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年度から始まった国の第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。2008年度は、まさに計画半ばの折り返し点を過ぎたところであり、加速器収納建屋、光源収納建屋が完成し、加速器や光源アンジュレータ設置の準備が整ったところである。また、実験研究棟の建設がはじまり、2010年5月には完成が予定されている。加速器の残件、アンジュレータ、ビームラインなどの、債務負担行為による発注作業も順調に推移し、装置建設も構想・設計段階から、現場での組み立て調整等に移行することになった。

一方で、SCSS試験加速器を利用した加速器機器開発や利用機器開発も順調に進展し、実機建設に対する非常に有益な経験の集積が進んでいる。自由電子レーザーでは、利用者と光源との関わりが従来の放射光利用とは異なると予想され、新たな光源の利用に見合った体制の構築を進めていく必要がある。試験加速器を用いた極端紫外領域での自由電子レーザー利用研究も順調に進展し、数々の新しい成果を産んでいる。

X線自由電子レーザー計画合同推進本部
石川　哲也

2. 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

2008年度、光源棟及び実験研究棟内に設置されるアンジュレータ、電磁石、フロントエンド、実験棟ビームライン機器の発注と、8GeV線型加速器の高品質電子ビームをSPring-8蓄積リングに輸送する電子ビーム輸送系機器の発注が終了し、機器の製作が開始された。これによりXFEL計画に関わる建屋、加速器、ビームライン機器の発注が全て完了し、2010年度末のXFELビームコミッショニングに見通しが立った。

C-band加速システムは、予定通りC-band加速管62台、導波管31式、SLED31台、ダミーロード93台、2008年度末に加速器Ⅰ期分全数が納入され、加速器Ⅱ期分についても予定通り製作が進んでいる。納入された機器の一部は組立調整実験棟のエージングスタンド（旧テストベンチ）で性能試験が行われ、仕様値（35MV/m）を上回る37MV/m加速電界勾配を短時間に達成した。また、加速管に高周波電力を供給するクライストロンモジュレータおよび高圧PFN電源の最終設計と製作が行われ、仕様値以上の性能がエージングスタンドで確認され2008年度末、一部契約台数が納入された。これら機器は、2009年度から、全数XFEL加速器棟テストスタンドで性能確認後、所定の位置に設置する。一方、これら高周波機器を駆動する低電力高周波機器やタイミング制御機器の詳細設計と製作がほぼ予定通り終了し、初号機が2008年度末に組立調整実験棟のエージングスタンドに納入された。関連機器との組み合わせ試験を実施し、ほぼ所定の性能を達成したことで、残り実機製作を開始した。その他、加速器Ⅱで発注した入射部機器、電磁石、真空、制御、ビーム診断機器、放射線安全機器等の製作・納入も予定通り進捗した。ビームライン機器及び電子ビーム輸送系機器については、製作会社との詳細設計等の打ち合わせが、またX線レーザーの利用関係では２次元X線検出器やデータ収集系の今後の整備計画を策定し、それに基づいて検出器等の開発・発注・製作が進められた。XFEL建屋関係では加速器棟及び光源棟が2009年３月竣工、それに先だって建屋内で機器の据え付けに用いる基準線測量が開始された。竣工にともなって建屋内での室温変動、床のレベル変動の測定が本格化した。また、実験研究棟（2010年度完成）及び電子ビーム輸送系建屋（2009年度末完成）の建設が開始された。

XFELの完成後の施設維持管理業務の効率化とFELの高度化を睨み、制御グループでは、SPring-8サイト内施設の制御体系の一本化の枠組みの中で、XFEL施設の機器・建屋・放射線安全等制御システムの設計・製作を実施、また加速器研究開発グループ、光源開発グループではXFEL計画完成後のシーディング等、施設の高度化に向けた研究開発等を実施した。

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、2008年度に以下の検討を実施した。

(1) 電子銃から8GeVビームダンプまでのStart to End (S2E) Simulationをアンジュレータビームライン１と３(BL1とBL3)で実施した[1, 2]。このシミュレーションでは、L-APSまで３次元の空間電荷効果を取り入れ、それ以降の超相対論領域では、空間電化効果は無視し、CSR

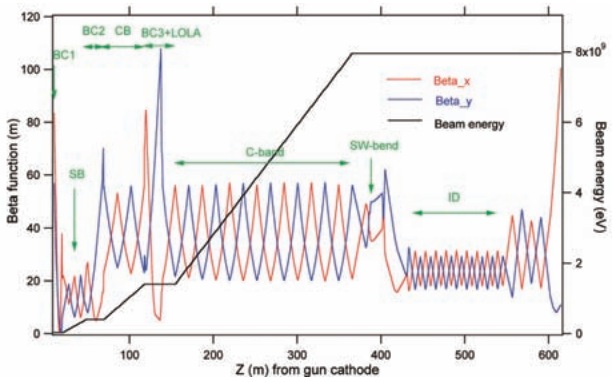

図1　BC1からBL3 8GeVビームダンプまでの水平・垂直ベータ関数分布。

による摂動、加速管及びアンジュレータ部でのウエーク場による摂動を考慮した。図1に一段目のバンチ圧縮器BC1からBL3の8GeVビームダンプまでのベータ関数分布を示す。結論として、加速器の直線上にあるBL3では、ピーク電流3.4kA以上の条件において電子ビーム規格化エミッタンス0.7～0.8πmm mradが実現できる事（図2参照）、スイッチング電磁石で振り分けた後のBL1においても、電子ビーム規格化エミッタンスは十分目標の1πmm mradを下回る事を確認した。

(2) 加速管の振動が電子ビームに及ぼす影響を解析し、加速管の振動に関する最大許容誤差を評価した[3]。この評価結果は、加速管設置法を具体化する際に考慮された。

(3) 定常運転時のXFELでのビーム損失を40万個の粒子を用い高精度で評価した。この解析精度は、全加速電荷に対し2.5×10^{-6}に対応する。この結果、ダーク電流を除外し、電子銃から引き出された電子は、3段目のバンチ圧縮器（BC3）以降基本的に損失しないことを明らかにした[4]。

(4) 開発された3次元シミュレータを用いて加速器に沿ったダーク電流の損失分布に関する検討を行った。アンジュレータ部に近いC-band主加速システムの下流から発生したダーク電流はクロマティックな効果により加速途中で損失するが、上流から発生したダーク電流はそのまま加速されマッチング部出口まで輸送される事を確認した。得られた結果を基に、ビームコミッショニングを円滑に行う目的でC-band主加速システムの上流から4番目のセクション（cb08）に小型のダーク電流除去用シケインを設置する設計変更を行った。このシケインの偏向角は0.17°と小さく、ビーム性能に影響を与えることはない。このシケインは電磁石磁場をオフにすることで、ビームをまっすぐ通すことも可能な設計とした。シケインの設計は、電磁石チームと真空チームの協力の基で実施した[5]。

(5) 試験加速器のマシンスタディから、アンジュレータ部で異常に大きなディスパージョンの漏れがあることが判明し、電磁石チームと協力してこの原因の究明を行った。原因は偏向電磁石端部の6極磁場成分であることが分かった。この結果は、実機の電磁石の設計に反映される[6]。

参考文献

[1] オプティックスチーム、“8GeV XFELパラメータ（BL1）Rev.1”、2008年5月6日。
[2] オプティックスチーム、“8GeV XFELパラメータ（BL3）Rev.”、2008年5月6日。
[3] オプティックスチーム、“加速管の振動について”、2008年9月17日。
[4] オプティックスチーム、“XFEL おける定常運転時のビーム損失の見積もり”、2008年7月30日。
[5] オプティックスチーム、“暗電流除去用シケインの仕様　改訂.2”、2009年2月9日。
[6] T. Hara, K. Fukami, H. Takebe, K. Togawa, H. Tanaka and N. Kumagai :“Estimation of Emittance Degradation due to Multi-Pole Fields of XFEL Bunch Compressor”, presented

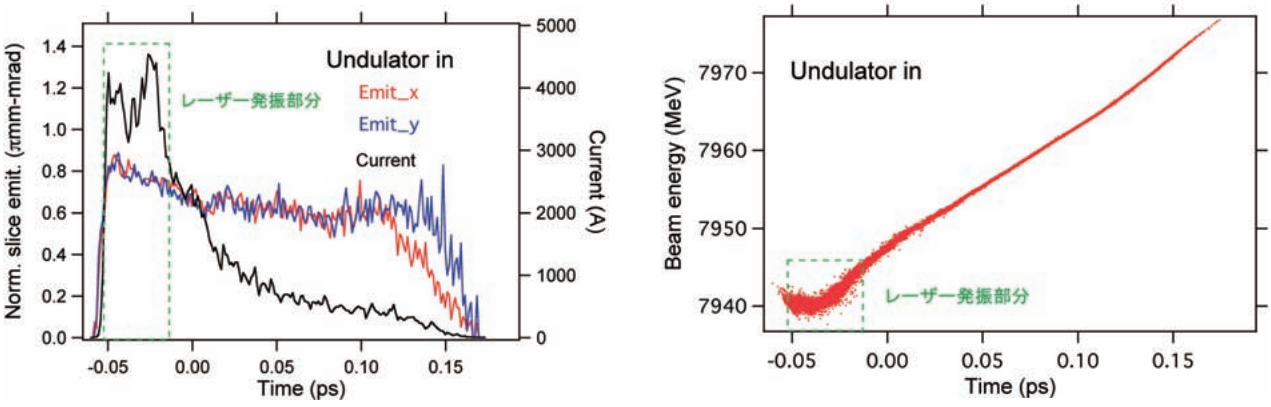

図2　BL3アンジュレータ入口でのエミッタンスとビーム電流の時間方向分布（左）とエネルギーと時間（E-t）の位相空間での電子ビーム分布（右）。

in the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, JAEA, Tokai-Mura, Aug. (2009) 5-7.

加速器建設グループ　オプティックスチーム
田中　均

2-2-2　入射部

XFELリニアックの入射部では、エミッタンスが非常に小さい熱電子銃を採用し、かつ多段バンチングシステムの最適設計を行うことにより、1πmm mrad以下のエミッタンスで十分な電流量のビームが安定に得られるよう、SCSS試験加速器をベースに入射部全体を設計した[1]。

機器の製作は順調に進んでおり、中でもバンチャ系空胴用の増幅器は全てが完成した。今回初めて製作するLバンド加速システムは、メーカーにおける技術的検討を特に念入りに行いながら設計・製作を進めている。

(1) RF増幅器[2]

238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空胴、1428MHz補正空胴では2MeV以下の非相対論領域のビームに速度変調を与えることから、僅かな高周波変動がビームのバンチ幅やピーク電流に影響し、その結果アンジュレータ内でのX線レーザー発振が大きく左右される。オプティックスチームがビーム軌道シミュレーションにより評価した空胴ギャップ電圧安定度及び時間ジッタ（位相）の許容値は、それぞれおよそ0.01%（σ）、120fs（σ）である[3]。時間的にゆるやかな高周波変動は、電力・位相帰還制御により安定化されるが、短時間あるいはショット毎の変動についてもこれらの安定度を満たさなければならない。従って、これらの空胴を励振するためのRF増幅器は、速い変動に対する安定化を特に念頭に置いて設計・製作が行われた。完成した増幅器の性能は表1の通りである。

(2) Lバンド加速システム

本入射部では、試験加速器であるSCSSの入射部で使用されているSバンド定在波加速管の替わりに、Lバンド定在波加速管2本により速度バンチングを行っている。加速構造はASP型を採用し、各加速管は18個の加速セルと中央のカップラセルで構成される。導波管は、SF6などの絶縁ガスを使用しない真空型を採用する。

加速管については、加速セル4個＋カップラセルより成る試験加速管を製作中であり、空胴セルの精密加工を終了したところである。今後ロウ付けを行い、ロウ付けによる共振周波数変化などの基礎データ取得、あるいはディンプリングによる周波数調整などの試験を予定している。一方、実機用の空胴は粗削りした空胴セルの製作が進行中である。

導波管などの立体回路系は現在設計を詰めているところである。回路内を真空にするため、導波管には真空封止のできるフランジが必要であるが、Lバンド用導波管は断面積が大きいため、それに見合った強度のフランジが必要である。採用する予定の真空フランジは、Cバンド導波管と同じくSバンド用DESY型を基にして設計したもので、これについては理研で試作を行い、真空リーク等の問題の無いことを確認した。

参考文献

［1］H. Hanaki et al.:“SPring-8 XFEL 入射部システムの設計”、第5回加速器学会年会、東広島 (2008) pp. 539.
［2］T. Asaka et al.:“XFEL/SPring-8入射部における高周波システムの開発状況”、第6回加速器学会年会、東海 (2009).
［3］H. Tanaka et al.:“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”、第4回加速器学会年会、和光 (2007) pp. 613.

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、電子入射器から入射される50MeV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8GeVまで加速し、アンジュレータ部へと供給する。長さ400mの加速器トンネルに納めるため、Cバンド加速器は従来の2倍近い35MV/mという高い加速電場で運転される。SバンドとCバンドあわせて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安定に運転することも極めて重要である。図3はRFシステム1ユ

表1　各高周波空胴（238MHzサブハーモニックバンチャ、476MHzブースタ空胴、1428MHz補正空胴）のための高周波増幅器の性能、および出力高周波電力・位相に関する安定度測定結果。

Frequency	238 MHz	476 MHz	1428 MHz
Type of amplifier	Solid-state	Solid-state + IOT	Solid-state
Number of amplifier	4	1	4
Pulse width	100 μs	50 μs	20 μs
Output power	3.5 kW (5.0 kW max.)	120 kW	2.5 kW (3.5 kW max.)
Gain	65.4 dB	83.8 dB	64 dB
Stability of output power		0.026%/min. (std.)	0.052%/min. (std.)
Stability of phase	0.02˚/10 min. (std.)	0.014˚/min. (std.)	0.062˚/min. (std.)

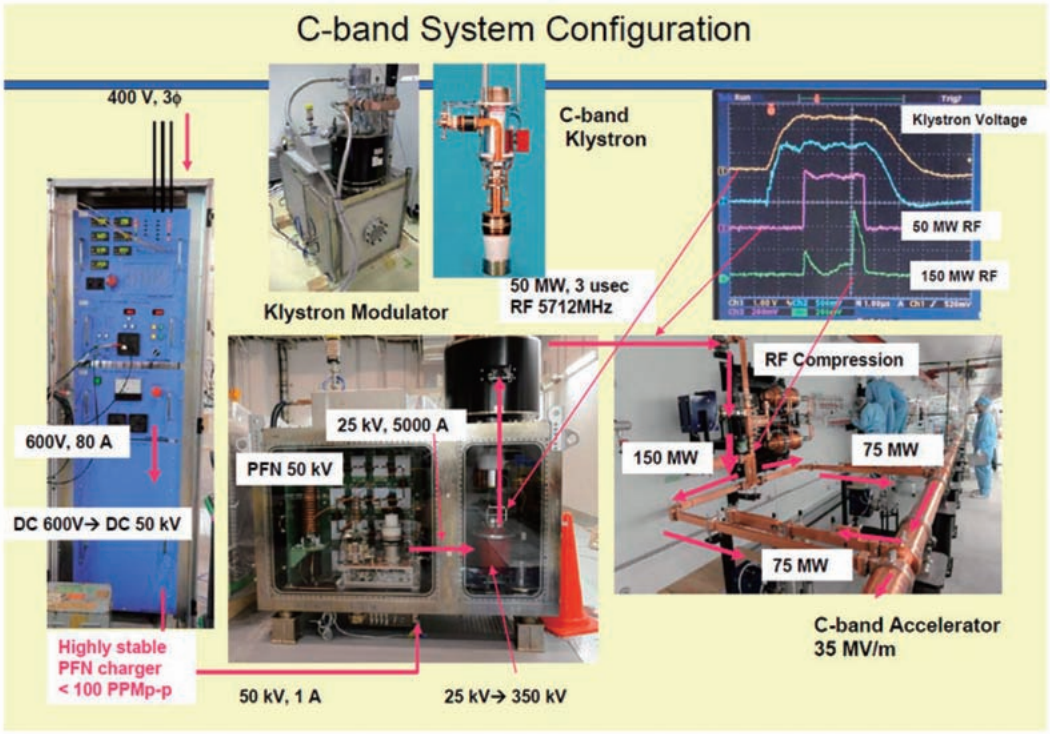

図3　Cバンド加速器の構造

ニットの構成である。2008年度は図中のコンポーネントの量産を継続し、全体の 6 ～ 8 割程度の製造が完了した。各部につき電力の流れにそって説明する。

(1) 高安定度コンデンサ充電器：三相400Vを受電し、IGBTインバータによって50kV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30ppm.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、湿度等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50MW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ている。

(4) RFパルスコンプレッサー：4 結合孔を有する独自のモードコンバータによって出力150MWピーク電力に対しても、高電圧に伴う暗電流の放射がなく、安定な動作が可能となっている。

(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 2 孔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共に、安定な動作を可能としている。

(6) Cバンド加速管：独自開発のチョーク型空胴を採用し、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) 以上のシステムを、組立調整実験棟のエージングスタンドに組み立て、試験運転を行ってきた。3 式の試験が終わり、加速電界35V/mの安定な運転が実証された。

加速器建設グループ　主加速部チーム
新竹　積

2-2-4　光源

(1) アンジュレータ実機製作開始

2007年度に製作したアンジュレータ先行機の各種試験結果に基づき、実機18台分の詳細仕様を確定し、機械駆動部の製作を開始するとともに、その動作試験に必要な制御システムの整備を行った。永久磁石部については材質や形状などの検討を経て、2009年夏以降に機械駆動部への設置並びに磁場測定・調整作業が順次開始される予定である。また、永久磁石列を真空槽に組み込んだ後に磁場測定を行うためのホール素子駆動用ガイドレールや、永久磁石端部とドリフト部真空ダクトを滑らかに接続し、インピーダンスを低減するための形状変換部などの周辺機器について詳細設計が完了し、製作を開始した。

(2) 差動アジャスタ試験

磁場調整作業を迅速に行うために、真空槽外部の鋼製クロスビームと内部の磁石列を連結するベローズシャフトの

上下位置を微調し、磁石列ギャップを局所的に補正するための機器（差動アジャスタ）を採用した。アンジュレータ先行機を用いて動作試験を行った結果、数μm程度の分解能でギャップを補正できることを確認した。

(3) アライメントアンジュレータ整備

X線をガイドとしたBPMのアライメントを可能にするために加速器収納部のマッチングセクションに設置されるアンジュレータ（アライメントアンジュレータ）の整備を行った。加速器収納部における高さ800mmのビームラインに対応するために小型の機械駆動架台を新規に製作し、既存の真空封止アンジュレータから、永久磁石列（周期長24mm、全長1.5m）と真空槽を取り外し、新型架台に設置した。尚、同架台は従来のC型構造ではなく、磁石列を両側から支える門型構造をしており、磁場測定の際には光源チームにて開発されたSAFALIシステムを利用する。また、ギャップを開閉するための機構として、ボールねじではなくジャッキが採用されているため、コスト及び製作期間の削減が可能である。

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

2008年度のビーム診断チームの活動は、2007年度に発注した加速器用の量産版の位置モニター（BMP）、差動電流モニター（CT）、スクリーンモニター（SCM）の試作機（量産用試作機）の設計・製作を進めた。量産用試作機が年度末に納入され、その評価・動作試験をSCSS試験加速器のモニター試験部に於いて行った。[1] その結果、量産用試作機は以前の開発試作機と同等の性能が確認され、要求性能を満足しているため量産体制に移行した。達成された性能は以下の通りである。BPM[2] は検出回路及びAD変換などのデータ収集システムの全てを含んだ形で、サブミクロンメーターの検出精度が確保できた。これは、アンジュレータラインで必要なビーム軌道の検出分解能を満足している。CT[3] は10～90%のパルスの立ち上がりが200ps程度で、ノイズである同相グランド電圧レベルのうねりなども差動原理で除去できることを確認できた。スクリーンモニター[4] は、高分解能型の4倍光学系で2.5μm程度の分解能を示し（光学的なgrid distortion targetで確認）、RFデフレクターでのバンチ長測定で必要な0.5fsの分解能を達成できた。以上の他に、加速器の電子軌道のエネルギー分散部に設置されるエネルギースリットも、現在設計が終了して製作中である。2009年度の秋頃までには量産機がほぼ揃う予定である。図4には、性能の例として、SCSS試験加速器に試験的に設置された量産試作機スクリーンモニターと、電子ビームをそのモニターにより観測した画像を示す。RFデフレクターでのスライスエミッタンス測定では、電子ビームを水平方向で10μm程度まで絞り込む。図4の画像は、この水平に絞り込まれた電子ビームのプロファイルを、開発したSCMで計測可能かの確認試験を、電子ビームを用いて行った時のものである。電子ビームコアの横方向サイズ 13.4μmがクリアに観測され、内部のビーム分布も図に示すように判別できスライスエミッタンス測定が十分可能であることを示すものである。

参考文献

[1] Y. Otake *et al.*:“Development Status of a Beam-Diagnostic System with a Spatial Resolution of Ten Micron-meters for XFEL”, Proc. of EPAC08 (2008).
[2] H. Maesaka *et al.*:“Beam Position Monitor at the SCSS Prototype Accelerator”, Proc. of APAC07 (2007).
[3] A. Higashiya *et al.*:“Development of a Beam Current Transformer for the X-FEL Project in SPring-8”, Proc. of FEL07 (2007).
[4] K. Yanagida *et al.*:“Development of Screen Monitor with a Spatial Resolution of Ten Micro-meters for XFEL/SPring-8”,

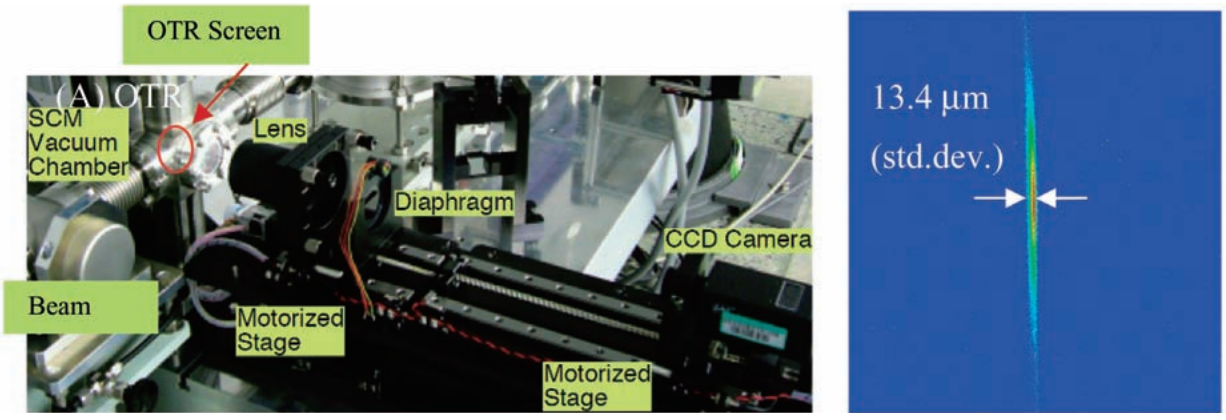

図4　SCSS試験加速器に設置された量産試作機のスクリーンモニター（左）と、それによる電子―ビーム観測例（右）。Q磁石によりビームを横方向に最大限に絞った場合。

Proc. of LINAC08 (2008).

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・高周波チーム

タイミング・高周波チームでは、クライストロンギャラリーに設置されるラック挿入機器（2007年度発注）[1] の設計・製作を前年度に引き続き推進した。具体的には、大電力高周波源である1428MHz、2856MHz、5712MHzのパルスクライストロンを駆動するための低電力高周波機器、タイミング制御機器の量産用試作機の製作とその一部性能評価を実施した。量産用試作機製作に向けて開発した機器は、光高周波分配器、IQ変調器、IQ検出器、600Wパルス高周波増幅器、低ノイズ電源、238MHzの高周波駆動のVME-AD及びDAモジュール、VMEトリガーディレーモジュールなどである[2,3]。各々を説明すると、光高周波分配器は、マスターオシレータから位相安定化光ファイバーラインで送られてくる5712MHz、238MHzの低電力高周波信号や、5712MHz高周波信号にPSK（Phase Switch Keying）変調されたトリガーパルス信号を受け、ラック内機器に配る装置である。IQ変調器は、クライストロンの出力高周波位相・電力を制御するものである。IQ検出器は、クライストロンの出力高周波位相・電力を検出するためのものである。600Wパルス高周波増幅器は、5712MHz、50MWパルスクライストロン駆動用である。低ノイズ電源は、高安定で低ノイズな電圧をラック挿入機器に供給するための水冷電源である。VME-AD及びDAモジュールは、IQ関連機器をコンピュータにインターフェースする機能を持つ。VMEトリガーディレーモジュールは、加速器の繰り返しでPSK変調された信号から取り出されたトリガーパルスで動作し、0～16msまでの所定の遅延を加えて、700fsくらいの時間ジッタ（ちなみに加速電子ビームの時間ジッタは、現状における時間基準高周波信号の数秒内の時間精度である、50fs以下で決まる。）で機器トリガーパルスを出力する装置である。

以上の各装置から構成される低電力高周波機器及びタイミング制御機器の量産用試作機が、2008年度末に組立調整実験棟のエージングスタンド（旧テストベンチ）に納入された（図5）。現在、長期に渡る総合性能試験を実施している。高周波増幅器の出力高周波位相安定度などは、ほぼ期待された性能が確認されている。

図5　量産用試作機の低電力高周波・タイミング機器

参考文献

［1］Y. Otake, et al.:“Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femto-Second Stability”, ICALEPCS2007, Tennessee, USA, 2007.

［2］Y. Otake, et al.:“Sub-pico-second trigger system for the SCSS prototype accelerator”, FEL2006, Berlin, Germany, 2006.

［3］Y. Otake et al.:“SCSS rf control toward 5712 MHz phase accuracy of one degree”, Proc. of APCA conf., India, 2007.

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加速器部で使用する電磁石は、本年度製作が全て完了した。光源棟に設置する電磁石は引き続き製作を行っており、電子ビームダンプ用偏向電磁石など特に大型の電磁石については、真空槽の設置や固定方法等の詳細設計を真空チームと共同で進めている。製作が完了した電磁石は磁場測定を行い、ほぼ設計通りの磁場強度と分布が得られていることを確認した。一部のバンチコンプレッサー用偏向電磁石については、端部6極磁場が電子ビームの投影エミッタンスを増大させる可能性があるため、エンドシムを用いた磁場分布補正を検討中である[1]。投影エミッタンスの増加はFEL発振には直接影響しないものの、加速器のビーム調整を難しくする。

加速器部電磁石電源は、本年度９月から試作機の製作を開始し、１月にOPT-VME制御カード（i-DIO）を用いた制御系との接続試験を完了している[2]。その後、機器保護や安全インターロック系の詳細設計を行い、先行機電源８種類の製作を進めている。光源棟で使用する電磁石電源

についても、仕様を決定し発注作業を完了している。

参考文献

［1］T. Hara et al.:“Estimation of emittance degradation due to multi-Pole fields of XFEL bunch compressor”, presented in the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, JAEA, Tokai-Mura, Aug. (2009) 5-7.
［2］H. Takebe et al.:“Power supply control system for the XFEL/SPring-8 magnets”, presented in the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, JAEA, Tokai-Mura, Aug. (2009) 5-7.

加速器建設グループ　電磁石チーム
原　徹

2-2-8　真空

共通真空コンポーネント、すなわちADESYフランジ、ハイブリッドフランジ、RFコンタクト付ベローズ、DLCコーティングボルトの開発が終了した[1,2]。DLCコーティングボルトについては、各ボルトサイズについて、ナット、ワッシャーの材質、コーティングの有無等による種々の組み合わせの中から最適なトルクを発生する組み合わせを評価し、実機に反映した。これとは別に、コスト削減のため、排気槽、真空ポンプ等のビームから外れた場所のフランジ締結用ボルトの潤滑用コーティングとしては、デフリックコーティングを採用し、トルク評価・剥離評価を実施した。

偏向電磁石内に設置されるSUS製矩形真空槽は狭い磁石ギャップ間に精度良く挿入できなくてはならないが、長手方向の溶接による入熱のため、真空槽が歪みやすい。このため、入熱が少なく、変形の少ない溶接方法としてレーザー溶接の評価試験を行い、実機に採用した。

BCセクション、50MeVビームダンプなどの特殊真空槽等の検討・設計・発注作業を引き続き行った。また、真空組み立ての作業要領を策定し、作業者に実技・教育訓練を行った。

参考文献

［1］T. Bizen :“Development of Vacuum components for XFEL/SPring-8”, Proc. of 11th European Particle Accelerator Conference, Genoa, Italy (2008) p3682-3684.
［2］T. Bizen :“Development of Vacuum Components for the Project of X-ray Free Electron Laser (XFEL/SPring-8)”, J. Vac. Soc. Jpn. Vol. **52** No. 5 (2009) p271-277.

加速器建設グループ　真空チーム
備前　輝彦

2-2-9　機器制御

本年度は2007年度設計を行ったコンポーネントのいくつかの動作確認を工場において実施した。電磁石電源制御用に開発を進めてきた光伝送ボードは、エンジニアリングサンプルを電磁石電源と組み合わせてテストを行い、電流値の設定、読み出し及び誤差検出等の機能に問題がないことを確認し量産体制に移行した。PLCを組み込む機器に関してはPLCと上位制御系との取り合いのためのマップの設計を行った。ハードウエアの製作が進んでいるIOT電源、238MHz高周波アンプ及びクライストロン用主制御装置についてはFL-net Test Toolを用いてFL-net経由でデータのやり取りが出来ることを確認した。

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を試験加速器に導入して安定に動作することを確認した。また、XFEL実機に使用するインタラプト・レジスターボードの設計・製作を行い、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するテストを来年度に試験加速器で行うことを予定している。

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

本年度は、各種架台の設計・発注と据付作業・アライメント機器の発注作業を主に行った。

架台に関しては、入射部やシケイン等で使用される石定盤、Cバンド・Sバンド加速管用架台、SLED・導波管用架台、各種4極電磁石架台を設計し製作を開始した。また、高精度で一直線に並べる必要があるアンジュレータ間のビーム位置モニター（BPM）と4極電磁石設置のために、両機器を載せて1μmの分解能で上下左右に動くステージの開発を行った。このスペックは技術的にはそう難しくないが、19台発注することからコストを低く抑えることが課題であった。上下駆動に関してくさび式とカム式の2つの方式に関して試作・評価を行い、最終的にくさび式のステージを採用する事にした。

据付作業に関しては、C・Sバンド加速部、シケイン部、マッチングセクション部、BL1、BL3（ID部以外）の発注作業を行った。これで既に発注済みの入射部を含めて、最上流から最下流までの機器の据付に関して一応発注を終えた事になる。但し、石定盤上の全ての機器（特に4極電磁石や電子ビーム位置モニター等据付精度が要求される）や、まだ設計が終了していない最下流のダンプ部に関しては自分達で据え付ける事になった。他に、水配管据付作業（一部）、コンクリート床面研削作業に関しても発注作業を行った。

アライメント用測量機器として、デジタルレベルDiNi03（ニコントリンブル）、トータルステーションTDA5005（ライカ）を購入した。これらは主に建屋の据付用基準モニュメントの調整及び建屋の変位計測に使用する。これらのモニュメントを基準とし、個々の機器の据え

図6　据付用モニュメント設置時の写真。光源棟最下流から上流方向を見ている。オレンジ色のポールがモニュメント。手前は高精度距離測定器ME5000。

付けに使用するレーザートラッカーとしてはT3（API）を購入した。

据付作業の中で最も繰り返しの多い（64ユニット）Cバンド加速管に関して、組立調整実験棟内に収納部壁面と見なせるコンクリート壁を設置し、据付業者も交えて据付模擬を行う事で据付手順や使用する機器や治具の検討と確認を行った（図7）。また3月には、建屋竣工前ではあったが、収納部内に据付用基準モニュメント（約30mおき、24箇所）を設置し、建屋の変位の計測を始めた。

図7　据付模擬時の写真。アライメント手順や使用する治具の確認を行っている。

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

電子ビーム輸送系（XSBT）は、XFELの線型加速器で加速された8GeV高品質電子ビームを、SPring-8蓄積リングに導くためのものであり、2008年度秋にチームが発足、設計を行い、2008年度末に主要機器を発注した。2009年度末に機器が納入、2010年度以降に据付が計画されている。

XSBTは、XFEL線型加速器の末端にある振分け電磁石から電子ビームを取り出し、SPring-8シンクロトロンと蓄積リングを結んでいるビーム輸送系（SSBT）に合流して、電子ビームを蓄積リングへと輸送する。この合流部とXFELの間は、距離約300m、高度差9mである。ラティスは、低エミッタンスと短バンチを保持するため、偏向部を有するXFEL側（上流側）はDouble bend achromat、偏向部のないSSBT側（下流側）はFODOとし、更に偏向電磁石は磁場を1.2Tと比較的弱めの設計とした。

電磁石の内訳は、水平偏向電磁石9台、垂直偏向電磁石4台、水冷四極電磁石38台、空冷四極電磁石16台、補正電磁石20台である。偏向電磁石のギャップは30mm、四極電磁石のボア径は29mmとした。

真空チェンバは、四極電磁石部が内径24.8mm、偏向電磁石部が内部高さ24mmのステンレスチェンバとした。電子ビームサイズ、ディスパージョンが小さいため、配管サイズ（アパーチャー）を小さくすることも検討したが、ウェークフィールドによる電子ビームエネルギーの広がりが大きくなるため、上記の配管サイズとした。XSBTの圧力は、電子ビームの散乱を防ぐため、10^{-4}Pa台となるように排気系を設計した。

モニターは、ビーム電流計、プロファイルモニター、ビーム位置モニターを使用する。電流計はSSBTで使用しているものと同じ電流計とした。尚、この電流計の短バンチビームに対する特性を測定し、良好な結果を得た[1]。

XFEL線型加速器からの電子ビームは100fs程度以下の短バンチであるため、コヒーレント放射（CSR）の影響が大きいことが懸念される[2]。これについて今後、更に検討を進めると共に、据付方法などについても検討をする予定である。

参考文献

［1］T. Watanabe, et al.:“Current Transformerの極短バンチ応答試験”、第6回加速器学会年会、東海 (2009)
［2］T. Watanabe, et al.:“CSR effect at XFEL- to- Storage Ring Beam Transport Line, SPring-8”、第6回加速器学会年会、東海 (2009)

加速器建設グループ　電子ビーム輸送系チーム
大石　真也

2-2-12　建設

（1）XFEL加速器棟・光源棟

加速器棟（2007年３月工事開始）は、加速器トンネルの厚さ2mの遮蔽コンクリート工事が10月に完了した。また、光源棟（2007年７月工事開始）のアンジュレータホールの厚さ1.5mの遮蔽コンクリート工事が11月に完了した。加速器トンネル及びアンジュレータホールの床レベル水平精度（±5mm／全長630m）確保のための厚さ40cmのかさ上げコンクリート工事が12月に完了し、目標精度を確保することに成功した。並行して、鉄骨・外装・内装・外構工事、電気設備工事及び機械設備工事を進め、３月には設備の試運転、官庁検査を行い、予定通り３月25日に完成した。

（2）XFELビーム輸送トンネル

10月に工事が開始されたビーム輸送トンネルは杭基礎部分と直接基礎部分に分かれており、直接基礎部分の岩掘削が完了し、遮蔽コンクリート工事を開始した。また、杭工事の試験杭施工が完了した。

図8　XFEL加速器棟・光源棟　完成写真

図9　XFEL加速器棟　完成写真

加速器建設グループ　建設チーム
大塚　孝

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）バンチ長リアルタイム計測技術の開発

XFEL/SPring-8では熱電子銃から得られる1Aの電子ビームを、速度圧縮とシケイン磁場圧縮技術を組み合わせて、数千倍に圧縮して3～5kAの高密度電子バンチを生成し、これをアンジュレータに通し自然放射を増幅する。この高圧縮システムを安定に運転するために、加速の途中で電子バンチの長さをリアルタイムに測定し、加速器空胴の電圧と位相にフィードバックすることが重要である。加速器研究開発グループでは、これに必要となるバンチ長のリアルタイム計測技術の開発を実施している。すでにDESYに於いて、先行した研究が行われており、まず先行技術の習得のためDESYの研究者と意見交換を行い、問題点を議論した。これによって、偏向磁石内を電子バンチが走行する際に発生する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が最適であることがわかった。次年度はSCSS試験加速器にて、パイロ検出器の動作試験を実施する予定。なお、THｚ領域のスペクトロメータは、高い精度が得られず、実用性に乏しいことが判明した。

（2）シーディング技術の開発

X線FELの応用実験の中には、長いコヒーレント長や、高安定なX線出力を必要とするものがある。自然放射を増幅するSASE-FELではこれらの特性に原理的な限界がある。そこで、X線波長にまで到達するシーディング技術の理論的な解析を行っている。図10に示すようにYAGレーザーの第４次光（波長255nm）を電子ビームに入射させ、バンチ圧縮率4 x 5 x 5倍によって密度変調の波長を2.5nmに圧縮。ひきつづき8GeVに加速後、長周期のアンジュレータによって2.5nmにてFEL動作をさせ、その５次高調波に共鳴する短周期のアンジュレータにて0.5nmをFEL増幅し、さらにHGHGにより波長1ÅのX線を得る概念設計を実

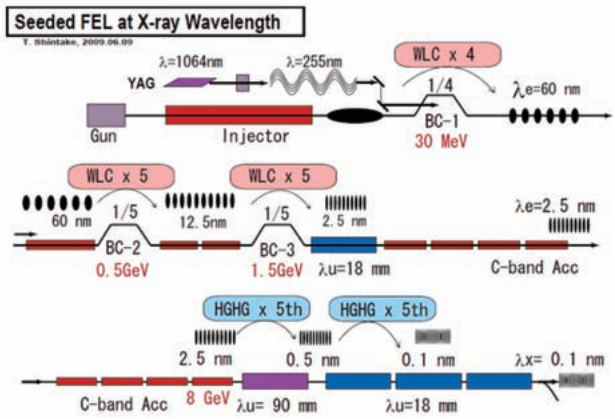

図10　X線波長の新シーディング方式

施した。今後具体化に向けて詳細設計を実施する予定。

加速器研究開発グループ
新竹　積

2-4　光源研究開発グループ

XFELの高い飽和出力と短いゲイン長を得るためには、アンジュレータの高い磁場精度と安定な磁場再現性が求められる。SPring-8には、真空封止アンジュレータ建設についての豊富な実績があるが、これらをそのままXFELに適用するには精度的に無理がある。本グループのミッションは、高精度XFELアンジュレータを実現するために新たな手法やツールを開発することである。以下に、2008年度に実施した開発項目について報告する。

(1) 差動アジャスタ

差動アジャスタは磁石ギャップ値を微調するためのものである（図11参照）。異なるピッチ（1.1mm、1.2mm）を持つ引っ張り力専用の差動ネジで、1回転100ミクロン、最小5ミクロン程度の磁石ギャップの微調が可能である。同心のガイドはネジ部に横方向負荷が生じるのを避けるためである。

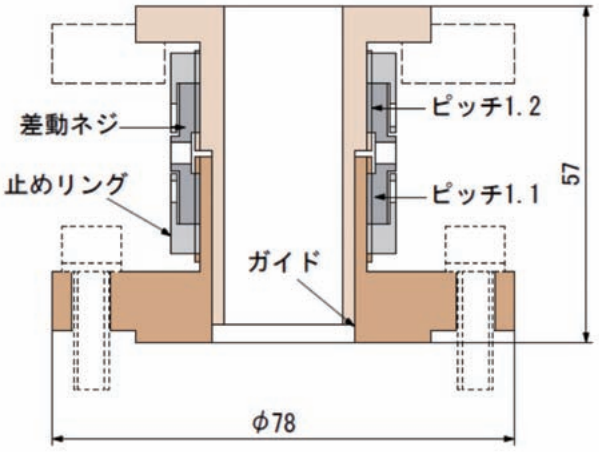

図11　差動アジャスタの概念図

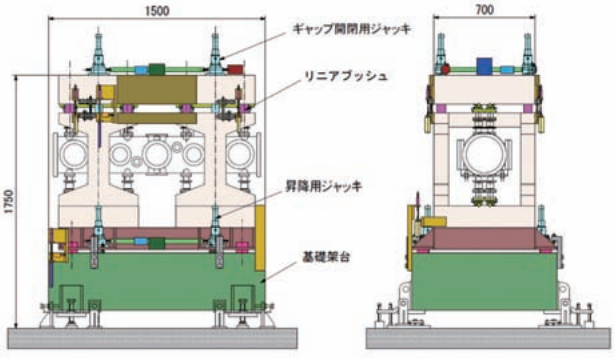

図12　門型アンジュレータの概念図

(2) 門型アンジュレータ

XFEL第2期計画を展望して開発を進めている低価格型アンジュレータである（図12参照）。従来のアンジュレータでは磁場吸引力と磁石列自重が均衡するギャップ値付近でボールネジ駆動に不連続変位が生じる欠点があったが、ギャップ開閉用と昇降用に夫々独立した精密ジャッキ駆動を採用することにより、これを解消している。さらに、支持構造を従来の片持ち支持のC型から門型に変更することにより、機械部全体を軽量化することができる。ただし、磁場測定はコンパクトなSAFALI方式にのみ対応している。

(3) 真空対応リニアゲージ

サブミクロン精度の磁石ギャップ測定を行うために、磁石列に直接装着する真空対応のリニアゲージを開発した。設計において考慮した点は、①放射線下の使用であること、②超高真空下での使用に耐えるが、加熱排気は考慮する必要なし、③原点を内蔵、④測定ストローク10mm以上、⑤分解能0.1ミクロン程度。以上の要求にしたがって、磁気方式であるSONY製デジタルリニアゲージDK812を真空対応としたのが図13の真空対応リニアゲージである。使用時はベローズ内側が内圧（大気）であるため測定力が10Nを越える。したがって、センサー先端（超硬）が接触する側も超硬合金でなければならない。

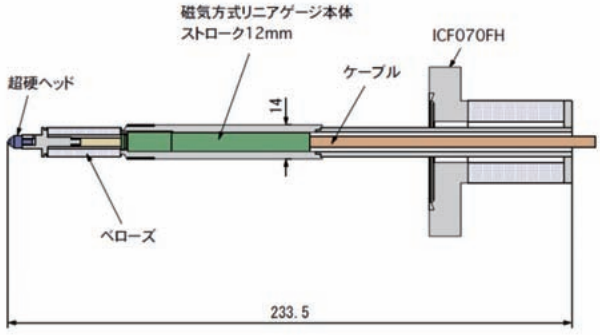

図13　真空対応リニアゲージ

光源研究開発グループ
北村　英男

2-5　制御系建設グループ

加速器と光源棟の施設機器制御系を建設した。建屋には約20個のPLC（Programmable Logical Controller）が施設制御のために使用されている。施設機器制御のために専用のPLCを設置して、機器制御系VMEにFLnetで接続した。専用PLCを経由して制御のVMEから施設の一部の機器を制御可能にした。

インターロック関係では、全系XFEL加速器放射線安全インターロック盤類の製作と納入、およびXFEL光源棟部

分入退管理システムの納入と設置が行われた。入退管理システムは、動作検査を行い実際に運用できる状態にある。また、高速停止モジュールの開発を行い、組立調整実験棟エージングスタンドでのノイズ耐性試験を行った。

ビームライン制御システムは、SPring-8と同様に挿入光源から実験ステーションに至る各種コンポーネントの制御およびデータ収集を行う。ただし挿入光源部においては、安定したX線レーザー発振を得るために高い精度で加速器と同期したモニターシステムが必要となる。そのため、試験加速器と同様に加速器部と挿入光源部を一体とした制御システムとなるように設計した。機器制御のフロントエンドシステムとしてVMEを採用し、FLnetにより制御装置であるPLCと機器毎に接続する。PLCと被制御機器の接続は加速器部と同様にDeviceNetを採用している。一方、フロントエンド部と輸送部については、基本的な機器構成がSPring-8と同等であり、加速器部と比較して静的な制御が主体であることから、SPring-8と同様の設計とした。VMEを機器制御フロントエンドシステムとし、パルスモータなどのインターフェースカードを用いた制御性の高いシステム設計とした。本年度は挿入光源制御システムとビームライン制御システムの発注が完了し、受注業者と共に詳細なシステム設計を始めている。

制御系建設グループ
田中　良太郎

2-6　安全設計グループ

XFEL施設安全設計指針に基づく加速電子ビーム損失率シナリオに従い、XFELビームラインの遮蔽設計を実施した。加速電子ビーム損失によって生ずる高エネルギーガンマ線や中性子がビームラインに混入してくる。これらを効率的に遮蔽するために局所遮蔽を適切に配置することや、光学ハッチ及び実験ハッチ壁遮蔽材質の選定、光学ハッチ壁に普通コンクリートを用いることの利点及び加速電子ビーム損失時における電子ビーム損失状態による高エネルギー放射線混入量依存性等を明らかにした。XFEL線型加速器で作られる高品質な電子ビームをSPring-8蓄積リングに入射するための電子ビーム輸送ラインバルク遮蔽設計を実施した。SCSS試験加速器において、CT（カレント・トランスフォーマー）で測定された加速電子ビーム損失量と加速器収納部内外におけるガンマ線及び中性子線量分布測定結果との相関及び評価結果との比較をまとめた。

XFEL施設放射線監視モニターシステムの詳細設計を実施するとともに加速器建屋及び機器配置に合わせたモニター配置及び配線計画等を決定した。効率的な放射線管理を行うため、モニター出力データ収集・格納システムを設計した。加速器運転管理、管理区域出入管理、加速器及び光源収納壁内への出入制御等を含めたXFEL安全インターロックシステム概念を構築するとともに、引き続き制御グループと共同で詳細設計の協議を実施している。

ダイヤモンド検出器を用いた、アンジュレータ用永久磁石の放射線減磁防止用Haloモニターの実証試験をSPring-8シンクロトロンブースター及びSCSS試験加速器で行った。その結果、平均電荷損失率10^6を十分検出できることが示された。また、電子ビーム損失位置等を検知するため、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た。その結果、おおよそ位置分解能30cmが達成できる見通しが示された。引き続き、これらのモニター実証試験及び改良試験を行い、XFEL実機装着に向けた開発を行う。外部有識者によるXFEL安全性評価委員会を２回開催し、XFELビーライン遮蔽設計・安全評価、電子ビーム輸送ライン遮蔽設計及びXFEL施設建設進捗状況に応じた評価について検証を受けた。

参考文献

［1］Y. Asano, T. Itoga and X. Maréshal :“RADIATION SHIELDING ASPECTS OF THE SCSS PROTOTYPE XFEL FACILITY”, Nuclear Technology Vol.**168** (2009).
［2］H. Aoyagi. T. Bizen, N. Nariyama, Y. Asano, T. Itoga, H. Kitamura and T. Tanaka :“Beam Halo monitor using Diamond Detector for Interlock Sensor at XFEL/SPring-8”, Proceedings on DIPAC 2009 Basel (2009).
［3］X. -M. Maréshal, Y. Asano and T. Itoga :“Beam Based Development of a fiber beam loss monitor for the SPring-8 / XFEL”, Proceedings on DIPAC 2009 Basel (2009).

安全設計グループ
浅野　芳裕

2-7　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。

利用グループの活動として、本年度は、「XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report」の取り纏めを行い、一般に公開した[1]。利用実験を計画するために不可欠な光特性、及びビームライン機器・検出器・データ収集系の基本設計を示したものである。

また、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。本年度は、「第３回XFEL利用ワークショップ」と題し、2009年３月16日、東京にて約60名の会合を開催した。今回は、XFEL

実機の実験ステーションの検討を初めて行った。施設者・利用者双方が、各分野において想定される実験、提供可能な共通基盤装置・技術、今後の機器開発・整備の方向性といったテーマを軸に発表し、活発な討議を行った。

2-7-1　ビームライン建設チーム

本年度は、XFELビームライン BL3 の詳細設計[2] を完了させるとともに、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等の発注業務を行った。

図14に、実験ホール内のビームライン配置図を示す。本施設は5本のビームラインの設置が可能であるが、光源棟内におけるアンジュレータ長の制約に基づき、両端のビームライン（BL1, BL5）は軟X線～EUV領域、中央の3本のビームライン（BL2～4）は硬X線領域という前提で設計を行った。隣接するビームラインの間隔が狭いため、光学ハッチは5本のビームラインを2つのグループに分け、さらに実験ハッチはBL2～4をまたいだ構成とした（BL1と5の実験ハッチは長波長領域のため不要）。また、実験ハッチに近接してフェムト秒同期レーザー用のブースが設置され、各実験ハッチ・ステーションに分配される。

図15に、BL3の光学ハッチ内ビームライン機器のレイアウトを示す。光学系として、ダブル平面ミラーと二結晶分光器を用意している。ダブルミラーは、異なる2通りの入射角が利用可能であり、カットオフ波長を切り替えることができる。また、二結晶分光器の分光結晶としては、シリコン（111）完全結晶を用いる。エネルギー分解能を0.01%程度に抑制するとともに、波長を精密に定める目的で利用される。これらの光学系を排他的に使用することにより、定位置出射を実現する。この他に、フォイルからのX線散乱を利用した強度・位置モニター、プロファイルモニター、真空排気システム、放射線安全機器等が設置される。

利用グループ　ビームライン建設チーム
矢橋　牧名

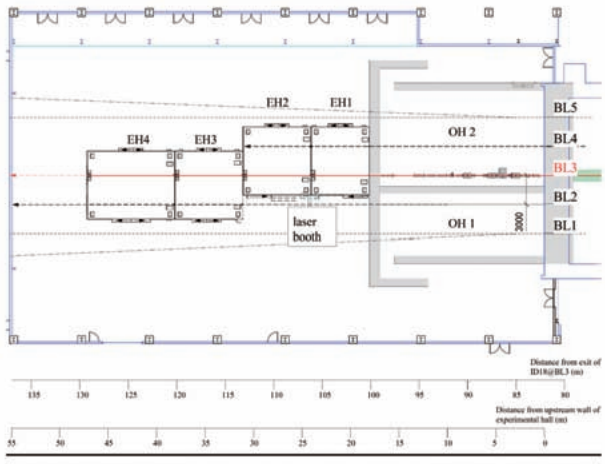

図14　実験ホール内のビームライン配置図

2-7-2　データ処理系開発チーム

本チームでは、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てデータを保存・解析できるデータ収集（Data Acquisition : DAQ）システムの開発を行っている。本年度はX線2次元検出器のなかでも開発に時間のかかる直接検出型の半導体検出器について、要求仕様をユーザーコミュニティと議論して決定した。また、この要求にこたえるため諸検出器技術の試験を行い、Multi-port Charge Coupled Device（MPCCD）検出器とSilicon-on-insulator（SOI）検出器を選定した[2]。開発リスクを管理するため、XFEL発振時に

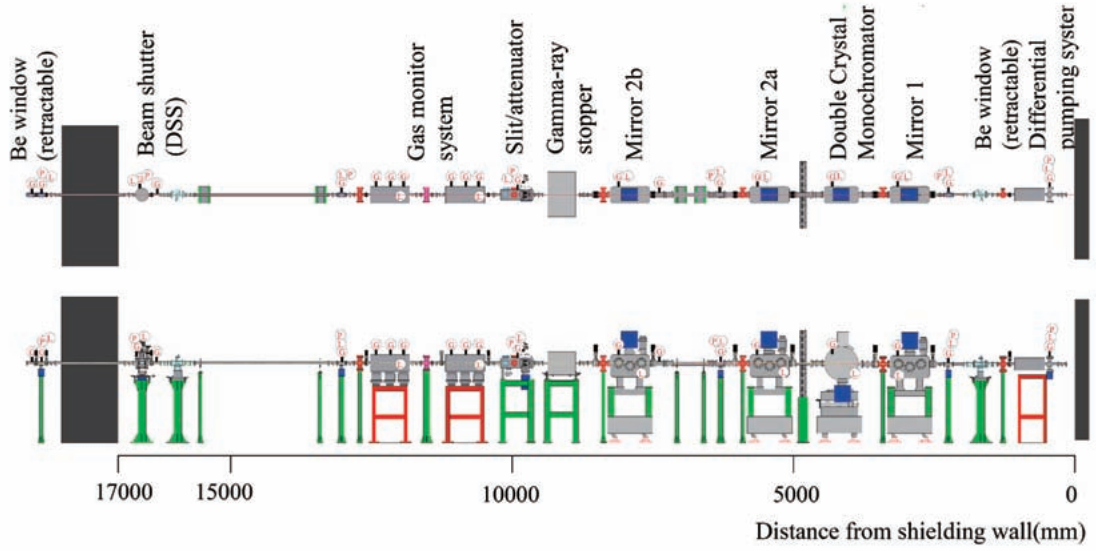

図15　光学ハッチ内のビームラインレイアウト

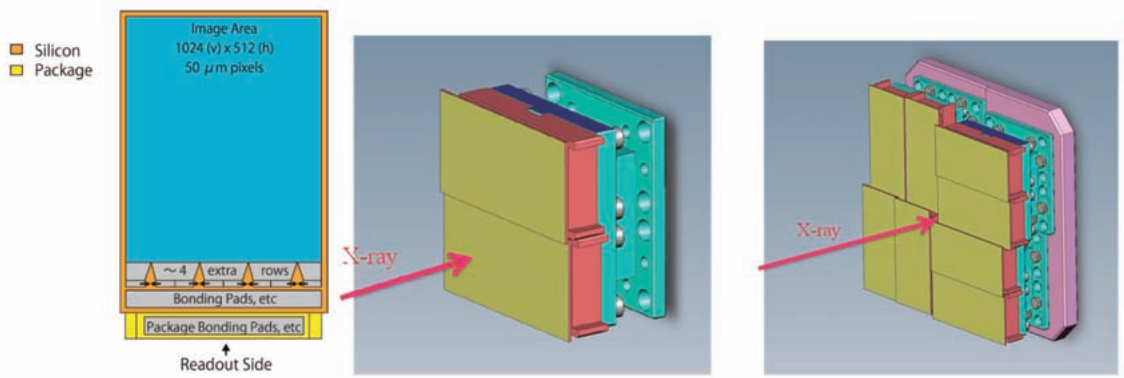

図16　MPPCCD検出器のセンサーのレイアウト概要（左）と、これをタイリングした1M pixel検出器（中）と4M pixel検出器（右）。4M pixel検出器は中心部に開口サイズが可変な矩形穴を持つ。

表2　Multi-port CCD検出器の仕様と目標性能

ピクセルサイズ	50×50μm
	100×100μm（2×2 binning時）
動作温度	0～−50℃
検出効率	80% @ 6keV, 20% @ 12keV
システムノイズ	フレームレート60Hzにおいて330電子以下（0.2ph@6keV）
最大信号量	ピクセルあたり5×10^6電子以上（3100ph/pixel/frame@ 6keV）
フレームレート	外部信号と同期して動作した条件で、60Hz以上
暗電流	20℃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300μm幅以下
	（2×2binning時で3ピクセル相当）
X線照射耐性	12keVのX線10^{14}光子/mm^2以上

確実に動作することを目標とするシステム（安定システム）としてMPCCD検出器を、新しい技術開発を導入し更に高性能の検出器を実現するシステム（先進システム）としてSOI検出器を位置づけリスク管理を行うこととした。

MPCCDのセンサー構造と、これを組み合わせた1M pixel 検出器、4M pixel 検出器（イメージ領域はそれぞれ$50\times50mm^2$, $100\times100mm^2$）を図16に示す。また、センサーの仕様と目標性能を表2に示す。繰り返し周波数60Hzに同期して画像を取得するためには、高速でデータを読み取る必要がある。そこでセンサーは8個の読み出しポートを備え、並列にデータを読み出す構造とした。これにより、各ポートは5MHz、実効ダイナミクスレンジ13.9bitでデータを読み取ればよい。CCD素子の寄生容量、消費電力、電荷転送効率、ノイズを検討した結果、このような素子が製造可能であることを明らかにした。次にX線照射による素子の損傷について検討した。直接検出型の半導体検出器では放射線耐性が一般に悪い。1年間の使用に耐えられることを必須の条件と考えた場合、全運転時間の40%のランタイムを仮定して1.6×10^{14}ph./mm^2以上の耐性が必要と見積もられる。実際にテスト用のCCD素子にX線を照射して素子の損傷による影響を評価した。その結果、X線照射によりフラットバンド電圧のシフトとリーク電流の増加が起こるが、前者は動作電圧の調整で、後者は素子を冷却することで対応可能なことが明らかになった。

MPCCD検出器では対応できない高ダイナミクスレンジが必要な実験や、MPCCDではコスト的に対応が難しい大面積検出器については、SOI検出器を用いることを検討している。実現可能性を評価するため、単一ゲインのセンサーについて、センサー性能の評価を行った。また、MPCCDの20倍のダイナミクスレンジを実現できる3つのゲインをピクセル内に実装したセンサーを設計した。来年度はこの試作センサーの性能評価を行う予定である。

参考文献

［1］XFEL/SPring-8 Beamline Technical Design Report, X線自由電子レーザー計画合同推進本部 利用グループ、2008年6月.

［2］矢橋牧名、初井宇記、富樫格、玉作賢治、永園充、東谷篤志、工藤統吾、木村洋昭、大橋治彦、後藤俊治、高橋直、田中義人、冨澤宏光、田中隆次、原徹、田中均、渡川和晃、石川哲也：放射光、Vol. **56** (2009) 22.

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、XFEL施設の構成機器のR&DとSASE-FELの性能検証を目的として2005年度に建設された。2006年度にレーザー増幅に成功、2007年度にレーザー出力の飽和を達成した。2007年度後期から、SCSS試験加速器の安定なEUV-FELの試験的利用が行われ、2008年5月から公募による本格的なEUV-FELの利用実験がスタートした。EUV-FELの利用実験は、XFEL利用実験のR&DおよびEUV領域の新光源による新たなサイエンスの開拓を目的としている。本節では、試験加速器の運転状況と利用の進捗状況について述べる。

3-1　SCSS試験加速器の運転状況

2008年1月の電子銃カソードアッセンブリー交換以降、50～60nmの波長範囲においてレーザー出力飽和が長時間持続する安定運転が実施されてきた[1]。大きなトラブルとしては、250MeVビームダンプラインでビーム損失による線量増加が10月に発生した。原因究明と仮復旧対策のため、予定されていた7日間の運転スケジュールがキャンセルとなった。このトラブルによる利用実験のダウンタイムを回避するため、スケジュールの組み替えを行った。2008年度の総運転時間（日数）は1941時間（200日）であり、そのうちの約43%、840時間（95日）が利用実験に使用された。高電圧機器等のフォルトによる利用実験中のダウンタイム比率は4%で、利用実験中のフォルトの平均頻度は1日あたり約1回であった[2, 3]。図17にマシン調整、スタディも含めたフォルト原因の頻度分布を示す。

XFELに向けたR&D項目は利用実験を軌道に載せるため、若干遅れてはいるが、大きな成果も幾つか得られた。先ず、目標であったC-bandの加速勾配35MV/m以上、60Hzのビーム繰り返しの条件において、安定なSASE-FELの連続出力飽和が達成された事である[4]。障害となっていた高繰り返し運転時のIOT電源や電子銃インバータ電源の不安定性は、回路系の改良により克服された。図18にC-band第2(1)ユニットの加速勾配を37(21)MV/mとして60Hzのビーム繰り返しで運転した時のSASE-FELの連続飽和状態を示す[2-4]。その他にも、IOT電源の高出力化、CSRインスタビリティの発生調査、E/O効果によるバンチタイミング計測、EMAを用いたRF電圧、位相のフィードバック制御、同期データ収集系を用いたアンジュレータ部の軌道ドリフト補正、電子ビーム電流分布安定化、C-band加速管のビーム誘起法によるクレスト評価等が実施された。

EUV-SASE-FEL利用実験は平日の5日間、朝10:00（休日明けは11:00）から夜7:00の9時間（休日明けは8時間）で実施される。実験の状況により、実験担当者との話し合いで実験開始と終了時間の調整を行っている。これまでの運転経験から、運転開始から約3時間、温度変動によるレーザー出力のドリフトが生じる事が判明している。10:00からの利用実験時にレーザー出力がドリフトしないよう、クライストロン及び電子銃ダミー管のカソードヒーター出力を運転状態まで引き上げる操作を早朝に実施している。また、一週間程度の利用実験期間に渡るレーザー出射位置及びレーザー出力変動を抑制するため、ディフレクタのタイミング制御[5]及び2種類のビームフィードバック[6, 7]を導入した。これにより極めて安定なレーザーの供給が可能となった。

試験加速器運転チームのXFEL運転への移行を視野に入れ、試験加速器運転制御システムの合理化を推進している。秋には、XFELの運転制御システムへ拡張可能な新しい運転制御システムの運用を開始する予定である。また、RF機器の交換による運転停止期間を短縮する目的で、RF機器の状態を監視するシステムの検討を始めた。運転の信頼性を高めるには、できる限り機器の異常を早く予測することが重要である。

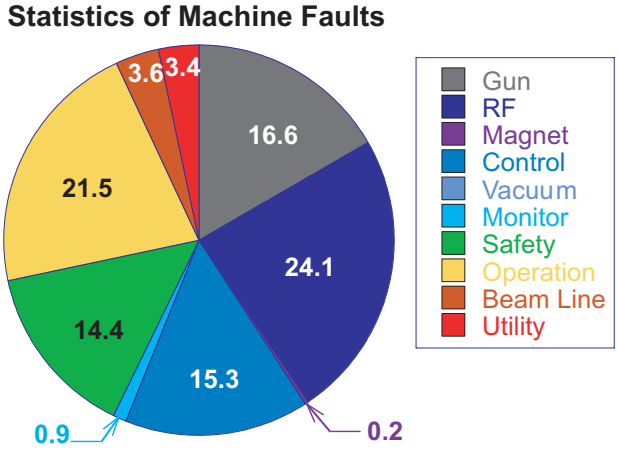

図17　試験加速器における各機器フォルトの割合

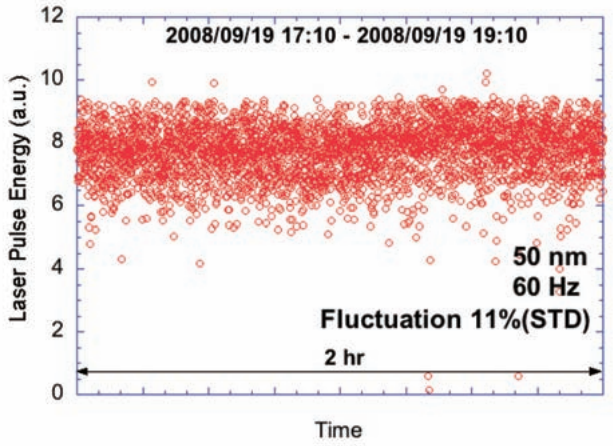

図18　C-band加速システム第2ユニットの加速勾配を37MV/m、60Hzのビーム繰り返しの条件で達成された50nmのレーザー波長でのSASE出力飽和の定常状態。

参考文献

［1］H. Tanaka et. al.:“Operation Status of the SCSS Test Accelerator : Continuous Saturation of SASE FEL at the Wavelength Range from 50 to 60nm”, *Proc. of the 11th European Particle Accel. Conf.*, Genoa, June (2008) pp.1944-1946 .

［2］K. Togawa et al.:“Progress of the SCSS Test Accelerator for XFEL/SPring-8”, presented in PAC'09, Vancouver, May 2009.

［3］K. Togawa et al.:“Operation Status of the SCSS Test Accelerator for Experiments Using Extremely Ultraviolet Laser Light”, presented in the 6th Annual Meeting of Particle Accelerator Society Japan, JAEA, Tokai-Mura, Aug. 2009.

［4］T. Inagaki :“8-GeV C-band Accelerator Construction for XFEL/SPring-8”, presented in the 24th Liner Accelerator Conference (LINAC08), Victoria, British Columbia, Canada, Sep. 2008.

［5］N. Hosoda, T. Ohshima, K. Togawa, H. Maesaka, Y. Otake and H. Tanaka : "Timing Control of a High Voltage Pulse Deflector to Stabilize EUV Laser Light at the SCSS Test Accelerator", *Proc. of the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan*, Higashihiroshima, Aug. (2008) pp. 533-535.

［6］S. Tanaka, K. Togawa, M. Yamaga, M. Yabashi, Y. Tajiri, T. Hasegawa, T. Morinaga, Y. Kano, R. Yamamoto, Y. Otake and H. Tanaka :“Performance Improvement of an Electron Orbit Correction System in the SCSS Test Accelerator”, presented in *the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan,* JAEA, Tokai-mura, Aug. 2009.

［7］Y. Tajiri, K. Togawa, M. Yamaga, H. Maesaka, M. Yabashi, S. Tanaka, T. Hasegawa, T. Morinaga, Y. Kano, R. Yamamoto, Y. Otake and H. Tanaka :“Energy Feedback for SASE-FEL Stabilization in SCSS Test Accelerator”, presented in the 5th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, JAEA, Tokai-mura, Aug. 2009.

SCSS試験加速器運転グループ
田中　均

3-2　SCSS試験加速器利用

本年度の公募は、３期（A期：５月～７月、B期：９～12月、C期：２～３月）に分けられ、総計25研究課題（XFEL利用推進課題17課題、一般利用８課題）が採択された。一般課題の中には、フランス、ドイツなどの海外の研究者グループによる課題も採択されている。課題分野は、XFELの基盤技術開発、原子分子科学、イメージング、超高速現象、高エネルギー密度科学であり、様々な利用実験が実施された。

ユーザー利用実験と並行して、ビームライン整備も進められた（図19）。実験棟内のブランチBには、共通基盤機器

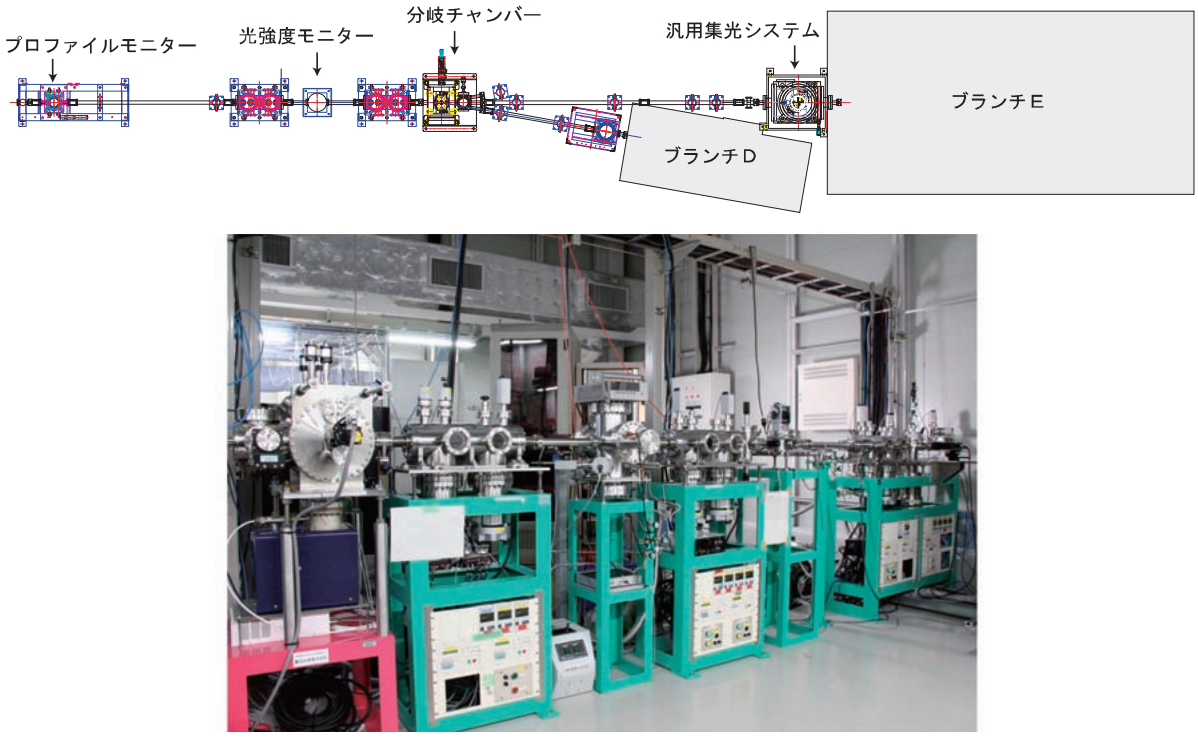

図19　EUVレーザー実験棟内ビームラインの機器配置図と写真

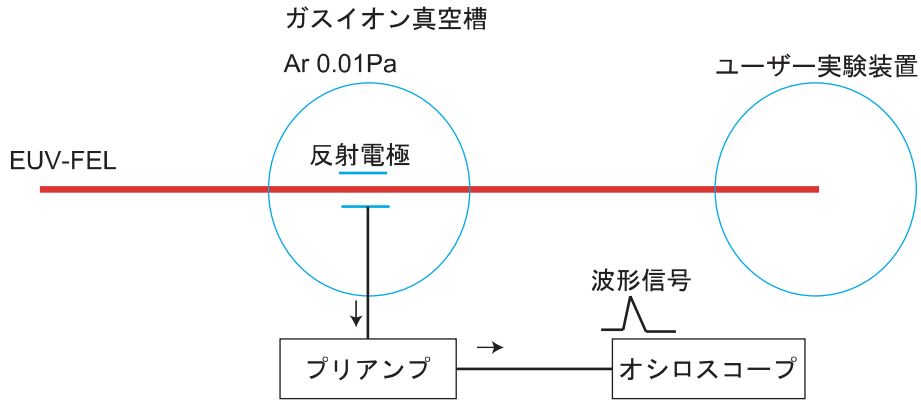

図20　透過型光強度モニター

として、光プロファイルモニター、透過型光強度モニター、分岐チャンバーを整備した。光プロファイルモニターは、5%Ce-YAG結晶（ϕ25mm）にEUV-FEL光を照射し、その脱励起による蛍光（可視）像をCCDカメラで撮影し、ビーム形状を観測する。透過型光強度モニターは、真空槽内にArガスを10^{-2}Pa導入し、FEL照射によって生じた光イオンを電極で検出し、波形信号をオシロスコープで測定して、電荷量から光量を見積もる（図20）。ここで、Arガスによる光吸収は１％程度であり、ほとんどのFEL光はビームライン下流側に供給される。分岐チャンバーは、FEL光を３つのブランチD、E、Fへ振り分ける。平面ミラー（Auコート）２枚が、鏡面（入射角５度）を向かい合わせに１つのステージ上に設置され、光軸に水平直交方向にステージを動かすことで、下流側の光軸を３方向に切り替える（ミラー反射でブランチDとF、ミラー反射なしでブランチE）。

ユーザー利用実験用として、ブランチD（非集光）とE（汎用集光）の整備を行った。ブランチDとEには、ユーザー受け渡しチャンバーを設置し、その下流側にユーザーの持ち込みチャンバーを接続できるようにした。今年度のブランチEは、非集光ビームのみを供与した。ユーザー利用期間後、ブランチEに汎用集光システムを導入した。集光システムは、楕円鏡と円筒鏡の２枚のミラーで集光サイズがϕ10〜20μm（計算値）を得る。また、ブランチDとEの実験チャンバー測定領域には、エアパットで高精度に実験チャンバーを据付できるように、床研削（平坦性＜200μm）を行った。

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や今後の展望等を積極的に発信し、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多大なる成果の創出を実現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

2008年度は第４回X線自由電子レーザーシンポジウム及び第２回XFEL３極ワークショップ（詳細は次項「5．国際協力：３極ワークショップの開催」参照）を開催した。第４回シンポジウムは「世界が注目する日本の技術・コンパクトX線レーザー」と題して、12月12日に東京国際交流館にて開催した。一般、企業及び研究機関から384名の参加者を迎えた（図21）。今回はアンケートを実施し、その結果、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、７月２日に兵庫県公館で、兵庫県及びひょうご科学技術協会主催の講演会が開催された。講演者として石川哲也プロジェクトリーダーと田中良太郎グループディレクターが招かれ、兵庫県内に建設されている10ペタフロップスコンピュータとXFELの連携可能性についての講演を行った。約200名が集まり、井戸敏三県知事も参加され、XFELとペタコンという２つの国家基幹技術の連携を考えるよい契機となった。

図21　第４回X線自由電子レーザーシンポジウムの様子

(3) 報道発表、取材・見学対応

2008年度に行った報道発表は表3の4件である。7月28日付けの発表は、SCSS試験加速器が目標性能に到達しXFEL実機の成功を確信させる内容であり、多くの新聞にとりあげられた。残りの3件は国からのサポートを受けているXFEL利用推進課題による成果で、4月17日付けと3月18日付けの成果はSCSS試験加速器を利用したものである。

また、XFEL計画は国のプロジェクトであるため、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（図22）や大学生らが多数見学に訪れた。2008年度からユーザー運転を開始したSCSS試験加速器についても、できる限り積極的に情報公開し、理解増進に努めた。

(4) 刊行物

季刊の「X線自由電子レーザーニュース」のデザインを一新し、より一般の方の興味をひく内容にした（図23）。1年間でNo.3〜6までを発行し、大学、企業、研究機関、図書館、自治体など約7,000ヶ所に送付した。また、放射光普及棟及び中央管理棟、組立調整実験棟へ頒布するとともに、各種イベント等で配布し、ホームページからもダウンロード可能にした。

また、地元自治体である上郡町が発行する広報誌「広報かみごおり」の連載枠をいただき、2009年1月号より毎月XFELについて掲載させていただくこととした。

(5) その他

4月のSPring-8施設公開ではSCSS試験加速器を公開し、昨年より700名ほど多い、1,831名の見学者に説明を行った。また、科学技術振興機構が主催する「サイエンスアゴラ」（東京お台場で開催）や、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し、関東地域での知名度向上や理解増進のための活動を行った。さらに、地域小中学生に対する広報活動として、佐用町立三日月中学校や播磨高原広域事務組合立播磨高原東小学校（図24）で出張授業を行った。佐用町立図書館や上郡図書館でも一般向けのお話会を開催した。

さらに、ユーザー運転を開始したSCSS試験加速器の運転状況をいつでも把握できるように、ホームページで運転

図22　中高生が試験加速器を見学

図23　2008年度に発行したX線自由電子レーザーニュース

表3　2008年度の報道発表

日　付	タイトル	発表者
2008年 4月17日	極短波長FEL光によるN_2の2光子・3光子イオン化過程の観測に成功！	東京大学　山内薫 理化学研究所　矢橋牧名　らのグループ
2008年 7月28日	新しい科学技術を創る小型自由電子レーザー －日本発、世界最小のX線自由電子レーザー（XFEL）成功に向けた大きな一歩－	理化学研究所　田中均 理化学研究所　矢橋牧名　らのグループ
2008年 8月5日	夢の光「X線自由電子レーザー」の強度を1億倍にする鏡の開発に成功－日本が誇る精密加工技術により、原子レベルの精度で大型集光鏡を作製－	大阪大学　山内和人 理化学研究所　大森整 理化学研究所　矢橋牧名　らのグループ
2009年 3月18日	不感時間ゼロの荷電粒子多重計測に成功 －XFELによる単分子構造解析に向けた大きな一歩－	東北大学　上田潔 京都大学　八尾誠 理化学研究所　永園充　らのグループ

図24　播磨高原東小学校での出張授業

状況をリアルタイムで表示することとした。

企画調整グループ
馬塚　優里

5. 国際協力：3極ワークショップの開催

SLAC（アメリカ）、DESY（ドイツ）、SPring-8（日本）という3つのXFEL施設間の国際協力を進めるために、3極コラボレーションの枠組みが2007年に立ち上げられ、SPring-8において第1回のXFEL 3極ワークショップが開催された。これに引き続き、第2回のワークショップが2009年2月27、28日SLACにて開催された。SPring-8からは8名が参加した。今回、ホストであるSLACは、LCLSのコミッショニングの最中であり、特に加速器グループは非常に多忙の様子であったが、活発な議論とともに運転現場等の見学も行うことができ、充実した2日間であった。

初日の午前中は、各施設が現状報告を行った。SLACはLCLSのコミッショニングの状況、DESYはFLASHの運転の様子を中心に報告した。SPring-8は、実機の建設状況とSCSS試験加速器の運転状況を紹介した。午後は、加速器、利用に分かれて議論を行った。加速器では、アンジュレータ周りの技術的課題が集中的に議論された。利用系では、コミッショニング、X線スプリット・ディレイライン光学系等のテーマが取り上げられた。

翌日午前中は、利用系は引き続きテーマ毎に議論を行った。加速器グループは、アンジュレータホールの見学が許可され（図25）、さらに制御室で実際のビームチューニングの様子を見学することができた。特に、SCSS試験加速器では見られない可視領域のコヒーレント遷移放射（C-OTR）の状況を直に見たことが印象的であった。C-OTRを発生させる密度変調は、フォトカソードRF電子銃に由来する可能性が高く、あらためて熱電子銃の安定性を痛感すると共に、安定なFEL運転を左右する鍵になる可能性もあると感じた。午後に会議のサマリーがまとめられた。加速器グループにおいては、各施設でタイムラインと装置構成が大きく異なるため、議論がかみ合わない点も多いが、お互いの現場を見学し意見交換をすることは非常に有用であり、今後も継続すべきであるという結論が述べられた。また、利用系では、薄型結晶、位相子等の光学素子の開発等のアイテムについて、継続してコラボレーションを行う。次回は2010年4月頃に、ドイツDESYにて開催の予定である。

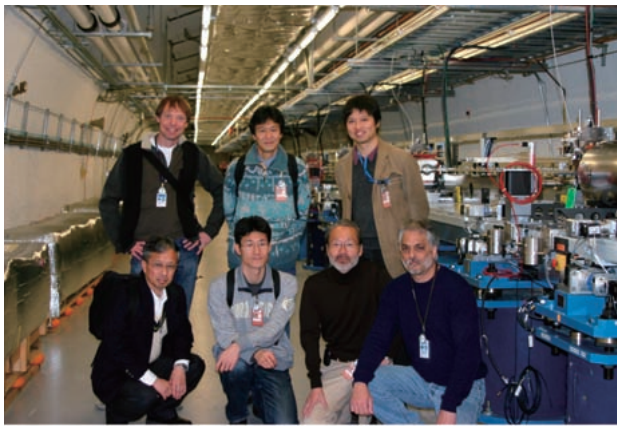

図25　アンジュレータホールでの記念撮影．真空チェンバーは最下流のフルエネルギービームダンプまで締結完了され、電磁石、モニター、アンジュレータ架台等、アンジュレータ以外の全ての必要な機器が据え付けられた状態であった。

利用グループ
矢橋　牧名