STATUS OF X-FEL/SPRING-8 MACHINE CONSTRUCTION

Tsumoru Shintake[1,A)]
for Joint XFEL Project Team[A,B)]
[A)] RIKEN, XFEL Joint Project / SPring-8
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5148, Japan
[B)] 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 intensity, ultra-short femto-second X-ray pulse at wavelength of 1 Å or shorter. XFEL will contribute to new science, such as, the single bio-molecular imaging, the pump-probe experiment in femto-second time-resolution, the high-temperature plasma experiment and basic physics under high electro-magnetic field. Year 2009 is the fourth year of five year project, the facility building construction has been completed in March 2009, and about 70% of hardware components have been made, whose installation has been started in July 2009. The high power operation of accelerator will start in October 2010, followed by the beam commissioning in March 2011. The first X-ray beam will be delivered to the user facility in 2011.

X線自由電子レーザー計画の現状

１．はじめに

図１に示すように2006年より、SPring-8に併設して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）を建設中である（図１は2009年春に完成した線型加速器棟とアンジュレータ棟）。Ｘ線ＦＥＬの目的は、飛躍的に高い輝度ピーク輝～10^{33} photons/sec/mm^2/mrad^2/0.1%BW、極短パルス（300～10 fsまたはそれ以下）、空間的に100%コヒーレント、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 ～ 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(～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、将来は合計5本のアンジュレータ・ビームラインを増設する。

日本で開発された3つの重要な技術によって、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（35～40MV/m）、そして（3）CeB_6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も伺えよう。2001年にX線FELに向けた技術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ている。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）。なお米国SLACに建設中であったLCLS (SLAC Linac Coherent Light Source)は順調にビームチューニングが進行し、2009年4月10日に波長1.5 Åにて最初のレーザー増幅を観測し、引き続きFEL飽和に達した[4]。この10月から利用実験がスタートする予定。

図１　XFEL/SPring-8　線型加速器棟、アンジュレータ棟が完成

1 E-mail: shintake@spring8.or.jp

一方、我々のＳＣＳＳ試験加速器は2006年のFEL発振以来、順調に稼動しており、昨年より真空紫外線(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]。また図２のようにFEL出力は極めて安定である。実機X線FELでは同様の入射システムを使用する予定である。なお長さ100mに及ぶアンジュレータ区間において、軌道誤差 5 ミクロン以内という極めて高度なビーム真直度を要求しておりビームベースアライメントが必須であり、試験加速器において安定なFEL運転が実現できている意義は極めて大きい。なお安定な運転が実現されている背景には、CeB_6単結晶熱電子銃を採用していること、空胴温度制御システムの最適化、基準RF信号源の低ノイズ化、パルスモジュレータ電源向けに開発していた2重インバータ方式の高電圧PFN充電器が高安定度100ppm以下を達成したことなどがあげられる。

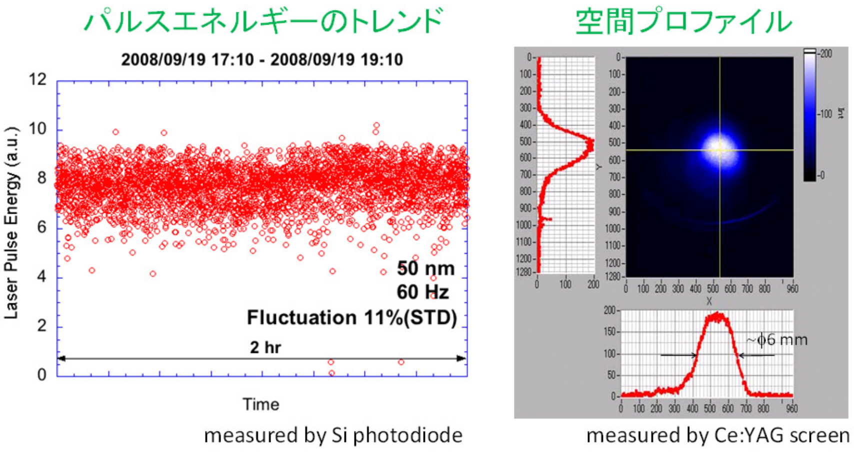


図２　SCSS試験加速器(EUV波長)のFEL出力安定性と空間プロファイル

２．加速器の構成

図３に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。つぎにSバンドにて450 MeVへ加速、シュケインバンチ圧縮、Cバンドにて1.4 GeVへ加速、さらにシュケインバンチ圧縮、引き続き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。

電子銃から50 MeVまでが、いわゆる電子インジェクターであり、SCSS試験加速器にてその性能が評価され、FEL増幅のGain長から、Slice Emittance 0.7 π. mm. mrad、ピーク電流 300 Aが得られており、表1のパラメータを満足することが保障されている。なお実機の入射器では2箇所で高調波補正空胴を用いてRF電圧の線形化を行っており、これによって50fsec以下の極めて短い時間幅へ均一密度の電子ビームを圧縮することが可能となっている。図４はFELシミュレーションコードSIMPLEXによって予想されたX線波長のFEL出力である。FWHMにて 10 fsec程度の極めて短いパルスの中に、 10 GWのピークパワーが集中する。パルスエネルギーは 0.4 mJであり光子数は、2 x 10^{11} photonsである。なおXFELの究極の目標となっているタンパク質の単分子イメー

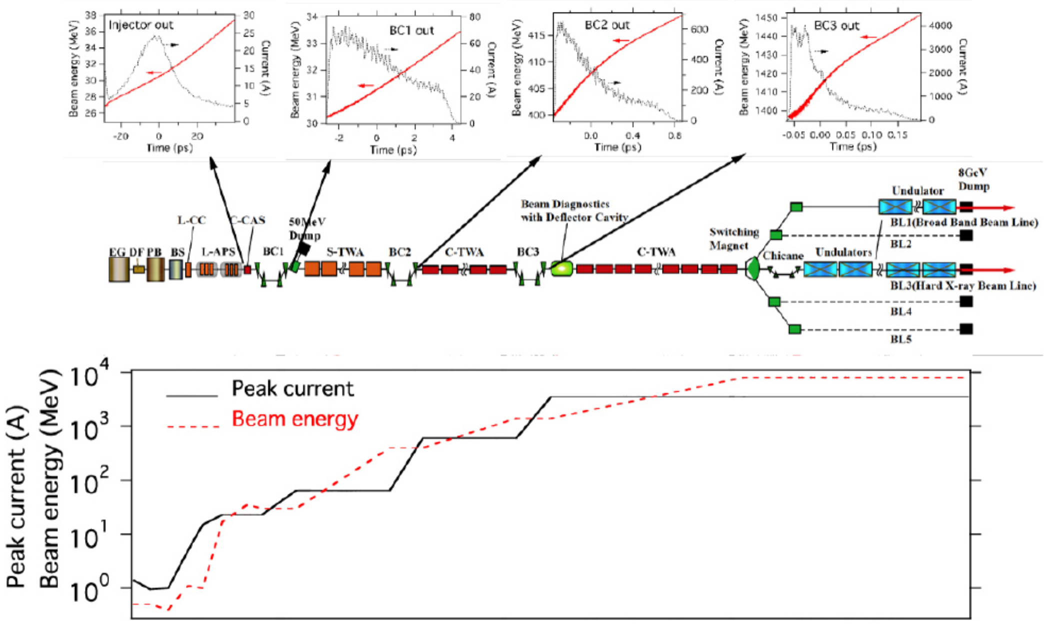


図３　XFEL/SPring-8加速器の構成

ジングでは、これよりさらに1桁多い光子数が必要とされており、運転をしながらさらなるチューニングが必要であろう。

さてCバンドの主加速部は電子バンチが加速管の中で発生する高次モードを減衰する構造を有しており、安定なマルチバンチ加速が可能となっている。これによってバンチ間隔 4.2 nsecにて最高 50 bunchesまでを1パルスで加速できる。加速器の最高パルス繰り返しは 60 Hzであるから、最高バンチ周波数は、60 x 50 = 3000 bunch/secと非常に高い繰り返しのX線パルスを発生できる。これはタンパク質の単分子を真空中に入射して微小断面（100 nm直径）に収束したX線FELパルスで照射する単分子イメージングにおいて、粒子とX線パルスの衝突確率を高くするために極めて重要な技術であり、この分野において日本のXFELが他に比べて優位となるであろう。

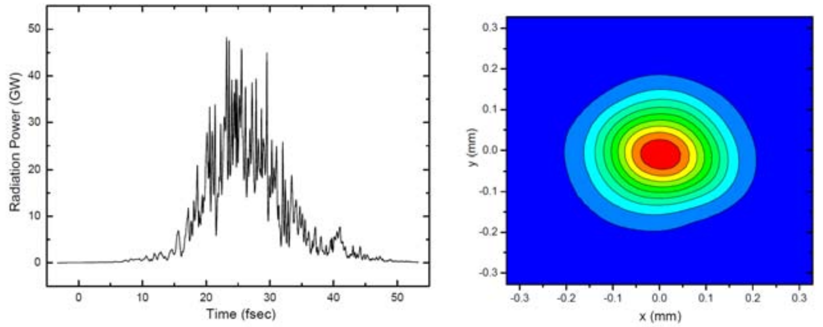


図４　電子ビームエネルギー8 GeV、波長１Åでの（左）X線強度のパルス波形と（右）50 m下流でのビームプロファイル（光強度分布を等高線表示）。 SIMPLEXシミュレーションによる。

３．加速器コンポーネントの量産

8 GeVの線型加速器は大型施設である。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８０％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８０％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、昨年度より量産に取り掛かり、この7月よりクライストロンギャラリーへの設置を開始した。また集束磁石と電源、高周波制御、機器制御の量産が開始され、下流側より順次ラックに設置されている。

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)が開発実用化され、本年度よりアンジュレータの量産を開始しており、来年後半までに18台を設置する予定である。

４．まとめ

現在まで、建屋建設、加速器構成部品の量産は、ほぼスケジュールどおりに進行している。この7月より加速器機器の設置を開始しており、来年の１０月からトンネル内の加速管エージングをスタート、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、少なくとも数ヶ月のビームチューニングを要するであろう。

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	2×10^{11} photons/pulse
最高ピーク輝度 @1Å	1×10^{33} photons/mm^2/mrad^2/0.1%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)	0.8×10^{-4} (1×10^{-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

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). T. Shintake, et al., “Stable operation of a self-amplified spontaneous-emission free-electron laser in the extremely ultraviolet region”, PRST **12**, 070701 (2009)

[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１０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。

[4] http://ssrl.slac.stanford.edu/lcls/commissioning/
P. Emma, "First Lasing of The LCLS X-ray FEL at 1.5 Å "

床研削装置（ゆかとけんさく）による、アンジュレータ部のBPM架台基部を研削。またライナックの主な架台基部、モジュレータ架台部など、合計300箇所以上を2台の“ゆかとけんさく”にて研削した。作業に3ヶ月を要した。

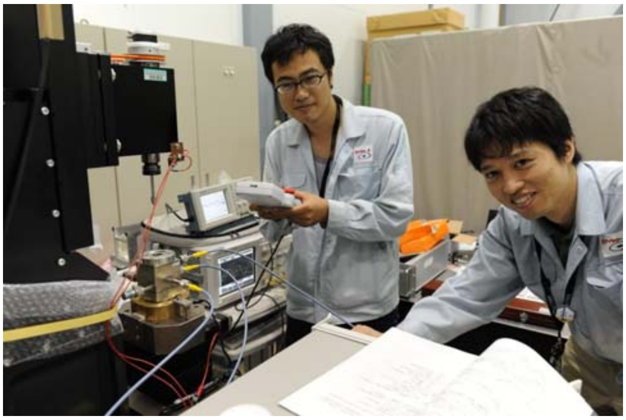
2009年7月よりCバンド加速管の設置を開始。RFパルスコンプレッサーと加速管を設置し、アライメント後に真空、導波管系を接続する。

MADOCA制御システム搭載のVME、高精度RF信号制御システム、Cバンド帯アンプ、冷却水制御、ソレノイド電源、モジュレータ電源、PFN高電圧充電器など4連ラックに収納。高精度機器を納める左側2台のラックは密閉式空調。機器の発熱は冷却水フィンにて除去。室内空調に負荷をかけないと共に、温度制御を容易にする。大竹雄次が率いるチームと関連メーカーの多大なる努力の結晶である。

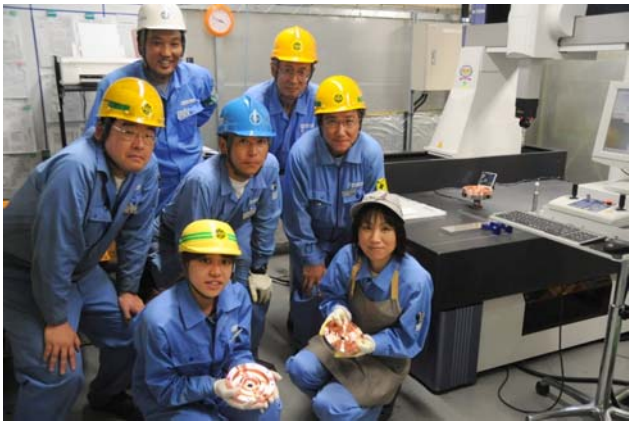
制御ラックの間に設置されたクライストロンモジュレータ電源。左の加速器トンネルから来る導波管への締結を待つ。周辺へのノイズ放射を極力押さえるためにスチール密閉シールドタンクを独自開発。PFN部、トランス部、クライストロン部がすべて1台のタンクに収められている。

7月15日より現地入りしたニチコンのスタッフが、モジュレータをクライストロンに装着してゆく。このあと絶縁油を注入し、大電力試験を行う。

組み立て調整棟に準備したテストスタンドでは、Cバンドの高電界試験を続けている。最大加速電界 40 MV/mまでスムーズにエージングされている。また設計電界である35 MV/mでのシステムのトリップ率は極めて低く、総数60台以上のシステムを同時に運転することに困難がないことが確かめられている。



高精度Cavity-BPMの中心位置校正を行う松原と前坂。Cavity-BPMはサブミクロンの高分解能が得られるが、その原点は必ず校正する必要がある。0.5 mmほどのワイヤピンを空胴に挿入し、空胴位置を移動させネットワークアナライザにてRF信号をモニタする。誤差は数ミクロンに収まっておりXFELの仕様を満足しているとのこと。



日立電線土浦工場のスタッフ。Cバンド加速管に用いる加速セル1万３０００枚の加工を2009年6月に終了した。マルチバンチ加速を可能とするチョーク構造のため、一部加工が困難な部分があり、当初はR&Dに苦労したが、スタッフの懸命な努力の結果、順調に製造が進んだ。

大量生産された加速管等を、SPring-8のリングに保管。このほか、クライストロン、真空パイプ、電源等の保管場所をJASRIの関係者の協力により確保できた。関係の方々には多大なるご迷惑をお掛けしたことをお詫びするとともに、寛大なる配慮に感謝したい。

2006年から続く伝統の毎朝9時のミーティング。田中均率いるSCSS試験加速器運転チームとスタッフ。試験加速器での最近の成果、今日の実験メニュー、機器のトラブル報告など、この場での議論が若手の良い勉強会となっている。

真空封止アンジュレータと挿入光源チーム。XFELでは短周期かつ高精度のアンジュレータ磁場が必要とされ、真空チェンバに磁石列を挿入した後の磁場測定が懸案であった。田中隆次等の努力により「その場磁場測定システムSAFALI」の技術が完成し、アンジュレータの量産が開始された。