

放射光物理科学研究推進グループ

Synchrotron Radiation Physics Research Group

代表研究者 北村 英 男
KITAMURA, Hideo

硬 X 線領域自由電子レーザー (XFEL) は物質科学, 生命科学いずれの研究分野においても革新をもたらすものと期待されている。本研究は, 以上の XFEL の実現を展望した R&D であり, 試作型自由電子レーザー開発, 放射光利用分野での新たな可能性を生み出すための方法開発, 装置開発を実施するものである。具体的には, 60 nm 領域での試作型自己増幅型自由電子レーザー (SASE) を建設しており, その重要要素として超高干渉性ミニギャップアンジュレータ, 高性能電子銃, 高性能線型加速器, 超高干渉性光学系に関する開発研究を実施している。

1. 低エミッタンス電子線型加速器開発研究

研究担当者: 新竹, 大竹, 稲垣, 渡川, 尾上 *1, 馬場 *2, 松本 *3 (新竹電子ビーム光学研究室); 北村, 原, 田中 (隆), 白澤 (北村 X 線超放射研究室); 石川, 玉作, 田中 (義) (石川 X 線干渉光学研究室)

X 線領域の自由電子レーザーとして電子エネルギー 8 GeV の線型加速器を提案している。本年度はこれを実現するための準備として 1/32 モデルの 250 MeV 試作型加速器の建設を開始した。完成は来年度秋の予定である。加速器の主要構成要素は電子銃を含む入射器システムと C バンド加速管システムであるが, 制御系, ビームアラインメントシステム, 冷却系を含む各種ユーティリティも重要な要素である。

入射器系の主要要素である電子銃は昨年度までに必要な性能を得ることができた。本年度は残る要素である 238 MHz プリバンチャー, 476 MHz ブースター空洞, S バンドプリバンチャー, S バンドライナックの最適化設計を行うとともに製作を開始した。

C バンド加速管システムは加速管本体の他に 50 kV 高電圧電源, 22 kV モジュレータ, 350 kV クライストロン等で構成される。高電圧電源としてはインバータ方式を採用することによって小型ながら高い安定性を得ている。モジュレータはスイッチング素子と PFN 全体を絶縁オイルタンクに封入する構造を採用しており, 高い耐放電特性を持ちながら従来型と比べて体積比 10% の超小型化を実現した。東芝との共同開発によるクライストロン (E3746) は出力 50 MW を定常的に達成しており完成品の域に達しているものといえる。250 MeV 試作型においては 4 本の加速管ユニット (1.8 m 長) で構成される。各ユニットは電子ビームの航跡場だけを吸収するチョークモード型の加速管セル 91 個で構成されている。加速勾配 40 MeV/m を目標に開発をしており, 本年度に行った高電界試験では 32 MV/m を達成した。暗電流への対策を実施しつつさらに高い加速勾配を得る予定である。

電子ビームの位置観測は精度 20 nm の空洞型ビーム位置モニター (Cavity-BPM) で行うが, 重要なのは BPM の設置精度である。これを 5 ミクロン以内で行うため, HeNe レーザー, アイリス付ターゲットおよび CCD カメラで構成されたアラインメントシステムを開発した。なお, 以上の諸要素を設置するための架台として 10^{-6} 台の低熱膨張

係数を持つコーギーライト製の温度安定型架台を開発した。

2. 超高干渉性アンジュレータ開発研究

研究担当者: 北村, 原, 田中 (隆), 並河 *3 (北村 X 線超放射研究室); 新竹 (新竹電子ビーム光学研究室); 石川, 玉作, 田中 (義) (石川 X 線干渉光学研究室)

昨年度確認された, アルミニウムビームの剛性不足による位相誤差の悪化を改善するために銅性の磁石取付ビームを製作し, 磁場評価を行った。この結果, ビームの歪みによる影響は改善されたものの, 磁石列脱着時の磁場再現性に問題が生じた。検討した結果, 4 つの磁石列を連結した状態での脱着作業に問題があることが確認されたため, 連結機構の改善や脱着手順を見直し, 再評価を行っている。これとともに, 真空槽取付後の磁場の最終確認をする磁場測定手法の検討, 開発を開始した。

1 つはパルスワイヤー法による磁場測定である。これは磁石ギャップに 100 mm 程度の金属製のワイヤーを通し, 電流パルスを印可することによりワイヤーに生ずる波形を, レーザーを用いた変位検出器により測定し, 適切な変換係数を乗ずることにより磁場分布として測定する手法である。これは従来の磁場測定手法に比べて高速な測定が可能であり, 真空槽などの障害物にも邪魔されずに測定を行うことが可能であるが, ホールプローブなどに比べて精度は劣るため磁場調整等の目的のためには利用されてこなかった。しかしながら, 真空槽取付前後の磁場分布の変化を確認するための目的としては十分な精度が達成されることが期待されており, 現在開発を進めている。特に, 短周期アンジュレータの開発において懸念される, 波の分散による影響について検討し, これを補正する手法をほぼ確立した。

もう 1 つは, 従来のホールプローブを用いる手法である。ただし, 同プローブを, 真空槽外の長尺ステージによって走査するのではなく, 真空槽内に設置された駆動機構により走査し, その間のプローブの位置をレーザー等の検出器によって測定し, 位置情報としてフィードバックする手法を検討している。このためには, 数 mm の精度をもつ位置検出手法の確立, 微小 XY ステージの開発, 駆動機構の検討などが必要であり, 来年度も引き続き開発を進めていく予定である。

3. 超高干渉性光学系開発研究

研究担当者：石川，玉作，田中（義），香村，田中（良），西野（石川 X 線干渉光学研究室）；原，北村（北村 X 線超放射研究室）；辛，大浦，高田（辛放射光物性研究室）；山崎（山崎原子物理研究室）；川合（川合表面化学研究室）；緑川（緑川レーザー物理工学研究室），清水（イメージ情報研究ユニット）

X 線自由電子レーザー SCSS の要素技術開発が昨年度までにほぼ終了し，来年度には 250 MeV 線型加速器をベースとするプロトタイプを建設することになった。これは本計画の 1/32 スケールモデルであり，発振波長 60 nm が予定されている。このプロトタイプを用いた実証試験を経て，平成 18 年度以降に本計画をスタートさせるべく，様々な準備が進められている。そのために，本年 11 月播磨研究所に「線型放射光研究開発グループ」が設置された。このグループについては，別項に改めて掲載されている。このような，計画の想定外の進展に伴い，X 線自由電子レーザーのための X 線光学系開発も，当初計画での要素技術開発に加えて，プロトタイプおよび本計画での実機開発設計研究が大きな部分を占めるようになってきた。また，予算面でもプロトタイプ建設に大部分が振り向けられ，当初本年度に計画されていた X 線干渉計測関連の開発計画は，大幅な見直しを受けることになった。

このために，本年度での光学系開発は昨年度までに開発された超平坦ミラーの高度化研究と，それを利用した計測システムの開発が主たるものとなった。昨年度までに表面粗度 1 ナノメートル p-v 以下の非球面ミラー加工法が大阪大学との共同研究で確立し，本年度はその上に表面形状を乱さずに重金属をコーティングする技術が開発された。この結果，開口数の大きな楕円 X 線全反射ミラーの製作が可能となり，SPRing-8 の 1 km ビームライン (BL29XU) でのテスト結果として，世界最高性能の 48 nm × 36 nm の集光ビームサイズを得た。このナノビームは，走査型蛍光 X 線顕微鏡に応用され，病変細胞内の金属元素分布マッピングなどに利用されている。また，ここで作り上げた計測システムを広く理研内で利用してもらうため，理事長ファンドによって，BL29XU に専用ステーション建設を行った。本年度末に完成したこの実験ステーションは，来年度前半での試験調整運転を経て，後半からの本格的運用を目指している。

X 線自由電子レーザー光源での分光結晶の候補と目されているダイヤモンド単結晶に関しては，SPRing-8 の初期の段階から結晶性の向上と大型化に関する開発研究を住友電工と協力して行ってきた。現在，結晶性，サイズとも SPRing-8 および X 線自由電子レーザーで利用するのに十分なものが得られているが，X 線自由電子レーザーからのコヒーレント X 線では表面微細形状がスペckルの原因となるため，これを除去する必要がある。このためにダイヤモンド単結晶のエッチング方法に関するサーベイを行い，また光学干渉計による形状測定と X 線トポグラフィによる結晶性計測の相関をとった。一方で，逆格子マッピング法を用いたダイヤモンド単結晶中の微小歪みの精密計測を行い，現在僅かに残っている歪みの原因を究明しつつある。

X 線干渉計としては，台湾清華大学のグループと共同で，X 線領域でのファブリー・ペロー干渉計を世界で初めて実

現した。この干渉計に関しては，既に作ったと主張するグループがあり，相当の論争に発展したが，厳密な理論計算の結果異なる原因での干渉であることが明らかになった。

*1 共同研究員， *2 協力研究員， *3 客員主管研究員

The development of an angstrom free-electron laser (XFEL) is anticipated as a revolutionary tool for both the materials and life sciences. This research program, which aims at the creation of XFEL sources, includes the trial construction of a soft x-ray FEL and the development of methods and instrumentation for bringing new future possibilities in synchrotron science. More specifically, aiming toward the development of a compact FEL facility, we are developing a high DC voltage low-emittance e-beam gun, a high-gradient C-band linear accelerator, an in-vacuum mini-gap undulator with short period length and various types of x-ray interferometry for the characterization of XFEL.

1. Development of low-emittance electron linear accelerators for SASE-FEL in the x-ray region

We have begun construction of a prototype free-electron laser facility with a beam energy of 250 MeV, a 1/32 model for the proposed XFEL facility. A 500-kV DC gun was successfully constructed last year. Other injector components, including a pulsed chopper, 238-MHz pre-buncher 476 MHz booster, S-band pre-buncher, S-band linac and chicane energy filter are currently under construction.

We have adopted the C-band accelerating system for the main linac. The cavity has a choke-mode structure for suppressing wakefield effects due to intense electron beams. High field testing has been successfully concluded using a klystron output power of 53 MW, corresponding to an accelerating gradient of 32 MV/m. We intend to attempt higher gradients by suppressing dark current.

Observation of the electron beam will be accomplished using cavity beam position monitors (cavity-BPMs) with 20 nm resolution. An important factor is accurate alignment of the BPMs; we have developed a laser-based alignment concept in order to obtain an accuracy of 5 μ m.

2. Development of undulators for SASE-FEL in the x-ray region

New copper I-beams were built to improve reproducibility of the magnetic field in terms of phase error. I-beam distortion was found to have significantly improved, but there still remain problems with the magnetic field at the junction between the magnet units, which we are not studying.

R&D on field measurement techniques after installation of a vacuum chamber, for which two candidates have been considered. One is the pulsed-wire method, which is faster than other conventional methods and permits obstacles, such as the vacuum chamber, and the other a Hall probe within the vacuum chamber, which would require careful measurement of the Hall probe in order to obtain accurate feedback of the position of the probe. We feel that many components may be developed with this method, which will be utilized next year.

3. Development of coherent x-ray optics for SASE-FEL in the x-ray region

With the development of a new technique for mirror-

coating without deterioration of the surface figure, we have developed an x-ray-focusing system that has produced a focal spot of $48\text{ nm} \times 36\text{ nm}$, the smallest yet seen in the world. The system has been applied to scanning x-ray fluorescence nanoscopy. Diamond crystals, a candidate for

monochromator crystals for XFEL, were test using both x-ray and optical techniques. A Fabry-Perot interferometer was created in the hard x-ray region for the first time, in collaboration with a research group in Taiwan.