

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、60nm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 積、大竹雄次、稲垣隆宏、渡川和晃、(新竹電子ビーム光学研究室) 北村英男、原 徹、田中隆次、白澤(北村X線超放射研究室) 石川哲也、玉作賢治、田中義人(石川X線干渉光学研究室)

本格的な硬X線領域の自由電子レーザーに必須の技術である低エミッタンス電子ビームの発生と、パンチ圧縮技術を確立するため、SCSS 試験加速器の建設を昨年より開始し本年度の10月に予定通り完成した。このSCSS 試験加速器の主要構成要素はCeB6単結晶を用いた電子銃と、長いパルスビームから短パンチを形成する入射器システム(238MHzプレバンチャーと476MHzブースター、Sバンドバンチャー加速管)そして主加速器であるCバンド加速管システム(50MW Cバンドクライストロン2台)短周期の真空封止型アンジュレータである。さらに加速器全体に係わる制御系、ビームアライメントシステム、冷却系を含む各種ユーティリティも重要な要素であり加速器の安定性を向上させる新規技術を随所に投入した。

電子銃は15年度までに必要な性能を得ており、これを実用機に適合するように高電圧タンクを小型化して試験加速器に配備した。また500kVという高電圧パルス電源を安定に動作させるため、パルス整合のため500kVのダミーロード管を新規に開発した。11月から試験加速器の試験運転を開始し、上記の電子銃から設計どおりの1Aのビームを得て、これを入射器にて短パンチに成形し、主加速部へ入射した。

主加速部ではCバンド加速管システムを2ユニット使用している。各ユニットは密閉型モジュレータにより50MWクライストロンを駆動し、パルスコンプレッサーを経由して2本の加速管をドライブし最高35MV/mという極めて高い加速電界を発生でき、2ユニットにて250MeVを得ている。

11月からの試験運転では、上記の電子銃、入射器、主加速部の総合運転を行い、ハードウェアとコントロールソフトの性能テストを行った。またアンジュレータに電子ビームを通し、アンジュレータからの自発放射光を観測できた。今後、SASE-FELの発振へ向けた立ち上げ調整を行ってゆく。

2. 超高干渉性アンジュレータ開発研究

研究担当者：北村英男、原 徹、田中隆次、並河一道¹⁾(北村X線超放射研究室) 新竹 積(新竹電子ビーム光学研究室) 石川哲也、玉作賢治、田中義人(石川X線干渉光学研究室)

SCSS 試験加速器用アンジュレータに関して検討し、電子ビーム250MeV、発振光波長60nmにおいてFEL出力パワーが飽和に至るためのアンジュレータの全長を解析、及びシミュレーションにより求めた。この結果、8m程度の磁石列長が必要ことが確認されたため、既存の4.5m真空封止アンジュレータに加えて、同様の仕様でさらに1台のアンジュレータを建設・設置することとした。本年度建設したアンジュレータに関しては、各磁石の特性のばらつきが大きく、位相誤差として10°程度までしか磁場調整ができなかったが、シミュレーションの結果、FEL発振には大きな影響はないと判断し、試験加速器のアンジュレータライン下流側に設置した。

試験加速器の入射部やシケイン部の調整運転後、アンジュレータに電子ビームを入射し、可視光領域の放射光を確認した。その後のビーム調整において、下流のアンジュレータ(本年度に建設したもの)に、電子ビーム形状に影響を及ぼす多極磁場成分が存在する実験データが得られた。冬季停止期間中にフリップコイルによる磁場積分測定を実施した結果、極めて強いねじれ4極磁場成分が存在することが確認された。このため下流側アンジュレータを、加速器収納部内から組立調整棟の挿入光源磁場測定室に搬出し、同磁場成分を補正するための磁場調整を行った。この結果、電子ビームの大きな形状の変化は大幅に改善された。

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、矢橋(石川X線干渉光学研究室); 原、北村(北村X線超放射研究室)

平成18年度から始まる、第三期科学技術基本計画で、我々が開発してきたX線自由電子レーザーが「国家基幹技術」として取り上げられたことを受けて、本研究プログラムも様々な影響を受けた。昨年度11月に実機建設にむけての組織として「線型放射光研究開発グループ」が

設置され、実機建設計画の策定、サイエンスケースの掘り起こしなどが行われてきた。平成 18 年度からの実機建設予算が認められたことに伴い、このグループを平成 17 年度末で終了し、新たに平成 18 年度より「X 線自由電子レーザー計画推進本部」を、和光本部に組織することになった。このような進展に伴って、X 線自由電子レーザーのための X 線光学系開発を行う本研究プログラムも、当初計画された要素技術開発よりも、平成 17 年度に建設されたプロトタイプ装置の利用技術検討や、実機での X 線光学系検討が大きな部分を占めるようになってきた。また、予算面でも昨年度に引き続きプロトタイプ建設に大部分が振り向けられ、光学系開発研究は 2 年連続で大幅な見直しをうけることになった。

このために、本年度での光学系開発は、昨年度までに開発の基幹部分が終了している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なものとなった。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や、その表面上に表面形状を変えずに重金属をコーティングする技術を、大阪大学との共同研究で確立してきた。このような非球面ミラーを組み合わせた Kirkpatrick-Baez 型集光光学系を用いて、30 ナノメートル以下の焦点サイズを持つ X 線集光系の開発を進め、高分解能走査型蛍光 X 線顕微鏡などの応用研究を実施している。ここで開発された集光ミラーは、X 線自由電子レーザーでの光学素子として非常に重要である。とくに、高干渉性 X 線を扱う光学系では、表面形状誤差などによるスペックル生成が大きな問題となるため、スペックルを生じない形状精度の確保と、それに必要な形状計測法の開発を視野にいたれた開発研究が進められている。

一方で、平成 18 年度からの実機建設に向けて、X 線自由電子レーザー利用研究の幅広い掘り起こしを行った。強光子場中の原子・分子科学、ナノマテリアルの時間変化計測、単一生体高分子の原子分解能イメージング等 X 線自由電子レーザーの実現によりはじめて研究が可能となる科学技術分野は多数存在するが、平成 22 年の実機完成に向けて、関連研究者間の連携を、オールジャパンで活性化し、完成後直ちに成果が上げられる体制作りの検討が行われた。

*1 客員研究員

An angstrom free electron laser (XFEL) is expected as a revolutionary tool for both material and life sciences. This research program, considered as an R&D for realizing XFEL sources, includes trial construction of soft x-ray FEL and developments of methods/instrumentation for bringing new possibilities in the future synchrotron science. In concrete terms, to realize a compact FEL facility, we are developing a low-emittance e-beam gun of DC high voltage type, a high-gradient linear accelerator of C-band type, an in-vacuum mini-gap undulator with short-period length, 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 constructed the prototype free electron laser facility with the beam energy of 250 MeV, which is the 1/32 scale

model for the proposed XFEL facility. The prototype accelerator employs 500-kV pulse electron gun using CeB6 single crystal cathode, whose excellent performance was verified last year. This year we have developed all injector components and installed them into the prototype accelerator, that is, the pulsed chopper, 238-MHz pre-buncher, 476-MHz booster, S-band pre-buncher, S-band linac and the chicane energy filter.

We adopt the C-band accelerating system for the main linac. Using 50 MW klystron and rf pulse compressor, the system drives two accelerating tubes at 35 MV/m, which is enough to obtain 250 MeV by two C-band systems.

During November beam run, all hardware components and control software were tested. 1 A beam was generated from the electron gun, followed by forming bunched beam in the injector system. The bunched beam was accelerated through C-band system. The first light was the spontaneous emission from the undulator, which was successfully observed from downstream beam line.

We will start machine tuning and hope to achieve SASE-FEL operation soon.

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

For the SCSS prototype accelerator, another in-vacuum undulator was constructed, the specifications of which were the same as those of the existing undulator for the SCSS project, constructed in 2003. It was found during the field correction that individual magnet units have significant errors and the resultant phase error was around 10 degree. After commissioning of the accelerator, the electron beam was injected to the undulators and synchrotron radiation was observed in an optical region. It was found in the following beam commissioning that the newly constructed undulator has significant multipole field error. In order to correct it, the undulator was taken away from the accelerator tunnel and transported to the undulator assembly hall. After correction of field error, it was verified that the multipole components were reduced significantly.

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

Super-smooth x-ray mirrors have been developed and applied to advanced x-ray imaging for the use of highly coherent x-rays from x-ray free-electron lasers. Collaboration on the mirror figuring technology with a group of Osaka University led to the fabrication of aspherical x-ray mirrors with sub-nanometer figure errors. Two-dimensional focusing system with the mirrors gave the world's smallest x-ray focal spot with the diameter less than 30 nanometer, resulted in the development of a high-resolution scanning x-ray fluorescence microscopy capable of imaging chemical elements in biological cells.