

4. X線自由電子レーザー(XFEL)プロジェクトの現状と進展

1. はじめに

X線自由電子レーザー（以下、XFELとする）施設建設は、2006年度からはじまった国の第3期科学技術基本計画の中で、「国家基幹技術」と位置付けられて、計画が進められている。2009年度は、まさに最終コーナーを回ったところであり、様々な加速器コンポーネントの搬入が開始され、2008年度までに完成した加速器収納建屋、光源収納建屋への機器設置がはじまった。XFEL線型加速器からSPRING-8に向けて電子ビームを入射するためのビームトランスポートに建屋が竣工し、そのための機器設置の準備が整った。利用のための実験研究棟の建設が、2010年5月の竣工に向けて進められた。XFEL利用に向けては、文部科学省内局予算で実施されていた利用推進研究が新たなフェーズに入り、2008年度までの利用のためのコンポーネント開発から、それらを統合して実験装置として組み上げる段階に移った。ここで開発された装置は、SPRING-8やSCSS試験加速器を用いた試験利用が進められた。2009年度の補正予算で、XFELとSPRING-8のビームを同じ試料上に導く実験施設の整備が認められ、その建設が開始された。

X線自由電子レーザー計画合同推進本部
石川 哲也

1. X線自由電子レーザー実機建設の進捗状況

2-1 建設計画の進捗状況

2009年度、8 GeV線型加速器、全系制御、放射線安全、BL3、BL1ビームライン、アンジュレータ、蓄積リングに高品質電子ビームを輸送するXSBTなど機器の製作がほぼ計画通り進捗した。一方、建屋の建設は、XFEL線型加速器から高品質電子ビームをSPRING-8に輸送する電子ビーム輸送系建屋が3月末に竣工、XFEL実験研究棟は2010年5月末に完成予定である。また、本年度からXFELからのX線レーザーとSPRING-8からの放射光を連携して利用する相互利用実験基盤施設の建設がはじまった。

Cバンド加速管およびSLED、導波管など機器が2月末に全数納入され、2010年7月までに全数がトンネル内に設置される。また、放電対策で製作が遅延していたクライストロン+モジュレータシステムはほぼ当初スケジュールに復帰、3月末で約75%の製作が終了した。納入されたモジュレータはテストスタンドで定格試験を実施した後、クライストロンギャラリに設置（37台）された。また、モジュレータに50 kVの高電圧を供給する充電器の初期納入品

の複数機で、コンデンサー、ダイオードなどが破損する現象が発生、現在原因を究明中で対策方法が確立次第量産を再開する。クライストロンギャラリ側に設置する、低レベル高周波制御機器やタイミング機器、およびビーム診断機器などで構成される制御ラックの製作が3月末でほぼ全数終了し、所定の場所に設置された。今後制御対象機器との配線接続や各種動作試験を予定。

アンジュレータの光源棟への設置作業は、3月末までに全数18台の内7台の設置が終了した。現場での磁場測定中に磁石間吸引力による磁場分布の再現性悪化が見つかり、これを抑えるため、吸引力をバネで補償する機構を導入、その補償効果を確認後全数に装着する予定である。BL3、BL1ビームラインの電磁石、真空機器などの据え付けが3月末でほぼ終了、レーザー輸送系のフロントエンド機器、光学機器、輸送系コンポーネント、放射線遮蔽ハッチなどは2010年度完成を目指し設計・製作が進められた。また、2011年度からの利用開始に向け、X線2次元検出器とDAQシステムの開発が前年度に引き続きおこなわれ、XFEL完成時に使用するMPCCD検出器の製作が当初設定の歩留まりで可能であることが確認された。今後実機カメラシステムに接続し性能評価試験を実施する。また、MPCCDで60 Hzの繰り返しで取られる大量な画像データを効率的に収集・転送・保存するDAQシステムの検討も開始した。

これら機器の製作・据え付けと並行して、2011年3月からのレーザー発振に向け、コミッショニングワーキングチームにより、Beam Based Alignment (BBA) に基づいた電子ビームのコミッショニング方法の具体案の策定作業が精力的におこなわれた。今後、制御モデルの精度向上と制御ソフトの作成、診断機器などの追加・改造などを実施する予定である。

XFEL計画は全体としてはほぼ計画通り進捗しており、2011年3月からの電子ビームとX線レーザーのコミッショニングの開始がほぼ確実なものとなった。

X線自由電子レーザー計画合同推進本部
熊谷 教孝

2-2 加速器建設グループ

2-2-1 オプティックス

オプティックスチームでは、2010年度にはじまるコミッショニングに向け、以下の検討を実施した。

(1) 各チームとの協力の下に、XFELのビームコミッション検討会を約半年かけて15回開催し、電子銃からアンジュレータまで、“どのようにビームを通し”、“何をどう観測し”、“加速器やアンジュレータのパラメータをどう設定していくのか”を詳細に検討した。これにより、調整方法の確立している部分、R&Dを継続すべき部分を明確化するとともに、現設計の変更すべき点などを明らかにし、加速器システム設計へ反映した。具体的には、第一バンチ圧縮器直上流に、飛行時間観測用のビーム位置モニター (BPM) の追加、Beam Based Alignment (BBA) のためのアンジュレータ直上流部のBPM配置および変更と地磁気補正用シールドの追加などをおこなった。

(2) アンジュレータビームライン (長さ約100 m) は、X線波長域で十分な増幅利得を得るため、直線からの歪みが高々 $\pm 4 \mu\text{m}$ しか許されない。高精度でアンジュレータビームラインを並べるため、先行するLCLSでは、電子ビームの直線軌道を基準とし、リング加速器の応答関数解析と同様に、オーバーサンプリング条件を満たすデータを取得し、収束計算により、4極電磁石の設置誤差とBPMのオフセット値を求める複雑で手間のかかるBBA方式を採用している。XFEL/ SPring-8では、真空封止アンジュレータを採用しており、地磁気遮蔽が困難であることから、電子ビームの直線軌道を基準とはできず、ステアリングを有効活用する新たなBBA方式を開発する必要があった。このため、アンジュレータ1台を含む任意のダイポール誤差磁場分布を有する補正区間を、水平・垂直のステアリング電磁石ペアにより平均的に相殺するという考え方に基づくstraightforwardな補正法を考案した^[1~5]。この方法では、18個の補正区間を上流から順次補正していくことができる。計算機シミュレーションの結果、 $1 \mu\text{m}$ の測定精度のBPMを用いることで、理想的な条件で得られるレーザーパワーの8割の性能が確保でき、この方法でXFEL/SPring-8のレーザー調整が十分可能であることがわかった。図1にモンテカルロ計算で得られたアンジュレータビームラインに渡る垂直軌道 (10ケース) を、また図2には、地磁気とアンジュレータ端部にランダムな誤差磁場を仮定したFELシミュレーションにより得られたレーザーパワー (理想的なレーザーパワーを100%とした単位) を示す。

(3) 現状、XFEL線型加速器では、4極電磁石シングレットをベースとしたFODO-likeなビームオプティックスを採用している。このオプティックスにおいて、Quadrupole-Wakefield (QW) による顕著なエミッタンス増大が生じるかどうかの検討をおこなった。その結果、初期エミッタンスが小さいXFEL線型加速器ではQWの影響が従来の線形加速器に比べ小さく、4極電磁石トリプレットで実現できるラウンドビームオプティックスを用いなくともQWによる電子ビームエミッタンスの劣化が無視で

きることを確認した^[6]。

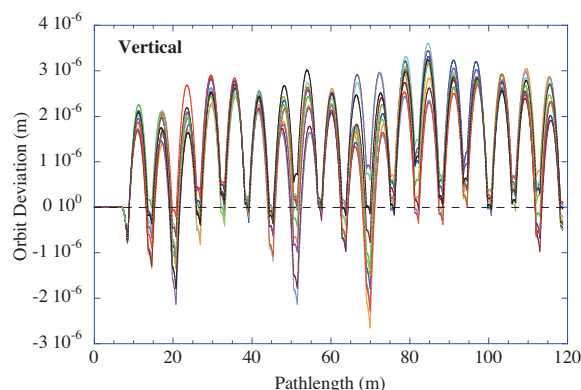


図1 モンテカルロ計算で得られたBBA後のアンジュレータビームラインに渡る垂直ビーム軌道 (10ケース)。地磁気は0.2 Gauss様、アンジュレータ端部に0.8 Gauss・m (1σ) の積分誤差磁場、BPMの測定誤差は1 mm (1σ) を仮定。

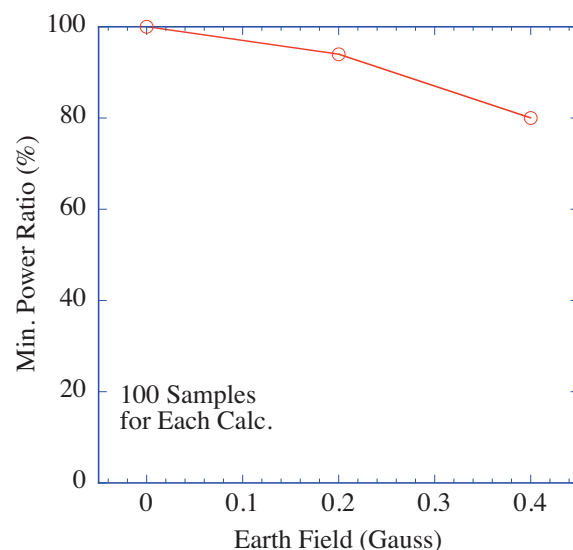


図2 SIMPLEXで得られたBBA後の予測レーザーパワー。縦軸は理想的な条件でのレーザーパワーを基準 (100%) とするユニット。データは100ケースの異なる誤差条件で得られたレーザーパワーの中の最悪値を示す。

参考文献

- [1] 田中均、渡川和晃、原徹：“アンジュレータセクションにおける電子ビーム軌道設定法の検討”、2009年9月30日。
- [2] 田中均、渡川和晃、原徹：“BPM の測定誤差がアンジュレータセクションのBeam Based Alignment (BBA) 精度に及ぼす影響”、2009年10月19日。
- [3] 田中均、渡川和晃、原徹：“BBAの補正性能シミュレーション”、2009年10月26日。
- [4] 田中均、渡川和晃、原徹：“アンジュレータへの入射軌道条件を測定する1組のBPMを結ぶチェーンバーの

地磁気遮蔽の必要性能・BBA精度へ及ぼす影響からの評価”、2009年12月15日。

[5] 田中均、渡川和晃、原徹：“BBA測定時のQM電磁石変調時の磁場中心のシフトの測定値に及ぼす影響に関して”、2009年12月17日。

[6] 田中均、渡川和晃、原徹：“加速管部の収束電磁石系高次の軌跡場抑制の観点から”、2010年1月5日。

加速器建設グループ オプティクスチーム

田中 均

2-2-2 入射部

Lバンドシステムを除く入射部用機器の製作はほぼ終了し、2010年5月中旬より、入射部の組み立てが開始される予定である。電子銃システムについては、入射部への組み込みに先立ち、電子銃部と変調器の高圧試験をおこなう予定であり、その準備を進めている。今回、初めて製作するLバンド加速システムについては、メーカーにおける技術的検討を特に念入りにおこないながら設計・製作を進めており、新設計の大電力RFダミーロードは、組み込み前に単独での大電力RF試験を予定している。

Lバンド加速システムは、SCSS試験加速器において採用されたSバンド加速管に替わって導入された。加速電界の非対称性が生じるRFカップラを、ビームエネルギーが十分に高くなる加速管中央部に有する、定在波ASP型加速管を採用しているため、速度バンチング過程でのエミッタンス増加を最低限にできる。加速管は2本構成とし、各加速管は18個の加速セルと中央のカップラセルより成っている。

Lバンド加速管セルの切削は全て終了し、1号機については、加速管全体のロー付け、および各セルのデインプリングによる周波数調整も完了した。図3は、工場にて完成したばかりの1号機である。表1は、完成した1号機の特徴であり、実測値は、仕様に対して余裕を満たした値であることがわかる。

Lバンド導波管システムには、SF₆などの絶縁ガスを使用しない真空型を採用するため、定在波型加速管からの反

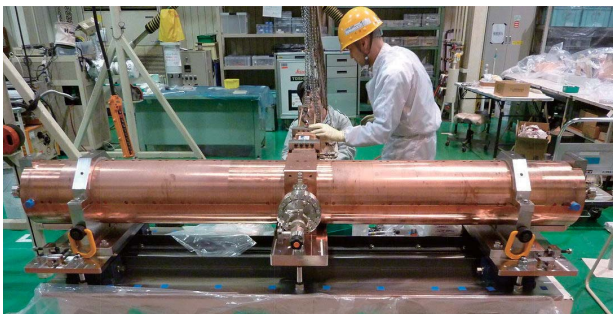


図3 工場にて完成したLバンド加速管1号機

表1 製作されたLバンド加速管1号機の特徴

	仕様	測定値
全長	2.2 m	—
周波数	1,428 ± 0.02 MHz	1,428,000 MHz
無負荷 Q	> 20,000	24,300
シャントインピーダンス	> 30 MΩ/m	32.8 MΩ/m
β	1.5 ± 0.1	1.45
電界一様性	95 %	98.6 %

射波をクライストロンに戻さない役割を担うサーキュレータを使用することができない。そこで、2本の加速管からの反射波が3 db分配器で完全に相殺されるよう、すなわち各加速管入力ポートでのRF位相差が90度になるよう、入念な設計をおこなった^[1]。また、その際に最大4.2 kW（平均）のRFを吸収するダミーロードは、小型・高信頼性を期して新設計のSiCダクト型を採用した^[2]。

完成した導波管コンポーネントを工場内で組み立て、RF特性の測定をおこなったところ、上記のRF位相差は90度の設計に対して測定値は89度であり、きわめて優秀な仕上がりであった。また、ダミーロードのVSWRも、使用予定の温度域内で1.1以下に収まっている。

参考文献

- [1] H. Hanaki et al.: “Construction of Injector System for SPring-8 X-FEL”, IPAC 2010, Kyoto (2010).
- [2] J. Watanabe et al.: “Duct-Shaped SiC Dummy Load of L-band Power Distribution System for XFEL/SPring-8”, IPAC 2010, Kyoto (2010).

加速器建設グループ 入射部チーム

花木 博文

2-2-3 主加速部

主加速部は、2009年3月に完成した400 mの加速器トンネルに加速管、導波管システムの設置、またクライストロンギャラリにモジュレータ電源、クライストロンの設置をおこなった。主加速部は電子入射器から入射される50 MeVの電子ビームを、4台のSバンド加速器と64台のCバンド加速器によって8 GeVまで加速し、アンジュレータ部へと供給する。Cバンド加速器は従来の2倍近い35 MV/mという高い加速電場で運転されるため、50 MWクライストロンを4 m間隔で高密度に配置する必要があり、コンパクトなモジュレータ電源が必要となり、パルストランス部とPFN部を一つのタンクに収めた一体型モジュレータをメーカーと共同で開発してきた。SバンドとCバンド合わせて68本のクライストロンと、そのパルス電源であるモジュレータ電源を量産し、クライストロンギャラリに設置した。各部について、電力の流れに沿って説明する。

(1) 高精度、PFNコンデンサー充電器

三相400 Vを受電し、IGBTインバータによって50 kV直流を発生する。特にXFEL/SPRing-8向けに開発された並列インバータ方式によって30 ppm・rmsという従来の電源から二桁近く優れた安定度が達成されている。

(2) 一体型モジュレータ電源

XFEL/SPRing-8向けに開発したモジュレータ電源である。スイッチ部とクライストロン高圧部を金属製の大型タンクに収納し、絶縁油を充填し、優れた電磁ノイズ遮蔽特性と、湿度などの環境変化に影響を受けない優れた性能を有する。これにより、高度の制御を必要とするデジタル制御系に悪影響を与えないシステムが可能となった。

(3) Cバンドクライストロン

出力50 MWのパルスクライストロン。高周波出力部に3セルの進行波構造を有し、負荷変動に対して安定な動作が可能となった。

(4) RFパルスコンプレッサー

独自のモードコンバータ技術によって、出力150 MWピーク電力に対しても安定な動作が可能となった。

(5) 導波管システム

独自のフランジ構造により、確実に真空と壁電流を封止できる。RFモニター部には、独自開発の方向性結合器と広帯域N型コネクタを採用し生産性を高めるとともに、安定な動作を可能とした。

(6) Cバンド加速管

独自開発のチョーク型空洞を採用し、高次モードを積極的に減衰するために、マルチバンチ運転が可能となっている。

(7) 組立調整実験棟のエージングスタンドにて、4式の大電力試験運転をおこない、加速電界35 MV/mの安定な運転が実証された。



図4 Cバンド加速管128本、Sバンド8本の設置が完了



図5 モジュレータ電源、クライストロン、制御ラックの設置が完了

加速器建設グループ 主加速部チーム
新竹 積

2-2-4 光源

2008年度に引き続き、アンジュレータの製作が進行中である。2010年3月末現在、7セグメントまでがXFEL光源収納部に設置され、8から10セグメントまでが磁場測定並びに磁場調整中である。これらの過程で明らかになった問題点と、その対策などについて以下に述べる。

(1) ベローズシャフト嵌合部の加工方法

磁石列を保持しているアルミニウム製ビームの変形により、無視できない量の誤差磁場が生じていることがわかった。原因を調査したところ、真空内外のビームを連結する“ベローズシャフト”と呼ばれる部品の嵌合部の加工方法が適切でないことが判明し、修正をした。

(2) 局所ギャップ補正用バネシステムの設置

磁石列ギャップを開閉するためのボールねじの設置場所において、ギャップ開閉に伴う局所的なギャップ誤差が確認された。このため、ある特定のギャップで位相誤差が悪化するという問題が生じた。これは、ボールねじおよびそれに付随する機器が、強力な磁場吸引力によって収縮する際の変形量にばらつきがあるためである。この問題を解決するために、バネによる吸引力補正機構を開発し、各セグメントに設置した。本補正より、ギャップ開閉による位相誤差の変動を軽減することに成功した。

(3) SAFALIによるその場磁場測定

XFEL/SPRing-8で採用されている真空封止アンジュレータでは、磁場測定が完了した後、真空槽を設置するために磁石列を一旦取り外す必要があるが、この過程で磁場特性に変化が生ずることが予測される。これを補正するためには、真空槽内に磁石列が設置された状態で磁場分布を精密に測定する必要がある。光源チームでは、この目的のためにSAFALIと呼ばれる新しい原理に基づく磁場測定技術を開発してきたが、これを利用して光源収納部に設置後の

アンジュレータの磁場分布の測定をおこなった。この結果、位相誤差が最大で 10° 程度劣化していることが確認された。一方でこれらの誤差が、3つに分割されている磁石列ユニットごとのギャップのテーパーやオフセットに由来するものであり、ボールねじを微調整することにより容易に補正ができることを確認した。この確立された新手法により、全セグメントの測定、調整がおこなわれる。

加速器建設グループ 光源チーム
田中 隆次

2-2-5 ビーム診断

ビーム診断チームは、2008～2009年度までにビーム位置モニター (BPM) [1]、ビーム射影断面構造観測用のプロファイルモニター (SCM)、ビーム電流モニター (CT) などのXFELのための実用試作機を開発して、SCSS試験加速器にて性能を試験し、良好な結果を得た[2, 3]。達成したモニターの機械精度は、数十 μm で、BPMのビーム位置の測定精度は300 nmである。開発したモニターは、おおむねXFELに必要な要求精度を満足している。加えて、電子ビームのパンチ長測定器の開発も順調に進めており、後述するRFデフレクター空洞のほか、パンチ圧縮機の双極電磁石からのコヒーレント放射光 (CSR) を利用したもの、ストリークカメラでSCMから放射される遷移放射光 (OTR) を観測する装置などを用意している[3]。以上を基に2009年度に、これらのビームモニターを量産して、XFELの電子リニアックおよびアンジュレータビームラインに設置をおこなった。リニアックの方は設置がほぼ終了し、アンジュレータビームライン部の設置を鋭意進めている状況である。設置の例を図6に示す。これは、加速管の間の4極集束電磁石と対になったBPMとCTの設置状況である。この加速器における設置では、収束電磁石の磁場中心とBPMの電気的な中心が、百 μm 以内、アンジュレータ区間では数十 μm 以内で一致することが要求されている。この設置精度を実現するためには、従来より使用されている4極電磁石の磁場によるビームの軌道を模擬するフローティングワイヤー法を採用した。この方法では、ワイヤーを4極電磁石とBPMのビームホールに通して張り、ワイヤー上に数kHzの信号と位置検出BPM空洞の共振周波数である4760 MHzの高周波信号を同時に流した。1 kHz信号での4極電磁石の磁場によるワイヤーの振動を4760 MHzの高周波信号をBPMで検出することで、BPMの電気中心と4極電磁石の磁場中心の関係を求めた。この関係から、最終的にBPMの電気中心と4極電磁石の磁場中心が前記の要求設置精度になるように、両機器の位置調整をおこなった。現状で我々は、加速器で必要な100 μm 以内の設置精度を十分に実現できた。さらに、電子ビームの時間方向構造を測定するためには、電子ビームをストリークカメラ

のように振るHEM11-モードのRFデフレクター空洞の開発を進めた。ほぼ所定の性能で空洞の製作が終了しつつあり、大電力試験に向けて機器の整備を進めている。このように、XFELの実現に向けたビームモニター系の建設は、順調に進んでいる。

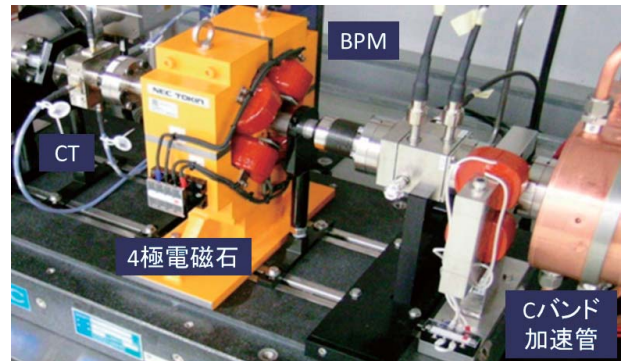


図6 Cバンド加速管の間に設置された、4極電磁石、BPMおよびCT。

参考文献

- [1] H. Maesaka et al.: "Development of the RF Cavity BPM of XFEL/SPring-8", Proceedings of DIPAC'09, Switzerland (2009).
- [2] H. Maesaka et al.: "Development Status of the Beam Diagnostic System for XFEL/SPring-8", Proceedings of the 6th Meeting of the Particle Accel. Soc. of Japan, Tokai (2009).
- [3] S. Matsubara et al.: "Development and Construction Status of the Beam Diagnostic System for XFEL/SPring-8", Proceedings of IPAC'10, Kyoto (2010).

加速器建設グループ ビーム診断チーム
大竹 雄次

2-2-6 タイミング・高周波

タイミング高周波チームの2009年度の主な進捗は、2008年度に試作した恒温化用19インチラックに納められたタイミング・低電力高周波機器を量産し、加速器のクライストロンギャラリーに設置がほぼ終了したことである[1]。これらの機器は、加速器のタイミング・基準高周波源である、マスターオシレーターからの信号を受ける光高周波受信機、その信号からCバンド大電力クライストロンの駆動高周波パルスを成型するIQ変調器、クライストロンを駆動する500 W 半導体高周波増幅器、加速管やクライストロン出力の高周波をモニターするIQ検出器、クライストロンモジュレータなどの機器の動作タイミングを決めるVMEトリガー遅延モジュールなどである[1]。前記の機器において、要求されている高周波信号の長・短期の電力安定度であるが、試作機で一部の部品に1桁位届かないものがあるが、

ほぼ要求の 10^{-4} を実現している。またこの機器の長・短期の位相安定度は、要求である50~100 fsをほぼ実現している。しかし、電力安定度と同様に、一部の機器で1桁弱届かないものがある。この場合の環境温度安定度の条件は、開発した19インチ恒温化ラックを使用して達成している、0.1~0.2 Kの温度変動である^[2]。現状では、この性能の量産機を製作・設置完了している。そのラック機器のクライストロンギャラリーへの設置状況を図7に示す。引き続き要求性に機器を近づけるように、検討および改良を進めている。

加速器に沿って設置した低電力高周波ラック機器を駆動するために、マスターオシレーターの基準高周波信号が分配されるわけであるが、そのための位相安定化光ファイバー（光路長の温度係数、2 ppm）を使った信号線路の設置を進めた^[2]。この光ファイバーは、0.1 K以内の温度制御性能を示している恒温ダクトに収納された^[1]。光ファイバーの設置とともにこのダクトの設置もほぼ終了している。現状では、以上と同様の作業を、光源棟のビームモニターを中心とした水冷恒温化19インチラック機器に対しておこなっている。



図7 XFEL加速器棟クライストロンギャラリーのタイミング・低電力高周波ラック機器の設置状況

参考文献

- [1] H. Maesaka et al.: "Recent Progress of the RF and Timing System of XFEL/SPring-8", ICALEPCS2009, Kobe (2009).
- [2] N. Hosoda et al.: "Construction of a Timing and Low-level RF System for XFEL/SPring-8", Proc. of the 1st International Particle Accelerator Conference, Kyoto (2010) 2191-2193.

加速器建設グループ タイミング・高周波チーム
大竹 雄次

2-2-7 電磁石

XFELで使用する電磁石は、2009年度で製作がほぼ完了し、加速器部については電磁石の設置をおこなった。蓄積

リングと異なり、線型加速器では加速によって増大するビームエネルギーに合わせ、磁場を強くしていかなければならない。よって、電磁石も少量多品種となる。製作した電磁石は、磁気レンズ2種類10台、4極電磁石5種類114台、偏向電磁石7種類28台およびステアリング電磁石5種類121台である。電磁石ヨーク材の選択肢はいくつか考えられるが、XFELの電磁石は基本的にDC励磁で用いるため、コスト面からステアリングを除き、電磁純鉄ブロック材をヨークに採用している。電磁石製作後の磁場測定の結果、磁場の時間変化率の履歴が異なると、純鉄ブロック材の場合、渦電流によって残留磁束密度が変化し、励磁特性に与える影響が無視できないことがわかった。加速器運転時の磁場再現性を確保するためには、パターン励磁が必須であり、励磁パターンの決定と磁場データの取得をおこなっている^[1]。ステアリングについては、ビーム軌道フィードバックなどで磁場を頻繁に変化させることを考慮し、残留磁場、ヒステリシスを小さくするためパーマロイをヨークに採用した。磁場測定の結果、ヒステリシスは 10^{-4} 程度に抑えられており、パターン励磁なしでもよい磁場再現性が得られている^[1]。

電磁石電源の製作についても、2009年度でほぼ完了し、最終組み込み試験をおこなっている。電源安定度やリップルなどの詳細な測定をおこない、仕様を満たしていることを確認した^[2]。今後は、上位制御系やインターロックとのつなぎ込みおよび動作確認をおこなう予定である。

参考文献

- [1] Y. Kano et al.: "XFEL Electro-Magnets and Their Excitation Characteristics", 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, Himeji (2010) 4-6.
- [2] H. Takebe et al.: "Test Operation of Magnet Power Supply and Control System for XFEL/SPring-8", 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, Himeji (2010) 4-6.

加速器建設グループ 電磁石チーム
原 徹

2-2-8 真空

加速器棟で真空機器の組立作業が実施された。超高真空領域の真空を目標とする加速器は、クリーンな環境で組み立てる必要がある。据付・組立てに先駆け、加速器トンネルの空气中に浮遊するパーティクルの粒径分布計測および電子顕微鏡観察、ラマン分光、赤外分光、エネルギー分散型X線分光法による成分分析を実施し、主なダストが人に起因するタンパク質やセルロースであることを確認した。これに加え、SPring-8所内各所で空気清浄度を調査し、加速器周辺の真空作業の実績から清浄度目標値をISO class8

とした。この目標を達成するために、静電防止フィルムのパーティションで、加速器トンネル内を隔離し、組立作業場所はHEPAフィルター式空気清浄機で清浄化した。また、常時パーティクルカウンターでモニターし、アンカー打設やはんだ付け作業により環境が悪化する場合は真空作業を中止した。

Cバンド、Sバンド、Lバンド用ADESYフランジやビームライン用ハイブリッドフランジおよび精密プレス無酸素銅ガスケット、位置決めピン、DLCコーティング高強度ボルト・ナットで構成されるXFEL用に開発されたADESY面タッチ真空フランジシステムにおける据付時のリーク発生は皆無であり、本フランジシステムの有効性が確認された。光源棟においても真空機器組立作業が開始された。



図8 組立作業の様子

加速器建設グループ 真空チーム
備前 輝彦

2-2-9 機械制御

2009年度は、XFEL加速器棟クライストロンギャラリーにおいて、実環境でのVMEシステムを用いた大電力高周波、真空および精密温調系PLCの動作確認をおこない、FL-net経由でデータベースへのデータ収集ができることを確認した。高周波系と真空系に関して、1枚のFL-netカードを共用で使用するため、VME側ではSolaris 10のコンテナを利用した仮想環境を立ち上げ、それぞれを独立して管理できることを確認した。タイミングおよび低電力高周波系の制御に関しては、エージングスタンドでの構成をベースに、一部のSolaris 10用デバイスドライバーの不具合の修正をおこない、正常に動作することを確認した。

光伝送ボードは、ローカルでの操作を可能にするロジックの組み込みと、挿入光源で使用する電磁石電源とを組み合わせテストをおこない、電流値の設定、読み出しが

できることを確認している。ローカルでの操作に関しては、いくつかの不具合が見つかったため、2010年度も引き続き不具合の修正をおこない、修正されたボードを電磁石電源に組み込むことを予定している。

SCSS試験加速器において、ビームモニター用の共有メモリーを用いた同期型データ収集系と、XFEL実機に使用するインタラプト・レジスターボードを組み合わせ、ビームに同期したデータにショット毎のイベント番号を付加してデータ収集ができることを確認した。また、同期型データ収集系の運用をおこない、安定して動作することを確認できている。

加速器建設グループ 機器制御チーム
福井 達

2-2-10 据付・アライメント

2009年3月末の竣工直後に据付作業を開始した。はじめに、XFEL建設グループで開発された“ゆかとけんさく”による床面研削作業をおこなった。この目的は、機器の脚部に使用するエアパッドのため(電子銃・クライストロンタンク75台・石定盤26台)と、架台底面と床面との接触面積を増やし共振周波数を低くするため(コージライト架台16台・加速管鋼管架台272台・Q電磁石架台37台・アライメントアンジュレータ)である。これにより、平面度50 μm 表面荒さ30 μm 程度の水平なコンクリート平面が得られた。研削エリアは延べ600ヶ所、180 m^2 であった。研削作業は、クライストロンギャラリー部から開始し、7月中旬にすべて終了した。

研削面上に加速管架台・加速管を設置して振動測定をおこない、冷却水通水時の加速管の振動幅を推定した。測定した結果は許容値より1桁低く、水平方向は0.2 μm 、垂直は0.1 μm 程度(r.m.s)であった。

研削作業が終了した部分より、順次据付作業が開始された。クライストロンギャラリーの制御ラックの設置工事および収納部内のアンカー打設作業が6月、加速管の据付作業が8月、さらにIDの据付作業が11月からはじめられた。2009年度末の段階で、加速器棟の75%、光源棟の40%の据付作業が終了している。

ここで、Cバンド加速管部を例にして据付作業の流れを紹介する。まず、据付基準線と収納壁導波管貫通口中心線との交点の床部マーク点を基準に、基準線やアンカー位置をコンクリート面上に罫書く。罫書きに従ってアンカーを全て打設した後、壁貫通導波管を挿入し、壁面部の各種架台類と重量物であるSLED(パルスコンプレッサー)を取り付けた。次に、加速管鋼管架台を床に設置して粗アライメントをおこない、加速管を据え付けた。その後レーザートラッカーを使用して加速管の精密アライメントをおこなった。引き続き導波管・真空機器類・サポート類を取り付

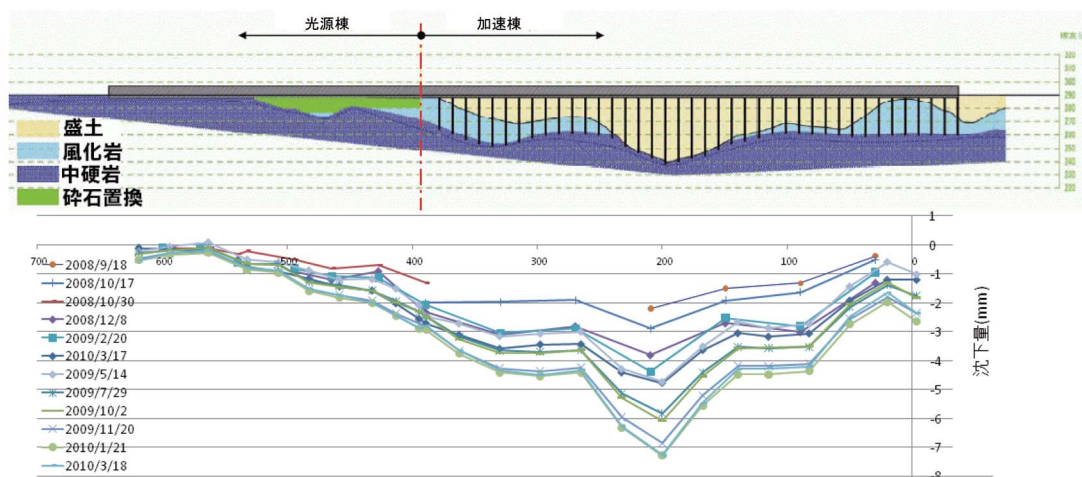


図9 XFEL棟建屋基礎部断面と2008年7月を基準とした収納部床面の沈下の履歴。加速器棟部はコンクリート杭で中硬岩層から支持しているが、盛土層の厚さに比例した沈下が見られる。

けて、壁外のクライストロンモジュレータタンクまで接続する。最後に全ての真空機器を締結し、冷却水配管作業をおこなった。作業は、2チームが1セクションずつ（加速管8本分、全部で16セクション）おこない、1つのセクションの作業終了まで約1ヶ月要した。

XFEL棟の建屋においては、床面の沈下が予測されていたので、約30 mおきに設置した水準点鉤の変位計測をおこなった。その結果、加速器棟の中央付近では、平均して月0.2 mm程度の沈下が継続的に起きているが、光源棟の沈下は小さいことがわかった。そのため、加速器棟内の据付は、まず沈下の少ない下流部からはじめて次に上流部をおこなった。2010年度は中央部においての据付をおこなう予定である。

加速器建設グループ 据付・アライメントチーム
木村 洋昭

2-2-11 電子ビーム輸送系

XFEL線型加速器からの8 GeV高品質電子ビームをSPring-8蓄積リングに導くため、電子ビーム輸送系(XSBT)

は2008年度末に主要機器を設計・発注し、2009年度に電磁石、真空チェンバー、モニターなど主要機器の製作をおこない、年度末に納入された。2010年度以降に据付が計画されている。

また、2009年度は、XSBTの末端と既存のシンクロトロンと蓄積リングを結ぶビーム輸送系(SSBT)との合流部の設計をおこなった。SPring-8の現状の入射器である線型加速器、シンクロトロンからのビーム入射を今と同様にできるよう、既設のSSBTの電磁石は動かさずにオプティックスを保持し、XFEL線型加速器からのビームを入射するための電磁石の追加をおこなった。また、XFEL線型加速器のビームもSSBTダンプラインに導き、XSBT単独での調整運転やエミッタンス測定などをおこなえるようにした^[1]。

XSBT とSSBT には多数の水平、垂直方向偏向電磁石があり、ここで発生するCoherent Synchrotron Radiation は、バンチ内の Longitudinal 方向にエネルギー偏差を与える。これにより、バンチ長は伸び、エミッタンスも悪化する。そこで、これらのパラメータの変化をトラッキングコード“elegant”で計算した。結果を図10に示す。入射ビームのバンチ長を100 fs、Energy spreadを0.1%、入射

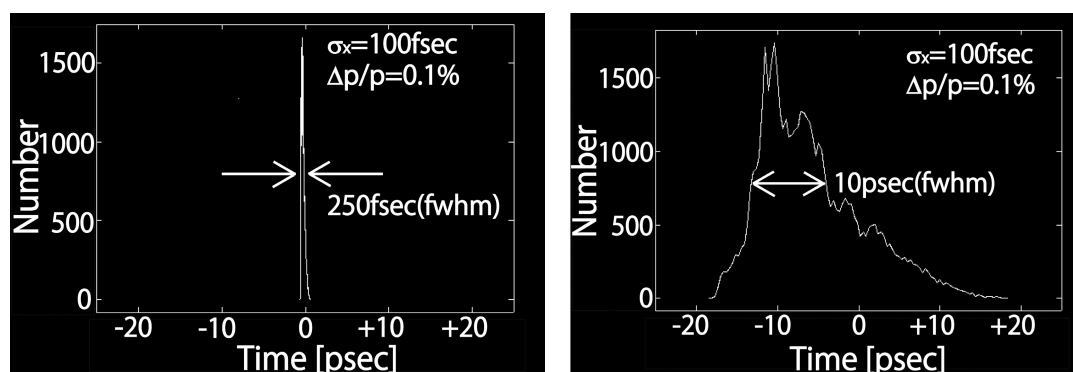


図10 バンチ長の計算結果。XSBT末端（左）とSSBT最下流（右）。

エミッタンスを0.04 nmradとした場合、パンチ長はXSBT末端（SSBT合流点）では250 fs、SSBT最下流（蓄積リング入射点）では10 psと伸び、エミッタンスも増大した。既存のSSBTの改造が必要であることがわかった^[1]。

参考文献

- [1] K. Fukami et al.: “Beam Transport from XFEL-Linac to Storage Ring in SPring-8”, 第7回加速器学会年会、姫路(2010)。

加速器建設グループ 電子ビーム系輸送チーム
大石 真也

2-2-12 建設

(1) XFELビーム輸送トンネル

ビーム輸送トンネル（2008年10月工事開始）は、杭基礎工事およびスラブコンクリート打設を4月に完了、遮蔽コンクリート打設を10月に完了、嵩上げコンクリート打設を11月に完了した。屋根・外壁折板張り工事は12月に完了、2009年3月より着手していたトンネルを跨ぐ橋梁部は11月に完了し、12月より部分使用を開始した。電気設備工事、機械設備工事は2月中に完了し、各種検査の後、3月26日に竣工検査を実施した。



図11 XFELビーム輸送トンネル

(2) XFEL実験研究棟

実験研究棟（2009年3月工事開始）は、実験ホールラブルコンクリート打設を6月に完了、スラブコンクリート打設を7月に完了、光学ハッチ遮蔽コンクリート打設を10月に完了、嵩上げコンクリート打設を12月に完了した。鉄骨工事、および屋根・外壁折板張り工事は12月に完了、エントランスホールのカーテンウォール工事は2月に完了した。電気設備工事・機械設備工事は、機器搬入据付を2月に完了し、受電後試運転調整をおこなった。

加速器建設グループ 建設チーム
板倉 早苗



図12 XFEL実験研究棟

2-3 加速器研究開発グループ

加速器研究開発グループでは、SASE-FELをより高い性能へ向上させるための研究開発を実施している。主なる項目を順に述べる。

(1) シーディング技術の開発

X線波長のシーディング技術の実現のためには、高品質電子ビームの振る舞いについて、理論的かつ実験的に研究し、深く理解しておく必要がある。電子ビームの種々の特性のうち、エネルギー分散がシーディング性能に大きく影響するため、最も静寂な電子ビームを供給できると予想される熱電子銃をSCSS試験加速器ならびにXFEL/SPring-8にて採用してきた。最近、米国のスタンフォードに建設されたLCLSにおいて、電子ビームのプロファイルモニターから異常に強い光が放射される現象が観測され、コヒーレントOTRによるものであろうと議論されている。この現象が観測されるということは、電子ビームに可視光波長に相当する電子密度の変調が存在することを示しており、これが電子源に起因するものであるかどうか国際会議などにおいて議論の対象となっている。すなわち、光カソードを用いた諸外国の電子源では、レーザー装置内部にてレーザー光にミクロな時間変調が発生しており、これが光電子放出によって、電子ビームの密度変調に変換され、RF-Gun方式の電子銃の中でパンチ圧縮する際に光の波長に変換され、これが加速器内を輸送され、金属箔を用いたOTRスクリーンや、YAGスクリーンにて電磁放射に変換されているとの見解である。これが事実であれば、電子ビームに内部構造が存在することとなり、下流のアンジュレータから発生するX線に不要な密度変調が存在し、FEL光の性能を劣化させることとなる。特に心配されるのは、コヒーレントX線イメージングに応用する際に、その干渉距離が短くなるために、散乱イメージのコントラストの低下や不要な密度変調により、位相回復が困難となる事態である。

熱電子銃を用いたSCSS試験加速器では、次に述べるパンチ長の測定技術開発において、異常な光が観測されておらず、不要な密度変調のない、なめらかな電子ビームが得られているとの確証を得ることができた。今後、パンチ圧縮器の

上流にて、可視光のレーザー光を用いて、人為的な密度変調を加える実験をおこない、電子ビームの反応から、電子の熱エネルギーや分布関数などの基本的な電子ビームパラメータを観測する実験を計画している。

この結果をもとに、1 ÅのX線波長でのシーディングシステムを設計する予定である。

(2) バンチ長リアルタイム計測技術の開発

2008年度におこなった、先行技術の習得のため、DESYの研究者との意見交換、問題点の議論に基づき、ビームモニターグループとの協力によって、コヒーレントな軌道放射の赤外線領域をパイロ検出器にてパルスごとに計測する手法の開発をおこなった。SCSS試験加速器にてバンチ長を変化させながら、赤外線領域の放射電磁波強度を測定し、バンチ長との線形関係を観測できた。なお、実験中にバンチ圧縮比を大きく変化させ、OTR放射を観測したが、LCLSにて見られたような、異常放射は全く観測されず、熱電子銃が安定で高品位な電子ビームを供給しているという確証を得ることができた。

加速器研究開発グループ
新竹 積

2-4 制御系建設グループ

(1) ビームライン制御チーム

ビームライン制御システムでは、挿入光源制御系の詳細なシステム設計を完了した。挿入光源の実機を使ったテストベンチを構築してシステム評価をおこない、良好な制御性を確認した。2009年度後半には、挿入光源制御システムの工場試験が始まり、順調に構築が進んでいる。電磁石制御システムとして新たに開発したVME用iDIOボードは、評価試験を終え実際に運用できる状態となっている。フロントエンドから下流の制御システムとして、BL3制御システム、BL1制御システム、実験ステーション制御システムおよび利用系DAQシステムの取り扱い点を決定し、ネットワークの設計をおこなった。また、ビームラインコミッショニングまでのタイムラインを確定し、制御システムの発注手配を開始した。加速器制御および利用系DAQにおいて、必要となる同期データ収集系のプロトタイプシステムを完成し、SCSS試験加速器に導入して良好な結果を得た。加えて、ビームライン持ち込み機器で、電子ビームと同期する同期型実験を容易に実現するためのビームタグ分配のスキームを確定した。今後は、同期型ADCや高速デジタイザの評価と併せて試験を継続していく。

(2) 施設機器制御チーム

従来の加速器施設では、施設制御系は加速器制御系からの直接制御対象とはみなされていなかったが、XFELでは電子ビームは電気・冷却水などの施設系状態のごくわずかな変動にも敏感であり、安定なレーザー発振をおこなうた

めに、施設制御機器を加速器制御系の一部として建設された。加速器制御系から、施設機器のモニターや、特に加速管の冷却水を制御するためのシステム開発と実装をおこなった。2009年度は、施設系データ264点のモニターを開始し、それらデータはXFELのデータベースに蓄積されることにより参照することが可能となった。その他、加速器収納部建設時から別システムにより収集されていた地盤変動のデータもMADCOCAフレームワークに取り込み、過去のデータもデータベースからも参照できるようになった。

(3) インターロックチーム

インターロック関係では、RF、GUNの停止信号を伝達するための停止モジュール約90式が納入された。また、光源棟インターロックの制作が進められ、予定通り完成できる見通しとなった。2010年秋には、加速器棟と光源棟の入退管理システムと併せて、インターロック機能を運用する予定となっている。また、XFELビームラインインターロックシステムも、2010年度内の完成に向けて、順次、検討と設計が進められた。

(4) 施設運転チーム

施設運転チームは、加速器や光源に影響を与える床面変動のデータ収集をおこなうとともに、加速器の据付開始にあたり電源電圧の確認、マシン用冷却水の温度、圧力及び流量の最適化を目指した運転調整、加速器トンネル、アンジュレータホールおよびクライストロンギャラリーなどの空調温度の調整をおこない、エージング運転に向けた準備をおこなった。

制御系建設グループ
田中 良太郎

2-5 安全設計グループ

加速器棟および光源棟建屋の完成に伴い、構築されたダクトおよびピットなどの漏洩線量評価をおこない、またSpring-8敷地境界線量の詳細検討など放射線発生装置使用変更許可申請のための検討を開始した。加速器機器配置などの最終決定に基づく放射化評価の詳細計算を順次実施し、加速器冷却水、加速器収納部内空気、およびダンプ周辺土壌の放射化生成量が少なく環境に影響がないことを確認した^[1-3]。また、XFEL施設放射線監視モニターシステムの設計を完了するとともに、順次整備を開始した。現在は、放射線モニターや管理区域内、加速器および光源収納壁内への出入制御を含めたXFEL加速器安全インターロックシステムを制御グループと共同で構築している^[4]。

XFEL施設では、放射線防護とともにアンジュレータに用いられている永久磁石の減磁を防止するために、加速電子ビーム損失を極力減らす必要がある^[5]。そのため、アンジュレータに入射する加速電子ビームの拡がり異常を検

知するためのダイヤモンド検出器を用いたビームハローモニターを引き続き開発している^[6]。また、電子ビーム損失位置などを検知するため、2次荷電粒子によるチェレンコフ光を利用したグラスファイバー製ビームロスモニターの特性評価をSCSS試験加速器で実施し、良好な結果を得ている^[7,8]。これら2つのモニターをXFEL/SPRING-8に装着するよう準備を進めている。

ALARA（合理的に達成可能な限り低く）精神に基づく客観的評価を得るため、外部有識者によるXFEL安全性検討委員会を1回開催し、敷地境界線量、およびXFEL放射線安全インターロックについて検証を受けた。

参考文献

- [1] Y. Asano : "Shielding Design of the SPRING-8 XFEL facility", 5th International workshop on Radiation Safety of Synchrotron Radiation Sources, Italy (2009).
- [2] Y. Asano : "Characteristics of the Radiation Safety for Synchrotron Radiation and X-ray Free Electron Laser Facilities", 3rd Asia Oceania Regional Congress of International Radiation Protection Association, AOCRP 3, Tokyo (2010).
- [3] T. Itoga, Y. Asano and Y. Tanimura : "Response Function of a Superheated Drop Neutron Monitor with Lead Shell in the thermal to 400MeV Energy Range", 3rd Asia Oceania Regional Congress of International Radiation Protection Association, AOCRP 3, Tokyo (2010).
- [4] N. Nariyama, T. Matsushita, H. Aoyagi, M. Kago, C. Saji, R. Tanaka, T. Itoga and Y. Asano : "Concept of Radiation Monitoring and Safety Interlock Systems for XFEL/SPRING-8", International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto (2010).
- [5] Y. Asano, T. Bizen and X.-M. Marechal : "Analyses of the Factors for Demagnetization of Permanent Magnet Caused by High Energy Electron Irradiation", Journal of Synchrotron Radiation, Vol. **16** (2009) 317-324.
- [6] H. Aoyagi, T. Bizen, N. Nariyama, Y. Asano, T. Itoga, H. Kitamura and T. Tanaka : "Feasibility Tests of the Beam Halo Monitoring System for Protecting Undulator Permanent Magnets Against Radiation Damage at XFEL/SPRING-8", International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto (2010).
- [7] T. Itoga, Y. Asano and X.-M. Marechal : "Fiber Beam loss Monitor for the SPRING-8 X-FEL; Numerical Study of its Design and Performance", International Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto (2010).
- [8] X.-M. Marechal, T. Itoga and Y. Asano : "Fiber Beam loss Monitor For the SPRING-8 X-FEL ; Test Operation at the SPRING-8 250MeV Compact SASE Source", International

Particle Accelerator Conference (IPAC'10), Kyoto (2010).

安全設計グループ

浅野 芳裕

2-6 利用グループ

利用グループは、ビームライン建設チーム、データ処理系開発チーム、SCSS試験加速器利用チームの3チームから構成され、FEL利用に関連するR&D・建設・機器整備を担当している。本節では、ビームライン建設チームとデータ処理系開発チームの進捗状況を示し、SCSS試験加速器利用チームの報告は、第3節に記す。

利用グループは、2007年度より利用ワークショップを継続的に開催し、文科省のXFEL利用推進課題を中心とする利用者・研修者との連携を図っている。2009年度は、「第4回XFEL利用ワークショップ」と題し、2010年3月3日、東京にて約60名の会合を開催した。今回は、XFEL実機の利用の検討とともに、2008年5月より開始されたSCSS試験加速器の利用に関する報告会もおこなった。

2-6-1 ビームライン建設チーム

2009年度は、XFELビームライン BL3 のコンポーネント（ビームライン光学機器、輸送系コンポーネント、放射線遮蔽ハッチ、フロントエンド機器）の設計・製作が進められた。特に、主要コンポーネントである二結晶分光器について、重要な要素技術であるヒンジステージの駆動試験が継続しておこなわれ、設計目標であったサブマイクロリアンの分解能・安定性が確認された。並行して、冷却系の設計、結晶保持ケージの歪み解析、分光結晶の無歪み保持試験も進められた。また、ポンプ・プローブ実験をおこなうためのフェムト秒同期レーザーおよびタイミングシステムについて、仕様の取り纏めがおこなわれた。

また、XFELビーム診断システム、オペティックスに関する研究開発がおこなわれた。ビーム診断システムとしては、フォイルからの後方散乱を利用した、強度・位置モニターのテストをおこなった。ビーム位置に関する応答性を解析した結果、後方散乱成分には、コンプトン散乱・弾性散乱に加え、フォイルの材質によって粉末回折の影響が顕著であることがわかった。CVDダイヤモンドナノ結晶をターゲットに用いることにより、高い線形性および数ミクロン程度の重心感度が確認され、この結果をもとにしてモニターの最終設計がおこなわれた。また、放射光ビームラインでは簡便な強度モニターとしてイオンチャンバーが広く用いられているが、XFELでは、電荷の再結合の影響により強度の線形性が確保されていない。このために、ガスのX線散乱をフォトダイオードで検出するタイプの小型強度モニターの試験をおこない、設計通りの結果を得た。オペティックスとしては、薄型シリコン結晶の試験研究を大

阪大学と共同でおこない、プラズマエッチングにより機械加工歪みが完全に除去されることが確認された。

利用グループ ビームライン建設チーム
矢橋 牧名

2-6-2 データ処理系開発

本チームは、施設側で提供するX線2次元検出器の開発、および施設側検出器とユーザー持ち込み検出器をシームレスに統合し、データを保存・解析できるデータ収集 (Data Acquisition: DAQ) システムの開発をおこなっている。2008年度は、試験研究をおこない、Multi-port Charge Coupled Device (MPCCD) 検出器を最初の実験に投入する安定システムとして、またより安価で高機能なセンサーとして期待できるSilicon-on-Insulator (SOI) 検出器を先進システムとして選定した。2009年度は、MPCCD検出器において実際にデバイスを設計製造し、性能試験も一部終了した。その結果、プローブテストによって、設計予測値の歩留まり製造ができていることを確認した。2010年度は、このセンサーを実際にカメラシステムに接続し、詳細な性能試験と耐久性試験をおこなったのち、量産をおこなう。もう一つの検出器であるSOIセンサーについては、電荷を必要なだけ分割して読み出すMulti-via検出方式を考案し、試験センサーを試作した。試作チップの試験結果から、電荷を分割して読み出すMVIA原理が動作していることを確認することに成功した。これにより試験研究段階は終了し、2010年度からプロトタイプ開発に取り組むことになった。2009年度の後半からは、DAQについての実装を開始した。まず、要素技術であるデータ前処理技術、データ転送技術、データ保存技術について試験研究をおこなった。その結果、データ前処理技術については、FPGAによる圧縮処理が原理的には可能であることがわかった。また高速データ収集

用のフレームワークについて検討し構築をおこなった。データ転送については、ストリーム技術とデータベース技術を融合させた新しいリアルタイム・ストリーム・データベース技術を確認し、これを採用することとした。これにより、欠損なくリアルタイムデータ転送可能で、かつ直前のデータ以外の古いデータも取得できる (プレイバックできる) システム構築が可能となった。データ保存技術については、60 Hz運転時に必要とされる480 MB/sec以上の書き込みが安定しておこなえるかどうかをテストベンチ環境で試験した。その結果、必要とされる性能のストレージシステム構築が可能であることを確認した。2010年度は、これらを実際に組み上げシステムとして動作させるほか、ユーザーが利用するアプリケーション群を開発し、早期に高度な利用

表2 Multi-port CCD検出器の仕様と目標性能

ピクセルサイズ	50 μm $\times$ 50 μm 100 μm $\times$ 100 μm (2 $\times$ 2 binning時)
動作温度	0 $\sim$ 50 $^{\circ}\text{C}$
検出効率	80 % @6 keV, 20 % @12 keV
システムノイズ	フレームレート60 Hzにおいて330電子以下 (0.2 ph@6 keV)
最大信号量	ピクセルあたり 5×10^6 電子以上 (3100 ph/pixel/frame@6 keV)
フレームレート	外部信号と同期して動作した条件で、60 Hz以上
暗電流	20 $^{\circ}\text{C}$ において600,000電子/ピクセル/秒以下
暗電流の均一性	暗電流の標準偏差が暗電流の平均値の ± 10 %以内
タイル時の不感領域	不感領域が300 μm 幅以下 (2 $\times$ 2 binning時で3ピクセル相当)
X線照射耐性	12 keVのX線 10^{14} 光子/ mm^2 以上

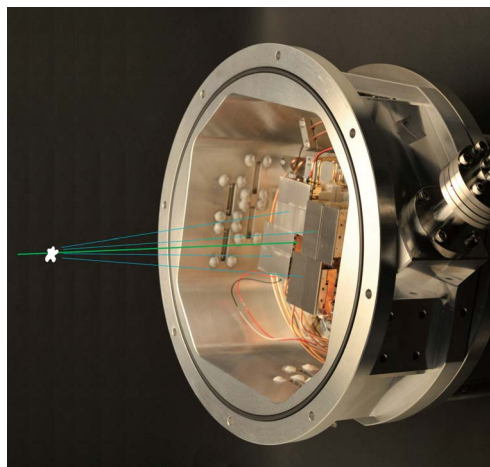


図13 MPCCDセンサー (左) と組み立て中のMPCCD検出器と実験のイメージ (右)。試料に当たって回折されたX線はセンサーによって検出される。入射X線と極小角の散乱X線は検出器の中央部の穴によって下流側に導かれ、下流に設置されるもう一組の検出器で検出される。

実験を可能にする。

利用グループ データ処理系開発チーム
初井 宇記

3. SCSS試験加速器の進捗状況

SCSS試験加速器は、我が国独自の方式でのコンパクトなXFEL建設の実現可能性評価を目的として2005年に建設された。2006年にレーザー増幅に成功、2007年に極紫外(EUV)領域のSASE-FELの出力飽和を達成した。2007年10月から、EUV-FEL光の試験的利用がおこなわれ、2008年5月から公募による本格的な利用が開始された。EUV-FELの利用目的は、XFEL利用のR&DとEUV領域の新しいサイエンスの開拓である。2009年度も、XFEL加速器のコンポーネントのR&Dおよびユーザー運転がおこなわれた。本節では、SCSS試験加速器の運転状況と利用に関する進捗状況について述べる。

3-1 SCSS試験加速器の運転状況

2009年度も、SCSS試験加速器の運転は概ね順調におこなわれた。2009年度の総運転時間は1821時間、そのうちの899時間が利用実験に供され、ダウンタイムは81時間、全利用時間の4.4%であった。ダウンタイムを生じたトラブルの内訳を図14に示す。電子銃のfaultが減った反面、RFモジュレータに関するfaultが増加した。また、レーザー調整の時間超過がユーザータイムを圧迫していることが分かる。この理由は主に、新しい運転員への引き継ぎと後述する電子銃のエミッション不良によるものである。停止期間中に発生したため統計にカウントされていない大きなトラブルとして、加速器冷却水用冷凍機の空冷ファンの損傷があった。運転を優先するため、8ユニットあるチラーのファンを全数、プラスチック製から金属製へ交換し、破損したファンのローターを支えるステムを交換し、最短で運転を再開した。今回のトラブルは、ステム構造の脆弱性の他に、0.1℃以下の冷却水温度精密制御にファンのon/off制御を用いているなど、根本原因がシステムの基本設計にある。長期的には、冷却水の安定供給に向け、ステムに過度の応力が発生しないような構造や、制御スキームの抜本的変更が必要と考えられる。運転開始から2年が経過したカソードのビームエミッションの急激な低下現象も、2009年度の後半から見られるようになった。ヒータパワーを増加することでエミッション電流は一時的に回復するものの、レーザー出力の連続飽和状態を維持するのは極めて困難な状況となった。これにより図14に示すように、大幅な調整時間超過が発生した。安定で高品質のレーザー供給を考えると、カソードの交換は2年を目安とすべきである。

XFELに向けたR&D項目は、ほとんどが2009年度で終了した。具体的には、実機に使用するCTの処理回路の性

能確認、パイロ検出器によるパンチ長に相関したCSR強度の観測、アンジュレータビームラインの直前に設置するハローモニターシステムの開発、スクリーンモニター画像取得システム開発などが主に実施された。実機の長期的性能向上の視点から、短波長領域でのシードFELの基本技術確立を目指し、60 nmの波長におけるシードFELのR&Dも平行して進められた。

2009年秋には、SCSS試験加速器の運転制御システムを合理化した上で、XFELの運転制御システムと共通のシステムに更新した。この目的は、来年度にSCSS試験加速器運転グループがXFELの運転制御へ軸足を移した後も、SCSS試験加速器の円滑な運転を保証するためである。運転業務引継ぎに向け、新しい運転スタッフへのOn the Job Training (OJT) も年度後半の半年をかけて実施した。

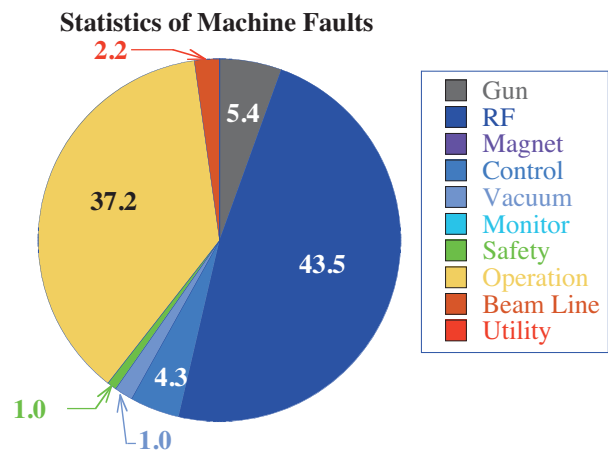


図14 SCSS試験加速器における各機器faultの割合

SCSS試験加速器建設グループ
田中 均

3-2 SCSS試験加速器利用

2009年度の公募も3期に分けられ、総計32研究課題(XFEL利用推進16課題、一般利用16課題)が採択された。ドイツとイタリアの海外研究機関も含まれ、また本年度から参入してきた研究グループは6つであり、一般利用が増えつつある。採択された利用分野は、原子分子分光、基盤機器開発、固体科学、イメージング分野、半導体プロセスとなっている。また、原子分子分光分野が半分以上を占めている。

ビームライン整備も、ユーザー利用実験と並行して進めた。光強度モニターの較正、2008年度末に設置した汎用集光システムの調整、FEL同期フェムト秒レーザーの導入などをおこなった。光強度モニターの較正実験は、産業技術総合研究所・放射線標準研究室(齋藤グループ)とドイツ

DESY/PTBとの協力研究でおこなわれた。光強度モニターシステムの測定値が、2つの絶対値測定機器（カロリメーター（産総研）とガスモニター検出器（DESY/PTB））を用いて較正した。汎用集光システムは、多様な実験に対応するために、焦点距離の長く（光学素子中心から試料までの距離が1 m）、水平面内でFEL光を集光する。FEL光は、2枚のミラー（楕円筒面鏡と円筒面鏡）により、それぞれ水平および垂直方向に集光する（表3）。集光状態は、ピンホールによる走査とアブレーションによる照射痕により評価をおこなった。計測された集光サイズは、楕円形状（長辺 $\sim 25\text{ }\mu\text{m}$ 、短辺 $\sim 20\text{ }\mu\text{m}$ ）であり、設計値の $\phi 10\text{ }\mu\text{m}$ （FWHM）よりも大きかった。また、集光システムの透過率（ミラー2枚の反射率）は50%であった。FEL光（パルスエネルギー $10\text{ }\mu\text{J}$ ）が集光した場合、そのピーク強度は 10^{12} W/cm^2 を超える。FEL同期フェムト秒レーザーは、FELと光学レーザーを用いたポンプ・プローブ法による時間分解実験をおこなえるように整備した。使用可能な波長および出力を表4に示す。

表3 汎用集光システムの仕様

	M4	M5
集光方向	水平	垂直
表面形状	楕円筒面	円筒面
コーティング	SiC	SiC
偏角	85.5度	85.0度
物点距離	23.434 m	23.546 m
像点距離	1.112 m	1 m

利用グループ SCSS試験加速器利用チーム
永園 充

4. 広報活動

(1) 広報業務概要

XFEL計画は、政府が定めた国家基幹技術のひとつであり、XFEL施設の建設状況、XFEL利用推進研究の成果および今後の展望などを積極的に発信し、XFELへの更なる理解増進に努めるとともに、研究課題の掘り起こしや利用分野の裾野拡大、新たな分野においての多大なる成果創出することを目的として広報活動を実施している。

(2) シンポジウム、講演会

2009年度は、第5回XFELシンポジウムおよび市民公開講座を開催した。

第5回シンポジウムは、「日本発・実用X線レーザーで拓く科学と未来」と題し、11月27日に品川インターシティホールにて開催した。参加者は、一般、企業および研究機関から363名を迎えた（図15）。参加者にアンケートを実施した結果、約5割が企業からの参加ということで、産業界からも注目されていることがうかがえた。またシンポジウムと同時に、XFEL整備に係わるメーカーにブースを出展していただき、模型やパネルなどを用いて、XFELへの理解をより深められるよう努めた。

市民公開講座は、「こんな分野もあった！あなたの知らない科学」と題し、1月9日に姫路市民会館にて姫路市と共催で開催した。参加者は、地元姫路市だけではなく兵庫県内から343名を迎えた（図16）。発表は、理研知的財産戦略センターの辨野義己特別招聘研究員より「見た目年齢は“腸”で決まる！～大切な腸内環境コントロール～」と題した講演、および合同推進本部の北村英男グループディレクターより「X線解体新書 ～レントゲンからXFELまで～」と題し、X線の歴史からXFEL/SPRING-8までの最先端の科学についての講演がおこなわれた。当日は、熱心に講演を聴いていただき、参加者より多くの質問も寄せられ、XFELへの関心の高さがうかがえた。

表4 FEL同期フェムト秒レーザーシステムの仕様

	Wave length	Ave. Power	Rep. Rate	Pulse duration	Energy
Oscillator	800 nm	0.7 W	79.3 MHz	50 fs	8.9 nJ
CPA	800 nm	3 W	1 kHz	30 fs	3 mJ
OPA	Idler : 2.5 $\sim$ 1.1 μm Signal : 1.1 $\sim$ 0.79 μm SHI : 810 $\sim$ 570 nm SHS : 602 $\sim$ 532 nm SFI : 602 $\sim$ 532 nm SFS : 531 $\sim$ 471 nm FHI : 495 $\sim$ 395 nm FHS : 395 $\sim$ 285 nm SH-SFI : 301 $\sim$ 266 nm SH-SFS : 263 $\sim$ 235.5 nm	—	1 kHz	—	50 $\sim$ 150 μJ 50 $\sim$ 200 μJ 1 $\sim$ 30 μJ 10 $\sim$ 70 μJ 25 $\sim$ 48 μJ 27 $\sim$ 108 μJ 1.5 $\sim$ 2.5 μJ 0.1 $\sim$ 8.5 μJ 2.3 $\sim$ 8.4 μJ 4.9 $\sim$ 8.6 μJ



図15 第5回X線自由電子レーザーシンポジウムの様子（左：会場内、右：展示の様子）



図16 市民公開講座の様子



図17 学生によるXFEL施設見学の様子

(3) 報道発表、見学対応

2009年度におこなった報道発表は、表5の2件である。8月26日付けの発表は、電子ビームを短距離で効果的に圧縮できる画期的手法の有効性をシミュレーションで確認したものであり、日本独自の画期的なアイデアが反響を呼んだ。また11月23日付けの発表は、世界最小のX線ビームの報告である。

また、XFEL計画は国のプロジェクトであるため、一般公開をはじめとして、政治家、文部科学省、海外研究機関の要人を始め、学校教育の一環として中高生や大学生らが多数見学に訪れた（図17）。2009年度は加速器棟や光源棟

が完成しており、2008年度より実際のスケールの大きさを感じていただきながら、XFEL計画の理解増進に努めた。

(4) 刊行物

3～4ヶ月ごとに発行している「X線自由電子レーザーニュース」については、2009年度はNo.7～9までを発行し、大学、企業、研究機関、図書館、自治体および希望される個人宅など約7,000ヶ所に送付した。また、放射光普及棟および中央管理棟、組立調整実験棟へ頒布するとともに、各種イベントなどで配布し、ホームページからもダウンロード可能にした。

さらに、地元自治体である佐用町が発行する広報誌「広

表5 2009年度の報道発表

日付	タイトル	発表者
2009年 8月26日	電子ビームを数千倍に圧縮、高品質レーザー生成を裏付け-X線自由電子レーザー (XFEL) の小型化を促進する革新的アイデア-	理化学研究所・高輝度光科学研究センターのXFEL計画合同推進本部の共同発表
2009年 11月23日	世界で最も小さなX線ビームを実現-10ナノメートルの壁を世界で初めて突破-	大阪大学大学院工学研究科 山内和人教授、三村秀和助教 理化学研究所・高輝度光科学研究センターのXFEL計画合同推進本部の共同発表



図18 2009年度に発行したX線自由電子レーザーニュースおよび「広報さよう」抜粋（右端）

報さよう」の連載枠をいただき、2009年4月号より隔月でXFELやSPRING-8について掲載させていただくこととした(図18)。

(5) その他

4月26日のSPRING-8施設公開では、完成したばかりの加速器棟を初めて公開した。見学者は、昨年SCSS試験加速器を公開した際より500名ほど多い、2,340名を迎え、施設の説明およびエアード試乗などを体験していただいた。また、関東地域での知名度向上や理解増進のため、青少年向けには、科学技術振興機構主催の「サイエンスアゴラ」(図19)および官庁主催の「子ども霞が関見学デー」などのイベントに参加、また企業向けには、日本真空工業会主催の「VACUUM真空展2009」およびnano tech実行委員会主催の「ナノテク2010」などの展示会への出展をおこなった。

さらに、XFEL関連の各種動画(完成イメージのコンピュータグラフィックス動画など)をYouTube上に開設している「理研チャンネル」に公開した。(http://www.youtube.com/user/rikenchannel#grid/user/C557179519DAEFA2)



図19 サイエンスアゴラでの様子

企画調整グループ

馬塚 優里