

SPring-8蓄積リングの低エミッタンス化

財団法人高輝度光科学研究センター
放射光研究所 加速器部門
田中 均、大熊 春夫、熊谷 教孝

1. はじめに - 低エミッタンス化の歴史 -

第3世代の放射光光源の設計は、1970年代後半からスタートした^[1]。第3世代の放射光光源では、アンジュレーターと呼ばれる挿入型光源（以下ID）の性能を最大限引き出すように考えられ、ID設置用の多数の直線部が、ほぼ周期的に一周に渡り配置されている。アンジュレーターは電子を光の自然放射角以下で蛇行させ、各蛇行で発生した光を干渉させることで、光源の軸上に共鳴エネルギーの鋭いピークを発生させるものである。しかし、電子ビームが空間的に広がっていると、個々の電子から発生した光の共鳴エネルギーはシフトし、理想的にはシャープである光のスペクトルを広げてしまう。この電子ビームの空間的広がりを表す物理量がエミッタンスである。エミッタンスには、ビーム進行方向（縦）とそれに直交する平面内の2軸、水平と垂直方向の位相空間広がりを表す3種類がある。縦エミッタンスは光パルスの時間幅に関連し、水平、垂直エミッタンスは、各々光ビームの水平、垂直広がりを決定する。さて、当時の低エミッタンス化では、挿入光源部をディスパージョンフリーとするのが常識であった^{注1)}。ディスパージョンとは、周回電子エネルギーの設計値からの偏差が、軌道の位置と角度をどれだけ変えるかを表す係数^{注2)}で、 η と η' が記号としてよく用いられる。周回中の電子は、磁場で曲げられるたびに光子を確率的に放出する。これにより、電子ビームのエネルギーは広がりをもち、ディスパージョンが挿入光源部に存在すると、水平（垂直）方向の広がりをさらに増大させることになる。ディスパージョンフリーとは、その部分で無用なビームサイズの広がりを抑えるために $\eta=\eta'=0$ にするというものである。加速器の電磁石周期構造の単位セルから、ディスパージョンを漏らした方がエミッタンスを原理的に低下できることが分かっていた^[2]のに、なぜ“ディスパージョンフリーが良い”と考えられていたのだろうか？ 今となっては真相はよく

分からない。その責任の一端を担う筆者（H.T.）が考えるに、(a) ディスパージョンの及ぼす効果を定量的に調べなかった、(b) 衝突型加速器で問題となった縦振動と水平振動の結合の問題を誤解した^{注3)}、(c) 加速器のパラメータ調整や運転が面倒になると考えたからではないだろうか。

1990年前半から第3世代の放射光光源の運転が徐々に開始され、さらなる低エミッタンス化の検討が始まった^[3]。第3世代の放射光光源でディスパージョンフリーの呪縛から最初に抜け出したのはESRF（France）とMAX（Sweden）であろう。ESRFの低エミッタンス化の検討には筆者（H.T.）も参加していたが、マシンスタディを経て1995年秋からユーザー運転に3.9nm・radのオプティックスが投入されている^[4]。

一方、SPring-8では、1997年の運転当初から、垂直エミッタンスが極めて小さく（ $< 10\text{pm}\cdot\text{rad}$ ）⁵⁾、1次元の垂直回折限界ビームの条件が近似的に満たされていた。このため、次なるターゲットとして、加速器部門では水平エミッタンスの低減化に取り組んできた^[6, 7]。昨年暮れ、“加速器の電磁石周期構造の単位セルに閉じ込められたディスパージョンを積極的に漏らす”方法により、水平ビームエミッタンスの低減に成功し、ユーザー運転に導入した。本報告では、今回適用した低減化法の概要と得られた性能等について述べる。「この方法によるSPring-8の低エミッタンス化がどうして遅れてしまったの？」という読者の疑問については3章でお答えしよう。

注1) 例えば、日本物理学会編集、“シンクロトロン放射”、培風館、2章、p.30を見ると当時の雰囲気を感じることが出来る。

注2) 軌道のエネルギー依存性は厳密には非線形であるが、通常そのうちの線形部分をディスパージョンと呼んでいる。

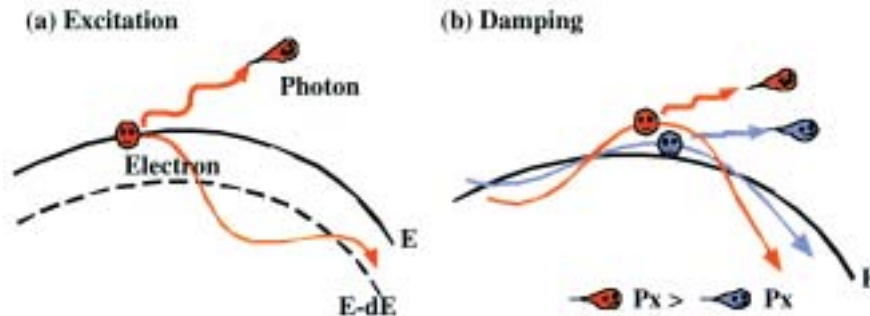


図1 光子の放出による振動の励起（放射励起）(a)と光子放出による振動振幅の減衰（放射減衰）(b)。放射励起（a）では、エネルギーの変化による軌道の変化が大きい程、振動が大きく誘起される。また、放射減衰（b）では、振動振幅が大きいほど、減衰効果が大きい。

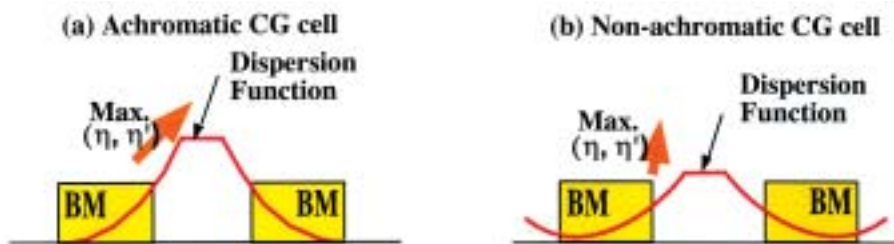


図2 ディスパージョンを電磁石周期構造の単位セル内に閉じこめた場合（a）と漏らした場合（b）。BM（黄色い四角）は偏向電磁石を赤い曲線はディスパージョンの分布を示す。また、オレンジ色の矢印は偏向電磁石端部の摂動ベクトルの最大値を表している。

注3) IDを設置する直線部には放射によるエネルギーロスをRF電場で補うためのRF空洞も設置される。専門的になるがそこに水平位置のエネルギー依存性が大きくあると水平振動と縦（エネルギー）振動が結合し、不安定となる場合がある。第3世代の放射光光源では、水平振動と縦振動の振動数が極端に異なるのでこの結合の影響は殆ど無視できる。

2. 加速器の電磁石周期構造の単位セル内に閉じ込められたディスパージョンを漏らすことによる低エミッタンス化

水平のエミッタンスは、簡単に言えば、個々の電子の確率的光子放出による振動励起と振動減衰の動的平衡で決まる振動振幅の期待値である。光子は、ほぼ電子の進行方向に放射されるので、放射の度に振動エネルギーの一部を失っていく（振動減衰）。一方、エネルギーの異なる電子は異なる周回軌道を取る。光子放出によるエネルギーのステップ変化で、電子はそれまでの軌道を走れなくなり、振動が励起される（振動励起）。この様子を図1に示す。

以上の基礎知識をもとに、ディスパージョンを漏らすことによるエミッタンスの低減を図2を用いて定性的に説明しよう。第3世代の放射光光源では、

単位セル内に2個、もしくは3個の偏向電磁石が配置される。ここでは2個の場合を考える。図2(a)と(b)はそれぞれディスパージョンをセル内に閉じこめた場合と漏らした場合を示している。黄色の四角は偏向電磁石を表しており、光子放出の大部分はこの電磁石内で生じる。図中の赤線は電磁石内でのディスパージョン分布を示し、光子放出によるエミッタンス（振動）励起の大きさは、この曲線の値 η とその微分 η' の作る摂動ベクトルの大きさに比例する。ディスパージョンをセル内に閉じこめた場合（図2(a)）、偏向電磁石内の摂動ベクトルはディスパージョンを漏らす場合（図2(b)）に比べて電磁石の端部で必然的に大きくなる（図2の η と η' 平面上で描いたオレンジ色の矢印を比べてみれば分かるであろう）。

エミッタンス励起の大きさを決めるもう一つの要因は、摂動ベクトルと位相空間とのマッチングの問題である。図2(a)と(b)には、同じ大きさの摂動ベクトルを用い、マッチングの善し悪しによるエミッタンス励起の違いを示してある。図の固有楕円は、光子放出点での位相空間上の電子の振動の軌跡を表し、電子は振幅の大小を問わずこの軌跡に相似な形で振動する。エミッタンス励起を抑えるには、摂動ベクトルを小さくすると共に、摂動ベクトルに固有楕円の長軸を合わせることが重要になる。詳細は省

くが、ディスパージョンをセル内に閉じこめた場合、マッチングを取るために、ビームを偏向電磁石部で水平に強く絞り込む必要がでてくる。これに対し、ディスパージョンを漏らした場合には、この条件が緩和され、摂動ベクトルに対する固有楕円のマッチングが取りやすい。

上記の2つの理由により、セル内に閉じ込められたディスパージョンを外に漏らすことでエミッタンスを低減できる。

3. SPring-8での低エミッタンス化と得られた性能

SPring-8でも、ディスパージョンを漏らすことによる低エミッタンス化は運転のオプションとして当初から考えられていた。しかし、導入までに運転開始から5年を要したのは理由がある。SPring-8では、電磁石のない130m級の直線部を挿入できるように2個の偏向電磁石から構成される44台のChasman-Greenセル（以下CGセル）の間に、CGセルから2個の偏向電磁石のみを抜きとった直線セルが4回対称に配置されていた。この10台の4極電磁石と7台の6極電磁石だけで構成された直線セルの働きは、設計エネルギーを持つ電子の水平、垂直振動に対し、リングの対称性を4から48に引き上げることでビームを安定化させ、蓄積リングの初期調整運転を容易にすることにあった。当初採用した電磁石電源システムも、基本的にこの48回対称性を前提に構成されていた。しかし、この電磁石電源システムでは、CGセルでディスパージョンを漏らすと、偏向電磁石がないという全く異質な直線セルでディスパージョンのマッチングが取れず、エミッタンスを低減するようなディスパージョン分布をリング一周に渡り実現できなかった。2000年の夏期停止期間に直線セルとその前後のCGセルが改造され、CGセルと独立にチ

ューニング可能なマッチング部を両端に有する27mの電磁石フリーな長直線部が作られた。この改造でリングのディスパージョンマッチングに関する電磁石電源の問題がほぼ解決し、SPring-8でもディスパージョンを漏らすことによる低エミッタンス化が可能になった訳である。

その後、ただちにこの方法による低エミッタンス化の検討が始まった。2002年夏にディスパージョン制御の自由度を増やす若干の電源改造を実施し、2002年秋からマシンスタディを本格的に開始した。その結果、2.5nm・rad程度までは水平エミッタンスを低下できることが分かった。図4に実験で得られた水平エミッタンスと計算値の関係を示す。水平エミッタンスは、2次元可視光干渉計^[8]で測定された水平ビームサイズとディスパージョンからベータatron関数の設計値を用いて求めた。このデータはパルスポンプとスクレーパーによるビームサイズ測定^[9]から評価した水平エミッタンスとも矛盾しない。また、図4からIDギャップの違いでエミッタンスが変化していることも分かる。IDギャップを閉じた時には、放射減衰の相対的増加により、エミッタンスが低下する。

エミッタンスの低下によりフォトンフラックスが実際に増加していることを確認するため、ビームライン関係者の協力を得て、BL19LXUとBL29XUで単色X線のフラックス測定も行った^{注4)}。その結果、エミッタンスの減少を裏付ける最大で30%のフラックス増大が確認された。一連のスタディとビーム安定性確認試験や軌道調整等を経て、2002年第9サイクルから水平エミッタンス3.4nm・rad（設計）のオプティックスでユーザー運転を開始する運びとなった。

現在用いられているオプティックスを図5に示す。

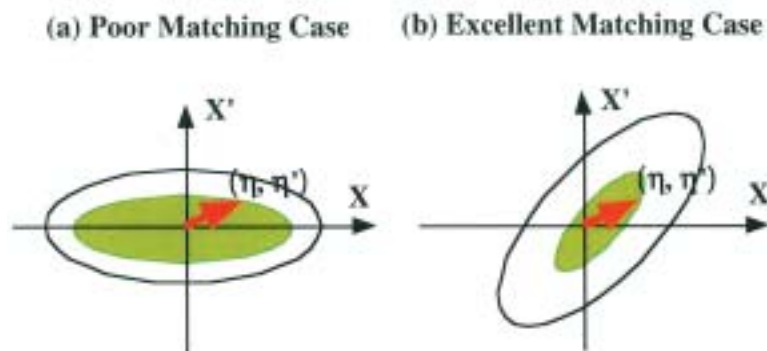


図3 摂動ベクトルと固有楕円とのマッチング。マッチングの悪いケース (a) と良いケース (b)。オレンジ色の矢印は同じ大きさの摂動ベクトルを表す。

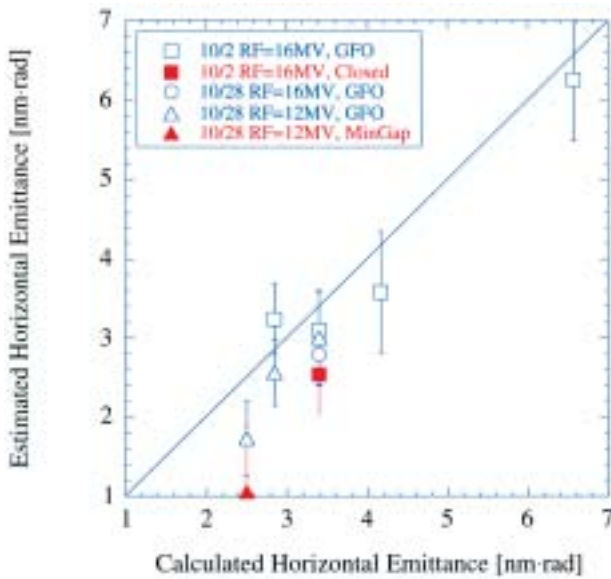


図4 2次元可視光干渉計で測定された水平ビームサイズからベータatron関数の設計値を仮定して評価した水平エミッタンスと設計エミッタンスの関係。GFOは全てのIDのギャップ全開を、また、RF=12MVは測定時のRF電圧が12MVであることを示す。エラーバーはフィッティングの統計誤差を示す。

水平エミッタンス3.4nm·radを選択した理由は、ID光源点でのディスパージョンによるビームサイズの増大を考慮した有効エミッタンスを最小にするためである。IDギャップを閉じることによるエミッタンスの約20%の減少を考慮すると、通常ID部での有効エミッタンスは、IDギャップの閉状態に依り、3.0~3.7nm·radになると予測される。表1に光源点でのビームサイズをまとめて示す。ここでは実測の3.1nm·radという水平エミッタンスを用いて各光源

点でのビームサイズと角度発散が計算されている。通常及び長尺IDともに、水平ビームサイズ(1σ)で300ミクロンを下まわる大きさとなることが分かる。表2にリングの主要パラメータを低エミッタンス化の前後で比較して示す。ビーム寿命がこれまでのHHLV+4LSSオプティックスに比べ低下しているのが目立つ。低エミッタンス化によりバンチ内電子密度が上がり、電子・電子散乱によるビームロスが増大したためである。これにより、特にセバールバンチ運転でのビーム寿命が著しく減少する結果となった^{注5)}。これは、高輝度低エミッタンスにより開ける新しい科学を追究する上で避けられない問題である。不安定性抑制のためのフィードバックシステムと組み合わせた低クロマティシティ運転やTop-up運転を早急の実現し、時間平均輝度を向上させる努力が必要であると考えている。

注4) 理研播磨研の玉作賢治氏、JASRIビームライン技術部門の矢橋牧名氏に測定を依頼した。

注5) 表2の低エミッタンス化前後のビーム寿命は直接比較ができない。Operation chromaticitiesが前後で異なり、ビーム寿命はこのパラメータに敏感である。低エミッタンス化前とchromaticitiesが同一の条件であれば、ビーム寿命は今より長くなり、おおよそ以前の半分程度と考えられる。

4. 今後の展望

ディスパージョンを漏らす方法の他にも、エミッタンスをさらに低下させる可能性として(1)放射減

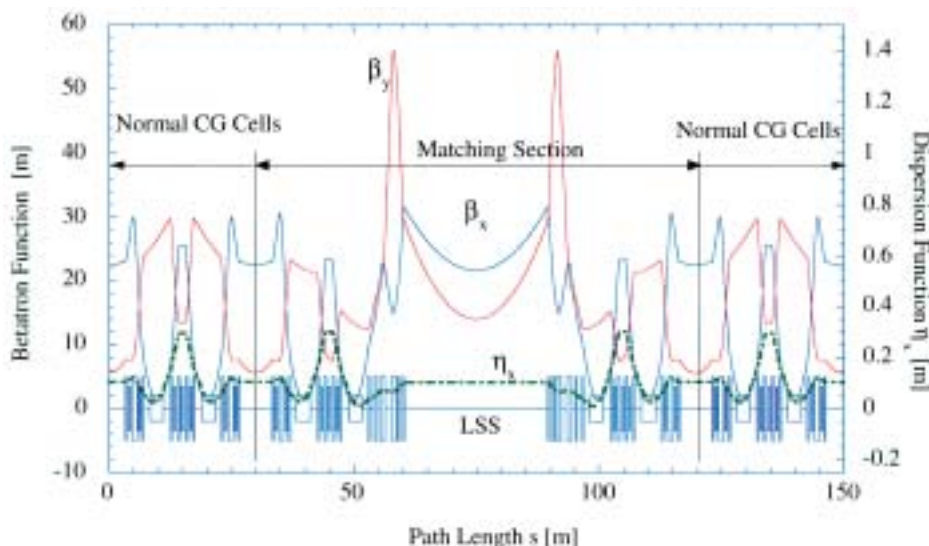


図5 設計エミッタンス3.4nm·radのオプティックス

表1 各光源点でのTwissパラメータとビームサイズ

	β_x [m]	β_y [m]	γ_x [m ⁻¹]	γ_y [m ⁻¹]	η_x [m]	η'_x [-]	σ_x [m]	σ_y [m]	σ_x [rad]	σ_y [rad]
Long ID	21.7	14.1	4.61E-02	7.12E-02	0.103	0.000	2.83E-04	1.14E-05	1.19E-05	8.13E-07
ID	22.6	5.61	4.43E-02	0.178	0.107	0.000	2.89E-04	7.22E-06	1.17E-05	1.29E-06
BM1	3.02	25.0	0.331	4.00E-02	0.032	-0.014	1.03E-04	1.52E-05	5.38E-05	6.78E-07
BM2	2.11	27.8	0.475	0.0360	0.071	-0.056	1.12E-04	1.61E-05	7.28E-05	6.78E-07

水平エミッタンスはIDギャップフルオープン時の測定値3.1nm・radを用いた。
カップリングは0.2%を仮定した。

表2 リングの主要パラメータ

	低エミッタンス化前	低エミッタンス化後
Tunes (ν_x/ν_y)	40.15/18.35	40.15/18.35
Current [mA] :		
single bunch	13	10
multi bunch	100 (120 ^{\$1})	100
Bunch length (FWHM) [psec]	32	34
Horizontal emittance [nm・rad]	6.3 ^{\$2} /6.6 ^{\$3}	3.1 ^{\$2}
Vertical emittance [pm・rad]	16.9 ^{\$3}	3.9 5.8 ^{\$4} /8.7 ^{\$3}
Coupling [%]	0.26 ^{\$3}	0.13 0.19 ^{\$4} /0.28 ^{\$3}
Operation chromaticities (ξ_x/ξ_y)	+7/+6	+8/+8
Momentum acceptance [%]	2.6	2.1
Energy spread ($\Delta E/E$)	0.0011	0.0011
Lifetime [hr] : 100mA (multi bunch)	~ 150 ^{\$5}	~ 97 ^{\$5}
1mA (single bunch)	~ 24 ^{\$6}	~ 9 ^{\$6}
Dispersion distortion [mm] :		
horizontal (rms)	4	9.3
vertical (rms)	1.1 ^{\$7}	1.1 ^{\$7}

注記：低エミッタンス化前後のビーム寿命は直接比較ができないことを断っておく。

Operation chromaticitiesが前後で異なり、ビーム寿命はこのパラメータに敏感である。低エミッタンス化前とchromaticitiesが同一の条件であれば、ビーム寿命は今より長くなり、おおよそ以前の半分程度と考えられる。

\$1 maximum stored beam current at machine study

\$2 estimated with the beam size measured by a pulse bump and scraper

\$3 estimated with the beam size measured by two dimensional interferometer

\$4 estimated with the beam size measured by two photon correlation

\$5 (12-1)*160 pulse train [normal beam-filling pattern for multi-bunch operation],
Vrf=16MV, typical value at user time operation

\$6 Vrf=16MV

\$7 with correction by 20 skew Q's

衰を制御して水平エミッタンスを低減する方法^[6]、(2) エネルギーを8GeVから下げる低エネルギー運転、(3) 電子ビームの水平方向の位相空間をIDに対し非対称とし、光源の実効的位置を実験ハッチ側にシフトさせ実効的エミッタンスを低減する等がある。原理的には全て実施可能であるが、ユーザー運転に適用するまでにはまだ多くの課題をクリアする必要があろう。しかし、これらを組み合わせたとしても、SPring-8の運転エネルギーを極端に下げない限り、水平エミッタンスの低減は精々Factor程度に止まる。ユーザーが待望するX線領域での水平・垂直2次元回折限界ビームを蓄積リングで実現するには、ブレイクスルーを可能にする新しいアイデアを導入していくことが必要だ。

参考文献

- [1] 例えば、ESF : Synchrotron Radiation / a Prespective View for Eurorpe, Strasbourg, Nov. (1977)
- [2] M. Sommer : Laboratoire de l' Accelérateur Lineaire, LAL/RT/(1983)83-15 ; Y. Kamiya and M. Kihara : National Laboratory for High Energy Physics, KEK 83-16 (1983); L. C. Teng : Argonne National Laboratory, LS-17 (1985)
- [3] J. L. Laclare, A. Ropert, L. Farvacque, H. Tanaka, J. Payet, P. Nghiem and A. Tkatchenko : ESRF, ESRF/MACH-LAT-93-08 (1993); L. Farvacque, J. L. Laclare, P. Nghiem, J. Payet, A. Ropert, H. Tanaka and A. Tkatchenko : " Possible Retuning of the ESRF Storage Ring Lattice for Reducing the Beam Emittance ", Proc. of the 4th European Particle Accel. Conf., London, June(1994)pp.612-614 ; Å. Andersson, M. Eriksson, L. J. Lindgren, P. Rösel and S. Werin : " Status of the Synchrotron Radiation Source MAX " ; Proc. of the 4th European Particle Accel. Conf., London, June(1994)pp.588-590.
- [4] European Synchrotron Radiation Facility Annual Report 1994/1995, Machine Division (1995)
- [5] N. Kumagai, H. Ohkuma, K. Soutome, M. Takao and H. Tanaka : " Estimation of Betatron Coupling and Vertical Dispersion for SPring-8 Storage Ring ", Proc. of the 18th Particle Accel. Conf., New York, Mar. (1999) pp. 2349-2351.
- [6] T. Nakamura, T. Ohshima, K. Soutome, M. Takao, S. Takano, Y. Suzuki, H. Yamazaki, H. Tanaka, T. Hara, Y. Kohmura and Y. Tanaka : " Low Emittance Operation of the SPring-8 Storage Ring by Damping Partition Control " Proc. of the 19th Particle Accel. Conf., Chicago, June.(2001)pp. 2665-2667.
- [7] マシンスタディ報告書、「ディスパージョンリーケージによる低エミッタンス化と短バンチ化」、マシンスタディ報告書、「ディスパージョンリーケージによる低エミッタンスOpticsのチューニングと安定性確認試験」。
- [8] M. Masaki and S. Takano : "Beam Size Measurement of the SPring-8 Storage Ring by Two-dimensional Interferometer", Proc. of the 5th European Workshop on Beam Diagnostics Instrum. for Particle Accel., Grenoble, May (2001)pp.142-144 ; M. Masaki and S. Takano, submitted to Journal of Synchrotron Radiation.
- [9] K. Soutome, H. Tanaka, M. Takao, K. Kumagai and H. Ohkuma : SPring-8 Annual Report 1999, p. 136; http://www.spring8.or.jp/ENGLISH/publication/ann_rep/AR99PDF/p136-138.pdf.

田中 均 TANAKA Hitoshi

(財)高輝度光科学研究センター 放射光研究所 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0851 FAX : 0791-58-0850
e-mail : tanaka@spring8.or.jp

大熊 春夫 OHKUMA Haruo

(財)高輝度光科学研究センター 放射光研究所 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0858 FAX : 0791-58-0850
e-mail : ohkuma@spring8.or.jp

熊谷 教孝 KUMAGAI Noritaka

(財)高輝度光科学研究センター 放射光研究所 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0861 FAX : 0791-58-0850