

# 北村 X線超放射研究室

## Coherent Synchrotron Light Source Physics Laboratory

主任研究員 北村 英男  
KITAMURA, Hideo

当研究室は SPring-8 に設置する各種挿入光源の開発研究を一手に引き受けており、それぞれ特徴のある計 25 基の挿入光源を建設し蓄積リング直線部に設置してきた。これらは全て順調に稼働しており、得られた高輝度光を利用したユニークな放射光利用研究が行われている。現在のところ SPring-8 に新たに設置可能な新規挿入光源の台数は 12 基、このうち 3 基は長尺型である。当研究室の長期的な研究課題は放射光科学の将来展望を見据えた挿入光源の開発である。空間的コヒーレント特性に優れた放射光源の開発研究ばかりでなく、長尺挿入光源をベースにした誘導放出型の超高輝度光源の開発も推進している。

### 1. 短周期アンジュレータの開発研究

#### (1) 永久磁石の放射線減磁 (北村, 原, 田中)

挿入光源に用いられている永久磁石 ( $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ ) の電子線による被爆実験を韓国の Pohang Light Source (PLS) と共同研究を行った。本実験は、PLS の入射用ライナックの電子線 ( $E = 2.5 \text{ GeV}$ ) を永久磁石試料に照射、その磁場分布を計測し、減磁の程度を試験するものである。本年度は、クライオ型永久磁石アンジュレータに用いる予定の磁石に関して、液体窒素温度付近での放射線減磁を評価した。低温においては、耐放射線性が極めて向上することが分かった。

#### (2) クライオ型永久磁石アンジュレータの開発 (北村, 原, 田中, 岩城 \*1)

クライオ型永久磁石アンジュレータは、アンジュレータの短周期化に不可欠な磁石の高性能化を、現在最も強力な永久磁石である  $\text{NdFeB}$  磁石または  $\text{PrFeB}$  磁石を 77~150 K まで冷却することにより実現したものである。液体ヘリウム温度付近で動作する超伝導電磁石と比べ動作温度が高いため、冷凍機を用いて数百ワット程度の十分な冷却能力が得られ、クエンチがないため安定な運転が期待できる。

昨年度得られた  $\text{NdFeB}$  磁石の低温特性のデータをもとに、本年度はテスト機の開発を行った。テスト機の磁石列は、周期長 15 mm, 全長 60 cm で NEOMAX 社製高残留磁束密度  $\text{NdFeB}$  磁石 50BH を使用して製作した。アンジュレータ架台は、SPring-8 で使用されている従来の 1.5 m 長真空封止アンジュレータ架台を用い、ギャップ駆動に適応できるフレキシブルな銅板を介して冷凍機ヘッドを磁石列に熱接触させている。また真空中の磁石ビームと大気中架台を繋ぐシャフトは、断熱材を内部に入れ外部からの熱流入を抑えた構造を採用した。テスト機磁石温度は、磁石列ビームに取り付けたシースヒータにより制御している。

テスト機の磁場測定は、ベローズを介して真空中に設置したホールプローブをビーム軸方向にスキャンさせることにより行い、予想された低温における磁場強度の増大を確認した。低温での保磁力向上による耐放射線減磁特性の改善については、50BH 磁石に対する電子ビーム照射実験を室温と 150 K において行い、低温で減磁が減少することを確認した。一方で、シャフトや磁石列ビーム等の熱収縮による磁石ギャップ変化や磁石列ビームの変形などの問題も

判明し、今後、低温における磁石ギャップの直接測定による制御や、熱収縮を考慮した設計などを行い、実用機の開発を進めていく。

#### (3) 高温超伝導永久磁石アンジュレータの開発 (北村, 原, 田中, 都留 \*1)

高温超伝導体 (High Temperature Superconductor, 以下 HTSC) を用いた新しい原理に基づく短周期アンジュレータを考案し、開発を開始した。1 つはクライオアンジュレータプラス (Cryoundulator plus 以下 CU+), 他方はピュア型超伝導永久磁石アンジュレータ (Superconducting Permanent Magnet Undulator 以下 SCPMU) と呼ばれている。CU+ は、昨年度に考案し、開発を開始したクライオアンジュレータ (Cryoundulator 以下 CU) の発展型であり、永久磁石の表面にリング上の HTSC を設置することにより CU の磁場を増強する目的で考案された。磁石ギャップの開閉というアンジュレータ本来の機能を利用することにより、HTSC の着磁・利用が全く同一の装置内で行うことが可能であり、HTSC 応用の新しい分野を開拓することが期待される。CU+ の原理を実証するため、半周期モデルを製作し、液体窒素温度において増強される磁場を測定したところ、用いた HTSC サンプルの臨界電流密度から計算される磁場とよく一致することが確認された。

SCPMU は上記 CU+ よりもさらに積極的に HTSC を利用することにより、より強磁場・短周期のアンジュレータを開発するために考案されたものであり、HTSC の臨界電流密度が十分に高ければ、永久磁石型アンジュレータの到達磁場をはるかに上回る磁場を得ることが可能である。原理は、直方体状の HTSC を並べ、これらを外部磁場により着磁することにより周期的磁場を発生するというものであるが、この際生ずるオフセット磁場を除去する方法により 2 つの種類に分類される。1 つは、外部磁場の極性を反転して適正な値に調整する方法、他方は上下の HTSC 列を逆極性の磁場により着磁する手法である。後者の場合、ギャップを閉じることにより HTSC の永久電流値が増加し、さらに着磁されるという利点がある。原理を検証するため 3 個の HTSC サンプルを電磁石により着磁し、磁場分布を測定したところ、予想通りの磁場分布が得られ、また電磁石の磁場を調整することにより磁場オフセットが除去できるこ

とを確認した。今後は超伝導材料工学の専門家と協力し、HTSCの磁場特性、機械特性を改善する。

## 2. 偏光制御アンジュレータの開発研究

### (1) 新型偏光制御アンジュレータ (北村, 田中, 白澤 \*2)

2004年8月にSPring-8の軟X線理研ビームラインBL17SUに設置されたアンジュレータはユーザーからの偏光に対する要求を満たすため電磁石と永久磁石から構成されており、電磁石の周期長および極性を選択することにより、3つの運転モードを持っている。運転モードを切り替えることにより垂直・水平偏光(8の字アンジュレータモード)、左右円偏光(ヘリカルアンジュレータモード)、高速でヘリシティが反転する左右円偏光(非対称8の字アンジュレータモード)を発生することが可能である。

試験運転の結果、8の字アンジュレータモードは電子ビームの不安定性を引き起こすことが分かった。不安定性の原因を追求するため磁場の三次元測定を行い、SPring-8の加速器部門と協力して現在調査中である。一方、ヘリカルアンジュレータモードでは不安定性の問題は起こらなかったためユーザー運転に提供するべく閉軌道変位を補正するフィードフォワードテーブルを準備中である。

---

\*1 研修生, \*2 基礎科学特別研究員

The main mission of our laboratory is to develop insertion device technology for SPring-8, the 8-GeV synchrotron radiation (SR) facility of third generation source. Before now, we have completed 25 devices, generating synchrotron radiation with the highest brilliance, which promotes new sciences utilizing the coherence property of the radiation. In addition, we are developing an FEL in the soft X-ray region based on the combination of high gradient LINAC and a mini-gap undulator of in-vacuum type.

## 1. Development of short period undulators

### (1) Radiation induced demagnetization of permanent magnets

Radiation induced demagnetization of undulator permanent magnets was tested by using the linac at the Pohang Light Source in Korea. The resistance to radiation of the magnet was remarkably increased around the liquid nitrogen temperature.

### (2) Development of cryogenic undulators

In order to pursue a short periodicity of undulators, an improvement of the magnetic field performance of magnet materials is indispensable. By using the permanent magnets at cryogenic temperatures higher than the liquid nitrogen temperature, the cryogenic permanent magnet undulator can increase the field performance by ~30% compared to the existing in-vacuum undulators. Based on the current SPring-8 in-vacuum undulator design, a prototype undulator has been developed with high  $B_r$  NdFeB magnet (NEOMAX 50BH) arrays (15 mm period and 60 cm length). Although the expected increase of the magnetic field was confirmed in this prototype undulator, mechanical deformation of the undulator components due to thermal shrink was not negligible. We will improve the undulator design to solve this problem for the undulator operation in a storage ring. Two novel undulators that utilize high temperature superconductors (HTSCs) were proposed and

R&D has been started. One is called cryoundulator *plus* (CU+), and the other is called Superconducting Permanent Magnet Undulator of pure type (SCPMU).

CU+ is an extension of the Cryoundulator under development in our laboratory and equipped with ring-shaped HTSCs to enhance the magnetic field. It takes advantage of gap movement to magnetize the HTSCs, which is an intrinsic function of undulators. Experiments have been performed to demonstrate the principle of CU+, which gave promising results. SCPMU has been proposed for the development of an undulator with a shorter period and stronger field and it can produce a much stronger field than is achieved by undulators with conventional permanent magnets if the critical current density of HTSC is high enough. The concept of SCPMU was verified by experiments performed using HTSC samples and a normal-conducting electromagnet.

## 2. Development of exotic undulators

### (1) Novel undulator with controllable polarization

The multi-operation-mode undulator has been installed in the BL17SU/RIKEN beamline of SPring-8 where SR experiments require linearly/circularly polarized light and a fast helicity switching of circular polarized light. Therefore, the undulator has three operation modes; helical undulator mode for circular polarized light, figure-8 undulator mode for linear polarized light, and asymmetric figure-8 undulator mode for fast helicity switching. In order to realize the above three operation modes, the undulator consists of electromagnets and permanent magnets.

As a result of the test operation, we found electron beam instability in the figure-8 undulator mode. The cause of the instability is under investigation using the 3D magnetic field data with SPring-8 Accelerator Division's cooperation. On the other hand, the helical undulator mode has no effect on the operation of the storage ring. Therefore, in order to use the helical undulator mode at user time, we are preparing a feed-forward table of the steering coil for COD correction.

## Staff

### Head

Dr. Hideo KITAMURA

### Members

Dr. Toru HARA

Dr. Takashi TANAKA

Dr. Masamitsu WATANABE

Dr. Katsutoshi SHIRASAWA \*

---

\* Special Postdoctoral Researcher

### *in collaboration with*

Dr. Tetsuya ISHIKAWA (Coherent X-Ray Opt. Lab.)

### *Visiting Members*

Prof. Kazumichi NAMIKAWA (Fac. Edu., Tokyo Gakugei Univ.)

## Trainees

Mr. Daisuke IWAKI (Fac. Sci., Himeji Inst. Technol.)  
Ms. Rieko TSURU (Fac. Sci., Himeji Inst. Technol.)

## 誌 上 発 表 Publications

### [雑誌]

(原著論文) \*印は査読制度がある論文

- Tanaka Y., Muraki S., Hara T., Kitamura H., and Ishikawa T.: "Time-to-space converter for ultrashort pulsed x-ray experiments", AIP Conf. Proc. **705**, 1379–1382 (2004). \*
- Tanaka Y., Staub U., Katsumata K., Lovesey S., Lorenzo J. E., Narumi Y., Scagnoli V., Shimomura S., Tabata Y., Onuki Y., Kuramoto Y., Kikkawa A., Ishikawa T., and Kitamura H.: "Direct and quantitative determination of the orbital ordering in CeB<sub>6</sub> by X-ray diffraction", Europhys. Lett. **68**, 671–677 (2004). \*
- Nambu A., Bussat J., West M. W., Sell B. C., Watanabe M., Kay A. W., Mannella N., Ludewigt B. A., Press M. J., Turko B., Meddeler G., Zizka G., Spieler H., van-der-Lippe H., Denes P., Ohta T., Hussain Z., and Fadley C. S.: "An ultrahigh-speed one-dimensional detector for use in synchrotron radiation spectroscopy: first photoemission results", J. Electron Spectrosc. Relat. Phenom. **137/140**, 691–697 (2004). \*
- Narumi Y., Katsumata K., Tabata Y., Kimura S., Tanaka Y., Nakamura T., Shimomura S., Matsuda M., Harada I., Nishiyama Y., Ishikawa T., Kitamura H., Hara T., Tanaka T., Tamasaku K., Yabashi M., Goto S., Ohashi H., Takeshita K., Ohata T., Matsushita T., and Bizen T.: "Synchrotron X-ray diffraction studies of the incommensurate phase of a spin-peierls system CuGeO<sub>3</sub> in strong magnetic fields", J. Phys. Soc. Jpn. **73**, 2650–2653 (2004). \*
- Tanaka T., Kitamura H., and Shintake T.: "Consideration on the BPM alignment tolerance in X-ray FELs", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A **528**, 172–178 (2004). \*
- Hara T., Tanaka T., Kitamura H., Bizen T., Marechal X., Seike T., Kohda T., and Matsuura Y.: "Cryogenic permanent magnet undulators", Phys. Rev. Spec. Top.: Accel. Beams **7**, 050702-1–050702-6 (2004). \*
- Tanaka T., Hara T., Kitamura H., Tsuru R., Bizen T., Marechal X., and Seike T.: "Application of high-temperature superconducting permanent magnets to synchrotron radiation sources", Phys. Rev. Spec. Top.: Accel. Beams **7**, 090704-1–090704-5 (2004). \*
- (総 説)
- 北村英男: "永久磁石を使用したアンジュレータ", までりあ **43**, 569–577 (2004).
- (その他)
- Takahashi S., Sano M., Oura M., and Kitamura H.: "Development of the volumetric heating mask for the front end attached to the asymmetric figure-8 undulator at SPring-8", AIP Conf. Proc. **705**, 328–331 (2004).
- Takahashi S., Sano M., Mochizuki T., Oura M., Watanabe

A., and Kitamura H.: "Present status of high-heat-load components for SPring-8 front ends", AIP Conf. Proc. **705**, 332–335 (2004).

Aoyagi H., Mochizuki T., Oura M., Sakurai Y., Sano M., Takahashi S., and Kitamura H.: "Alignment of front end components at SPring-8", AIP Conf. Proc. **705**, 432–435 (2004).

### [単行本・Proc.]

(その他)

Lambert G., Carre B., Couprie M., Garzella D., Doria A., Giannessi L., Hara T., Kitamura H., and Shintake T.: "Seeding high gain harmonic generation with laser harmonics produced in gases", Proc. 9th European Particle Accelerator Conf. (EPAC 2004), Lucerne, Swiss, 2004–7, European Physical Society Interdivisional Group on Accelerators, Lucerne, pp. 363–365 (2004).

## 口 頭 発 表 Oral Presentations

(国際会議等)

- Watanabe M., Ishiwata Y., Eguchi R., Takeuchi T., and Shin S.: "Resonant soft x-ray emission study of  $\gamma$ -Ce: 3d-4f resonant spectra of trivalent Ce in the metallic phase", 9th Int. Conf. on Electronic Spectroscopy & Structure (ICESS 9), Uppsala, Sweden, June–July (2003).
- Fadley C. S., Mannella N., Rosenhahn A., Booth C., Marchesini S., Watanabe M., Sell B. C., Ritchey S. B., and Tomioka Y.: "Direct observation of high temperature electron localization effects in colossal magnetoresistive manganites", Ann. APS March Meet. 2004 (MAR04), Montreal, Canada, Mar. (2004).
- Hara T., Kitamura H., Tanaka T., Bizen T., Marechal X., and Seike T.: "Insertion devices of next generation", 3rd Asian Particle Accelerator Conf. (APAC 2004), (Pohang Accelerator Laboratory), Gyeongju, Korea, Mar. (2004).
- Watanabe M.: "Resonant inelastic x-ray scattering study of Ce compounds", Advanced Light Source/Center for X-Ray Optics Seminar (ALS/CXRO Seminar): X-Ray Science and Technology, Berkeley, USA, June (2004).
- Fadley C. S., Nambu A., Bussat J., West M. W., Watanabe M., Sell B. C., Kay A. W., Mannella N., Ludewigt B. A., Press M. J., Turko B., Meddeler G., Zizka G., Spieler H., van-der-Lippe H., Denes P., Ohta T., and Hussain Z.: "An ultrahigh-speed one-dimensional detector for use in synchrotron radiation spectroscopy: first photoemission results", 14th Int. Conf. on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (VUV14), Cairns, Australia, July (2004).
- Watanabe M., Mannella N., Mun B. S., Yang S., Kay A. W., Garcia-de-Abajo F. J., Bluhm H. H., Arenholz E., Hussain Z., van-Hove M. A., Fadley C. S., Feulner P., Ecker M., Jakob P., Kostov K., Romberg R., Weimar R., Menzel D., Fohlisch A., and Wurth W.: "Multi-atom resonant photoemission effects in O 1s emission from metal oxides (NiO, CuO, and Cu<sub>2</sub>O) and N 1s emission from an adsorbate (N<sub>2</sub>/Ni(111))", 14th Int. Conf.

- on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (VUV14), Cairns, Australia, July (2004).
- Yang S., Mun B. S., Mannella N., Pham L. D., Nambu A., Sell B. C., Ritchey S. B., Watanabe M., Parkin S. P., and Fadley C. S.: "Probing buried solid-solid interfaces in magnetic multilayer structures and other nanostructures using spectroscopy excited by soft x-ray standing waves", 14th Int. Conf. on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (VUV14), Cairns, Australia, July (2004).
- Hara T.: "SPRING-8 compact SASE source (SCSS)", 14th Int. Conf. on Vacuum Ultraviolet Radiation Physics (VUV14), Cairns, Australia, July (2004).
- Lambert G., Carre B., Couprie M., Garzella D., Doria A., Giannessi L., Hara T., Kitamura H., and Shintake T.: "Seeding high gain harmonic generation with laser harmonics produced in gases", 9th European Accelerator Conf. (EPAC 2004), (European Physical Society Interdivisional Group on Accelerators), Lucerne, Switzerland, July (2004).
- Hara T.: "Commissioning and interlock of ID", Workshop on Beamline Design for Shanghai SR Facility, (JASRI and KEK), Harima, Aug. (2004).
- Tanaka T.: "Development of an FEL simulation code to test the undulator performance", 26th Int. Free Electron Laser Conf. (FEL 2004) and 11th FEL Users Workshop, (Sincrotrone Trieste), Trieste, Italy, Aug.-Sept. (2004).
- Hara T., Shintake T., and Kitamura H.: "Electron beam simulations on the SCSS accelerator", 26th Int. Free Electron Laser Conf. (FEL 2004) and 11th FEL Users Workshop, (Sincrotrone Trieste (ELETTRA)), Trieste, Italy, Aug.-Sept. (2004).
- Lambert G., Carre B., Couprie M., Garzella D., Mairesse Y., Salieres P., Doria A., Giannessi L., Kitamura H., Shintake T., and Hara T.: "Seeding high gain harmonic generation with laser harmonics produced in gases", 26th Int. Free Electron Laser Conf. (FEL 2004) and 11th FEL Users Workshop, (Sincrotrone Trieste (ELETTRA)), Trieste, Italy, Aug.-Sept. (2004).
- Watanabe M., Mannella N., Mun B. S., Yang S., Kay A. W., Garcia-de-Abajo F. J., Bluhm H. H., Arenholz E., Hussain Z., van-Hove M. A., Fadley C. S., Feulner P., Ecker M., Jakob P., Kostov K., Romberg R., Weimar R., Menzel D., Fohlisch A., and Wurth W.: "Multi-atom resonant photoemission effects in O 1s emission from metal oxides (NiO CuO and Cu<sub>2</sub>O) and N 1s emission from an adsorbate (N<sub>2</sub>/Ni(111))", 2004 Advanced Light Source Users' Meet., (Advanced Light Source and Lawrence Berkeley National Laboratory), Berkeley, USA, Oct. (2004).
- Watanabe M., Sell B. C., Yang S., Mun B. S., Mannella N., Pham L. D., Ritchey S. B., Nambu A., Salmassi F., Guo J., Kortright J. B., Parkin S. P., and Fadley C. S.: "Standing-wave excited XES and RIXS: new tools for buried interface studies", 2004 Advanced Light Source Users' Meet. Workshop: Photon-in and Photon-out X-ray Spectroscopy in Material Sciences, Environmental Energy and Chemical Analysis, (Advanced Light Source and Lawrence Berkeley National Laboratory), Berkeley, USA, Oct. (2004).
- Hara T.: "Cryogenic small-gap undulators", 9th SPRING-8, ESRF, APS Workshop, (JASRI), Harima, Nov. (2004). (国内会議)
- 田中良和, Staub U., 勝又紘一, Lovesey S., Lorenzo J. E., 鳴海康雄, Scagnoli V., 下村晋, 田畑吉計, 大貫惇睦, 倉本義夫, 吉川明子, 石川哲也, 北村英男: "CeB<sub>6</sub>における非共鳴 X 線回折", 日本物理学会第 59 回年次大会, 福岡, 3 月 (2004).
- 北村英男: "シンクロトロン光って何だろう?", 第 18 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 鳥栖, 1 月 (2005).
- 田中隆次, 白澤克年, 原徹, 北村英男, 都留理恵子, 岩城大介, 備前輝彦, 清家隆光, Marechal X.: "バルク高温超伝導体を用いた短周期アンジュレータの開発", 第 18 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 鳥栖, 1 月 (2005).
- 原徹, 田中隆次, 備前輝彦, 清家隆光, Marechal X., 白澤克年, 岩城大介, 都留理恵子, 北村英男: "永久磁石型クライオアンジュレータの開発", 第 18 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 鳥栖, 1 月 (2005).
- 白澤克年, 田中隆次, 竹内政雄, 大浦正樹, 仙波泰徳, 大橋治彦, 北村英男: "軟 X 線偏光制御アンジュレータ (SPRING-8 ID17) の光源評価", 第 18 回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム, 鳥栖, 1 月 (2005).