

## 3 GeV 次世代放射光施設設計画の加速器システム

西森信行

量子科学技術研究開発機構 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

渡部貴宏

高輝度光科学研究センター 〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

田中 均

理化学研究所 〒679-5148 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1

### 要旨

国内初の高輝度中型 3 GeV 次世代放射光施設は、最新加速器設計の MBA (Multi-Bend Achromat) ラティスを採用した低エミッタンス蓄積リングにより、軟 X 線からテnder X 線領域で高コヒーレンス・高輝度光の提供を目指す。蓄積リング入射のため、XFEL SACLA の C-band 加速器からなる 3 GeV 線型加速器を採用し、軟 X 線 FEL への拡張性も持たせた。電子ビームの安定性・加速器運転の信頼性が、光源実効性能や利用者の利便性に大きく影響するため、機器性能の確保、運転の信頼性・メンテナンス性を最大限考慮した設計を進めている。蓄積リングは周長約 350 m で 16 セル、4BA ラティスを採用し、自然水平エミッタンス 1.1 nm.rad、蓄積電流 400 mA を目指す。SPring-8-II 計画の R&D を最大限活用して機器性能を保証し、コストを合理化する。本稿では 3 GeV 次世代放射光施設設計画の加速器システムの特徴と進展状況を報告する。

### 1. 加速器システムのコンセプト

3 GeV 次世代放射光施設設計画が 2023 年度中の稼働を目指して進められている<sup>1)</sup>。2018 年度には仙台市東北大学青葉山新キャンパス内にて整備用地の造成が開始された。本施設は軟 X 線からテnder X 線領域において高コヒーレンス・高輝度光を提供し、軽元素の高感度測定に真価を発揮する。耐久性に優れた先進複合材料開発、高性能磁石・スピントロニクス素子開発、新たな高活性触媒・創薬開発への貢献が期待され、硬 X 線領域を得意とする SPring-8 と相補的な役割を果たす。Fig. 1 に放射光エネルギーを関数としてプロットした放射光輝度を示す。四角の囲み枠が本 3 GeV 放射光施設の目標輝度で、軟 X 線領域において  $>10^{21}$  photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1% b.w. を目指す<sup>2)</sup>。これは、SPring-8 の 100 倍である。また、コヒーレンスの指標である coherent ratio R については 1 keV 領域において R=10% を目指す。ここで、

$$R[\%] = 100 \left( \frac{\varepsilon_{ph}}{\varepsilon_x + \varepsilon_{ph}} \right) \left( \frac{\varepsilon_{ph}}{\varepsilon_y + \varepsilon_{ph}} \right) \quad (1)$$

$\varepsilon_{x,y}$  は電子ビームの水平、垂直エミッタンスで、 $\varepsilon_{ph} = \lambda/4\pi$  は光の回折限界エミッタンスである。Fig. 2 に水平エミッタンスの関数として Coherent ratio (放射される光の干渉成分の割合) をプロットした。光の波長に依存し、 $\varepsilon_x = 1$  nm.rad では 0.1 keV で R=50% 程度、1 keV で 10% 程度、

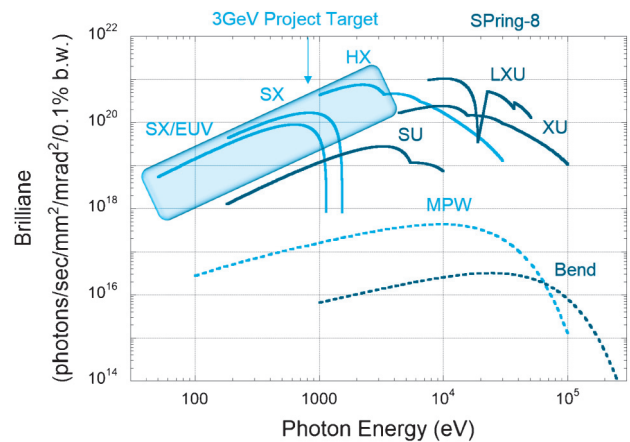


Fig. 1 Brilliance as a function of photon energy. Pale blue lines show brilliance of 3 GeV project for various undulators and multipole wiggler (MPW) when  $\varepsilon_y/\varepsilon_x=0.01$  is assumed. Deep blue lines stand for brilliance of SPring-8 for  $\varepsilon_y/\varepsilon_x=0.002$ . Square shows target brilliance of 3 GeV project.

10 keV で 1% 程度となる。輝度と Coherent ratio の目標値、十分な光子束を達成するため、ビーム電流 400 mA、エミッタンス 1 nm.rad を本 3 GeV 蓄積リングの目標とする。トータルの光源性能向上のため、ビーム寿命 5 時間以上を目標とし、信頼性の高い Top-up 運転を目指す。

加速器システムは放射光施設として高い信頼性と実績を持つ SPring-8/SACLA の加速器デザイン・技術に基づく。具体的な理由として以下の 3 点を挙げる。

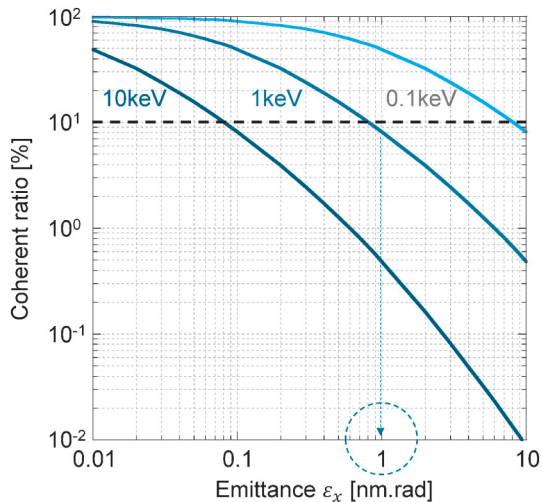


Fig. 2 Coherent ratio as a function of horizontal emittance for various photon energies when  $\varepsilon_y/\varepsilon_x=0.01$  is assumed.

- ① 加速器が故障なく連続的に平均200時間運転を実現していること。
- ② SPring-8のTop-up運転で蓄積ビーム電流変動0.06%以下を実現していること。
- ③ XFEL施設SACLAは、高加速電界Cバンド加速管など最先端技術を有し、6000時間を上回る年間運転時間を実現していること。

3 GeV放射光施設加速器システムはSPring-8/SACLAの知識・技術・経験を利用すると共に、軟X線FELへの拡張性、限られたスタッフによる高信頼性運転、タイトなスケジュールと限られた予算の中で最先端性能実現を念頭に設計されている。機器設計について、加速器学会で詳述した<sup>3)</sup>。本稿では、最新加速器設計を用いた低エミッタンス化について分野外の読者を対象に分かり易く解説し、機器設計開発の現状を概説する。

## 2. 加速器システムの基本設計

一般的なN個の偏向磁石によるMBA (Multi-Bend Achromat) セルを基本要素として構成される蓄積リングの理論最小エミッタンスは次式で与えられる<sup>4)</sup>。

$$\varepsilon_{x, \min} (\text{m.rad}) = \left( \frac{N+4}{12N\sqrt{15}} \right) \frac{C_q \gamma^2 \theta^3}{J_x} \quad (2)$$

ここで、 $C_q = 3.84 \times 10^{-13}$  m.rad,  $\gamma$  はローレンツ因子,  $\theta$  は偏向磁石の偏向角である。 $J_x$  は damping partition number と呼ばれ、ビーム偏向機能のみを持つ通常の偏向磁石では  $J_x = 1$  である。(2)式から明らかであるが、 $J_x$  を大きくすることでエミッタンスを低減できる。 $J_x$  は理論上最大

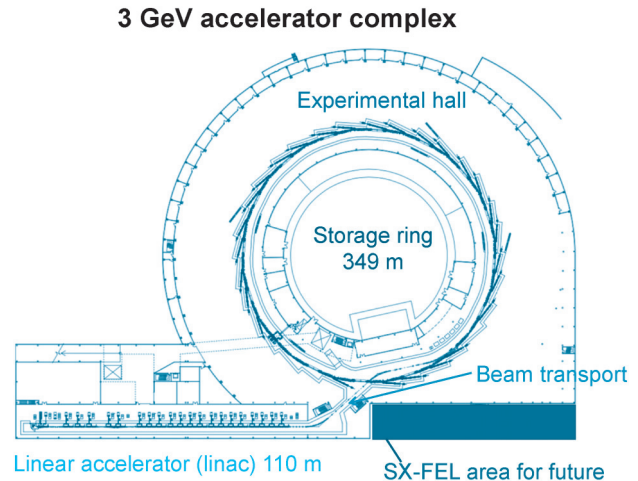


Fig. 3 3 GeV accelerator complex.

2まで大きくできる。エミッタンスは $\theta^3$ に比例するため、蓄積リング偏向磁石の偏向角を小さくすること(リングあたりの偏向磁石数を増やすこと)が低エミッタンス化に直結する。(2)式から明らかなように、理論最小エミッタンスはセル当たりの偏向磁石数Nにも依存し、Nの大きい方が低エミッタンス化には有利である。3 GeV次世代放射光施設は周長349 mのコンパクトな蓄積リングと長さ110 mの線型加速器で構成される(Fig. 3参照)。コンパクトな故にセル数が16程度に限られ、偏向磁石2台で構成される従来型DBA (Double-Bend Achromat) ラティスでは、 $\varepsilon_x = 1$  nm.radを達成できない。そこで、最新の加速器設計であるMBA (Multi-Bend Achromat) を取り入れ、偏向磁石4台の4BA (4-Bend Achromat) ラティスとし、偏向磁石総数を64とした。

更なる低エミッタンス化のため、本3 GeV蓄積リングでは機能複合型偏向磁石を採用した。通常の偏向磁石はビーム偏向機能のみであるが、複合型は四極磁石(この場合、水平方向にビームを発散させ、垂直方向にビームを収束させる磁石。発散四極磁石とも呼ばれる)も有する。詳細は後述するが、単機能型では(2)式で $J_x = 1$ に対し、本3 GeV蓄積リングの機能複合型では $J_x = 1.4$ 程度となり、エミッタンスを低減できる。まとめると、周長350 m程度のコンパクトな本3 GeV蓄積リングでは4BAと機能複合型偏向磁石を採用し、1 nm.rad程度の低エミッタンスを実現する。

蓄積リングのエミッタンスについて少し詳述する。電子ビームのエミッタンスは、個々の電子の放射による振動エネルギーの散逸にともなう振動減衰と放射の量子効果(不連続性)による振動励起の動的な平衡で決まる。振動の減衰は放射が電子の運動の接線方向に出るため、常に電子の振動の横方向運動量の一部が放射により奪い去られて行く。蓄積リングでは、電子の放射光生成による損失エネルギーを加速空洞で補うが、加速空洞は電子の進行方向にの

みエネルギーを付与するため、この効果は電子ビーム横方向の広がりをゼロへと減衰させる。

一方、放射は量子化されているので、偏向磁石中で電子が放射した場合、直後に電子は放射光生成に伴う電子の離散的なエネルギー変化と分散の積に比例して、中心軌道からジャンプし振動を開始する。この2つの効果のリング一周に亘る寄与のバランスでエミッタンスが決定される。

エネルギーの異なる電子ビームは、偏向磁場による曲げ角が異なるため、プリズム中の光と同様、軌道が水平方向に分散する。分散は位置の関数として偏向磁場を出た後もリニアに増大する。水平に収束レンズ機能を持つ四極磁石を用いて分散を収束できるので、四極磁石を適切に配置すれば、分散の小さくなる収束位置に全ての偏向磁石を配置できる。このように低エミッタンス化のため、偏向磁石数を増やして各磁石からの分散を小さくし、その上で高磁場勾配の四極磁石で各偏向磁石部の分散を極小化する配列がMBAラティスである。最適な分散関数分布を可能にする電子ビームの収束系の設置スペースを確保できる周長の大きな蓄積リングほど、低エミッタンス化が容易である。

蓄積リングには設計エネルギーを持つ電子が、全ての設計磁場中心を通る理想軌道が存在する。ビーム内の電子は、理想軌道を中心に水平・垂直方向に微小振幅の振動(ベータトロン振動)をしながらいリングを周回する。周回のベータトロン振動数は、蓄積リングの磁石の配列で決定され、本3 GeV蓄積リングでは、水平方向が28.17、垂直方向が9.23である。蓄積リングの各位置でのベータトロン振動の位相は周毎に異なり、その最大振幅を位置の関数として表したものをベータ関数と呼ぶ。放射により生じる電子のベータトロン振動の振幅変化は、電子が光を放射する場所での分散に依存する。このため、分散関数にマッチするように水平のベータ関数を偏向磁石内で最適化することも、放射による振動励起を抑制して、エミッタンスを低減する上で重要になる。

発散四極(水平発散/垂直収束)を組み込んだ機能複合型偏向磁石を採用すると、放射による水平の振動減衰を促進できるのは何故だろう。定性的な説明は次のようになる。電子は放射で必ずエネルギーが減少する。この結果、放射後の電子ビーム軌道はリングの内側にシフトする。軌道を中心として外側に外れると小さくなる磁場勾配を付けることで、低エネルギー側を通過する電子の相対的に小さい振動振幅と高エネルギー側を通過する電子の相対的に大きい振動振幅の偏差を、一様磁場に比べ抑制できる<sup>5)</sup>。つまり、振動励起の振幅のバラツキを低減する。この効果はdamping partition numberで表現され、SPring-8で $J_x=1$ に対し、本3 GeV蓄積リングでは $J_x=1.4$ 程度が得られる。

Table 1に本3 GeV蓄積リングとSPring-8の比較をまとめる。SPring-8に対して約1/4の周長というコンパクトな本3 GeV蓄積リングは、4BAラティスで偏向磁石総数を増やし、機能複合型偏向磁石の採用で、1 nm.radの低

エミッタンスを実現する。

エミッタンスを下げるため偏向磁石数をDBA, 4BA, 5BA…のように単に増やせばよいのか?という、そうではない。Table 1に示すように、隣り合う偏向磁石間の距離はSPring-8で約16 mに対し、本3 GeV蓄積リングは約5.5 mと1/3に縮小されている。偏向磁石間の狭いスペースに多極磁石を設置して各偏向磁石中のビームサイズを極小化するMBAラティスでは、高パッキングファクター克服が大きな課題となる。加速器機器実装技術を進化させない限り、やみくもに偏向磁石数を増やすことは困難である。

Fig. 4はアンジュレータ用の長直線部中心から次の長直線部中心までの4BAラティス中の電子ビーム水平(x)、垂直(y)ベータ関数と分散関数を表す。偏向磁石位置で、水平ベータ関数 $\beta_x$ 、分散関数 $\eta_x$ が極小化されていることがわかる。極小化は、偏向磁石間の四極磁石の磁場勾配の最適化で実現する。アンジュレータ中心でのビームサイズは

$$\sigma_x = \sqrt{\epsilon_x \beta_x}, \quad \sigma_y = \sqrt{\epsilon_y \beta_y} \quad (3)$$

Table 1 Comparison of 3 GeV-ring and SPring-8 parameters.

Parameter	3 GeV-ring	SPring-8
Beam energy [GeV]	3	8
Circumference [m]	349	1436
Lattice structure	4BA	DBA
Number of lattices	16	44
Number of bends	64	88
Length/bend [m]	5.5	16
Damping partition number $J_x$	1.4	1
$\epsilon_x$ [nm.rad]	1.14	2.4
Undulator wavelength $\lambda$ [nm]	0.96	0.13

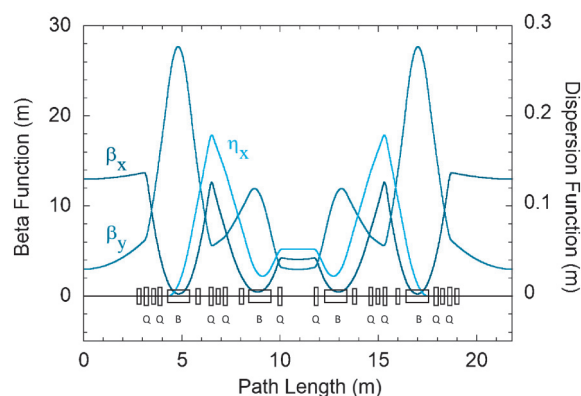


Fig. 4 Four-bend achromat lattice. The horizontal, vertical beta functions ( $\beta_x$  and  $\beta_y$ ) and dispersion function ( $\eta_x$ ) are plotted along the lattice. Layout of the magnets along path length is shown by black squares. Bending and quadrupole magnets are designated by B and Q, respectively. Other squares show sextupole magnets.

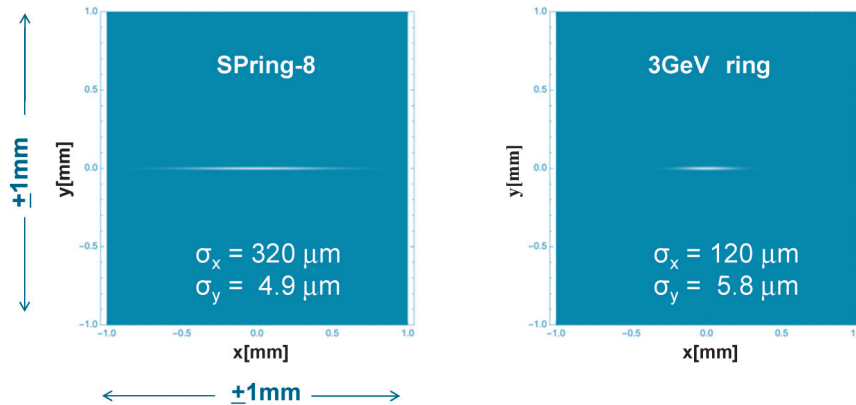


Fig. 5 Transverse beam profiles of SPring-8 (left) and 3 GeV-ring (right) at the undulator centers.

である。垂直エミッタンスは水平エミッタンスの1% ( $\epsilon_y/\epsilon_x=0.01$ ) を仮定して、アンジュレータ中心でのビームプロファイルを求めたのが Fig. 5 である。3 GeV 蓄積リングのビームサイズは、SPring-8 に比べて半分以下の小さな光源である。

周期長  $\lambda_w$ 、偏向定数  $K$  のアンジュレータ放射波長は

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left( 1 + \frac{K^2}{2} \right) \quad (4)$$

である<sup>6)</sup>。真空封止アンジュレータを仮定し、周期長  $\lambda_w = 20$  mm、 $K=1$  での放射波長は、本 3 GeV 蓄積リングで 1 nm 程度、SPring-8 では 0.1 nm 程度である (Table 1 参照)。長直線部の長さは 5.4 m、ラティス中心の多極ウィグラー用の短直線部の長さは 1.6 m である。長直線部 16 本の内、2 本は蓄積リング高周波加速空洞用と線型加速器からのビーム入射用である。残りの 14 本を放射光ビームラインに利用する。短直線部については電子ビームモニタ用の 2 本を除く 14 本が放射光ビームラインとなる。計 28 本のビームラインを提供できる。3 GeV 蓄積リングの主要設計パラメータを Table 2 に示す。

蓄積リングへの電子ビーム入射は、シンクロトロン加速器を用いず、全長 110 m の線型加速器による 3 GeV 加速で行う (Fig. 3 参照)。熱電子銃を採用し、SACLA と同じ C バンド加速器で入射器として十分な低エミッタンスビームを生成する。蓄積リングの外側に配置し、将来の軟 X 線 FEL への拡張性も有する。

### 3. 加速器要素開発

2 章の加速器システムを実現するため、各種要素開発を行っている。加速器は、磁石、真空、高周波等のシステムから構成され、その要素開発においては、要求される仕様を瞬時的に満たすのではなく、安定性 (仕様がフラつかない)、信頼性 (故障が極めて少ない) を確保するよう設計

Table 2 Main parameters of 3 GeV-ring.

Parameter	Value
Beam energy [GeV]	2.998
Circumference [m]	348.8432
Number of cells	16
Long straight section (LSS) [m]	5.44 × 16
Short straight section (SSS) [m]	1.6427 × 16
Betatron tune (x/y)	28.17/9.23
Natural chromaticity (x/y)	-60.50/-40.99
Natural horizontal emittance [nm.rad]	1.14
Momentum compaction factor	0.000433
Natural energy spread [%]	0.0843
Lattice functions at LSS ( $\beta_x/\beta_y/\eta_x$ ) [m]	13.0/3.0/0.0
Lattice functions at SSS ( $\beta_x/\beta_y/\eta_x$ ) [m]	4.08/2.962/0.052
Damping partition number ( $J_x/J_s$ )	1.389/1.611
Damping time ( $\tau_x/\tau_y/\tau_s$ ) [ms]	8.091/11.238/6.976
Radiation loss in bends [MeV/turn]	0.621
RF frequency [MHz]	508.75905
Harmonic number	592

の段階から留意し、これを実現していくことが肝要となる。そこで、SPring-8/SACLA 等で養ってきた経験・知見を大いに参考にしつつ、次世代放射光に求められる高い要求仕様を実現するための開発を行ってきた。3 章ではその概要を紹介する。

#### 3.1 磁石システム

各セルにおける磁石配置は、セル中心に対しミラー対称に設計されている (Fig. 4 参照)。3 GeV 蓄積リング用テストハーフセルは、2 台の機能複合型偏向磁石、5 台の四極磁石、5 台の六極磁石で構成されている。これまで、ハーフセルに相当する磁石全数を試作することで、各種磁石が個別に設計性能を満足することを確認するのに加え、これらをハーフセル上に組み立てることで、磁石間の空間干渉、設置手順、磁石列の精密アライメント方法確立等を行ってきた (Fig. 6 参照)。精密アライメント方法の確立に

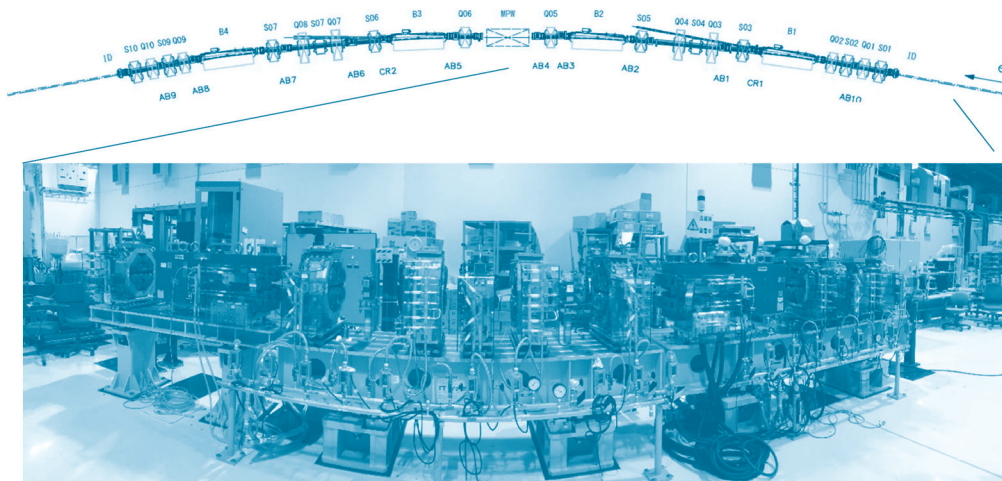


Fig. 6 A test half-lattice of 3 GeV-ring.

においては、放射光加速器施設のタイトな建設スケジュールの中で、設定時間内に磁石列を精密にアライメントできるかどうかの確認作業も行った。

機能複合型偏向磁石は有効長1.13 mで、水平方向に電子ビームを発散させる四極成分を持つ。この磁石を用いることで、水平エミッタンスを低減し、発散四極磁石数を減らすことが出来る。双極磁場と四極磁場勾配の設計値は、それぞれ0.8688 Tと $-7.06$  T/mである。ビーム軌道中心でのギャップ長は28 mmである。

四極・六極磁石は有効長0.2 mで、積層鋼板で製作する。ボア径はそれぞれ34 mmと40 mmであり、最大の磁場勾配は50 T/mと $1540$  T/m<sup>2</sup>である。磁場の均一度が $10^{-3}$ 以下となる有効磁場領域は $\pm 8$  mmである。

次世代光源では、四極・六極磁石を高精度（ $10$   $\mu$ m オーダー）でアライメントした上でリング状に配置することが、ビームを安定に周回する上で必須であり、重要な要素技術である。そこで、SPring-8-II用に開発されたVibrating Wire法（数 $\mu$ mの精度でアライメントできる、振動ワイヤ法）を用いて、四極・六極磁石の磁場中心をアライメントした<sup>7)</sup>。各磁石の磁場中心と機械中心の差は $\pm 50$   $\mu$ m以内であることがわかった。

### 3.2 真空システム

MBA ラティス低エミッタンス蓄積リングは、偏向磁石内の分散関数、水平ベータ関数を小さくするため、高磁場勾配を持つ多極磁石を必要とする。小ボア径の磁石に狭口径の真空チェンバを設置し、磁石や放射光アブソーバを高いパッキングファクターで配置する必要がある。これが第3世代放射光源と大きく異なる点である。そこで、次世代のSPring-8-II計画のために進められていた真空チェンバデザインとR&Dを本3 GeV蓄積リングでは採用する<sup>8)</sup>。狭小口径に対応するため、銅メッキを施した薄肉のステンレス製真空チェンバを採用する。分散配置された放射光ア

ブソーバ近傍にNEGポンプとイオンポンプを配置し、アブソーバから生成する脱ガスを排気する。本真空システムデザインにより、目標真空寿命10時間以上を達成する目処は得られた。モーメントムアクセプタンスで決まる寿命10時間と合わせて、電子ビーム寿命5時間以上を目指す。

### 3.3 高周波加速システム

偏向磁石・挿入光源での放射光発生により生じる周回電子ビームのエネルギー損失（放射損失）を補充するため、蓄積リングには高周波加速システムを設ける。この際、電子が1周あたりロスするエネルギー（本3 GeV蓄積リングの場合、約1.26 MeV）を補充するだけでなく、モーメントムアクセプタンスで決まる電子ビーム寿命を10時間以上に保つため、3.6 MVの加速電圧を持つ高周波加速システムを構築する。放射線防護上の許容範囲に電子ビームロスを抑え、且つ、万一入射器が一時的にマシントラブルに陥っても、ある程度安定したビーム蓄積を確保するためである。また、放射光ビームライン数確保のため、高周波加速システムの設置スペースは5.4 mの長直線部1本に限定する。以上の開発指針のもと、SPring-8-II用に提案された新型コンパクトTM020空洞を採用し、開発を進めている<sup>9,10)</sup>（Fig. 7, Table 3参照）。この新型空洞は、蓄積ビームの不安定性原因となる空洞で発生する高次高調波（HOM: Higher Order Mode）加速成分を、新しい加速器技術を用いて抑制する。従来はHOM電磁波吸収体（フェライトなど）を加速空洞外部のビームパイプに設置していたのに対し、内部設置とすることで、ビーム進行方向長の短い加速空洞を実現した。1本の長直線部に設置した4台のTM020空洞で3.6 MVの加速電圧を供給する（Fig. 7参照）。

本空洞へ高出力高周波を供給する高周波源は、SPring-8で使用されているクライストロンベースのシステムを採用し、これを構築する。

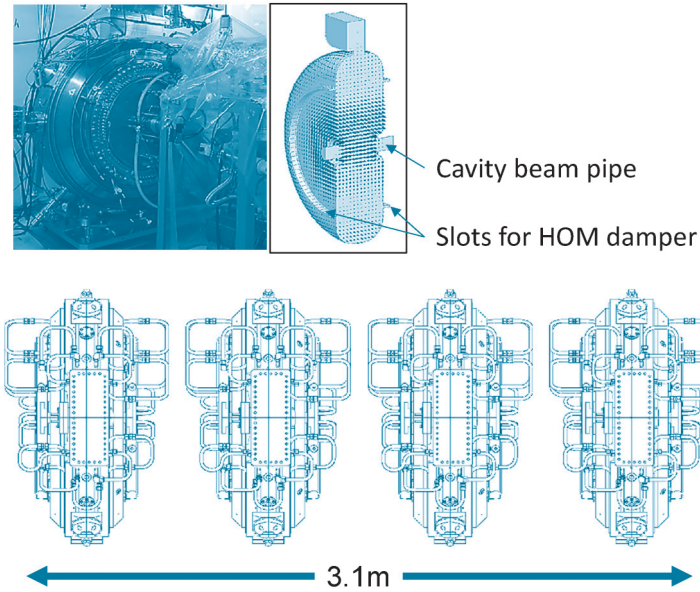


Fig. 7 TM020 HOM damped cavity. HOM dampers are installed on slots on the cavity inner wall along the magnetic node of TM020 mode.

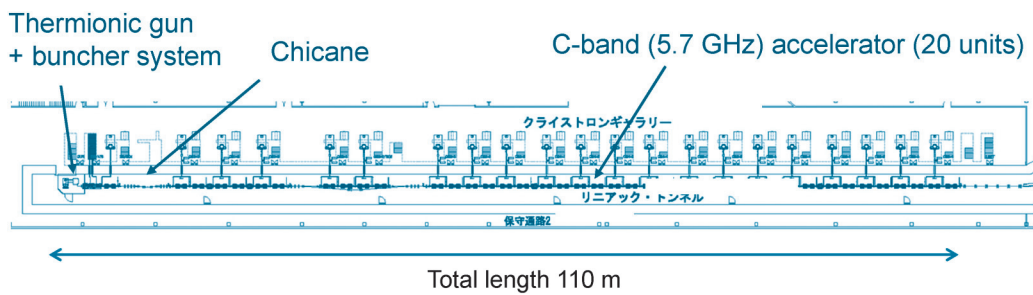


Fig. 8 Linear accelerator.

Table 3 TM020 cavity parameters.

Cavity parameters	Value
RF frequency [MHz]	508.76
Mode	TM020
Shunt impedance [MΩ]	6.8
Acc. voltage [kV]	900
RF power per cavity [kW]	120

### 3.4 線型加速器

線型加速器はコンパクト、低コスト、堅牢性を意識し、軟X線FEL駆動可能なデザインとした<sup>11)</sup>。SACLA/SPring-8で開発されたCバンド加速技術を用いて3 GeV加速を実現する<sup>12-14)</sup>。Fig. 8に線型加速器の全体図を示す。主加速部は、40 MV/m以上の加速勾配を持つCバンド加速管2本/ユニット×20ユニットの計40本で構成される。Cバンド加速管本体と、各加速管に約40 MWの高周波を供給するために用いるSLEDと呼ばれる高周波パルス圧縮器については、コストの効率化や堅牢性の観点から

SACLA デザインに改造を加えた。また、クライストロン故障時の交換作業を考慮し、導波管真空窓の新設を検討している<sup>14)</sup>。これら改造品の高出力テストを2019年度中に終える予定である。low-level RF制御系については、MicroTCA.4技術を用いたコンパクトなシステムでRFの位相と振幅を精密にコントロールする<sup>15)</sup>。

電子源としては、グリッド付熱カソードを用いた50 kV電子銃の直後に238 MHzの加速空洞を配置した500 kV電子源システムを開発中である (Fig. 9参照)<sup>16-18)</sup>。SACLAのCeB<sub>6</sub>熱カソード500 kVパルス電子銃<sup>19)</sup>よりも、コンパクトで堅牢性に優れ、保守性、安定性を優先し設計されている。本電子源の下流には476 MHzのバンチャー空洞、2 mのSバンド加速管を設置し、0.3 nCでバンチ幅5 ps FWHMの電子バンチをCバンド加速システムに供給する。本電子源の性能確認のため、テストスタンドを構築し、0.3 nC、電子ビームエネルギー500 keV以上、規格化エミッタンス10 μm.rad以下という3 GeV加速器の入射器として必要な目標性能 (Table 4参照) を達成した<sup>16)</sup>。

3 GeV線型加速器システムの入射部は計算コード PAR-

MELA を用いて SACLA と同様の手法で設計した<sup>1)</sup>。入射部以降の C バンド加速部分は SAD を用いて計算した。将来の軟 X 線 FEL では、低エミッタンスビームを生成するため、電子源システムについては再設計が必要となる。

### 3.5 蓄積リングへの入射システム

線型加速器から蓄積リングへの入射部設計は、狭いダイナミックアパーチャを持つ次世代放射光源にとって重要課題の一つである。SPring-8-II を目的として、Fig. 10 に示す真空封止パルスセプトムやキッカー磁石から構成される入射システムの開発が行われており、3 GeV 蓄積リングでもこれを採用する<sup>2)</sup>。

開発における重要な視点の 1 つは、蓄積リングにビー

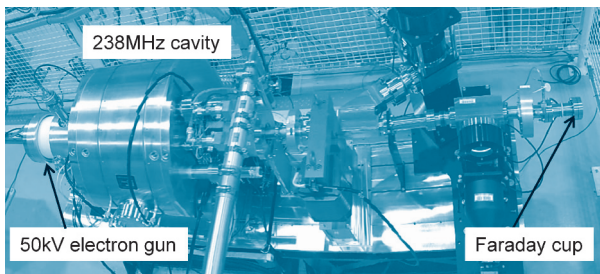


Fig. 9 Electron gun system consisting of a 50 kV electron gun and a 238 MHz accelerating cavity. The electron beam current is measured by a Faraday cup.

Table 4 3 GeV Linac parameters.

Linac parameters	Value
Beam energy [GeV]	3
Normalized emittance [ $\mu\text{m}\cdot\text{rad}$ ]	< 10
Emittance at 3 GeV [nm $\cdot\text{rad}$ ]	< 1.7
Bunch charge [nC]	0.3
Bunch length FWHM [ps]	5
Energy spread FWHM [%]	0.16
Repetition rate (Nomal) [Hz]	1
(RF conditioning/FEL) [Hz]	25

ムが入射されるタイミングで蓄積ビームが揺れ、ユーザーに届く光に顕著な影響が出ることがない入射システムの実現である。入射時のビーム振動をビームサイズの 1/10 程度の 10  $\mu\text{m}$  以下に抑制することを目標に、単一電源並列駆動ツインキッカーシステムを開発している<sup>2)</sup>。現在、電源の設計・製作を終え、電源の性能評価およびキッカーの詳細設計を進めている。

## 4. まとめ

3 GeV 次世代放射光施設の加速器システムは SPring-8/SACLA の知見・技術と SPring-8-II 計画の R&D の成果を利用し、設計開発が進められている。いくつかの加速器コンポーネントについては、2019 年度中の終了を目指して開発が継続中である。

### 謝辞

本原稿をまとめるにあたり、3 GeV 次世代放射光施設整備開発に携わる量子科学技術研究開発機構、高輝度光科学研究センター、理化学研究所の関係者の皆様に感謝申し上げます。特に、高輝度光科学研究センター早乙女光一氏に詳細なご助言を頂きました。

### 参考文献

- 1) 内海渉：“次世代放射光施設計画の推進状況”，第33回日本放射光学会年会・放射光科学合同シンポジウム，ウイックあいち，2020年1月11日。
- 2) N. Nishimori, T. Watanabe and H. Tanaka: “A Highly Brilliant compact 3 GeV Light Source Project in Japan”, in Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019, (JACoW, Geneva, Switzerland, 2019), p. 1478.
- 3) 西森信行，他：“3 GeV 次世代放射光施設の加速器システム”，in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ (日本加速器学会年会)，Kyoto, 2019, p. 153.
- 4) 田中均，早乙女光一：私信。
- 5) M. Sands: “The Physics of Electron Storage Rings”, SLAC-PUB-121 (1979).
- 6) H. Wiedemann: Particle Accelerator Physics I, (Springer, Berlin, 1993).
- 7) K. Fukami, N. Azumi, S. Inoue, T. Kai, H. Kimura, J.

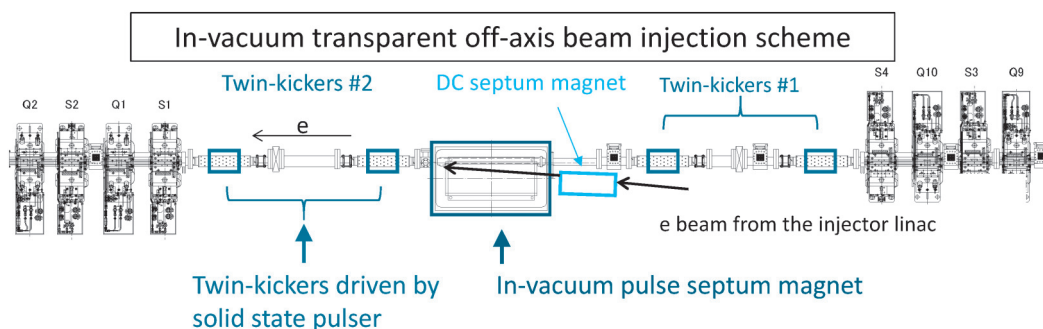


Fig. 10 In-vacuum transparent off-axis beam injection scheme.

- Kiuchi, S. Matsui, S. Takano, T. Watanabe and C. Zhang: Rev. Sci. Instrum. **90**, 054703 (2019).
- 8) M. Oishi, S. Takahashi, M. Shoji, K. Tamura, Y. Taniuchi, T. Bizen and H. Ohkuma: “Design and R&D for the SPring-8 Upgrade Storage Ring Vacuum System”, in Proceedings of IPAC2016, Busan, Korea, 2016, (JACoW, Geneva, Switzerland, 2016), p. 3651.
  - 9) 恵郷博文, 渡辺順子, 木村諭, 佐藤潔和: “SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞の開発”, in Proceedings of the 11<sup>th</sup> PASJ, Aomori, 2014, p. 237.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOL/MOOL14.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2014/proceedings/PDF/MOOL/MOOL14.pdf)
  - 10) 恵郷博文, 稲垣隆宏, 大島隆, 重岡伸之, 菅野東明, 原博史, 三浦禎雄, “SPring-8-II 高次モード減衰型高周波加速空洞プロトタイプの大電力試験”, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ, Kyoto, 2019, p. 17.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEOH/WEOH03.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEOH/WEOH03.pdf)
  - 11) 安積隆夫, 稲垣隆宏, 西森信行, 原徹, 前坂比呂和, 田中均: “次世代放射光施設のための3 GeV 線型加速器の基本設計”, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ, Kyoto, 2019, p. 771.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI019.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI019.pdf)
  - 12) T. Sakurai, H. Ego, T. Inagaki, T. Asaka, D. Suzuki, S. Miura and Y. Otake: Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 042003 (2017).
  - 13) T. Asaka, H. Ego, H. Hanaki, T. Hara, T. Hasegawa, T. Hasegawa, T. Inagaki, T. Kobayashi, C. Kondo, H. Maesaka, S. Matsubara, S. Matsui, T. Ohshima, Y. Otake, T. Sakurai, S. Suzuki, Y. Tajiri, S. Tanaka, K. Togawa and H. Tanaka: Phys. Rev. Accel. Beams **20**, 080702 (2017).
  - 14) 稲垣隆宏, 安積隆夫, 岩井英人, 大島隆, 近藤力, 前坂比呂和, 西森信行, 田中均: “次世代放射光リングの入射器として使用するCバンド加速器の機器設計と開発状況”, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ, Kyoto, 2019, p. 766.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI018.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THPI/THPI018.pdf)
  - 15) 岩井英人, 細田直康, 福井達, 石井美保, 前坂比呂和, 出羽英紀, 大島隆, 稲垣隆宏: “次世代放射光施設入射器におけるMTCA.4規格を用いたデジタルLLRFシステムの評価”, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ, Kyoto, 2019, p. 130.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THOI/THOI03.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/THOI/THOI03.pdf)
  - 16) 安積隆夫, 稲垣隆宏, 谷内努, 西森信行, 馬込保, 田中均: “グリッド付き熱カソードを用いた低エミッタンス電子銃システムの開発”, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ, Kyoto, 2019, p. 12.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEOH/WEOH02.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEOH/WEOH02.pdf)
  - 17) 比嘉究作, 重岡伸之, 安積隆夫, 稲垣隆宏, 谷内努, 西森信行, 田中均: “次世代放射光リング入射器加速空洞の製造”, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ, Kyoto, 2019, p. 422.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPI/WEPI005.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPI/WEPI005.pdf)
  - 18) 福岡翔太, 熊澤伸彦, 奥山恒幸, 相澤修一, 佐藤和行, 安積隆夫, 稲垣隆宏, 大竹雄次: “238 MHz 42 kW パルス半導体高周波増幅器の開発”, in Proceedings of the 16<sup>th</sup> PASJ, Kyoto, 2019, p. 283.  
[https://www.pasj.jp/web\\_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPH/WEPH008.pdf](https://www.pasj.jp/web_publish/pasj2019/proceedings/PDF/WEPH/WEPH008.pdf)
  - 19) K. Togawa, T. Shintake, T. Inagaki, K. Onoe, T. Tanaka, H. Baba and H. Matsumoto: Phys. Rev. ST Accel. Beams **10**, 020703 (2007).
  - 20) S. Takano, K. Fukami, C. Kondo, M. Masaki, M. Oishi, M. Shoji, K. Tamura, T. Taniuchi, K. Yanagida, T. Watanabe, T. Hara, T. Inagaki, H. Tanaka, K. Hamato, J. Kataoka, K. Kusano, K. Ogata, Y. Saito, H. Akikawa and K. Sato: “Renovation of off-axis beam injection scheme for next-generation photon sources”, in Proceedings of IPAC2019, Melbourne, Australia, 2019, (JACoW, Geneva, Switzerland, 2019), p. 2318.
  - 21) T. Inagaki, H. Tanaka, C. Kondo, K. Fukami, S. Takano, K. Sato and H. Arikawa: “Development of a solid-state pulse generator driving kicker magnets for a novel injection system of a low emittance storage ring”, in Proceedings of IPAC2018, Vancouver, BC, Canada, 2018, (JACoW, Geneva, Switzerland, 2018), p. 1804.





**西森信行**

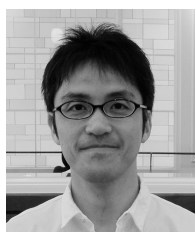
国立研究開発法人 量子科学技術研究開発機構 次世代放射光施設整備開発センター 加速器グループ 研究統括

E-mail: nishimori.nobuyuki@qst.go.jp

専門：加速器，ビーム物理

**【略歴】**

1996年3月九州大学大学院理学研究科博士課程卒業。1996年4月日本原子力研究所 自由電子レーザー研究室研究員，2006年7月日本原子力研究開発機構 ERL 光源開発研究グループ研究副主幹，2014年7月同 ガンマ線核種分析研究グループ研究主幹，2016年5月 東北大学多元物質科学研究所 准教授，2018年4月量子科学技術研究開発機構 高輝度放射光源推進準備室上席研究員を経て，2018年12月より現職。博士（理学）。



**渡部貴宏**

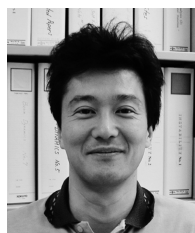
公益財団法人 高輝度光科学研究センター 光源基盤部門 副部門長，同部門加速器機器グループ グループリーダー，QST 上席研究員（QST-JASRI クロスアポイントメント），理化学研究所放射光科学総合研究センター 客員研究員

E-mail: twatanabe@spring8.or.jp

専門：加速器（近年は特に次世代放射光源開発）

**【略歴】**

1996年東京大学大学院工学系研究科中退。1996年東京大学大学院工学系研究科助手，2003年ブルックヘブン国立研究所物理部門 Research Associate，2005年同研究所 NSLS 部門 Assistant Scientist，2008年高輝度光科学研究センター加速器部門研究員を経て，2014年よりグループリーダー，2018年より副部門長。博士（工学）。



**田中 均**

国立研究開発法人 理化学研究所放射光科学総合研究センター 副センター長，センター長 室長，XFEL 研究開発部門 部門長，先端光源開発部門 回折限界光源設計検討グループ グループディレクター，QST 量子ビーム科学研究部門次世代放射光施設整備開発センター加速器グループ グループリーダー

E-mail: tanaka@spring8.or.jp

専門：加速器におけるビーム物理

**【略歴】**

1982年3月東京工業大学総合理工学研究科化学環境工学専攻修了，1982年4月日揮株式会社原子力事業本部に入社。1989年9月特殊法人理化学研究所サイクロトロン研究室へ入所し，1999年5月財団法人高輝度光科学研究センター加速器部門副主席研究員，2005年4月同部門主席研究員，2006年4月理化学研究所 X線自由電子レーザー計画推進本部。2010年4月財団法人高輝度光科学研究センター XFEL 研究推進室室長を経て，2011年4月から理化学研究所播磨研究所放射光科学総合研究センター XFEL 研究開発部門部門長，2013年5月から先端光源開発部門回折限界光源設計検討グループディレクター，2017年4月から放射光科学研究センター副センター長，2018年4月からセンター長室室長，2018年12月から QST 量子ビーム科学研究部門次世代放射光施設整備開発センター加速器グループリーダーを兼務。博士（工学）。

## Accelerator system for a highly brilliant compact 3 GeV light source project

**Nobuyuki NISHIMORI** QST, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan  
**Takahiro WATANABE** JASRI, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198, Japan  
**Hitoshi TANAKA** RIKEN SPring-8 Center, 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5148, Japan

**Abstract** A compact 3 GeV light source project capable of delivering the highly brilliant soft and tender X-rays is proposed in Japan. The low-emittance storage ring based on a 4-bend achromat lattice is composed of 16 lattices for a small circumference of about 350 m. The total number of 28 beam-lines is available. The natural horizontal emittance is expected to be around 1.1 nm.rad, and the maximum brilliance will exceed  $10^{21}$  photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1% b.w. for the 1-3 keV region with a stored beam current of 400 mA. The accelerator components are designed by utilizing the advanced studies for the SPring-8 upgrade project as well as by taking account of high stability and reliability of the system. A full energy injector linac consisting of C-band accelerating structures developed for SACLA is employed for the injection of low emittance beam to the ring. A future upgrade for the injector linac as an SXFEL driver is also envisioned. In this paper, the accelerator system for the 3 GeV light source project is described.