

PRESENT STATUS OF XFEL/SPRING-8 PROJECT and SCSS TEST FACILITY

RIKEN/JASRI XFEL Joint Project Team
1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo

Abstract

XFEL/SPRING-8 is being constructed on schedule. The RF conditioning starts from this October and the commissioning of electron beam and SASE-FEL will start in next march. The present status of this XFEL/SPRING-8 project and SCSS test facility are reported.

XFEL/SPRING-8 および SCSS 試験加速器の現状

1. はじめに

波長 0.1nm の X 線領域で SASE-FEL 発振を目指す X 線自由電子レーザー計画は XFEL 本体の建屋建設が終了し 8GeV 線型加速器、アンジュレータの製作・据え付けもほぼ終了、また X 線レーザーを利用するビームラインおよび実験ホール内の遮蔽ハッチの工事も予定通り進んでいる。10 月からは加速管の高周波エージングを開始し、2011 年 3 月から電子ビームと SAS-FEL のコミッションングを、そして 10 月から試験利用、2012 年 3 月から供用利用を予定している。

8GeV 線型加速器からの 60pmrad の超低エミッタンスビームを SPRING-8 蓄積リングに輸送する輸送系建屋の建設および輸送系機器の製作が 2010 年 3 月に終了し、2010 年 6 月から据え付けが始まった。また、パルス幅がフェムト秒の XFEL レーザーと SPRING-8 の蓄積リングからの高輝度放射光の二つの最先端光量子ビームを連携させ、新しい光量子科学の分野を開拓する連携ビームラインの建設も 2010 年度から開始された。図 1 は XFEL および SPRING-8 の全景写真である。



図 1 : XFEL および SPRING-8 全景

2. XFEL 施設の概要

XFEL の装置概要を図 2 に示す。装置は低エミッタンス電子ビームを生成する 500keV 熱電子銃、そのビームを進行方向に圧縮し 8GeV まで加速する入

射部と主加速部 (S-band 加速管 8 本、C-band 加速管 128 本、各種電磁石、ビーム診断系等)、8GeV に加速した高輝度短パルス電子ビームから SASE-FEL を発振させる 18 台の真空封止型アンジュレータ、および 8GeV 電子ビームを廃棄するダンプとレーザーを実験ホールに導くビームラインで構成されている。当初は SASE-FEL を利用する BL3 と広帯域 X 線を利用する BL1、そして SPRING-8 への輸送ライン (XSBT) の 3 本のビームラインが整備される。施設の基本構成と電子ビームと X 線レーザーの主要パラメータを表 1 に示す。

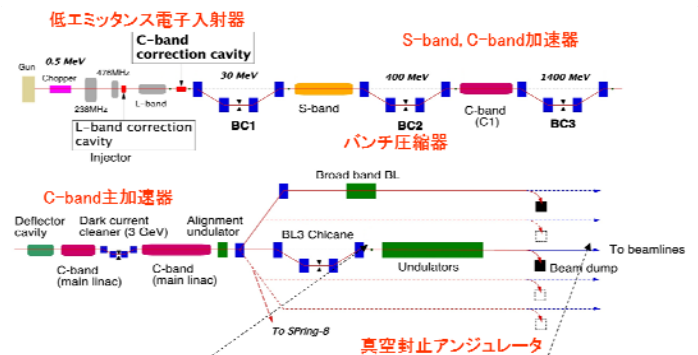


図2: XFEL 装置概要

8GeV線型加速器の基本性能

XFEL施設の長さ	700m
線型加速器の長さ	400m
アンジュレータ部の長さ	120m
電子ビームの最大エネルギー	8.5GeV
加速電荷	1nC/パンチ
ピーク電流	4.4kA
パンチ長 (FWHM)	55フェムト秒以下
スライスエネルギー拡がり	0.01%以下
規格化エミッタンスビーム	1 π mm/mrad以下
繰り返し	60pps
運転モード	単パンチ、 多パンチ(40b/pulse)

表1 XFEL 加速器の主要パラメータ

3. XFEL 施設の建設状況

線型加速器の機器は L-band 加速管の一部、ビーム診断用の C-band deflector 空洞、ビーム診断系機器へのケーブル接続等を除きトンネル内への設置工事はほぼ終了した。S-band 加速管までの低エネルギー部は、冷却水の脈動や環境温度の変化による電子ビームの軌道変動を極力抑制するため、全ての機器が石定盤あるいは熱膨張係数の小さなコージライト架台の上に設置された。図3は 500keV 電子銃から s-band 加速管までの機器配置の様子を示す。



図3：電子銃および入射器部の機器写真

S-band および C-band 加速管には、1本のクライストロンから SLED を通して圧縮された高周波電力が2本の加速管に供給され、C-band 加速管で 37MV/m の高加速電界強度を安定に実現している。電子ビームの収束系はエネルギーの低い S-band 部では加速管2本に一カ所、エネルギーの高い C-band 部では加速管8本に一カ所設けられ、収束系と診断系機器(図4)は同一の石定盤上に据え付けられ、四極電磁石の磁場中心と BPM の中心がフローティングワイヤ法で $10\mu\text{m}$ (1σ) の位置精度で校正された。

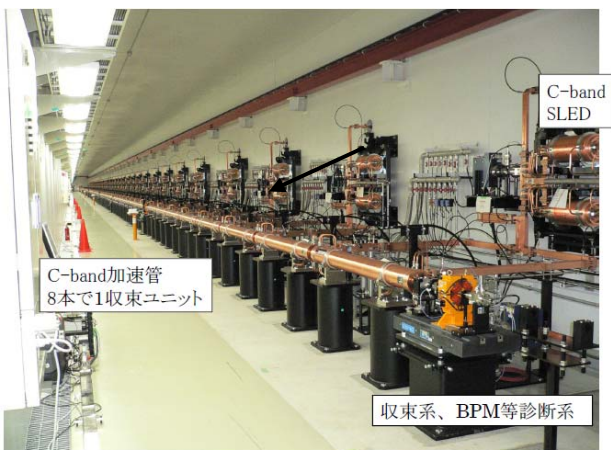


図4：収束系と C-band 加速管構成

主加速部は加速管2本を1ユニットとして S-band

部は4ユニット、C-band 部は64ユニットで構成され、FEL モードで 8GeV、加速器モードで 8.5GeV まで電子ビームを加速することができる。加速管に高周波電力を供給する RF システムは、クライストロン一体型モジュレータと、50kV の高圧充電器(電圧再現性 0.01%以内)、高周波増幅器、タイミング機器および各種制御機器を格納した四連のラックで構成され、高い安定度と精度を必要とする高周波増幅器やタイミング機器は $\pm 0.1^\circ\text{C}$ に恒温化された水冷ラック内に、その他真空や電源等機器は空冷ラック内($\pm 1^\circ\text{C}$)に格納され、クライストロンギャラリーには、この RF ユニットが71式設置されている。

SASE-FEL 発振で強度とエネルギーを安定化するために、高周波システムをはじめとする各種器機へのタイミング信号の時間的揺らぎを、施設全長(約700m)に渡って、数10フェムト秒以内に安定化することが必須となる。そのため、 ± 0.01 度程度に安定化された冷却水を用いた恒温ダクト内(周囲温度変動の1/20に低減)に温度補償光ファイバー(温度係数 4ps/km/°C)を敷設し、タイミング信号の時間変動幅を 60fs/1km 以下に抑制する。将来、さらに高精度が要求される場合に備え、マイケルソン干渉計を用いた伝送長補償装置が追加できるように設計・製作されている。

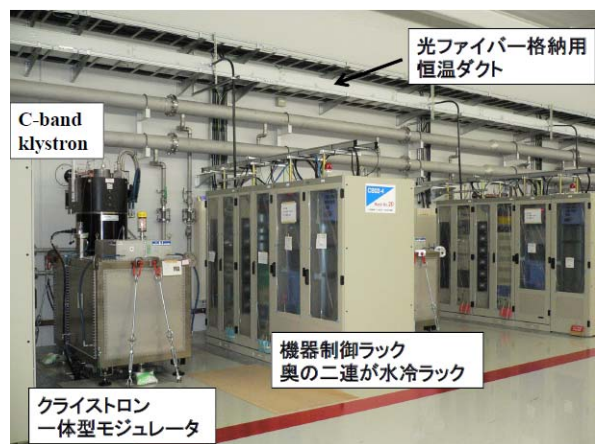


図5：クライストロンギャラリー内機器配置

8GeV まで加速された電子ビームは、線型加速器の最下流に設置された振り分け電磁石で、図6に示すように、BL1(広帯域 X 線ビームライン)、BL3(SASE-FEL ビームライン)、BL5 の三方向に振り分けられ、さらに BL1 は途中で BL2 に、BL5 は BL4 と XSBT (SPring-8 へ) の二本に分岐される。建設当初は BL3 と BL1 および BL5 の一部+XSBT の3本が整備される。BL3 には真空封止型アンジュレータが18台(図7)設置され、波長 0.1nm の SASE-FEL 発振を実現する。XSBT は 8GeV 線型加速器からの高品質電子ビーム(エミッタンス: 60pmrad、パルス幅: 100fs 程度)を SPring-8 に輸送し、回折限界光源の実現に向けた各種 R&D 等に利用される。

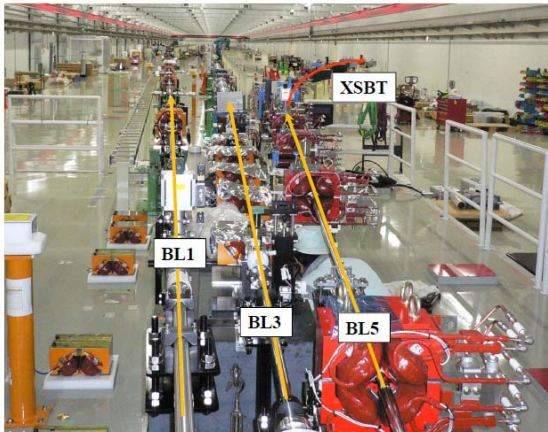


図6：振り分け電磁石後の3本のビームライン

図7：18台の真空封止型アンジュレータ

表2は BL3 で得られる SASE-FEL の代表的レーザーパラメーターである。BL1には SPring-8 標準型アンジュレータが1台設置され広帯域 X 線を生成

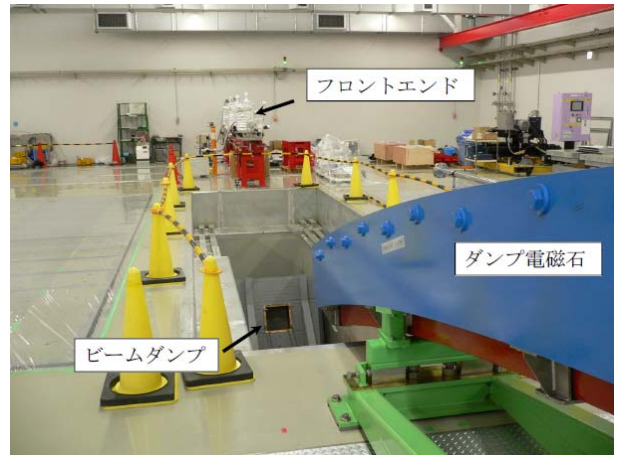
レーザービームライン：5本（当初はBL3とBL1の2本を建設）	
①BL3(硬X線レーザービームライン)	
真空封止アンジュレータ	5m/セグメント×18台
周期長、周期数	18mm、277
ギャップ長(波長:0.1nm)	4mm@8GeV
X-FEL放射パラメータ(代表例)	
波長	0.13nm (9.9keV)
バンド幅 ($\Delta\lambda/\lambda$)	0.009%
光源サイズと発散	33 μ m、0.73 μ rad
平均ピークパワーとエネルギー	29GW、0.78mJ
パルス当たりの光子数	5×10^{11}
②BL1(広帯域X線ビームライン)	
真空封止型アンジュレータ	1台

する。

表2：BL3とBL1ビームラインの基本性能

レーザー発振後の電子ビームは、図8に示すダンプ電磁石（長さ約6.6m、中心磁場1.5T）で水平から20度下方に曲げられ地下に設けられた間接水冷

製の長さ1.4mのグラファイト製ビームダンプで廃棄される。SASE-FELはこのフロントエンドのコリメーターでハロー等不要なX線とγ線が除去され、厚さ2.5mのコンクリートに開けられた貫通孔から実験ホール側光学ハッチ（壁厚60cmのコンクリート製）に導かれ、ミラー等で加工された後、光学ハッチ後方にタンデム型に設置された4つの鉄製



の実験ハッチ(図8)で実験に用いられる。

図7：電子ビームダンプシステム



図8：実験ホール内の実験ハッチ

MPCCD 検出器の開発

SASE-FEL の利用に際して完全空間干渉性を最大限生かしたタンパク1分子の構造解析等イメージング測定に不可欠な大口径高分解能 MPCCD の開発が2011年度の利用開始に間に合うように進められている。図9はMPCCDセンサー、図10はMPCCDを真空チャンバー内にセンサーを8枚組み合わせた検出器の機械モデルである。またこれと並行して、検出器から上がってくる膨大なデータをほぼリアルタイムで解析する事がFELのようなone shotの実験では不可欠と思われるため、神戸のスーパーコンピュータとの連携を進めている。

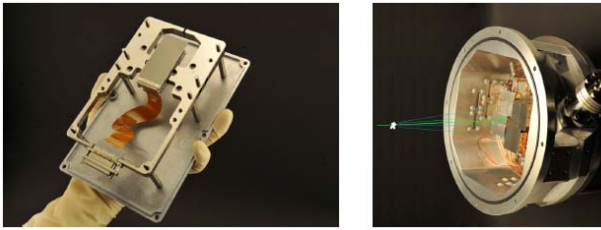
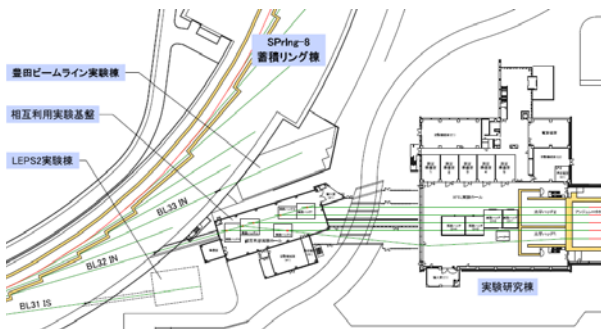


図 9 : MPCCD センサー 図 10 : MPCCD 検出器部

相互利用実験基盤施設

蓄積リング挿入光源からの高輝度 X 線と XFEL 施設からの SASE-FEL の二つの最先端光量子ビームを用い pump and probe 等で先端的分野を開拓するための相互利用実験基盤施設が 2010 年度末完成を目指して現在建設が進められている。この施設の概要を示したものが図 11 で、SPring-8 の BL32IN からの高輝度 X 線と XFEL 施設のエネルギーの異なる 5 本のレーザービームが基盤施設内で交差するように



設計されている。

図 11 : SPring-8-XFEL 相互利用実験基盤施設

4. SCSS 試験器の現状

SCSS 試験器では、EUV 領域での SASE-FEL 利用実験と XFEL 実機利用に向けた各種 R&D 等と、実機 SASE-FEL の次世代と位置づけられている seed 型 FEL 光源に関する R&D が進められた。図 12 は SCSS 試験器内に設置された seed 型 XFEL の実験装置で、Xe ガスチェンバー内に波長 800nm の Ti サファイアレーザを導入し非線型現象を利用し高次高調波 (図 13) を作り、その高次光を seed 光とする実験装置である。この装置を用いた実験が 7 月末富樫等によって行われ、世界で初めて 60nm の波長で seed 型レーザーの発振が確認された。

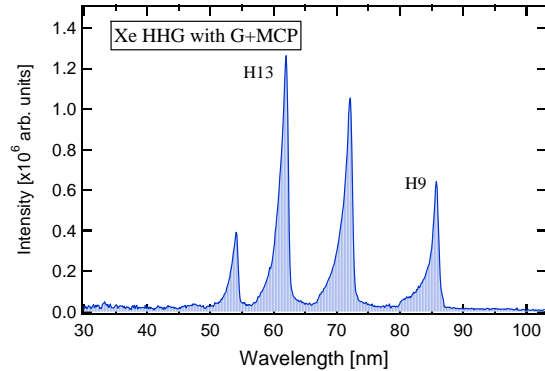
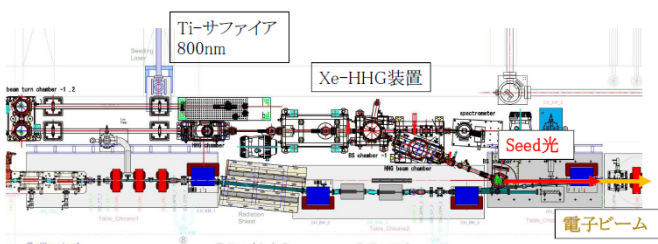


図 12 : SCSS での seed 型 XFEL 実験装置の概要

図 13 : Xe-HHG でのスペクトル、基本波 800nm の 13 次光、波長 60nm を SCSS で seed 光として利用。

5. まとめ

XFEL の建設は、一部機器でトラブルがあるものの致命的なものではなく、ほぼ当初計画通り進捗している。現在 2010 年 10 月から高周波空洞の rf エージングを開始し 2011 年 3 月に電子ビームとレーザー発振のコミッショニングを開始する予定である。その後半年程度で SASE-FEL の特性測定、レーザー強度と位置の安定化を図った上で 10 月から先行利用、翌年 3 月からは一般供用を開始する予定である。また、XFEL 施設の高度化として

- ①高速・高効率 2 次元検出器および高速データ収集・伝送系と解析ソフトの開発の開発
- ②波長 0.1nm における X 線 seeding 技術の開発
- ③残り 3 本のビームラインの整備
- ④XFEL と高輝度硬 X 線相互利用方法の新規開拓
- ⑤蓄積リングに於ける高品質電子ビームの利用等を年次計画を立てて進めていく予定である。