

故にエミッタンスの単位はメートル・ラジアンとなる³。

詳しい説明は省くが、理想的な蓄積リングの場合、 ϵ_x は有限値を持つが、 ϵ_y は0となる（電子の軌道が水平面内にあるため）。実際のリングでは様々な誤差磁場の影響で水平方向の運動が鉛直方向に結合し（この結合度を κ で表す）、鉛直方向のエミッタンスも有限値となる。結合度を用いて、 $\epsilon_x = \epsilon_0 / (1 + \kappa)$ 、 $\epsilon_y = \kappa \epsilon_x$ と表す。 ϵ_0 は自然エミッタンスと呼ばれる量で、SPring-8などの電子用の円形加速器では、自然エミッタンスは電磁石の配列・強度（ラティスと呼ぶ）だけで決まる。

SPring-8蓄積リングでは、2003年に6.7 nm・rad から3.4 nm・rad への低エミッタンス化が行われている。これは電磁石の並びは同じ（＝ラティスは同じ）で、電磁石の励磁量（＝オプティクスと呼ぶ）を変えた^[1]。その後、電子ビーム廃棄時に、オプティクス変更に伴う真空トラブルを生じ、6.7 nm・rad のオプティクスに戻して運転が再開された。

真空系に改良を施し、2005年にトップアップ運転が行われることとなったが、このときに実は3.4 nm・rad から2.5 - 2.6 nm・rad への更なる低エミッタンス化が試験されている^[2]。当時は入射効率が低く、またビーム寿命も短かったため、更なる低エミッタンス化への試みは断念され、3.4 nm・rad のオプティクスでトップアップ運転が開始された^[3]。

その後、長直線部への6極電磁石追加^[4] やオプティクス歪み補正用トリム4極電源の追加^[5] など、加速器の性能向上に向けた取り組みが進行した。これらが今回の2.4 nm・rad への低エミッタンス化^[6] 実現にもつながっていくこととなる。

以上をまとめると、SPring-8蓄積リングでは、2000年の長直線部導入以降^[7]、運転に適用されたオプティクスがこれまでに3種類存在する（エミッタンスがそれぞれ6.7 nm・rad、3.4 nm・rad（その後、Dゾーン長直線部へのID43導入に伴うラティスの改造により、自然エミッタンスが3.5 nm・rad になった）および2.4 nm・rad）。以下ではそれぞれのオプティクスをDBA-6.7、DB-3.5およびDB-2.4

と呼ぶ（DBはDouble Bend、AはAchromatの略である）。

2. DB-2.4の設計について

DBA-6.7、DB-3.5およびDB-2.4の主要パラメータを表1に、またラティス関数を図1に示す。図1の β はベータ関数、 D は分散関数で、電子ビームのエミッタンスを ϵ 、エネルギーばらつきの幅（RMS値）を $\sigma_{\Delta E/E}$ と定義すると、電子ビームの幅（RMS値）は

$$\sigma_e = \sqrt{\epsilon\beta + D^2\sigma_{\Delta E/E}^2}$$

と記述することができる。

表1 SPring-8蓄積リングの主要パラメーター

	DBA-6.7	DB-3.5	DB-2.4
Energy	8 GeV		
Natural emittance	6.67 nm・rad	3.49 nm・rad	2.41 nm・rad
$\sigma_{\Delta E/E}$	0.11%		
Tune (Q_x, Q_y)	(40.15, 18.35)	(40.14, 19.35)	(41.14, 19.35)
Natural chromaticity	(-91, -42)	(-88, -42)	(-117, -47)

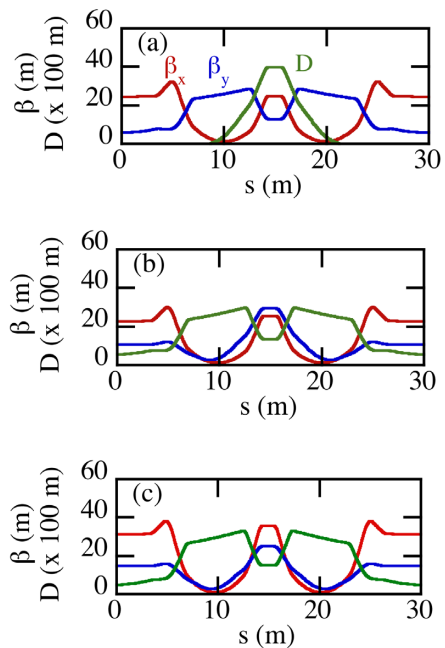


図1 (a) DBA-6.7 (b) DB-3.5および (c) DB-2.4のラティス関数

³ 本来は、 $\epsilon_x = (\langle \Delta x \rangle^2 \langle \Delta p_x \rangle^2 - \langle \Delta x \Delta p_x \rangle^2)^{1/2}$ 、 $\epsilon_y = (\langle \Delta y \rangle^2 \langle \Delta p_y \rangle^2 - \langle \Delta y \Delta p_y \rangle^2)^{1/2}$ であるが、 $(x', y') = (p_x/p_z, p_y/p_z) = (\tan\theta_x, \tan\theta_y) \sim (\theta_x, \theta_y)$ と、正準運動量 (p_x, p_y) から角度 (x', y') にスケール変換するのが一般的である。 $(p_z$ は進行方向の運動量である。)

今回の DB-2.4 の特徴として、「挿入光源のギャップの開閉でエミッタンスが変わらない」という点があげられる。ユーザー運転中、「他のビームラインで挿入光源のギャップが変わっても、ユーザーの実験条件 (= 電子ビームのエミッタンス) が変わらないように」かつ「挿入光源のギャップ条件によらず常に 3.5 nm·rad よりもエミッタンスが小さくなるように」、 β と D の最適化を行った (図2)。現状、オプティクスの変更 (3.5 ⇄ 2.4 nm·rad) は電磁石の設定電流値の変更だけで行うことができ、1 時間ほどで切り替えることができる。

SPECTRA^[8] で計算した、それぞれのオプティクスでの、SPring-8 標準アンジュレータから発せられるエックス線の輝度とフラックス密度の比較を図3に与える。絶対量で比較すると、DBA-6.7 から DB-3.5 に切り替えた際の増分と同程度の輝度・フラックス密度の増分が、DB-3.5 から DB-2.4 への切り替えで期待できるという結果となった。

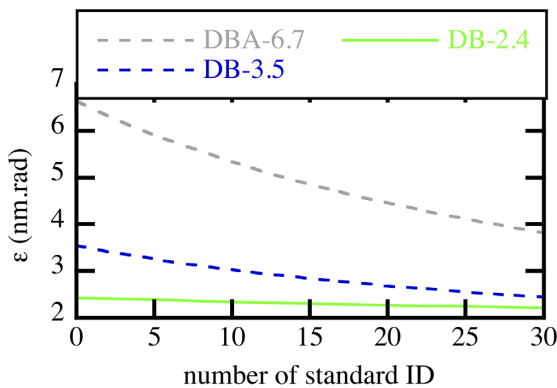


図2 SPring-8 標準アンジュレータを最小ギャップまで閉めたときのエミッタンス変化 (計算)。横軸は標準アンジュレータの仮想台数で、DB-2.4 では挿入光源ギャップに対するエミッタンスの依存性がほとんど無いことがわかる。

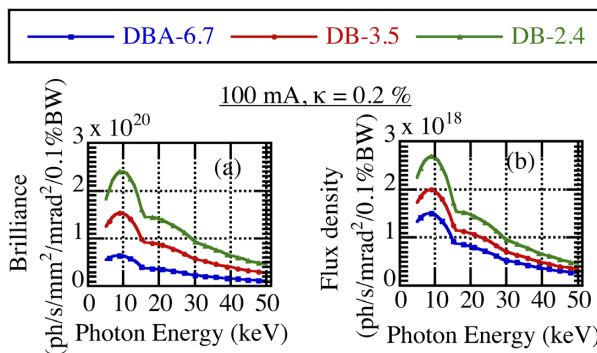


図3 DBA-6.7、DB-3.5 および DB-2.4 における (a) 輝度と (b) フラックス密度。SPECTRA による計算。

3. 加速器パフォーマンス

今回の DB-2.4 では、垂直方向ビームサイズの低減 (線形カップリング補正^[9] および垂直方向分散関数補正)、バンブ電磁石駆動時の蓄積ビーム (= 光源) の振動抑制^[10,11]、バンチファイリング安定性の確認等、一連の加速器調整を行い、トップアップ入射が可能であることを確認した上で、2013 年 1 月 26 日にビームライン試験利用を行った。その結果、運用には問題がないことが確認されたため、2013 年 5 月 8 日より DB-2.4 をユーザー運転に適用した。

加速器性能について、加速器診断用ビームライン I (BL38B2)^[12] で評価を行った (高輝度光科学研究センター加速器部門の高野史郎氏および正木満博氏に測定いただいた)。エックス線プロファイルモニター^[13] を用いてビームプロファイルを測定した。プロファイル例を図4に与える。ビームプロファイルから RMS ビームサイズが求まり、応答関数解析等によって得られたラティス関数からエミッタンスが求まる。結果を表2に示す。概ね設計値通りのエミッタンスが得られている。

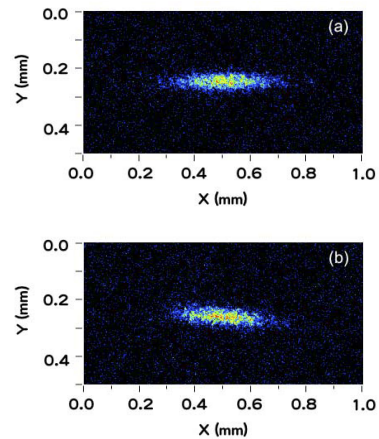


図4 加速器診断用ビームライン I (BL38B2) で測定したビームプロファイル例 (a) DB-3.5 および (b) DB-2.4

表2 測定結果から得られたエミッタンス

	DB-3.5	DB-2.4
Hor. emit. ϵ_x (nm·rad)	3.55	2.55
Ver. emit. ϵ_y (pm·rad)	20.1	13.8
Nat. emit. (nm·rad) measurement / design	3.57 / 3.49	2.57 / 2.41

加速器診断用ビームライン II (BL05SS) ^[12] の ID05 ($\lambda_u = 76 \text{ mm}$, $N = 51$) ^[14] を用いて、10 keV 光子 ($K = 1.666$, 3rd harmonic) のフラックス密度測定を行った (スリット位置: 発光点から 92.275 m、スリット幅: $0.37 \text{ mm} \times 0.37 \text{ mm}$ (4 μrad 角相当))。DB-3.5 から DB-2.4 に切り替えることで、フラックス密度が 1.3 倍増大するとの結果を得た (図 5)。これは SPECTRA の計算結果とよく一致する。

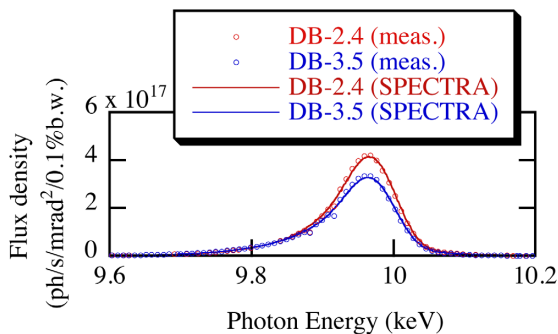


図 5 加速器診断用ビームライン II (BL05SS) で測定された、ID05 からの 10 keV 光子のフラックス密度

2013 年 5 月 8 日の DB-2.4 のユーザー運転適用後もマシンスタディや加速器調整等で加速器のブラッシュアップは続けられている。そのひとつの例として、ビーム寿命に関する最新の調整結果 ^[15] を図 6 に示す (高輝度光科学研究センター加速器部門の高雄勝氏にデータをいただいた)。ビーム寿命はトップアップ運転を維持するために重要なパラメーターとなる。RF 電圧が定常値の 16 MV のとき、DB-3.5 で 29.2 時間あったビーム寿命 (バンチ電流値 1 mA 時の寿命で、バンチ体積で規格化してある) が、

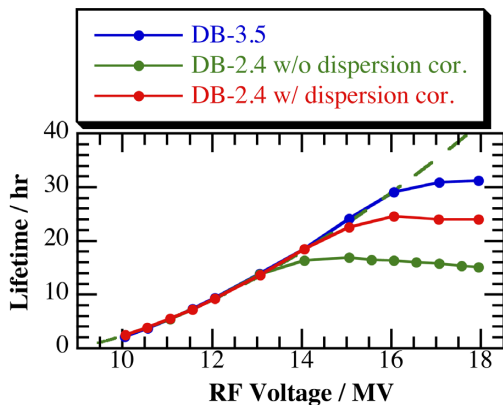


図 6 ビーム寿命の RF 加速電圧依存性 (測定結果)

DB-2.4 に切り替えた直後は 14.7 時間にまで減少した。トップアップ運転継続に問題はないものの、電子ビームの長寿命化が課題となっていた。その後の実験・解析で、分散関数の高次項が影響しているということがわかり、それを補正することで、現在はビーム寿命が 24.6 時間まで回復している。今後もユーザー運転に向けた加速器の高度化は続けられる予定である。

4. 利用側から見た低エミッタンス運転

ビームラインでの低エミッタンス運転による恩恵は、輝度およびフラックス密度の向上であり、特に挿入光源ビームライン (ID-BL) での効果が期待される。ID-BL では、電子ビーム性能が SR ビームの性能に直接反映される。そのため、電子ビームのエミッタンスが小さくなると、光源サイズも SR ビームの発散角も縮小される。その結果、試料位置でのフラックスが増加し、ビームサイズも小さくなる。

一方、偏向電磁石ビームライン (B-BL) ではおもに水平方向の取込角と電子ビームのエネルギーで SR ビーム性能が決まっている。そのため、低エミッタンス化しても SR ビームの水平・垂直の発散角は変わらず、フラックスも増加しない。光源サイズは水平・垂直とも、ビームラインの水平取込角・偏向電磁石の曲率・使用する波長の発散角に依存するので、集光ビームサイズが一概に小さくなるとは言えない。

利用側では低エミッタンス運転導入に向けたスタディを 2013 年 1 月に行った。3.5 nm \cdot rad の通常運転と 2.4 nm \cdot rad の低エミッタンス運転を同じ日に行い、低エミッタンス化による SR ビーム性能や機器への熱負荷等についての比較データを収集することを目的とした。このスタディには、20 本程度のビームラインが参加した。その結果、どの ID-BL においてもユーザー利用の条件において試料位置で 10% 程度のフラックスの増大が観測された。スリットを絞った擬似的なピンホールカメラ光学系による測定では最大 25% の強度増大が見られ、これは光源輝度の増加分によく対応している。B-BL ではフラックスに変化はなかった。また、低エミッタンス運転では通常運転と比べて問題となるような性能低下等は ID-BL、B-BL とともに認められなかった。

ここでは、その中から硬 X 線アンジュレータビームライン BL39XU での結果を紹介する。図 7 にアンジュレータの光源スペクトルの比較を示す。フ

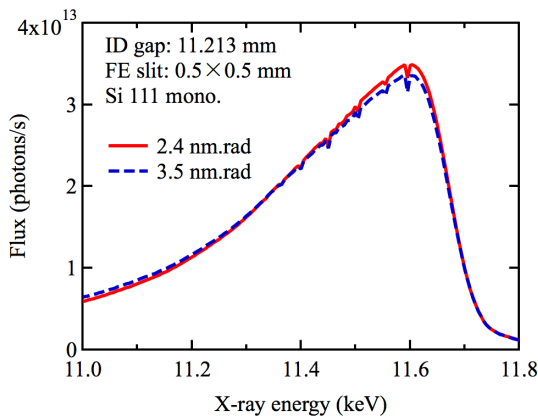


図7 ID スペクトルの比較 (BL39XU)

フロントエンド (FE) スリットサイズ (光源から 29 m に設置) は通常使われる $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ で (17 μrad 角相当)、液体窒素冷却の Si111 モノクロメータを使用している。同じ ID ギャップ値に対して、低エミッタンス化によってスペクトル幅はわずかに減少し、ピーク強度は 5% の増加が見られた。この結果は SPECTRA による計算結果と定性的に一致している。なお、グラフの数カ所にみられるディップはモノクロメータのグリッチ (同時反射による強度減少) によるものである。

図8は FE スリット位置でのビームサイズの比較である。FE スリットの位置スキャンにより、モノ

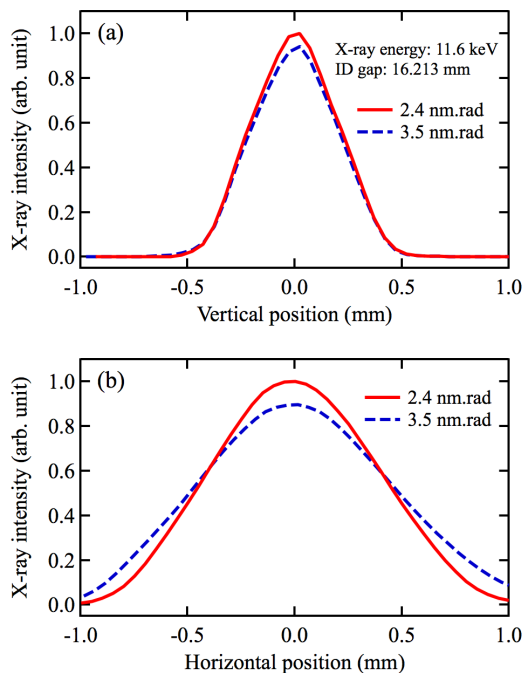


図8 FE スリットにおけるビームサイズの比較 (BL39XU)

クロメータ後での単色 X 線強度を使って計測した。測定中のスリット幅は 0.1 mm である。水平方向に関しては、13% (FWHM 1.08 \rightarrow 0.94 mm) のビームサイズの減少が見られたが、垂直方向の変化は見られなかった。

BL39XU にはサブマイクロビーム生成のための KB ミラーシステム^[16]があり、その集光特性も比較した。モノクロメータ下流の TC1 スリットを仮想光源として用い、スリットサイズは水平 54 μm 、垂直 5 mm (垂直方向は全開) とした。垂直方向に関しては、光源像を直接投影する配置を用いており、低エミッタンス化によって特に垂直方向の集光ビームサイズが小さくなることを期待した。金ワイヤーのエッジスキャンで評価したビーム形状を図9に示す。水平・垂直ともビームサイズの変化は見られなかった。光源サイズ縮小による垂直方向の集光サイズの明確な変化が観測されなかったのは、モノクロメータや KB ミラーなど光学系の振動による影響と考えられる。ただし、集光ビーム強度は 10% の増加が見られた。これは光源の発散角が小さくなったことにより、FE スリットや仮想光源スリットを通過する強度が増し、スループットが向上したためと考えている。

上記以外の点について、当初はビームフットプリントの減少にともなうパワー密度の増大による光学

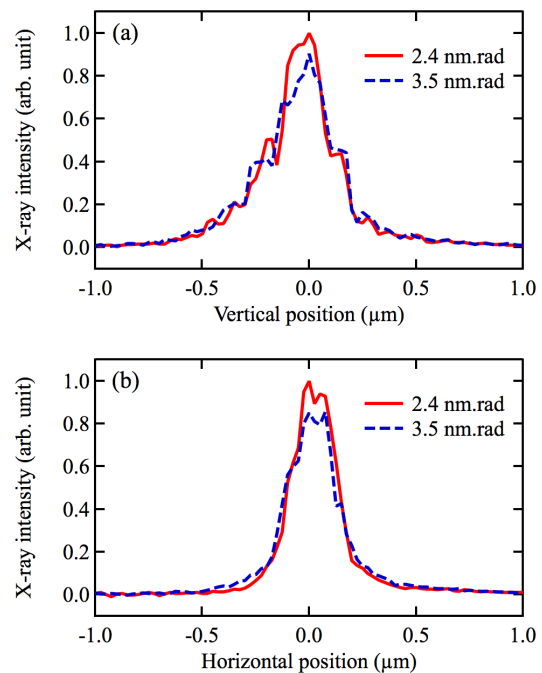


図9 KB ミラーによる集光ビームの形状の比較 (BL39XU)

素子への熱負荷の影響が心配されたが、モノクロメータ結晶の温度上昇は無視できる範囲であった。また水平方向ビームサイズの減少により、トップアップ入射の瞬間のビーム変動が目立つようになるのではないかと懸念もあったが、今のところ問題となっていない。

このスタディの好結果を受けて、2013A 期5月から2.4 nm・radの低エミッタンス運転がユーザー利用に提供された。通常、低エミッタンス運転で想定される最大の問題は蓄積電流寿命の低下だが、安定なトップアップ運転が今回の低エミッタンス化においても実現されているため、その心配はない。例えば、最初の低エミッタンス化(6.7→3.4 nm・rad)が実施された2003年には、まだトップアップ運転が導入されておらず、寿命低下による影響(セベラルバンチ運転時は半日で蓄積電流値が半分になり、1日2回入射)を考える利用側と加速器側で喧々諤々の議論があった。当時と異なり、今回の改良では利用側は利点のみを享受できるため、大変スムーズな導入となった。

5. おわりに

今回のSPring-8蓄積リング(88台の偏向電磁石で構成)のラティス切り替え(DB-3.5→DB-2.4)に際し、世界の大型放射光施設と比較してみる。アメリカのAPS(偏向電磁石の台数は80台)が電子エネルギー7 GeVで自然エミッタンスが2.5 nm・rad^[17]、ヨーロッパのESRF(偏向電磁石の台数は64台)が6 GeVで4.0 nm・rad^[18]といったところである。自然エミッタンスは電子エネルギーの2乗に比例し、偏向電磁石台数の3乗に反比例するので、各施設の比較のため、自然エミッタンスをこれらで規格化すると、APSの規格化エミッタンスが105.7、ESRFは117.4、SPring-8のDB-3.5が149.8で、DB-2.4が103.5となる(単位はいずれもnm・rad / GeV² / rad³)。SPring-8をDB-3.5からDB-2.4へ切り替えたことで、世界の大型放射光施設から見て、いい所にいったのではないかと思う。ただ昨今、世界各地で、より低エミッタンスを目指したリングが設計中・建設中である。SPring-8も負けないように、0.2 nm・rad以下の極低エミッタンスリング(SPring-8 II)を現在検討中である。

参考文献

- [1] 田中均、大熊春夫、熊谷教孝:SPring-8 利用者情報 Vol.8 No.2 (2003) 84.
- [2] 田中均 他:SPring-8 internal report ACC-MEMO 2005-04.
- [3] 田中均 他:SPring-8 利用者情報 Vol.11 No.2 (2006) 87.
- [4] K. Soutome *et al.*: *Proc. of EPAC08*, THPC070 3149.
- [5] 2005年当時は、4極補助電源は13台だったものを、2006年9月に48台に増設した。
- [6] Y. Shimosaki *et al.*: *Proc. of IPAC2013*, MOPEA027 133.
- [7] H. Tanaka *et al.*: *Nucl. Instrum. Meth. A* **486** (2002) 521.
- [8] T. Tanaka and H. Kitamura: SPECRA code ver. 9.02 (2012).
- [9] M. Takao *et al.*: *Proc. of IPAC2012*, TUPPC016 1191.
- [10] C. Mitsuda *et al.*: *Proc. of IPAC2014*, MOPRO082.
- [11] K. Fukami *et al.*: *Nucl. Instrum. Meth. A* **694** (2012) 1.
- [12] S. Takano *et al.*: *Proc. of IBIC2012*, MOPB52 186.
- [13] S. Takano *et al.*: *Nucl. Instrum. Meth. A* **556** (2006) 357.
- [14] M. Masaki *et al.*: *AIP Conf. Proc. SRI2009*, **1234** (2010) 560.
- [15] M. Takao, K. Kaneki, Y. Shimosaki and K. Soutome: *Proc. of IPAC2014*, MOPRO083.
- [16] 鈴木基寛 他:SPring-8 利用者情報 Vol.16 No.3 (2011) 201.
- [17] http://www.aps.anl.gov/Accelerator_Systems_Division/Accelerator_Operations_Physics/SRparameters/SRparameters.html
- [18] <http://www.esrf.eu/Accelerators/Performance>

下崎 義人 SHIMOSAKI Yoshito

(公財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0851
e-mail : shimosaki@spring8.or.jp

佐々木 茂樹 SASAKI Shigeki

(公財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0851
e-mail : sasaki@spring8.or.jp

早乙女 光一 SOUTOME Kouichi

(公財) 高輝度光科学研究センター 加速器部門

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1

TEL : 0791-58-0851

e-mail : soutome@spring8.or.jp

木村 洋昭 KIMURA Hiroaki

(公財) 高輝度光科学研究センター 光源・光学系部門

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

TEL : 0791-58-0831

e-mail : kimura@spring8.or.jp

鈴木 基寛 SUZUKI Motohiro

(公財) 高輝度光科学研究センター 利用研究促進部門

〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

TEL : 0791-58-2750

e-mail : m-suzuki@spring8.or.jp