ビームが1台のアンジュレータだけで自発的にSASE-FEL動作をしており、ビーム内部の真のエミッタンスは極めて低く保存されていることが確認されている^[4]。

さてSCSS及びXFEL/SPring-8にていわゆる RF Photo-cathode gunではなく、熱電子銃を用いた理由は、「光カソードに必要となる短パルスレーザーなどの精密な調整を要する機器を必要とせず、CeB6やLaB6が長期間にわたり安定して熱電子ビームを発生できる」。カソードの予想寿命は数万時間であり、光カソードに比べ圧倒的に長寿命である。

しかし、熱電子銃ではInsecという長いパルスからスタートするので、インジェクターでのバンチ圧縮率が高く、電子銃電圧や、加速空洞の電圧と位相の変動に対してビームパラメータが非常に敏感に反応するため、これらの機器に極めて高い安定性が求められる。そこで、XFEL/SPring-8プロジェクトで

は高周波電源の安定化と基準高周波信号源の安定化を行っており優れた安定性が得られつつある^[5]。

2.2 主加速器

上流部のSバンド4台にて450 MeVへ加速、ここでバンチ長を10 psec → 1 psecにバンチ圧縮し、次にCバンド64台にて 8GeVまで加速する。途中 1.5GeV でバンチ長を 1 psec → 0.3 psecに圧縮する。その直後、横モードの進行波管にてビームを横方向にキックし、ストリークカメラのように下流のスクリーンで観測してビームのスライスエミッタンスを測定するセクションを設けてある。

Cバンド加速器の各ユニットは、50 MWクライストロン1台、RFパルスコンプレッサー1台、チョークモード型加速管2台から構成され、35 MV/mにて動作する。すでに試験加速器に2台導入され、安定な動作が確認されている^[6]。

2.3 ビームオプティクス

電子銃からの 1 A, 1 π. mm. mradの電子ビームのエミッタンスを破壊せずに、最終的にはピーク電流 4 kAにまで圧縮するプロセスは、各種のコンピュータシミュレーションコードを用いて最適化され、また試験加速器において実験的に確認されている。

また、圧縮されたあとのバンチ電流のコントロールを可能とするため、上流のプレバンチャー、ブースターにそれぞれ高調波空洞が設けてある。これらビームの特性を評価するビームモニターシステムが設計され準備中である。

2.4 アンジュレータ

図4にアンジュレータを示す。アンジュレータは真空封止型、その磁石列は、磁場分布の安定性を高めるためハイブリッド型を採用する方針とした。周期長 18mm、ギャップ 4mm (運転時)、K値 1.9であり、周期数 276、全長 5mである。これを18台、Q磁石とモニター系を挟んで配置し全長120mのアンジュレータラインを構成する。XFEL/SPring-8では当初1本のアンジュレータラインを建設する。その後、順次増設することで最

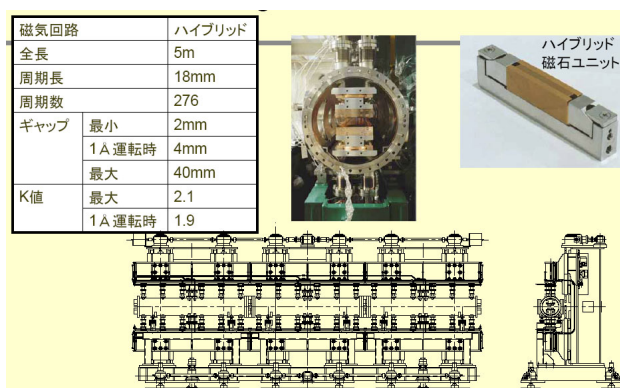


図4 アンジュレータ

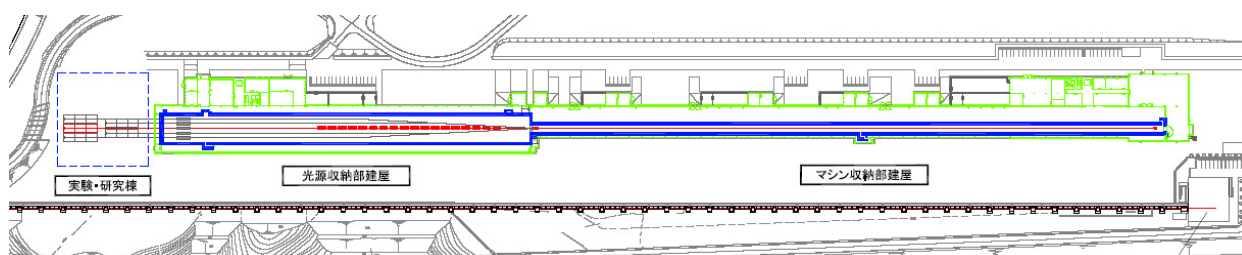


図5 XFEL/SPring-8、建屋平面図

大5本のアンジュレータラインを敷設できるスペースを確保した。

SASE-FELのシミュレーションによると、ピーク電流 3.5 kA、エミッタンス $1 \pi \cdot \text{mm} \cdot \text{mrad}$ のビームを用いると、約120 mにてFELは飽和に達し、ピーク電力 約3GWが得られるものと予想されている。

3. 施設建設

図6に建屋断面図を示す。1 kmの長尺ビームラインに沿って、新規に建屋を建設し、右からマシン収納部（電子入射器、主加速器）、光源収納部（アンジュレータ）、実験研究棟を配置する。図7に示すように、すべて地上施設である。通常行われるような地下トンネルは採用しなかった。これは水平配置の方が主加速部の加速管とクライストロンの接続距離が短く、また縦穴を通す必要がなく、導波管やケーブル、冷却水などの敷設が容易になるためである。

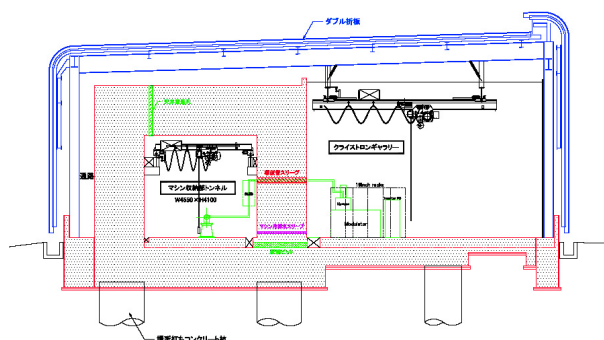


図6 建屋断面図



図7 杭工事 (2007年7月)

る。またアンジュレータ部が地上にあり、ユーザー実験エリアもSPring-8と同じ地上レベルとなり、将来、SPring-8の光とXFELの光を同時に利用する実験も実現できるというメリットがあるためである。

建設予定地の地盤は、一部に露岩があるものの、埋め立て土壌のため、加速器トンネルを安定に支持するには強度が不足であると判明し、図8のように直径1.5 mのコンクリート杭を加速器トンネルにそって合計139本埋設する工事を行っている。本年10月までに杭工事を終了し、トンネル躯体工事を開始する。

4. まとめ

SCSSプロジェクトにて開発された技術をもとに、XFEL/SPring-8の設計を行い、2006年度より機器の調達を開始し、2007年度より施設工事を開始、2009年より機器の搬入据付を開始し、2010年度には電子ビームをアンジュレータへ運び最初のX線を得る予定である。プロジェクトは順調に進行中である。

参考文献

- [1] Dennis Normile, "Japanese Latecomer Joins Race to Build a Hard X-ray Laser", Science Vol 314, Nov. 3, 006
- [2] 原徹「XFEL/Spring-8のビームオプティクス」本学会。田中均「XFEL/Spring-8のバンチ圧縮性能に及ぼすRF機器変動の影響評価」本学会。渡川和晃「XFEL/Spring-8のバンチ圧縮器におけるエネルギーチャープの線形化」本学会。
- [3] T. Shintake et al, "Status of the SCSS Test Accelerator and XFEL Project in Japan", EPAC'06, Edinburgh, UK 26-30, June 2006.
- [4] H. Tanaka et al., "Low Emittance Injector at SCSS", FEL'06
- [5] 大竹雄次「XFEL/Spring8用光タイミング・低電力高周波分配システム の開発」本学会。前坂比呂和「XFEL/Spring-8の光タイミング・高周波分配システムにおけるファイバー長安定化」本学会。細田直康「XFEL/Spring-8での光コムを用いた5.7GHz RF伝送とPSK方式を用いたトリガー伝送」本学会。新竹積「XFEL向け高安定高周波電源について」本学会。近藤力「クライストロン電源における絶縁油の冷却効率の向上」本学会。
- [6] 稲垣隆宏、「XFEL/Spring-8 Cバンド主加速器部の計画と現況」本学会。白澤克年、「XFEL/Spring-8におけるクライストロン制御システム」本学会