

# SIMULATION STUDY OF SHORT BUNCH GENERATION USING mm-WAVE INVERSE FEL AT THE SPring-8 STORAGE RING

Mitsuhiro Masaki<sup>#</sup>, Takahiro Watanabe, Kenji Fukami, Chikaori Mitsuda  
 Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/SPring-8)  
 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

## Abstract

Electron bunches in storage rings could be constantly-compressed less than 1 ps (r.m.s.) by a millimeter wave inverse free electron laser (mm-iFEL) system which is composed of a helical wiggler with long period length and a mm-wave corrugated waveguide resonator. Simulation studies show that the mm-iFEL leads to the equilibrium bunch length of 0.6 ps (r.m.s.), when a bunch charge is 479 pC corresponding to bunch current of 0.1 mA.

## mm-wave iFEL を用いた SPring-8 蓄積リングでの短バンチ生成の検討

### 1. はじめに

SPring-8 では、2019 年を目処に蓄積リングなどを一新する次期計画を検討中である。この計画の主たる目的は、10keV 程度の硬 X 線に対して、回折限界以下の電子ビームエミッタンスを実現することにより輝度性能を現在の 100 倍程度に向上させることである。これに加えて、併設されている XFEL/SACLA との相乗効果が期待される X 線ポンプ - X 線プローブ実験なども視野に入れ、蓄積リングにおいてサブピコ秒の短パルス X 線を生成するオプションも検討している。その候補の一つが millimeter wave inverse FEL (mm-iFEL)<sup>[1]</sup> を用いたバンチ圧縮であり、1ps 以下の短パルス X 線の生成を目指している。これは、到達したいバンチ長 (1ps 以下) の約 10 倍となる 3mm 程度の波長を持つミリ波を用い、その FEL 相互作用により形成されるポンドロモータポテンシャルの谷の 1 カ所にバンチ内の全電子を閉じ込め、結果として平衡バンチ長を 1ps 以下にする方法である。この mm-iFEL によるバンチ圧縮効果をシミュレーションによって確認した。本論文では、その結果を中心に報告する。また、このバンチ圧縮法によるエミッタンスの増大、ビーム寿命、到達ピーク輝度などについても述べる。

### 2. mm-iFEL の主要機器

mm-iFEL を構成する主要機器は、ミリ波を基本波として放射するヘリカルウィグラーと放射されたミリ波を溜め込むための低損失共振器である。SPring-8 のような高エネルギー蓄積リングを周回する GeV 級の電子ビームからミリ波帯の基本波を放射させるためには、K 値が数百程度のヘリカルウィグラーが必要で、その周期長は数メートルのオーダーとなる。したがって、周期数が 4 程度でもウィグラーの全長は 20m 近くに達する。表 1 に、現時点で想定しているヘリカルウィグラーのパラメーターを示す。

表 1 : 長周期ヘリカルウィグラー

ピーク磁場 (T)	1
周期長 (m)	3.84
K 値	360.7
周期数	4
自由空間での共鳴波長 (mm)	1.81

次に、この長周期ヘリカルウィグラーから放射されたミリ波を溜め込む共振器について述べる。可視光や赤外光領域であれば、共振器として側面が開放されたファブリー・ペロー型を用い、通常使われるガウシアン TEM<sub>00</sub> モードを共振モードとすることができる。しかしながら、ミリ波帯では、ガウシアンモードのウェストサイズが数 cm 程度となり、ウィグラー中心から数メートル離れた端部での断面サイズが必然的に数十 cm もの大きさになってしまう。このことが、伝送損失の少ないミリ波共振器を実現する上で大きな障害になる可能性が高い。最大の難点は、ミリ波のクリッピング損失を低減するために、ウィグラーの磁極間ギャップを数十 cm 程度に広げなければならない、その結果として、電子ビーム軌道上で必要な磁場強度が得られない恐れがあるという点である。この難点を解消するために、導波管モードを用いた共振器を検討している。プラズマの高周波加熱などの用途で開発されたコルゲート導波管<sup>[2]</sup>が、伝送損失の少ないミリ波導波管として有用かもしれない。これは、内壁面が櫛の歯状に微細加工されている特殊な導波管で、基本モードは HE<sub>11</sub> モードと呼ばれる。このモードの特長は、壁面に高周波電流がほとんど流れないため、伝送損失が極めて少ないことである。また、HE<sub>11</sub> モードの管内電界強度分布はガウシアンモードのそれに近い。

表 1 の長周期ヘリカルウィグラーから放射されるミリ波の共鳴波長は、自由空間では  $\lambda_0=1.81\text{mm}$  であるが、導波管内部での管内波長  $\lambda_g$  は、それよりも長くなり、次式で表される。

<sup>#</sup> masaki@spring8.or.jp

$$\lambda_g = \frac{2\gamma_z^2 \left\{ 1 - \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma_z^2} \left[ 1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_w p}{b} \right)^2 \right]} \right\}}{1 + \frac{1}{2} \left( \frac{\lambda_w p}{b} \right)^2} \lambda_0 \quad (1)$$

ここで、 $\gamma_z = 1/\sqrt{1-\beta_z^2}$ 、 $\beta_z = \beta\sqrt{1-K^2/2\gamma^2}$ 、 $\beta$  は光速  $c$  に対する電子の相対速度、 $\gamma$  は電子の静止質量に対するエネルギー、 $K$  および  $\lambda_w$  はヘリカルウグラーの  $K$  値と周期長、 $b$  は方形コルゲート導波管の開口サイズ、 $\lambda_0$  は自由空間内のウィグラー放射の共鳴波長である。パラメーター  $p$  は、伝送モードの横方向波数で、HE<sub>11</sub> モードの場合、ほぼ 1 に近い値をとる。コルゲート管内壁の楡歯構造の深さが  $\lambda_0/4$  のとき、 $p$  は厳密に 1 となり、ミリ波の減衰も理論上最小となる。現在想定しているコルゲート導波管のパラメーターと特性について、表 2 にまとめた。この導波管の両端に銅ミラーを配置すれば、低損失のミリ波共振器を形成することができる。

表 2 : コルゲート導波管のパラメーターと特性

伝播モード	HE <sub>11</sub>
周波数 (GHz)	165.5
管内波長 (mm)	3.06
断面開口サイズ (mm)	85×85
コルゲーション	
ピッチ (mm)	0.8
幅 (mm)	0.6
深さ (mm)	0.4
ミリ波パワー損失 (dB/m)	$1.6 \times 10^{-5}$
材質	銅

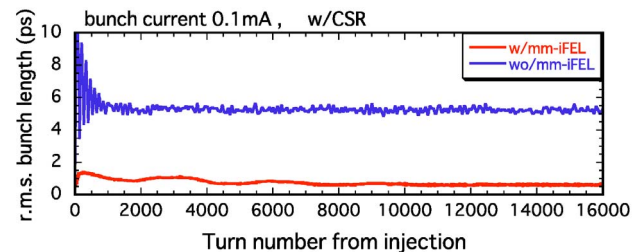
### 3. シミュレーション結果

#### 3.1 バンチ圧縮に必要なミリ波のパワー

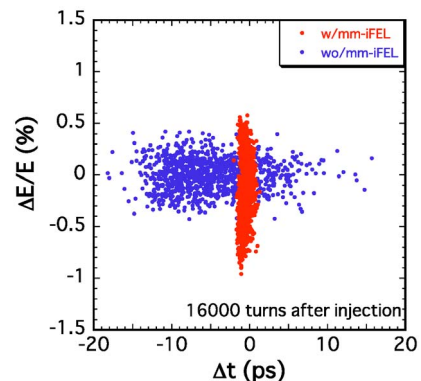
平衡バンチ長を 1ps 以下まで圧縮するためには、mm-iFEL により形成されるポンドロモティブポテンシャルの強さは、コヒーレントシンクロトロン放射(CSR)によるウェイクポテンシャルを遥かに凌ぐものなければならない。そのために必要なミリ波のピークパワーをトラッキング計算により評価した。蓄積リングとして仮定したのは、回折限界光源を目指して次期計画用に検討している電子ビームエネルギーが 6GeV の 6-bend アクロマートラティス<sup>[3]</sup>である。また、バンチ電荷は、0.1mA のバンチ電流に相当する 479pC とした。

表 1 の長周期ヘリカルウィグラーから放射されたミリ波は、表 2 に示したコルゲート導波管内を管内波長 3.06mm の HE<sub>11</sub> モードに変換されて伝播することになる。このときの変換効率は、積分パワーの比

で、自由空間放射の約 10% であるとした<sup>[4]</sup>。この共振器内に、1.8GW のピークパワーを持つ HE<sub>11</sub> モードのミリ波が予め存在している状態からトラッキング計算をスタートさせた。結果を図 1 に示す。(a)は、リング入射直後からターン毎に r.m.s. バンチ長をプロットしたものである。mm-iFEL システムによって、入射から数千ターン後でもバンチ長が 1ps 以下の圧縮状態で維持されていることが分かる。(b)は、入射から 16000 ターン後の縦位相空間分布であり、バンチ長は 0.6ps (r.m.s.)に到達している。ただし、エネルギー広がりについては、0.15% (r.m.s.)から 0.3% (r.m.s.)に増大した。計算結果は、バンチ内の全電子を 1カ所の”ミリ波バケット”に捕獲するために必要なピークパワーが 2GW 程度であることを示している。ピークパワーが不足している場合、例えば 1.6GW では、隣接する”ミリ波バケット”に一部の電子がこぼれてしまう。これらのシミュレーションでは、電子ビームエミッタンスの効果を mm-iFEL 内の電子軌道計算にのみ反映させている。エミッタンスは、バンチ内電子間散乱(IFS)やヘリカルウィグラー自身の放射励起によって、最大で 540pm.rad 程度まで増加し得る。ただし、この量はミリ波のウィグラー放射エミッタンス  $\lambda_0/4\pi$  に比べて非常に小さいので、計算結果が本質的に変わることはない。また、入射ビームの時間特性は 1ps 以下の短バンチであることが不可欠である。次期計画では SPring-8 に併設されている XFEL/SACLA の C-band linac を入射器として使用することを検討しており、そこから入射される極短バンチビームは有用である。そのバンチ長を伸ばすことなくビームを蓄積リングまで輸送するための輸送ライン<sup>[5]</sup>の建設も進行中である。



(a) 入射時点からターン毎に計算したバンチ長



(b) 入射から 16000 ターン後の縦位相分布

図 1 : ピークパワー 1.8GW の mm-iFEL によるバンチ圧縮 (赤)。青は mm-iFEL が無い場合である。

### 3.2 ミリ波のパワーを蓄積するスキーム

共振器内にミリ波を供給・蓄積するスキームとして、数ピコ秒またはそれ以下のバンチ長を持つ種バンチを数十個用意して徐々にパワー蓄積していく方法が考えられる。CSR の効果を低減するために、種バンチのバンチ電流はなるべく小さい方が望ましい。バンチ長が 3ps の種バンチを 4.79ms (1000 ターン)毎に 1 個ずつ追加することにより、共振器内のミリ波パワーが成長していく様子を図 2 に示す。ゼロから出発して 0.1GW 程度のピークパワーに成長するまでは、CSR 効果に配慮して 0.05mA/bunch の種バンチを用い、その後は 0.1mA/bunch としている。この計算では、これらの種バンチを、次期計画で導入が検討されているバンチ長制御用のハーモニック RF 空洞によって生成することを想定している。また、共振器内のミリ波パワー損失率を 0.3%/round trip とした。これは、達成可能な理論上のコルゲート導波管の伝送損失、両端ミラーの反射率を考慮して算出した値である。

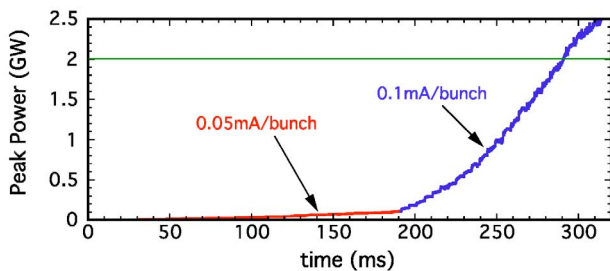


図 2 : 種バンチから放射されるミリ波を逐次重ね合わせることによって、共振器内のピークパワーが成長していく様子。種バンチは、4.79ms 毎に 1 個ずつ追加されている。

### 4. ピーク輝度、タウチェック寿命

一般に、バンチ長を圧縮して短くすると、ピーク輝度は向上する傾向にあるが、同時にエミッタンスやエネルギー広がりが増大も引き起こすので、それらとのトレードオフとなる。回折限界光源を目指す次期計画では、IBS 効果によるエミッタンスの増大を避けるために、ハーモニック RF 空洞を用いて 20~40ps 程度までバンチ長を伸ばすことを検討している。mm-iFEL 法による圧縮バンチから得られるピーク輝度は、エミッタンスの増大率が大きいにも関わらず、バンチ電流が 0.1mA のときに、 $\sim 5 \times 10^{25}$  (photons/sec/mm<sup>2</sup>/mrad<sup>2</sup>/0.1%b.w.) に達し得る。これは、40ps の伸長バンチ (エミッタンスは 35 pm.rad) の場合と比べて数倍大きな値であり、ピーク輝度に関して依然として優位性を保っている。

IBS 効果によるエミッタンス増大を考慮して計算したタウチェック寿命のバンチ長依存性を図 3 に示す。この結果は、バンチ長を 0.6ps まで圧縮すると、タウチェック寿命が 1 分程度まで短くなることを示している。しかしながら、mm-iFEL のヘリカルウィグラー自身の放射励起によって引き起こされるエ

ミッタンス増加が、IBS 効果によるもの (約 100pm.rad) の数倍に達するので、実際のタウチェック寿命は 7 分程度まで長くなると思われる。

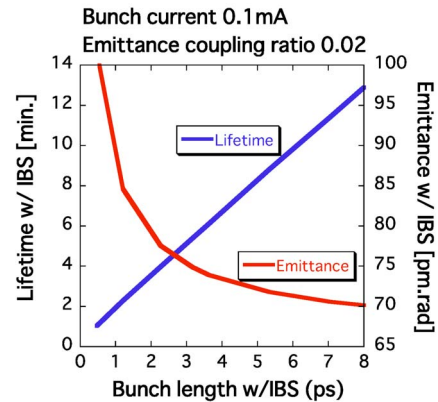


図 3 : IBS 効果を考慮したときの電子ビームエミッタンスとタウチェック寿命のバンチ長依存性。

### 5. おわりに

SPring-8 次期計画の短パルスオプション用に mm-iFEL 法を検討してきた。これは、サブピコ秒バンチを蓄積する方法の一つであり、シミュレーション上では、一定の圧縮効果を確認することができた。しかしながら、低損失ミリ波共振器などの主要機器の技術的な検討については未着手である。また、圧縮されたバンチ自身のエミッタンス増加は避けられないため、回折限界光を発生させる超低エミッタンスバンチと短バンチをバケットシェアする必要があるかもしれない。例えば、蓄積リングの長直線部に、本流ラインと平行に専用のバイパスラインを新たに設け mm-iFEL システムを設置する。そして、特定の選ばれたバンチのみを高速キッカーを用いて iFEL システム側に振り分け、短バンチ化する案などが考えられる。また、バンチ圧縮法に比べてピーク輝度特性や繰り返し特性は劣るが、利用側のニーズによっては、バンチスライシング法の可能性も未だ捨て切れない。現在 SPring-8 では、head-tail 振動を誘起することによって傾けられたバンチの中心部から、短パルス X 線を切り出す方法<sup>[6]</sup>が精力的に試験されている。いずれにせよ、方法論も含めて、今後も検討を継続していく必要があると考えている。

### 参考文献

- [1] V.N. Litvinenko, "Femtosecond e-beams in storage rings", Femtosecond Beam Science edited by M. Uesaka, Imperial College Press (2005), p.80-90.
- [2] 例えば、K. Ohkubo, et al., Fusion Eng. and Design **26** (1995), p.325-333
- [3] Y. Shimosaki, et al., "SPring-8-II の極低エミッタンスラティスにおけるダイナミックアパーチャー拡張", in these proceedings.
- [4] G. Geloni, et al., Nucl. Inst. and Meth. **A584** (2008), p.219-237.
- [5] K. Fukami, et al., Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010), p.1218-1220.
- [6] C. Mitsuda, et al., Proceedings of SRI 2009, AIP Conf. Proc. Vol.1234 (2010), p.197-200.