

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

2006年度に国家基幹技術としてスタートしたX線自由電子レーザー（以下、XFELとする）施設の整備は2年を経過し、建物関連・加速器関連の整備が順調に進捗している。この間にSCSS試験加速器（以下、試験加速器とする）を用いた各種試験や前年度の経験に基づく改善が実施され、2007年度中盤に波長50～60ナノメートルでのレーザー出力の飽和を観測した。そこに至る過程で得られた貴重な加速器の知見は実機建設に活かされている。試験加速器からの極端紫外（EUV）レーザー光は、所外からの利用希望も多く、実験のための建物とビームラインを整備することとした。XFELの利用準備研究は文部科学省の内局予算で進められているが、そこに関係する全国の研究者と連絡を密にすることによって、施設側で準備する基盤的設備の検討を行ってきた。また、グローバルな連携を深め、競争と協調の体制を明確化するために、米国、ヨーロッパのXFEL計画主体との間で合同ワークショップを開催し今後の協力促進を図るとともに、一般の方々により広くXFELの意義等を理解していただくためのシンポジウム開催をはじめとした各種広報活動を進めている。

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 建設計画の概要

XFEL/SPRING-8は2006年から5カ年計画としてSPRING-8サイト内で建設が開始され、2011年度以降、X線領域でのレーザー利用を可能とする施設で、建設費総額は390億である。

XFEL施設は高品質電子ビームを作り8GeVまで加速する長さ約400mの線型加速器部と、その電子からX線レーザーを作り出す長さ約200mの光源部（うち約100mがアンジュレータ）、そのX線レーザーを利用する長さ約60mの実験ホールで構成されている。

光源部には最大で5本のビームラインが設置でき、当初は硬X線レーザービームラインと広帯域ビームラインの2本が建設される。また、X線レーザーとSPRING-8の放射光ビームの融合による新しい研究分野の開拓を目指して、5本のビームラインは全てSPRING-8蓄積リング棟まで延長できるように設計されている。さらに、2008年には線型加速器からの8GeVの高品質電子ビームをSPRING-8蓄積リングに入射し利用するための電子ビーム輸送系の建設が始まる。図1はSPRING-8サイト内のXFEL、SPRING-8蓄積リング、電子ビーム輸送系、試験加速器等の配置を示す。

XFELは次の基本理念の下で設計された。図2に機器構成、表1に主要諸元を示す。



図1 SPRING-8サイト内のレイアウト

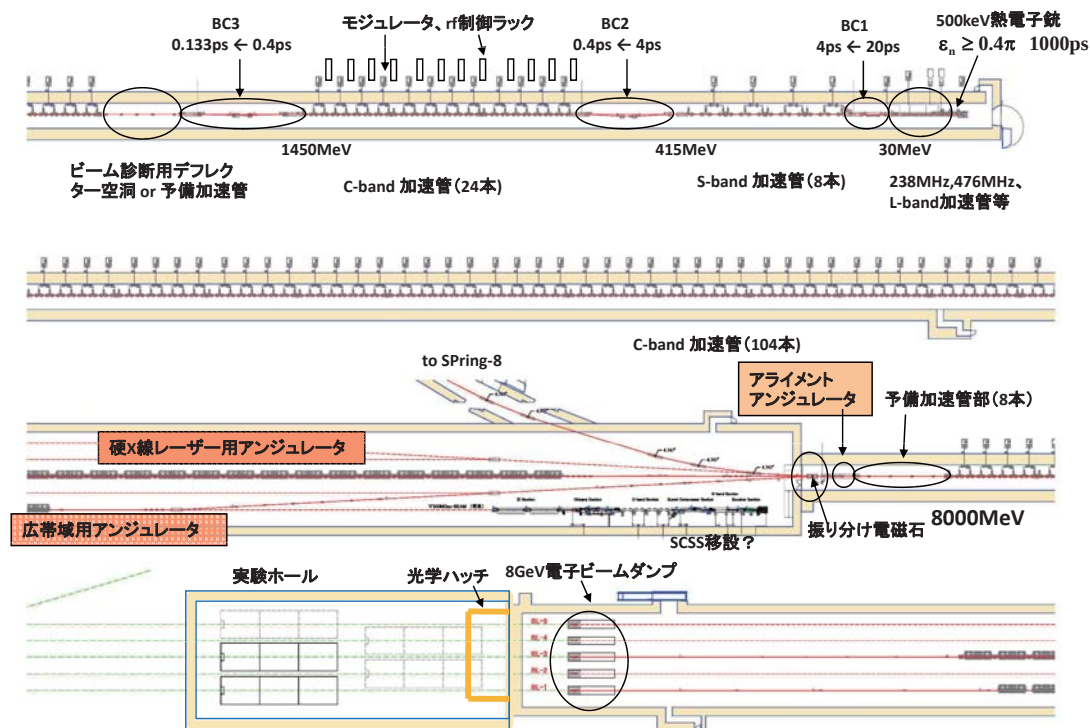


図2 XFEL施設の機器構成図

表1 XFEL/SPring-8の主要諸元

電子ビームの性能	
電子ビームのエネルギー	8GeV
電荷 (single and multi)	1nC/バンチ, 1nC/バンチ×40p
規格化スライスエミッタンス	$1\pi\text{ mm}\cdot\text{mrad}$ 以下(rms)
バンチ長	0.1ps (FWHM) 以下
ピーク電流値	3kA以上
スライスエネルギー拡がり	0.01%以下
エネルギー安定度	0.01%以下
繰り返し	60Hz
レーザー波長	
真空封止アンジュレータ	18セグメント、5m/セグメント
磁気回路	ハイブリッド型磁気回路
周期長、ギャップ長、周期数	18mm、277
ギャップ長	4mm@8GeV、5mm@7GeV

- (1) SASE発振の安定化。
- (2) SASEからSeeded FELへの高度化を可能とする柔軟性。
- (3) SPring-8サイト内の加速器、光源、施設、放射線安全等、制御システムの共通化、及び統合化による施設運転の高機能化、高精度化、省力化。
- (4) XFELとSPring-8の将来的な融合・拡張性。

2-2 建設の年次計画

2007年度に加速器機器の発注は完了し、現在製作がほぼ計画通り進んでいる。アンジュレータを含むビームライン機器は来年度の発注に向けて機器の設計作業が進められている。図3に2007年度以降の建設計画を示す。加速器及び光源棟建屋は2009年3月に完成、その後機器の据付が行わ

れ、2010年10月から線型加速器のRFエージングを予定している。2011年3月には電子ビームの調整を開始し、約半年後の2011年秋には波長0.1nmのレーザー光を利用に供する予定である。また、SPring-8への電子ビームの輸送については、レーザー光の利用開始後、速やかにビーム調整を開始し、可能とする予定である。

2-3 建設体制

2006年4月、XFELの建設を(独)理化学研究所(理研)と(財)高輝度光科学研究センター(JASRI)が共同して進めるためにSPring-8の中にX線自由電子レーザー計画合同推進本部(付録組織図参照)を設置し、試験加速器の経験と成果、SPring-8サイトで培われた加速器、挿入光源、ビームライン、放射光利用及び制御に係わる人的・技術的資源を活用し、さらに国内の産官学の専門家の協力の下、オールジャパンの枠組みで、国家基幹技術としてXFEL建設を推進している。また、若手研究者及び技術者の養成にも積極的に取り組んでいる。

推進本部には、プロジェクトリーダーの下に企画調整、加速器研究開発、加速器建設、制御系建設、試験加速器運転、安全設計、利用の7つのグループが設けられた。XFEL施設のシステムとしての整合性をとるために加速器と光源の建設は加速器建設グループが、利用技術及び測定器等の建設は利用グループが、そしてXFELとSPring-8全体の制御システムは制御系建設グループが担当する。2007年末時点でのスタッフの数は、推進本部専任、理研及び

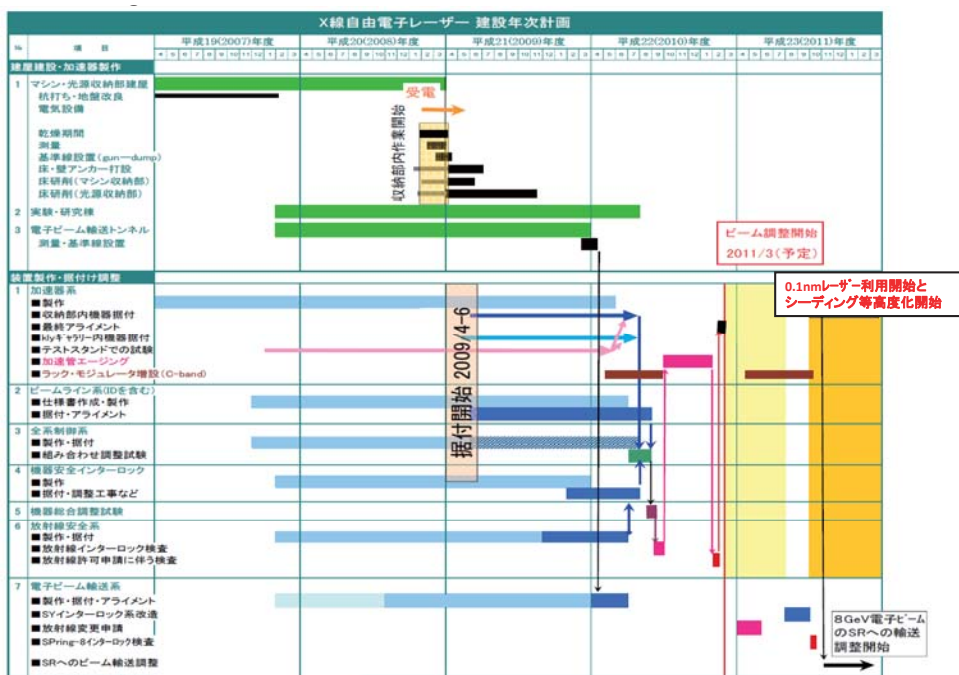


図3 XFEL/SPRING-8建設の年次計画の詳細

JASRIからの兼務者、他機関からの客員等を合わせて約160名である。

X線自由電子レーザー計画合同推進本部
熊谷 教孝

2-4 加速器建設グループ

2-4-1 オプティックス

オプティクスチームでは、2006年度から2007年度にかけて加速器基本設計^[1]を固めると共に、機器設計・製作の基本となる機器パラメータの最大許容誤差^[2,3]や機器の最大設置誤差^[4]を順次評価した。また、電子ビーム性能を保障する上で必要なバンチ圧縮プロセスの直後に設置されるRFデフレクタ空洞を用いたスライスエミッタンス及びワンショットでの縦方向位相空間分布測定系の基本設計^[5]も、ビーム診断チームと協力して実施した。

XFEL加速器の基本設計は、2-1「建設計画の概要」表1のビーム性能を満足する必要がある。設計されたXFEL加速器に沿って各機器でのビームエネルギーの増加とバンチ圧縮の様子を2-1「建設計画の概要」図2に示す。加速器設計上特に考慮した点を以下にまとめる。

- (1) CeB_6 単結晶カソード熱電子銃のビーム性能を最大限利用するため、速度変調圧縮でのビーム圧縮を試験加速器に比べ約5倍（ピーク電流比）緩めて20倍程度に止め、空間電荷効果が圧縮過程で強調されない加速に応じた理想的断熱圧縮へと近づけた。
- (2) 1Aの電子ビームを3000倍圧縮し、3kAを安定に得る

ため、非線形性によるオーバーバンチング、空間電荷効果やコヒーレント放射（CSR）によるビーム質の劣化に配慮し、速度変調バンチ圧縮とそれに引き続く30MeV、415MeV、1450MeVの3つのエネルギーでの電磁石シケインによるビーム圧縮を組み合わせた多段バンチ圧縮システムを採用した。ピーク電流は、速度変調バンチ圧縮のパラメータを変えることで広い範囲に渡り柔軟に変更可能となるよう配慮した。

- (3) レーザー増幅を安定化させるため、3段の電磁石シケインの最上流に、非線形チャープ補正用の2つのLバンド空洞とCバンド加速管を設置し、圧縮プロセスを利用し、効率的な非線形補正を可能にする^[6]と共に、当初予定されていたXバンド補正システムを取り除く事で、RF機器に対する安定性を大幅に緩和させた。
- (4) 3段の電磁石シケイン部並びに振り分け電磁石や振り戻し電磁石部で、自発放射やコヒーレント放射で射影エミッタンスの悪化が生じないように、横方向のオプティックスの設計を行った。
- (5) 試験加速器での運転経験を、XFELの基本設計にできる限りフィードバックするため、試験加速器運転グループと協力して基本設計を進めた。

参考文献

- [1] T. Hara, K. Togawa and H. Tanaka : “Basic Design of Beam Parameters for XFEL/SPRING-8”, Proc. of the 4th Annual Meeting Part. Accel. Soc. Japan, Wako, Aug. (2007) pp. 610-612.
- [2] H. Tanaka, T. Hara and K. Togawa : “Bunch Length Variation

and Timing Jitter Caused by RF System Instability in XFEL/SPRING-8”, Proc. of the 4th Annual Meeting Part. Accel. Soc. Japan, Wako, Aug. (2007) pp. 613-615.

- [3] オプティクスチーム、“電磁石電源に要求される精度について” 2007年 9 月21日。
- [4] オプティクスチーム、“加速管の位置精度について” 2008年 1 月10日。
- [5] オプティクスチーム、“BC3直下流でのスライスエミッタンス測定系設置の可能性検討 (改訂4)、2007年 3 月16日。
- [6] K. Togawa, T. Hara and H. Tanaka : “Energy Chirp Linearization in Bunch Compressors for XFEL/SPRING-8”, Proc. of the 4th Annual Meeting Part. Accel. Soc. Japan, Wako, Aug. (2007) pp. 616-618.

加速器建設グループ オプティクスチーム
田中 均

2-4-2 入射部

XFEL線型加速器の入射部は基本的に試験加速器に基づいて設計されており、その基本方針はエミッタンス増加を最小限にすることである (2-4-1参照)。すなわち、特にエミッタンスが小さくなるように設計された熱電子銃を採用し、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、1 π mm mrad以下のエミッタンスで十分な電流量のビームが安定して得られるよう、システムを設計している。試験加速器からの主な改良点は次の通りである。

①XFEL入射部では、エミッタンス増加を極力抑えるため、試験加速器で採用されたSバンドAPS空洞をLバンドに変更し、速度変調バンチングのバンチング比を試験加速器の約100から約20に低減する。②バンチング特性を改善するため、L及びCバンドの補正RF空洞を導入する。

すでにほとんどの機器が製作中であり、最初に発注した238MHz SHB空洞と476MHzブースタ空洞は納品された。

以下、電子銃と多段バンチングシステムの特徴を記載する。

(1) 電子銃

電子銃の構造^[1]は試験加速器と基本的に同じである。その主な特徴は次の通りである。①空間電荷効果によるビームの発散を抑制するため、500kVの高いビーム電圧 ②直径3mmのCeB₆単結晶カソード (理論的熱エミッタンスは約0.4 π mm mrad) ③機械的及び化学的安定性に優れるグラファイトヒータ ④エミッタンスを悪化させるグリッドを持たず、代わりにすぐ下流のビームデフレクタ^[2]により、長いビームパルスから1nsパルスを切り出す。

(2) 多段バンチングシステム

多段バンチングシステムでは、238MHz SHB空洞、476MHzブースタ空洞、及びLバンド加速管2本により速度変調バンチングを行い、L及びCバンド補正RF空洞は、バンチング効率を高め、かつ過剰バンチングを避ける役目を担う^[3]。RF系を含む全体の構成は図4の通りである。

SHB及びブースタ空洞は、ともに試験加速器とほとんど同じ構造である。新たに設計したLバンド加速管はAPS型 (Alternative Periodic Structure) 加速構造を採用し、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。APS管の場合、進行波管と違って、加速電界の非対称性を生じやすいカップラを加速管の中央に配置できるため、APS管に入射した直後のエネルギーの低いビームには、電界非対称性を原因とするエミッタンス増加が起これらしない。RF源は30MWクライストロンであり、これも製作中である。

Lバンド補正空洞は、二連単空洞であり、シャントインピーダンスを高めるためにリエントラント型形状を採用した。Cバンド補正加速管は、主加速部のチョークモード型Cバンド進行波管を必要な加速電圧が得られる26セルまで短縮した設計である (ただし定インピーダンス型)。

参考文献

- [1] K.Togawa et al.: “CeB₆ electron gun for low-emittance injector”, PR STAB, **10** (2007) 020703.

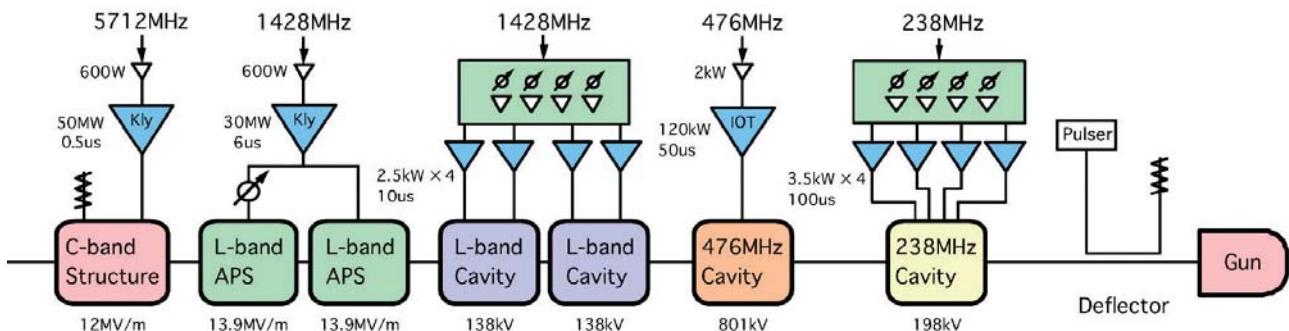


図4 XFEL入射部のRF系ブロック図

- [2] K.Togawa et al.: “低エミッタンス・短バンチ電子ビーム生成のためのビームディフレクタの開発”、第3回加速器学会年会、仙台 (2006) pp.551。
- [3] K.Togawa et al.: “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”、第4回加速器学会年会、和光 (2007) pp.616。

加速器建設グループ 入射部チーム
花木 博文



図5 Cバンド加速管の量産（於三菱重工2008年2月）

2-4-3 主加速部

主加速部では、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する。SバンドとCバンドあわせて68台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して運転することは、XFELの安定性に直結し、極めて重要である。業務実績は以下の通りである。

(1) 主加速部の加速管、導波管システムの製造

8GeVの主加速部にはSバンド加速管8本、Sバンド導波管システム4式、Cバンド加速管128本、導波管システム64式が使用される。加速器コンポーネントとしては、大量生産と言える数であり、請負メーカーにおいて生産ラインの整備、製造技術の再チェック、量産の立ち上げ、品質検査、出荷体制の整備を行った。初期トラブルも見られたが、迅速な対応によりすべて解決し、現在、量産が順調に進行している（図5）。

(2) 高安定度コンデンサ充電器の開発

加速電場の安定性はXFELにおいて大変に重要な課題である。主加速部では2007年度、クライストロン電源の安定化を集中的に実施した。その結果、モジュレータ電源のPFNコンデンサに50kVの電圧を毎秒60回高速充電するインバータ方式の高精度電源を開発した。これには理研特許の並列インバータ方式を採用しており、安定度30ppm.rmsという従来の電源から2桁近くも改善されている。試作機はすでに試験加速器に導入、ビーム運転に使用され、極端紫外線波長でのFEL運転の安定化に寄与している。

(3) 一体型モジュレータ電源の開発

モジュレータ電源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、絶縁油を充填することで、優れた電磁ノイズシールド特性をもち、湿度等の環境変化に影響を受けない一体型モジュレータ電源を開発した（図6、7）。



図6 一体型モジュレータ電源（外観）



図7 一体型モジュレータ電源（内部）

(4) その他

信頼性向上のためエポキシ含浸型パルストランス、そして温度安定化50kV高電圧分圧器を開発した。

加速器建設グループ 主加速部チーム
 新竹 積

2-4-4 光源

光源収納部に設置される挿入光源に関して詳細な仕様策定を行った。より短い磁石列長にてFEL発振を達成し、かつ、電子ビームに対する実効的開口を確保するために真空封止型アンジュレータを採用することとし、1 Åにおいて効率的なFEL発振が達成できるよう、磁気回路の最適化を行った。周期長18mm、最小ギャップ3.5mmのハイブリッド型磁気回路で構成される、全長5mのアンジュレータセグメントを18台並べることにより、1 Å近傍の広い波長範囲に渡ってFEL発振が達成できることを確認した。挿入光源機械駆動部の基本構造はSPRing-8の標準型挿入光源のものと同等であるが、磁石列の最大吸引力が従来のものに比べて約1.5倍になっているために、これを支えるための支柱が補強されている。また、オンラインでアンジュレータの高さをアライメントすることができるよう、遠隔にて上下駆動が可能なジャッキシステムを取り付けることとした。

上記で述べた基本設計をもとに、アンジュレータセグメントの先行機を開発し、各種試験を行った。まず、従来と同様の方法により磁場調整を行い、位相誤差 (図8 (a) 参照)、多極磁場成分とも従来と同程度にまで軽減できることを確認した。次に、新たに開発した磁場測定手法 (SAFALI) を利用することにより、真空槽に磁石列を設置した状態で磁場測定を行い、磁石列脱着作業による影響を調査した。この結果、図8 (b) のような位相誤差が生じていることを確認した。同図で示された位相誤差分布を解析すると、それぞれ1次あるいは2次曲線で表される、3つの領域に分割されることがわかった。これは全長5mの磁石列が3つのユニットから構成されていることを反映

しており、かつ、各々のユニットのギャップにオフセットあるいはテーパが生じていることを示している。これらのギャップ誤差の値を位相誤差分布から見積り、ボールネジを微調整することにより位相誤差を補正することを試みた結果、図8 (c) のように磁石列脱着前の値に回復していることを確認した。

加速器建設グループ 光源チーム
 田中 隆次

2-4-5 ビーム診断

2007年度は、試験加速器で評価されたビーム診断機器のうちで、XFEL装置の必要性能を満たさない、もしくは、XFELの性能向上のためさらなる性能改善が必要と思われる機器や、XFELで新規に必要なと思われる機器の研究開発を行った^[1]。加えて、仕様が確定している機器を基に、XFELの主に加速器で使用する装置の発注作業を行った。

開発を行った機器は、サブミクロンの検出精度を実現するための空洞型ビーム位置モニター用検出回路、放射線損失を低減するための薄いOTRターゲット (100μm厚、拡散接合により製作) を使用した数ミクロンの分解能を持つスクリーンモニター、同相ノイズを除去して100ps程度のパルス応答を持つ差動原理を採用したビーム電流モニター^[2]、ビームの時間方向の微細構造を知るためにストリークカメラのようにビームをキックしてスクリーン上に投影する高周波デフレクタ空洞^[3] などである。開発の結果、これらの機器は概ねXFELで必要とされる性能を満足した。一例として、図9にはビーム位置モニターシステムの性能を示す。これは試験加速器のビームモニター用データ収集システムを用いて測定されたビーム位置対検出器出力電圧のグラフで、検出感度は0.1μm/1mVである。現状のノイズレベル 5×10^{-4} V を考えると、50nm程度のビームの変位まで感度があると予想される。試験加速器では30μm (rms) 程度のビーム位置変動があり、最高到達感度を評価するのは容易ではないが、今後はその評価も試みる予定である。

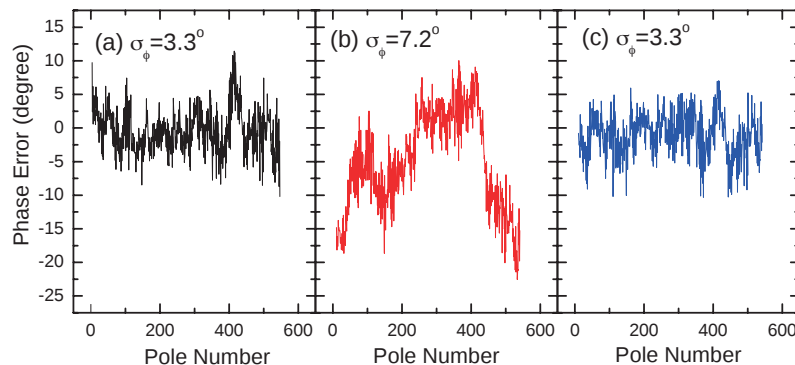


図8 XFELアンジュレータ先行機の位相誤差履歴
 (a) 磁石列脱着前 (b) 磁石列脱着後 (c) ギャップ誤差調整後

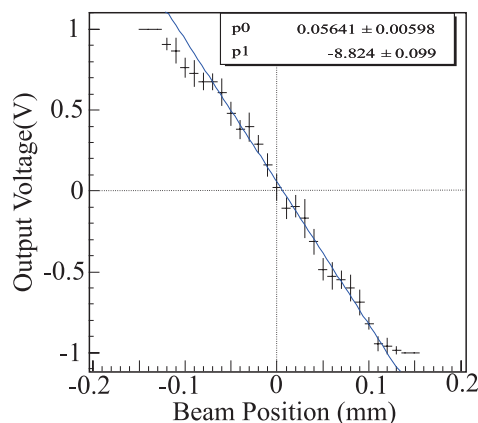


図9 BPMシステムの電子ビームの位置依存した検出感度。図中の誤差棒は、ビームのふらつきである $30\mu\text{m}$ (rms) を示す。検出感度は、 $0.1\mu\text{m}/1\text{mV}$ である。

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 EPAC2008 (2008) pp. 1224-1226.
- [2] H. Ego *et al.*: “Design of the Transverse C-band RF Deflecting Structure for Measurement of Bunch Length in X-FEL”, Proc. of EPAC2008 (2008) pp. 1098-1100.
- [3] A. Higashiya *et al.*: “Development of a Beam Current Transformer for the X-FEL Project in SPring-8”, Proc. of FEL2007 (2007) pp. 464-467.

加速器建設グループ ビーム診断チーム
大竹 雄次

2-4-6 タイミング・高周波

大電力クライストロン周りの低電力高周波システムの基本的な開発は試験加速器建設時に終了した^[1]。2007年度は、XFEL開発の一環として、試験加速器のIQ変・復調器やマスターオシレータの高度化を行った^[2]。

試験加速器と比較して規模が大きくなるXFELにおいて、伝送信号の種類を減らし、信頼性の向上と予算規模圧縮を目的として、IQ変・復調器の改造を行った。それは、主加速周波数5712MHzのIQ変・復調器で採用していた476MHzの中間周波数を使用する方式を、5712MHzを直接変・復調する方式に変更することである。また、マスターオシレータに関しては、加速電子ビームの時間ジッタに直接影響する発生信号の側波帯ノイズの低減を試みた。この結果、改良を加えた新規の装置で、60Hzとその高調波スパイク成分がそれ以前より数倍小さくなった。図10に改良前後での5712MHz波の側波帯ノイズを比較して示す。

さらに、1 km程度と規模の大きいXFELでは、施設全体に配置された装置を駆動するために、光ファイバーによる高周波・タイミング信号の伝送を行う予定である。その

理由は、光ファイバーが低損失で信号強度を遠距離まで維持でき、XFELに必要な光の波長程度までの光路長の精密制御（フェムト秒の時間精度）が可能だからである。2007年度はまず、光ファイバーによる低ノイズ高周波信号伝送装置の開発を行った^[1,3]。図11には開発した装置の評価実験結果を示す。これは、本装置の高周波入力と出力の側波帯ノイズ増加を示す比較で、ビームの時間ジッタに直接影響する量である。先に述べたマスターオシレータ（改造前）からの5712MHzの高周波信号と、その信号により光信号を強度変調し、500mの光ファイバーで伝送して、ピンフォトダイオードで光から電気に変換して得られた高周波信号を比較した。この結果から、開発した光高周波信号伝送装置は、マスターオシレータの極低ノイズレベル（46fsのビームと加速高周波間の時間ジッタを実現可能）をほとん

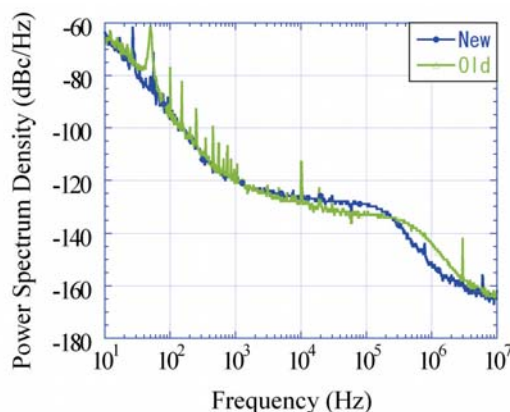


図10 マスターオシレータの改良前後の側波帯ノイズの比較。緑が改良前で青が改良後の特性である。60Hzの商用電源に起因するスパイクなどが改良後にほぼなくなっている。

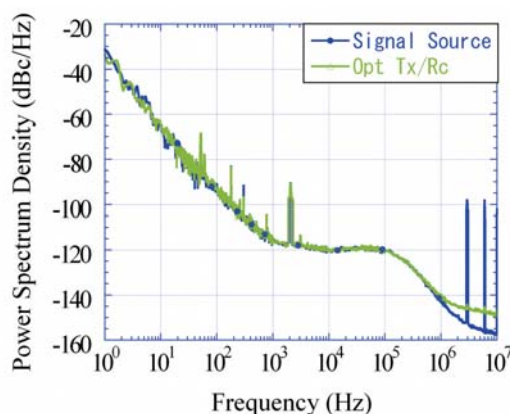


図11 5712MHzの信号源の側波帯ノイズスペクトルと光高周波伝送装置により500mのファイバーを伝送した後のノイズスペクトル。光伝送装置による500mにおよぶ5712MHzの高周波信号伝送で、1MHz以下ではマスターオシレータのノイズ増加はほとんど見られない。1MHzから10MHzでのノイズの増加は僅か7fs程度である。グラフで10KHz以上の周波数帯のノイズレベルは、使用した測定器の測定限界に近い。

ど増加させないことが分かった。このことから、高度化されたIQ変・復調器やマスターオシレータと光ファイバーによる高周波信号伝送装置を組み合わせたタイミングシステムは、XFELの初期必要性能を満たすことが確認できた。

参考文献

- [1] Y. Otake *et al.*: “Timing and LLRF System of Japanese XFEL to Realize Femtosecond Stability”, *proc. of ICALEPCS07 (2007)* pp. 706-710.
- [2] T. Ohsima *et al.*: “Improvement of the RF low level system toward the XFEL”, *Proc. of the 4th Particle accelerator Society of Japan (2007)* pp. 559-561.
- [3] H. Maesaka *et al.*: “Development of the Optical Timing and rf Distribution System for XFEL/SPring-8”, *Proc. of FEL2008, in press (2008)*.

加速器建設グループ タイミング・高周波チーム
大竹 雄次

2-4-7 電磁石

オブティックスチームと共同でXFEL加速器収束系の基本設計を行い、必要な電磁石の性能仕様を決定した。電子銃からCバンド加速部終端までの電磁石及び電源については、2007年度中に発注作業を完了している。電磁石は光源棟に設置する偏向電磁石を除いて全て空冷とし、4極及び偏向電磁石のコアには電磁純鉄(SUY0種)、ステアリング電磁石コアにはヒステリシスの小さいパーマロイ(PC-2)を使用する。電源は、加速器インターロック系に必要な入出力端子を備えた定電流電源で、OPT-VMEを介して制御する。

電磁石は、アライメントされた定盤上の基準面に底板側面を押し当てることによって位置精度を確保し、定盤に設置されたレール溝を用いて固定する。よって8GeVダンプ偏向電磁石などの大きなものを除き、基本的に各電磁石を個別にアライメントする必要はない。アンジュレータ部など4極電磁石の一部は、BPMとの相対設置精度が重要となるため、据付・アライメントチームと共同で据付方法の検討を行っている。

加速器建設グループ 電磁石チーム
原 徹

2-4-8 真空

XFELのビーム運転時の目標圧力は 1×10^{-6} Paで、主に加速管の放電を防ぐことを目的としている。排気はスパッタイオンポンプを主に用いる。真空槽はステンレス製でベッキングは行わない。真空ゲージは高速で応答するコールドカソードゲージ(CCG)を用い、加速管の放電等で圧力が悪化した際に、50msec以内に加速管を停止するインタ

ーロックとして利用する。

今年度は、XFEL固有の真空コンポーネントの開発をほぼ終了した。加速管・導波管用の高周波対応真空フランジ(ADESYフランジ)、同フランジ用DLCコーティングボルト、コンパクトRFコンタクト付ベローズの開発を行った。

また、加速器棟の真空槽、ポンプ・配管用支持装置などの設計・手配を行った。これは、シケイン部偏向電磁石用角型真空槽、RFコンタクト付ベローズ、真空パイプ、精密プレス加工した特殊ガasketなどを含む。また、真空ポンプ、真空計、バルブ類の手配を行った。真空計(CCG)については、本プロジェクト用にコントローラを開発した。

加速器建設グループ 真空チーム
備前 輝彦

2-4-9 機器制御

本年度は加速器制御システムのコンポーネントの設計と被制御機器との信号取り合い条件の決定を主に行った。高速・高精度なアナログ信号を扱うVMEボードは試験加速器で採用されたものを基に設計を行い、試験加速器での結果をフィードバックしてさらに改良することを計画している。60Hz運転時にパルス毎に電子ビームモニターのデータが収集できるように、同期型データ収集系の設計を行い、試験加速器での予備テストを通し実現可能であることを確認した。PLCを使った制御機器との信号取り合いにはFL-netを採用し、工場試験で基本的な動作確認ができるようにPC上で動くFL-net Test Toolを開発した。電磁石電源制御には、SPring-8で開発された光伝送ボードを電源本体に組み込むことで、配線量の削減と耐ノイズ性の向上を計画している。

加速器の全長が約400mと長く、機器保護のためのインターロック信号を加速器全体に直接配線することは現実的でない。このためPLCのネットワークを用いた機器保護インターロックシステムの設計を行った。

加速器建設グループ 機器制御チーム
福井 達

2-4-10 据付・アライメント

据付の基本要領として、電子ビーム軸から通路側に700mmオフセットした位置に約30m間隔でまっすぐに基準モニュメントを設置したものを水平方向据付基準とし、これらを座標基準としてレーザートラッカーを使い個々のコンポーネントを並べることとした。実際の据付に関しては、一番繰り返しが多いCバンド加速部の据付要領を検討してまとめ、各種治具の設計・製作、及び作業の手配を行った。

XFEL建屋のうち加速器部の400mは盛土部に設置する

ことから、隣接した場所に設置されたビームラインのパイプの位置を再測量し、建屋竣工後に起こる収納部床の変形に関する情報を得た^[1]。加速器部の建屋は岩盤まで達した杭基礎上に構築されるが、盛土の沈下は杭載荷荷重の変化となって建屋沈下を起こし、水平方向の変形も起こると予測された。

参考文献

- [1] H. Kimura, et al.: “SPRing-8の1kmビームライン BL29XULでの地盤変位”、日本加速器学会2007年報告集、p.859。

加速器建設グループ 据付・アライメントチーム
木村 洋昭

石にて置換を行った。切土部分は床躯体を施工できる部分まで岩掘削を行った(図14、15)。

アンジュレータホールは、放射線遮蔽のためのコンクリート(床・壁・天井厚さ1.5m)で囲われている。躯体工事では、アンジュレータホールの基礎コンクリート打設を行った。加速器棟同様、コンクリートの仕様選定のため、試験練り及び現場での試験打設を行った。アンジュレータホールの基礎は加速器棟に比べて複雑であるため、加速器棟と異なったコンクリート(低熱ポルトランドセメント、最大骨材粒径20mm、収縮低減型の混和剤)を選定した。

加速器建設グループ 建設チーム
大塚 孝

2-4-11 建設

XFEL施設の建物は、①加速器棟 ②光源棟 ③実験研究棟 ④ビーム輸送トンネルから成る。2007年3月より加速器棟に着工し、同年7月より光源棟に着工した。実験研究棟及びビーム輸送トンネルは現在設計中である。

施設建設において要求されるのは、マシンが設置される床レベルの恒久的の精度の確保である。本年度は、建物にとって特に重要な加速器棟及び光源棟の基礎工事・躯体工事を主に施工した。尚、加速器棟及び光源棟は2009年3月に竣工予定である。

(1) 加速器棟

加速器トンネル及びクライストロンギャラリーの床は長さ16m～52mの場所打ちコンクリート杭で支えられる構造になっている。加速器棟の地盤は、SPRing-8の敷地を造成する際に盛土によって造成された場所であり、建物を支持させたい中硬岩までの深さは最大で52mにもなる。盛土には杭施工に障害となる岩の塊が含まれているため、全旋回式オールケーシング工法による場所打ちコンクリート杭とした。杭工事は2007年6月から開始し、2007年11月に完了し、 $\phi 1.5\text{m}$ と $\phi 1.6\text{m}$ の杭を合計136本施工した(図12)。

加速器トンネルは、放射線遮蔽のためのコンクリート(床・壁・天井厚さ2m)で囲われている。躯体工事では、加速器トンネルの床・壁コンクリート打設を行った。コンクリートの仕様選定のため、試験練り及び現場での試験打設を行い、性能と施工性を考慮したコンクリート(低熱ポルトランドセメント、最大骨材粒径40mm)とした(図13)。

(2) 光源棟

光源棟のアンジュレータホール床部分は、直接地盤に支えられる構造になっている。地盤は、1/3が盛土、2/3が切土にて造成されている。盛土部分は床レベルの恒久的の精度確保のため、中硬岩が現れる最大深さ16mまで掘削し、碎



図12 加速器棟 杭工事



図13 加速器棟 加速器トンネル躯体工事



図14 光源棟 掘削工事



図15 光源棟 砕石置換工事

2-5. 加速器研究開発グループ

加速器研究開発グループでは、将来の性能向上を目指した研究開発を実施している。主な項目を順に述べる。

2-5-1 シーディング技術の開発

現在建設が進められている8GeVのXFELは、SASE（サセ方式：Self Amplified Spontaneous Emission 自然放射の自己増幅レーザー）であり、発振の種が自然放射光であるために時間軸のコヒーレンス長が約100nm程度に制限される。時間コヒーレンス長を改善するため可視光のレーザーを発振の種として電子ビームに入射し、高次高調波を利用する技術の開発が望まれる。そこでシュケイン磁場の入り口で可視光レーザーによりエネルギー変調を付与し、この波長を電子パンチの圧縮過程で同時圧縮して、X線波長へ変換する方式を発案した。2007年度は主に理論的な研究を行った^[1]。この方式によると、YAGレーザーの第4次光（波長250nm）を電子ビームに入射させ、パンチ圧縮率200倍によって密度変調の波長を1nmに圧縮。ひきつづき長周期のアンジュレータによってFEL動作をさせ、その9次高調波に共鳴する短周期のアンジュレータにてFEL増幅することにより、波長1ÅのX線を得ることが可能となることがわかった。

2-5-2 電子ビーム特性評価のための計測技術の開発

XFELのひとつの大きな目標である単分子のイメージングにおいて、たんぱく質等の生命物質をサンプルとする場合、強力なX線により分子を構成する原子が完全にイオン化してクーロン爆発をするが、X線のパルス長が数フェムト秒以下であれば、クーロン爆発の前にイメージングを完了できることが理論的に予測されている。しかしパンチ長を数フェムト秒にするには、大きなパンチ圧縮率が必要であり、非破壊でパンチ長を計測する方式の開発が望まれる。現在、X線イメージングにより使用されている2次元の位相回復技術を1次元に応用する方法について理論的な研究

を行っている。

参考文献

- [1] T.Shintake : “Wideband Seeding and Wavelength Compression” , Proc. of FEL 2007 (2007) pp.378-381.

加速器研究開発グループ
新竹 積

2-6 制御系建設グループ

2-6-1 XFEL制御システム

XFELにおける制御用フレームワークとして、SPRing-8で開発され、SPRing-8、NewSUBARU及び試験加速器で運用実績のあるMADDOCA（Message And Database Oriented Control System）^[1]を採用した。

高速・高精度なアナログ信号を扱う機器制御部はVMEを、それ以外の制御機器はインターロックを含めてPLCを使用する構成とし、これらのPLCと上位制御系との取り合いはFL-netを採用した^[2]。オペレータコンソールとしてはIA32ベースの計算機とLinux OSを採用し、オペレータコンソールとVMEを結ぶネットワークはギガビットイーサネットにより構築する。また、異なるネットワーク間の干渉を避けるために仮想ネットワークの導入を計画している。図16に制御システムの概念図を示す。

2-6-2 施設系制御システム

施設制御系で扱う冷却水、空調、受電電圧などの装置・設備は、XFELの性能を左右する重要なパラメータとなっている。そこで、PLCで組まれた施設制御系をFL-netを介してマシン制御系の一部として取り込み、収集したデータをマシン用データベースに格納できるよう施設制御系の設計を行った。

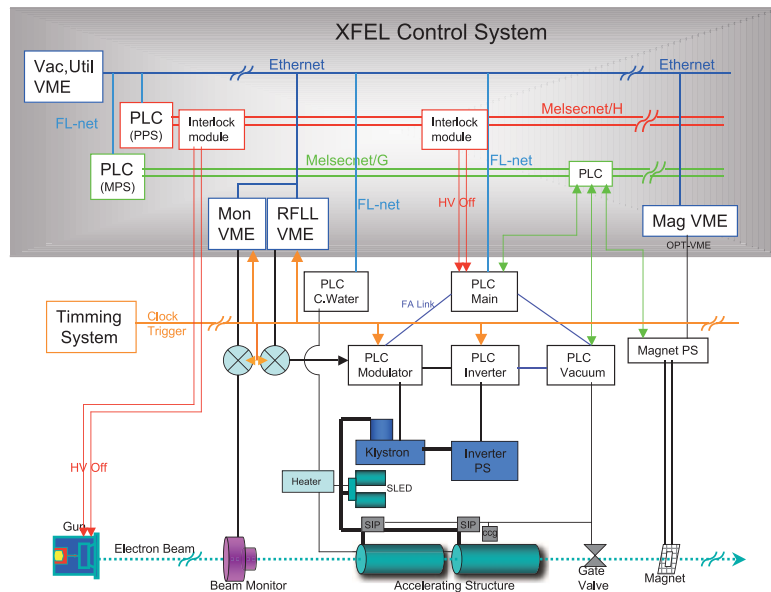


図16 XFEL制御系構成図

2-6-3 安全インターロック・入退管理

XFEL加速器の放射線安全に係わる加速器安全インターロックシステム、入退室管理システム、ビームラインインターロックシステムの基本的なシステム構成と機能について設計を行った。XFEL加速器安全インターロックシステムは、非常停止系、放射線安全系、ビームルート系、情報収集系など、機能毎に独立した各インターロックが連携動作する構成にした。入退室管理システムについては、将来的にはSPring-8入退室管理システムと一体的に管理・運用するため、SPring-8入退室管理システムと共通のシステムを採用した。

2-6-4 ラベリングシステム

XFELに使用する機器のライフサイクル、つまり製造、搬入、仮置き、設置、修理、再設置、廃棄にいたるまでのデータを一括してデータベースに納め、webで閲覧、管理するためのシステムを開発した。機器の管理状態を電子的に把握するため、QRコードを印刷したラベルを工場出荷段階で機器に貼付した。

参考文献

- [1] R.Tanaka, et al.: "The first operation of control system at the SPring-8 storage ring", Proceedings of ICALEPCS'97, Beijing, China (1997) p1.
- [2] T. Fukui et al.: "Development of a communication with PLC by using the FL-net as open standard PLC link", Proceedings of PCaPAC2005, Hayama, Japan (2005).

制御系建設グループ
田中 良太郎

2-7 安全設計グループ

X線自由電子レーザー安全性評価委員会において承認された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の策定を行い、加速器棟及び光源棟のバルク遮蔽設計を実施した。実施に当たっては、SPring-8で用いられた方法に加えて、最新の計算コード（モンテ・カルロコードFLUKAやEGS、及び簡易計算コードSHIELD11）による比較計算を実施し、評価の妥当性を検証した。加速器冷却水、加速器収納部内空気、及びダンプ周辺土壌の放射化による影響を概算し、その生成量が少なく環境に影響がないことを確認するとともに、合理的な施設設計・建設に反映させた。今後、加速器機器配置等の最終決定に基づく放射化評価の詳細計算を順次実施する。試験加速器においては、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相関をとりながら、調整時及び調整後（発振時）の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を行い、評価方法及び結果の妥当性を検証した。

XFEL施設放射線監視モニターシステムの概略設計と機器の選定を実施した。また、管理区域内や加速器及び光源収納壁内への出入制御を含めたXFEL安全インターロックシステムの概念を構築するとともに、制御グループと共同で詳細設計の協議を実施している。

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。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の開発に着手した。また、電子ビーム損失位置等を検知するために、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、試験加速器で実施している。

国際放射線防護委員会勧告の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X線自由電子レーザー安全性評価委員会を2回開催し、安全評価手法、及びXFEL施設進捗状況に応じた評価結果について検証を受けた。

安全設計グループ
浅野 芳裕

2-8 利用グループ

2-8-1 ミッション

利用グループは、XFEL利用基盤システムの開発・整備を担当するとともに、プロジェクトチームの中でユーザーとの接点の役割を果たしている。具体的な項目を以下に示す。

- (1) ビームライン・光学系、検出器・データ収集系、レーザー・タイミング系等の研究開発と整備。
- (2) シード化等のFEL高度化に向けた研究開発。
- (3) 文科省XFEL利用推進研究課題等のユーザーとの連携。
- (4) 試験加速器における利用システムの構築とユーザー支援。

2-8-2 ビームラインの概念設計

(1) 概要

ビームライン系機器の整備は、2008年度から3年間にわたって進める予定である。本年度は、来年度の発注作業に向けてビームラインの概念設計を行った。

XFELの3つの特徴として、高輝度・短パルス・高コヒーレンスが挙げられる。ビームラインの設計に当たっては、利用実験においてこれらの特徴を十分に生かせるよう留意しなければならない。このために、以下のような設計の基本方針を策定した。

- (a) コヒーレント照明下で有害となるスペックルを抑制するために、高品位の光学素子の利用を必須とする（高コヒーレンス）。
- (b) 光学系の不安定要因をできるだけ排除するために、可動軸を削減し、可動範囲も制限する（高コヒーレンス）。
- (c) XFELパルスの照射による光学素子のダメージを低減するために、軽元素組成の素子を用い、さらに超高真空環境下において素子の表面を清浄に保つ（高輝度・短パルス）。

(2) 主光学系

主光学系として、従来の放射光ビームラインでは結晶分光器（バンド幅：～0.01%）が広く用いられてきたが、これはXFEL（バンド幅：～0.1%）に対して1桁程度の強度の損失を伴う。そこで、損失がない全反射ミラー（ローパ

スフィルタ）を主光学系とし、結晶分光器も必要に応じて利用可能とした上で、定位置出射（使用する光学系・波長にかかわらず出射ビーム位置が一定となる状態）が実現可能かどうか検討を行った。原理的には、ミラー、分光器とも、それぞれの光学素子を2枚1組で用いて、回転・並進を組み合わせることで定位置出射は実現できる。しかし実際には、ミラーは1°以下の小さい視射角で用いられるため、カットオフ波長を連続的にスキャンしながら定位置出射を実現しようとすると、非常に大がかりな並進機構が必要となる。このために、今回は、カットオフ波長を2種類に制限した上で、第2ミラーを切り替えて用いるという方式を採用した（第1ミラーは共通）。また、オプションとして、ミラーを退避して、二結晶分光器が挿入可能となるようにした（図17）。ダブルミラー間の距離を小さく保つために、入射光に対する出射光のオフセット量を20mmに設定した。

ミラーをコヒーレント照明下で用いる場合、スペックルの発生を抑制するために表面の形状精度が非常に重要となる。このために、大阪大学・SPRING-8で開発された400mm長の超平坦ミラーが用いられる^[1]。

超高真空対応・高安定の二結晶分光器を実現するために検討が行われた。長尺（10cm程度）のシリコン結晶を用いることで、並進機構のストロークを抑制するという新たな方式が提案され、基本軸構成の検討が進められた。

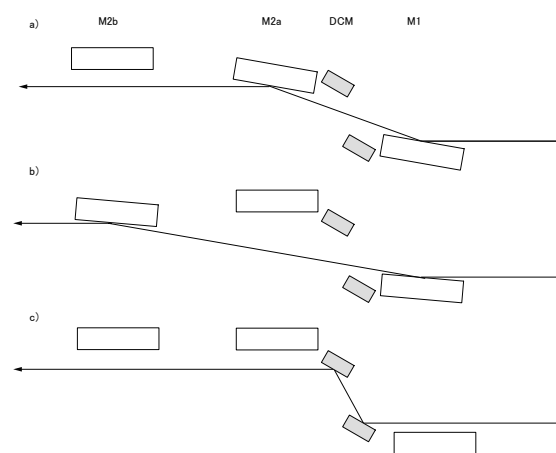


図17 主光学系の構成案

a) 長波長対応ダブルミラー b) 短波長対応ダブルミラー c) 二結晶分光器の3つの光学系が排他的に用いられ、定位置出射を達成する。M1: 第1ミラー、M2a: 第2ミラー-a、M2b: 第2ミラー-b、DCM: 二結晶分光器。

(3) ハッチ

安全設計グループを交えた協議の結果、γ線・中性子線に対する十分な放射線遮蔽を担保するために、光学ハッチの主素材としてコンクリートを用いることを決定した。また、アンジュレータ上流の振り分けマグネットの設計によ

り、隣接ビームラインの間隔は3mに制限されている。このために、光学ハッチ、実験ハッチは、ビームライン毎に個別に設けるのではなく複数をグルーピングする形でデザインされることになった (図18)。

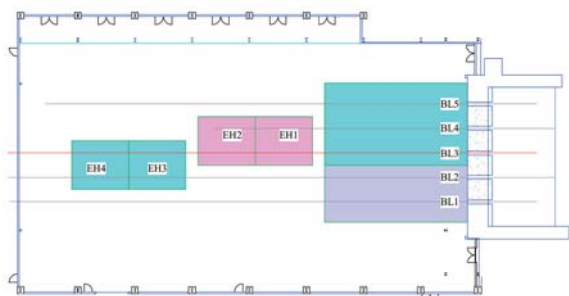


図18 ビームラインハッチの構成案

光学ハッチは2つ設置され、それぞれBL1・2、BL3・4・5を含む。4つの実験ハッチ（EH1-4）は、BL2・3・4に対応する。BL1とBL5は軟X線FELビームラインの想定のため、実験ハッチを設けない。

(4) 同期レーザー

XFELとの同期実験に用いられる超短パルスレーザーの検討を行った。将来の発展性、共同利用に必要な安定性・利便性等の観点から、様々なシステムを比較検討した。その結果、第一号機としては、Ti:Sapphireオシレータ・CPA・OPAを組み合わせたスタンダードなレーザーシステムを導入し、試験加速器で同期実験のテストを進めるという計画を策定した。また、同期に必要な高精度のタイミング伝達・診断システムについては、XFEL利用推進研究課題（代表者：理研 玉作賢治氏）及び加速器建設グループのタイミング・高周波チームとも連携しながら、開発を進めている。

2-8-3 コミッショニングシナリオの検討

加速器建設グループとともに、XFELのレーザー増幅を速やかに達成するためのコミッショニングシナリオの検討を行った。最終目標として、アンジュレータの複数のセグメントを数ミクロン以下の精度で直線に並べ、かつセグメント間の磁場エラーを 10^{-4} 以下に抑制する必要がある。このような高い精度を達成するために、アンジュレータの自発放射X線をガイドとしてアライメントを行う必要がある、このために必要な光学機器・検出器の検討がなされた。

2-8-4 ユーザーとの連携：利用ワークショップ

XFELは新奇性を本質とする光源である。したがって、利用研究の展開にあたっては、既存のコミュニティ（放射光、レーザー等）の枠を超えた新たな仕組みが必要とされる。この一環として、文部科学省において、X線自由電子レーザー利用研究推進のプログラムが組織され、2006年度から

2007年度にかけて、様々な分野から18課題が採択された。

施設側としても、これらの研究グループとの連携を十分に図っていくことが求められている。このために、利用グループが中心となり、「XFEL利用ワークショップ」を立ち上げた (表2)。第1回 (2007年6月) では、主に試験加速器の利用に向けて施設者、利用者双方からプレゼンテーションが行われ、議論がたたかわされた。第2回 (2008年3月) では、XFELビームライン、検出器・DAQ、試験加速器ビームライン、同期レーザーについて、施設側が示したたたき台をもとに議論が行われた。今後も定期的に開催する予定である。

また、利用実験のガイドラインとして、「XFELビームラインデザインレポート」の取りまとめを進めており、来年度に初版を発行する予定である。

表2 利用ワークショッププログラム

SCSS試験加速器の利用に関するワークショップ(第1回XFEL利用ワークショップ)			
2007年6月7日(木) 13:00~17:00			
理化学研究所東京連絡事務所			
～プログラム～			
第1部施設・共通技術			
(1)はじめに	.....	石川哲也(理研)	10分
(2)施設・共通基盤技術の概要	.....	矢橋牧名(理研)	20分
(3)タイミング・レーザー技術	.....	玉作賢治(理研)	20分
(4)プロトタイプ真空紫外レーザーの集光技術	.....	山内和人(阪大)	20分
第2部利用実験			
(5)XFEL光源による分子およびクラスターの構造とダイナミクス	.....	山内薫(東大)	20分
(6)高エネルギー密度状態を利用した新しいX線光学	.....	米田仁紀(電通大)	20分
(7)イメージング検出器を用いた時間分解光電子分光	.....	鈴木俊法(理研)	20分
(8)コヒーレント散乱測定	.....	西野吉則(理研)	20分
(9)高い対称性をもつ超原子クラスターの電子状態とダイナミクス	.....	中嶋敏(慶応大)	20分
第3部総合討論	.....		30分
第2回XFEL利用ワークショップ			
2008年3月5日(水) 13:00~17:00			
東京国際フォーラムG701号室			
～プログラム～			
(1)はじめに	.....	石川哲也(理研XFEL)	5分
(2)XFELビームラインの設計	.....	矢橋牧名(理研XFEL)	35分
(3)EUVビームラインの整備計画	.....	永園充(理研XFEL)	35分
(4)試験加速器のレーザー整備計画	.....	富樫格(理研XFEL)	35分
(5)XFEL2次光検出器の整備計画	.....	初井宇記(理研XFEL)	35分
(6)総合討論	.....		30分

2-8-5 SCSS試験加速器の利用に向けた取り組み

XFELプロジェクトの最終目標として、XFEL装置の建設後、速やかに利用実験を展開していくことが必要とされている。このためには、既存の放射光源、レーザー光源も十分に活用しながらR&Dを進めていくことが有効である。特に、XFELプロトタイプ機として建設された試験加速器は、FELを「未知の光源」から「既知の光源」へ転換させる場として、非常に利用価値が高い。

利用グループを中心として、このためのシステム開発・整備が進められている。2006年度には、加速器収納部とは独立の建屋である「EUVレーザー実験棟」が建設された。これを受けて、本年度は、収納部内の既設の光診断セクションから実験棟までの輸送ビームラインの建設を行った。詳細は3. (3-2-4 利用整備)を参照されたい。

また、2007年10月から、試験加速器収納部内において、XFEL利用研究推進課題の研究グループ（代表者：東大 山内薫氏）により試行利用が開始され、延べ数週間にわたる利用期間中、大きなトラブルなく安定してFELが供給されたことを確認した。さらに、この実験は、試験加速器における初の利用成果にもつながった^[2]。この運転実績をも

参考文献

- [1] H. Mimura et al.: Rev. Sci. Instrum. **79** (2008) 083104.
[2] T. Sato et al.: Appl. Phys. Lett. **92** (2008) 154103.

利用グループ
矢橋 牧名

3. SCSS試験加速器の運転状況

3-1 これまでのサマリー

試験加速器は、SPRing-8 Compact SASE Source (SCSS) の設計思想に基づくXFEL施設の構成機器のR&D、並びにSASE-FELの性能検証を目的として建設された。表3に試験加速器のこれまでの運転経過を示す。2005年春から加速器の建設を開始し、8月末に加速器トンネル及び建屋が完成、機器の据付とRFエージングを経て最初の加速器ビーム調整が11月に開始された。11月30日には約70MeVのビームエネルギーにて、最初のアンジュレタ放射を確認した。

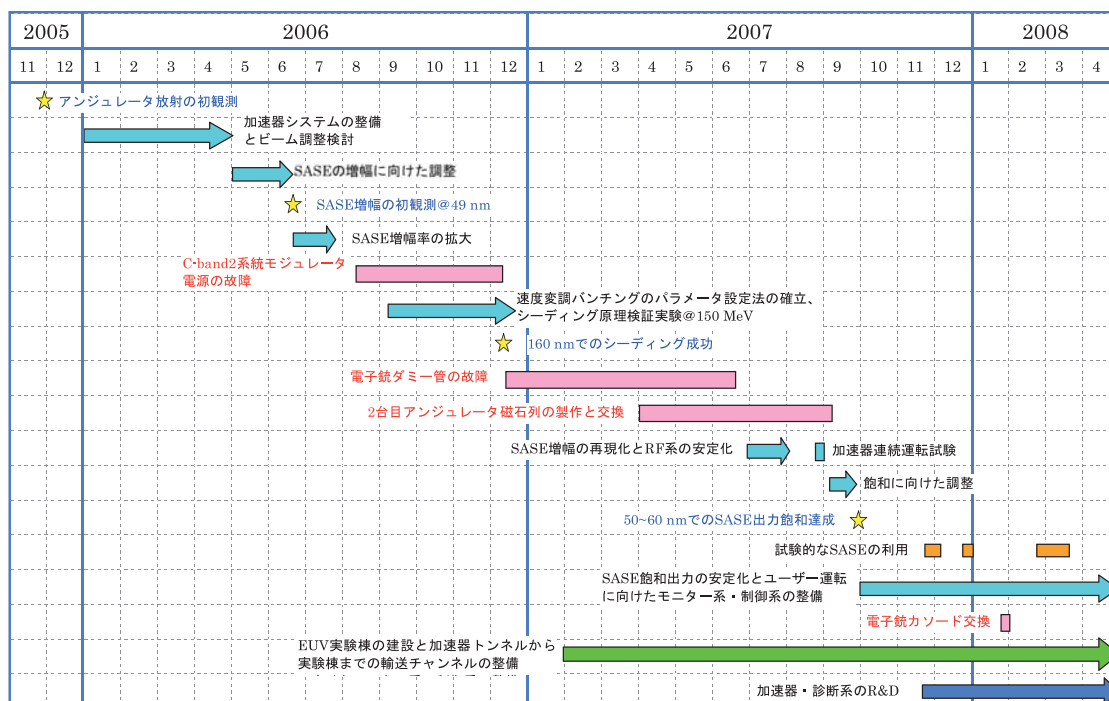
2006年1月から残りの加速器コンポーネントの設置及びコンディショニング、並びにビーム調整手法の検討を進めた。2006年5月、全ての機器の状態が整い、SASEレーザー増幅に向けたビーム調整を250MeVの電子ビームを用い

て開始した。合理的な調整を積み上げた結果、6月20日にレーザー増幅の初観測に成功、以降レーザーパワーの飽和に向けた調整を進めた^[1-3]。2006年秋にCバンド2系統のモジュレータ用インバータ電源が故障し、秋から冬にかけての3ヶ月は150MeVのエネルギーでビーム調整を行った。この時期は、電子銃からSバンドAPS空洞にかけての速度変調バンチングパラメータの正確な設定法の確立並びに160nmの長波長によるシーディングの原理検証実験などを進めた。しかし、ビーム調整途上の2006年12月、電子銃グミ管にトラブルが発生し、ビーム調整は約半年間中断されることとなった。

2007年の2月からSASEレーザーを利用した実験を行うためのEUV実験棟の建設を開始し、レーザーを加速器トンネルから実験棟まで導く輸送チャンネルの整備を進めた。並行してダミー管のトラブル要因の特定を進め、改良を加えた新しいダミー管を製作し交換した。2007年6月25日からビーム調整を再び開始し、まず初めに、SASEレーザー増幅の再現化を行った。引き続いて精密調整に向けたRF系の安定化^[4]を進めた。9月初めに2台目のアンジュレータ磁石列の交換によりSASEレーザー出力飽和を実現する全ての準備が整い、レーザーパワーの飽和に向けた調整を9月初旬から開始した。この結果、9月の終わりに50～60nmの波長領域において、はじめてレーザーパワーの飽和を実現した^[5]。実験装置を加速器トンネル内に設置し、強力で安定したSASEを試験的に利用する実験が、10月半ばから開始された。

2008年1月最初の加速器立ち上げにおいて、電子銃から

表3 試験加速器運転の経過



所定のエミッション電流が引き出せなくなり、カソードアップセンブリーの交換を加速器くみ上げ後に初めて実施した。このカソード使用実績は、約2万時間であった。カソードの交換は、電子銃の1500℃への昇温、エージングと500kVの高圧印加等、復旧までの全行程を含めて1週間で安全に実施できる事が分かった。また、バージンのカソードによるレーザーパワーの飽和も無事再現し、カソード製作の信頼性も確かめられた。現状パルスの繰り返しは通常10Hzで運転され、50~60nmの波長範囲でSASEレーザーの出力が持続的に飽和し続ける安定した発振状態が実現できている^[6]。

参考文献

- [1] T. Shintake: "Status of the SCSS Test Accelerator and XFEL Project in Japan", Proc. of the 10th European Particle Accel. Conf., Edinburgh, June (2006) pp. 2741-2743.
- [2] H. Tanaka et. al.: "Beam Performance of the SCSS Prototype Accelerator", Proc. of the 3rd Annual Meeting Part. Accel. Soc. Japan, Sendai, Aug (2006) pp. 96-98.
- [3] H. Tanaka et. al.: "Low Emittance Injector at SCSS", Proc. of FEL 2006, BESSY, Berlin, 27 Aug. to 1 Sep (2006) pp. 769-776.
- [4] H. Maesaka, T. Fukui, N. Hosoda, T. Inagaki, T. Ohshima, Y. Otake, H. Tanaka, T. Hasegawa, S. Takahashi, S. Tanaka and M. K. Kitamura: "Precise RF Control System of the SCSS Test Accelerator", Proc. of the 11th European Particle Accel. Conf., Genoa, June (2008) pp. 1404-1406.
- [5] T. Shintake et. al.: "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region", *Nature Photonics* **2** (2008) pp.555-559.
- [6] 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.

SCSS試験加速器運転グループ

田中 均

3-2 高度化の取り組み

3-2-1 安定化

SASEレーザー出力を増大させるには、増幅率をブロープとして全てのマシンパラメータを精密に調整する必要がある。安定したレーザー増幅状態を実現するには、電子ビームのピーク電流変動を制御することが本質的である。このため、まずRF系の安定化に取り組んだ^[1]。

(1) RF空洞冷却水温度安定化

入射器には3種類の定在波空洞が用いられている。定在

波空洞のQ値は高いので、僅かな形状変化で容易にRF位相がシフトする。加速モードを TM_{010} とし、 $Q=10^4$ 、空洞の材質を無酸素銅として計算を行うと、0.01度の位相安定性を実現するのに1mK以下の温度安定性が必要である。このため、空洞冷却水系には精密温度調整システムが設置され、空洞外壁面に設置された熱電対により空洞本体温度を0.01Kの分解能で一定とするPID制御が施されていた。しかし、ビームのエネルギー変動を詳しく調べた結果、熱電対の温度は遅れが大きく、フィードバック制御がRFの位相変動を逆に引き起こしていることが判明した。この対策として、熱平衡状態での使用を前提に、制御点を空洞本体温度から空洞入口冷却水温度に変更し、高周波ノイズをカットするFIRフィルターに制御信号を通す改善を行った。これにより、RF系の早い変動成分を大幅に抑制することに成功した。

(2) RF系のフィードバックループの設定分解能の改善

RF位相と電圧のドリフトを抑制するため、各RF系に空洞内RF位相と振幅の測定値に基づく位相固定ループ(PLL)と振幅固定ループ(ALC)を構築した。空洞の高周波位相・電力制御及びモニターにはIQ(Inphase-Quadrature)法を使用した。最初は位相設定の分解能が0.09度(360度の1/4096)に制限され、設定分解能が足りないため、滑らかなフィードバック制御が実現できなかった。そこで12bitのDACによる位相制御の中でIとQを独立に取り扱い、IとQの設定分解能が位相の設定分解能に最大限反映できるように、制御ソフトの位相設定アルゴリズムを改善した。また、空洞のQ値が大きいのを逆手にとり、空洞の長いfilling timeの間で入力側の設定値をDACの最小分解能で振りながら時間分解設定を行うことで、実効的な分解能を引き上げる改善を行った。この2つの改善によりフィードバックループの実効的な設定分解能を約1桁改善することに成功した。空洞冷却水温度安定化とフィードバックループの設定分解能向上の、2つの改善実施の前後における238MHz SHBの位相変動を図19に示す。

参考文献

- [1] H. Maesaka, T. Fukui, N. Hosoda, T. Inagaki, T. Ohshima, Y. Otake, H. Tanaka, T. Hasegawa, S. Takahashi, S. Tanaka and M. K. Kitamura: "Precise RF Control System of the SCSS Test Accelerator", Proc. of the 11th European Particle Accel. Conf., Genoa, June (2008) pp. 1404-1406.

SCSS試験加速器運転グループ

田中 均

3-2-2 アンジュレータ磁石列の交換

試験加速器が発振に至らなかった大きな原因として、下

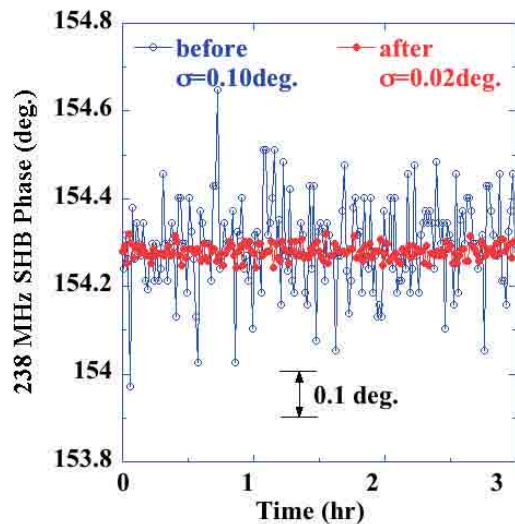


図19 改善の前後における238MHz SHBの位相変動

流側アンジュレータ（以下、ID2とする）の磁場性能を上げることができる。これは、例えばID2から得られる自発放射光スペクトルのバンド幅が上流側アンジュレータ（以下、ID1とする）のその3倍程度もあるということや、ID1単独でFEL増幅が観測できる条件下でもID2単独では増幅が確認できない、などの事実から明らかとなった。さらに、ID2下流における電子ビームのプロファイル測定から、ID2に極めて大きなねじれ4極磁場 (Skew Quadrupole Field) 成分が含まれているということが確認された。これらの状況を改善するため、新たに磁石列を製作しID2の磁石列と交換することとした。

新型磁石列の製作においては、磁石ユニットの設計を大幅に見直し、従来のもの（磁化角度を45°傾斜させたHalbach型磁石列）から、標準的なハイブリッド型磁石列へと変更することとした。これは磁化傾斜型磁石列の場合、永久磁石の製造過程において、各永久磁石ブロックの磁化ベクトルの大きさと角度に大きな誤差が生じやすく、結果的にID2のように大きな誤差磁場が生じやすいという理由からである。当初からハイブリッド型磁石列を採用しなかった理由は、アンジュレータ周期長が15mmと短いため永久磁石ブロックを薄くせざるを得ず、標準的な方法で磁石ユニットを組み立てることが困難であったためである。この問題を解決するために、磁石ブロックや磁極材さらには組立用クランピングボルトなどの寸法に関して、従来の設計と同程度の磁場が得られるように最適化を行い、この結果、ハイブリッド型磁石列用の永久磁石ユニットを開発することに成功した。また、磁石列の幅を長くすることにより、ねじれ4極磁場やその他の多極磁場成分の影響を可能な限り取り除くこととした。

新型磁石列への交換は2007年4月から始まり、真空槽の取り外し、銅製Iビームの取付穴の追加加工及び表面再加工、磁石ユニットのIビームへの取付、磁場の再測定及び

調整等の過程を経て、同年8月に完了した。交換完了後、ID2は同年9月に試験加速器収納部内へ再設置された。

加速器建設グループ 光源チーム
田中 隆次

3-2-3 制御系の整備

試験加速器の制御用フレームワークとして、SPring-8で開発されたMADCOCAを採用した。高速・高精度な機器制御用としてVMEを採用し、新たに高速A/Dボード、高速D/Aボード、トリガーディレーボード、FL-netボード等を開発した。配線量を減らして信頼性をあげるため、その他の制御機器は内部にPLCを組み込む構成とし、上位計算機との取り合いは上記のFL-netを使用した。オペレータコンソールとして、IA32ベースの計算機とRedhat Enterprise Linuxオペレーティングシステムを採用した。上位計算機とVMEを結ぶネットワークは、ギガビットイーサネットにより構築し、制御用ネットワークとFL-netを同じネットワークでサービスするために、仮想ネットワーク (VLAN) を使用して機能毎に独立したネットワークセグメントを構築した。機器構成としては、6台のオペレータコンソールと15台のVMEからなり、それらにより加速器と挿入光源の機器制御を行っている。データベースサーバ、ファイルサーバ及び基幹ネットワークは、SPring-8と共通の物を使用している。これらの構成により、加速器の制御システムとしては極めて短期間で安定運用を実現することができた。

本年度にはReflective Memoryを用いたパルス毎のBPMデータ収集系を整備して、10Hzで安定してデータベースにデータが保存されることを確認した。EUV実験棟への制御用ネットワークと機器制御用VMEの整備を行い、実験ユーザーに対してはSPring-8と同様にFirewallで保護されたBLユーザーLANを整備した。試験加速器の安全インターロック、及び機器保護インターロックに対して、SPring-8中央制御室からの遠隔制御が可能なようにシステムを改造した。また、その際に見つかった安全インターロックの不具合の改修も行った。このことにより、加速器と挿入光源の機器制御システムも含めて中央制御室からの運転が可能のように構築することができた。

加速器建設グループ 機器制御チーム
福井 達

3-2-4 利用整備

EUV-FEL輸送系は、加速器収納部内の既存のEUV-FEL診断セクション中に分岐用の平面ミラーM1を設置し、実験棟まで新規ビームラインを延伸するものである。従来の診断セクションをブランチA、輸送系をブランチBと呼ぶ

(図20)。ブランチAは、M1を退避させて（反射なしで）EUV-FELが導入される。ブランチBは、2枚の平面ミラー（M1、M2）を用いて、EUV-FELを実験棟へ輸送する。M1の中心は、ID出口から5785mmにあり、斜入射（視射角5deg）でEUV-FELを水平に振る。M2は、M1から光軸に沿って2304mmの下流側に設置され、斜入射（5deg）で、EUV-FELを水平に振り戻す。M1とM2のミラー本体は、長さ150mm、幅30mm、厚さ30mmのSiCである。SiCの反射率は、EUV-FELの基本波長50～60nmにおいて約80%（実測値）で、EUVレーザー実験棟までのビームライン全体での透過率は、ミラー2枚の反射で約64%である。M1の調整軸は、ビーム軸に対して、水平振り角、垂直振り角、光軸直交水平並進の3軸、M2の調整軸は、水平振り角、面内回転角、光軸直交水平並進、鉛直並進の4軸あり、それぞれステッピングモーターを用いて駆動され、収納部外からリモートで制御できる。

EUVレーザー実験棟は、9m×14mの広さがあり、ビームライン上流側（加速器収納部側）には収納部から続くブラ

ンチB、下流部には4つのブランチD、E、F、Gを整備する計画である（図21）。それぞれのブランチの機能は以下の通りである。実験棟内のブランチBは、施設側の共通基盤機器（光量調整用アッテネーター、透過型光強度モニター、透過型光位置モニター、分岐チャンバーなど）を整備する。ブランチD、E、F、Gは、ユーザー利用実験を行うため、ブランチDは非集光、ブランチEとFは汎用集光ミラーシステム（集光径：数10 μm ）を整備し、下流部にユーザー装置を接続して利用実験を行う。ブランチGはブランチEの下流部で、究極集光システム（集光径：数 μm ）を整備する予定である。また実験棟内には、共用レーザーシステムとユーザー持ち込みレーザー用のスペースを設ける。

利用グループ
永園 充

3-3 SASEレーザー出力飽和の達成

SASEレーザー増幅率は、2006年夏の時点で自発放射に

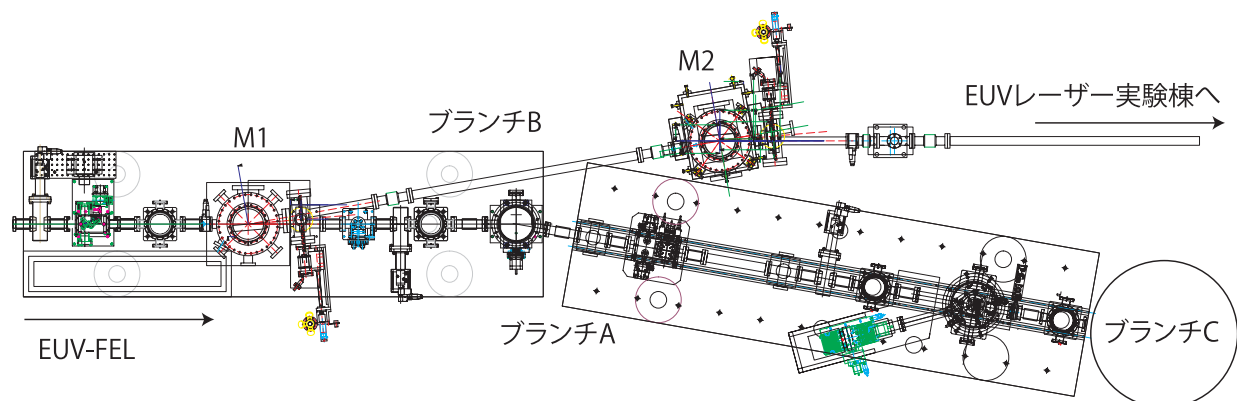


図20 加速器収納部内のビームライン

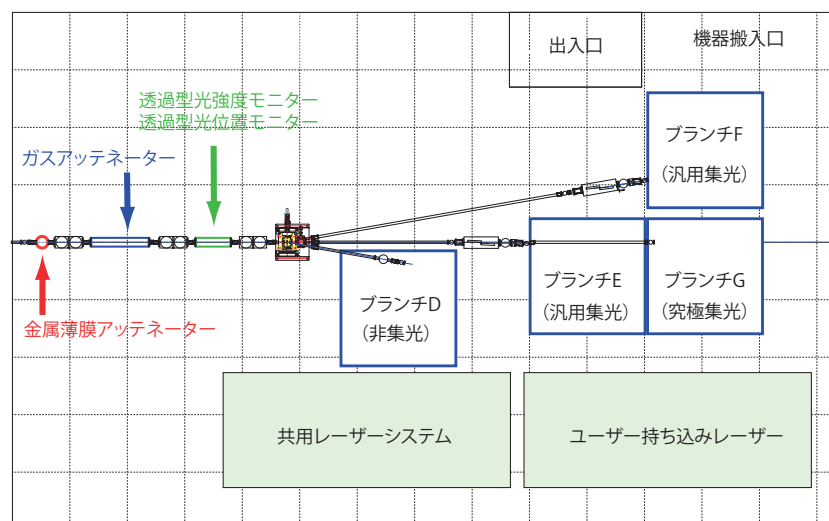


図21 EUVレーザー実験棟内のビームライン

対し4桁程度が得られていたが、飽和には至らなかった。その理由として、①ショット毎のレーザー増幅が不安定であり、精密なRF系並びに電磁石パラメータの設定ができないこと②2台目のアンジュレータのSkew多極成分が大きく2台目のアンジュレータでのレーザー増幅利得が低いことが考えられた。

そこでまず、入射器のRF系の安定化を実施した^[1]。次に、これにより実現したレーザー増幅状態をモニターしながら、増幅率が増大する方向にRF系のパラメータの精密設定を実施した。

2台目のアンジュレータの磁石列交換後、アンジュレータギャップで決まるレーザー波長に対し、増幅率を最大化するよう2台のアンジュレータの相対レベル調整、並びに各アンジュレータ入口部のステアリングによる電子ビーム軌道のマッピングを実施し、2台のアンジュレータに渡る軌道の精密設定を行った。最適軌道はアンジュレータ内を電子ビームの蛇行の中心線が直進するように決まるはずである。アンジュレータ1台当たりの増幅利得が大きいので、アンジュレータ間で光の位相整合を行う必要はなかった。

アンジュレータ内では強い垂直収束がアンジュレータギャップに依存して発生する。この垂直収束とアンジュレータ間に設置された収束4極電磁石による水平収束を合わせることで、アンジュレータ内の水平・垂直バートロン振動によるビームの横方向の空間広がりを小さく維持することが可能である。このためには、電子ビームのレーザー増幅部の水平・垂直位相空間分布を、2台のアンジュレータと4極電磁石の作る収束条件に整合させる必要があった。蓄積リングと異なり、モデルによる予測が困難であるため、これも増幅率を最大化するように上流の磁気レンズと4極電磁石を反復調整した。

このような機器の改善と精密調整を積み上げた結果、50～60nmの波長範囲でレーザー出力が高い状態で安定する飽和を達成するに至った^[2,3]。図22に、ギャップを閉め、電子ビームを蛇行させる磁場を強めていった場合（レーザー波長を長くすることに対応）のレーザー出力特性とその時の出力変動を示す。50～60nmの範囲で出力の増加が飽和し、変動が急激に小さくなっていることが分かる。図の点線は、測定した電子ビームの密度分布と $0.7\pi\text{ mm mrad}$ の規格化スライスエミッタンスを仮定した場合のレーザー出力のシミュレーション結果を示す。

参考文献

- [1] H. Maesaka, T. Fukui, N. Hosoda, T. Inagaki, T. Ohshima, Y. Otake, H. Tanaka, T. Hasegawa, S. Takahashi, S. Tanaka and M. K. Kitamura: "Precise RF Control System of the SCSS Test Accelerator", Proc. of the 11th European Particle Accel. Conf., Genoa, June (2008) pp. 1404-1406.
- [2] H. Tanaka et. al.: "Operation Status of the SCSS Test

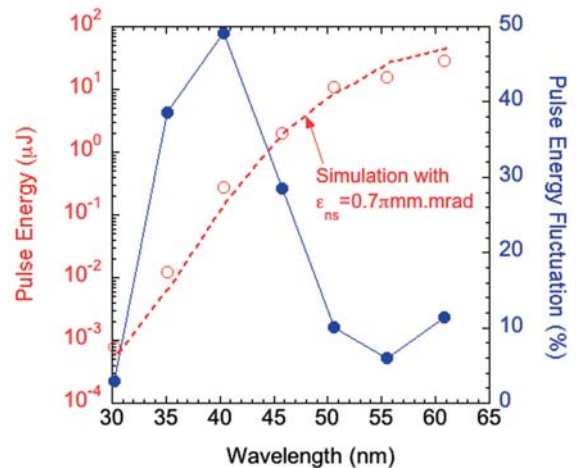


図22 レーザー波長に対するレーザー出力とその変動

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.

- [3] T. Shintake et. al.: "A compact free-electron laser for generating coherent radiation in the extreme ultraviolet region", *Nature Photonics* **2** (2008) pp. 555-559.

SCSS試験加速器運転グループ
田中 均

4. 広報活動

4-1 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る。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することで、XFELへの更なる理解推進に努めること、また、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。

4-2 シンポジウム・ワークショップ

2007年度は、第2・3回のXFELシンポジウム及び、第1回XFEL3極ワークショップを開催した。

第2回シンポジウムは、SPring-8供用開始10周年記念式典にあわせ、10月20日に兵庫県立先端科学技術支援センターにて開催し、研究者を中心とした266名の参加者を迎えた。米国SLAC、欧州DESYからの代表者による講演も交え、日米欧で進められているXFEL開発の状況が紹介された。続けて21日、22日はXFEL3極ワークショップをSPring-8で開催し、3極の若手研究者を中心に、XFEL開発における共通課題に対する活発な議論を行った（詳細は5. 参照）。そして、今後も継続してワークショップを行うことを決定した。



図23 第3回X線自由電子レーザーシンポジウムの様子

第3回は「人類未踏・X線レーザーの威力と未来」と題して2008年1月16日に東京丸の内MY PLAZAホールで開催した(図23)。一般、企業及び研究機関から多数の参加があり、会場の定員を超える442名の参加者を迎えた。

4-3 報道発表、取材・見学対応

試験加速器で行ったシード光実験の論文が*Nature Physics*に掲載され^[1]、2008年3月にプレス発表を行い、各種新聞で取り上げられた。

また、議員、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学生や大学生らが多数見学に訪れ



図24 中学生が試験加速器を見学

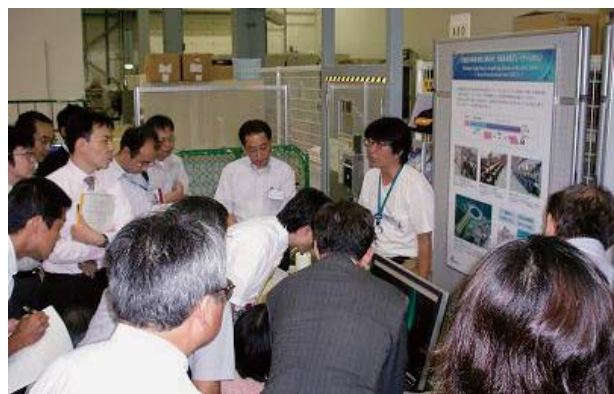


図25 SPring-8利用推進協議会による見学

た。運転時間を調整して試験加速器も積極的に公開し、国家プロジェクトであるXFEL計画への理解推進に努めた(図24、25)。

4-4 刊行物

XFEL施設建設が進むに伴い、新たなXFELパンフレットを日本語版、英語版ともに制作した。また、パンフレットとは別に、XFELの建設・開発状況を逐次公表するために、季刊の「X線自由電子レーザーニュース」を創刊し、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、刊行物は放射光普及棟及び中央管理棟へ設置するとともに、各種イベント等で配布し、ホームページ上からのダウンロードも可能にした(図26)。



図26 2007年度に発行を開始したX線自由電子レーザーニュースの創刊号

4-5 その他

4月のSPring-8施設公開では試験加速器を公開し、1,132名の見学者に説明を行った。また、子どもや一般への理解推進のために、タッチパネル式の解説ソフトウェアを制作し、放射光普及棟に設置した。さらに、コンピュータグラフィックによって設計図から忠実に完成イメージをおこし、動画化して、試験加速器前で常時見学可能とし、シンポジウム等でも公開した。日々建設が進むXFEL施設建設現場にはライブカメラを設置し、その映像をホームページ上で公開した。

参考文献

- [1] G. Lambert et al.: *Nat. Phys.* **4** (2008) p. 296.

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

現在、XFELの建設プロジェクトは、SPring-8(日本)、

SLAC（アメリカ）、DESY（ドイツ）の世界3カ所で進められている。これらの施設を速やかに立ち上げ、利用成果を輩出するためには、国際競争とともに、施設間の緊密な国際協力が極めて重要である。このために、本年度からXFEL 3 極ワークショップが組織され、2007年10月21、22日、第1回の会合がSPRING-8にて行われた。加速器・利用の両分野において、それぞれの施設が抱えている問題と開発項目の共有化が図られ、問題解決に向けた協力体制が議論された。今回の主なテーマは下記の通りである。今後も継続して開催が予定されている。

加速器

- (1) コヒーレントOTRの調査
- (2) スーパーシーディング等の新しい波長圧縮スキームの検討
- (3) デフレクタ空洞等によるバンチ時間構造の計測
- (4) アンジュレータコミッショニング
- (5) ビームダイナミクスのシミュレーション
- (6) コリメーションとアンジュレータの保護
- (7) レーザー短パルス化のための電子ビームバンチ長制御

利用

- (1) X線パルスの分割・遅延のための光学系の検討
- (2) 波面診断法の開発
- (3) スペクトル、強度、パルス幅等の光診断システムの開発
- (4) ミラーの表面形状計測
- (5) X線パルス圧縮のスキームの検討
- (6) 高速タイミング診断法の検討

利用グループ

矢橋 牧名