

# APPLICATION STUDY OF MULTITURN CIRCULATION ERL

Takeshi Nakamura<sup>1</sup>,

JASRI / SPring-8

1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

## Abstract

A multiturn circulation of a energy recovery linac beam (ERL) in a storage ring can reduce the current and the bunch rate of the ERL by the factor of the number of turns and eases the requirement on the ERL. In previous paper, we proposed the system for such multiturn circulation with RF deflection and here we discuss the application of this scheme to the SPring-8 storage ring. The possible configuration of a multi-pass ERL with a multiturn circulation system is proposed and the growth of the emittance and the energy spread by radiation excitation are estimated.

## リング多重周回Energy Recovery Linacの適用研究

### 1. はじめに

Energy Recovery Linac (ERL) の超低エミッタンスかつ短パルスのビームを放射光源などに応用する研究が各所で行われているが<sup>[1,2,3,4,5]</sup>、Cornell大学<sup>[2,3]</sup>やAPS<sup>[4,5]</sup>では、既存の蓄積リングにERLからのビームを周回させて放射光源とする計画が検討されている。この方法の長所としては、リングの大きな改造の必要がないのでリングの停止期間を比較的短くできること、および、従来の蓄積リング運転とERL運転との両立が可能であることが挙げられる。これらの計画では、ERLから入射されたビームは、リングを一周したあと取り出され、ERLへと戻されるため、ERLのビーム電流とリングの電流は等しい。これに対して、われわれは横方向偏向力をもつRF空洞を出入射に用いて周回毎にバンチの進行方向のスイッチングを行い、ERLのビームをリングに多重周回させたのちに取り出す方法を提案した<sup>[6]</sup>。この方法ではリングの電流およびバンチレートはERLのその周回数倍となっている。逆に、リングの電流を保ったままERLの電流およびバンチレートを低減できるので、ERLや電子銃の大電流化、および高いバンチレートに付随するビームのモニタや制御等の問題を軽減することが可能となる。ここでは、この手法をSPring-8蓄積リングに適用した場合について検討する。

### 2. リング多重周回装置

ERLのビームを蓄積リングに2周回させる装置を図1に示す。ERLからのバンチは、2つのDC磁石に挟まれたRF偏向空洞によりキックを受け、リングに入射される。リング1周後のタイミングでは、磁石と空洞によるキックが打ち消しあい、バンチは次の周回へと導かれる。2周した後は再度、磁石と空洞のキックの方向が一致し、バンチはERLにむけて引き出される。同時にERLからのバンチが入射される。RF偏向空洞の周波数 $f_D$ をERLからのバンチレ

ートに設定すれば、すべてのバンチについてこれを行うことができる。このとき、リングの周期 $T_0$ とRF偏向空洞の周期 $T_D = 1/f_D$ は $h$ を自然数として  $T_0 = (h \pm 1/2) T_D$  となっており、また、リングのバンチレートは  $2f_D$  となっている。さらにこの概念は、4周回させる装置へと発展させることができる(図2)。

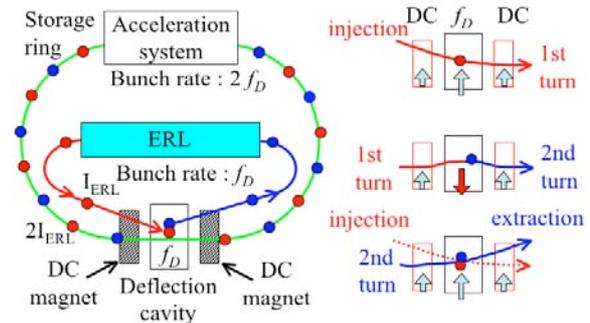


図1: 2周回装置。ERLからのバンチレート $f_D$ のビームは周波数 $f_D$ の空洞( $f_D$ )と静磁石(DC)により周回毎に方向をスイッチされ、リングを2周したのちERLへと戻る。リングの電流およびバンチレートは、ともにERLの2倍となる

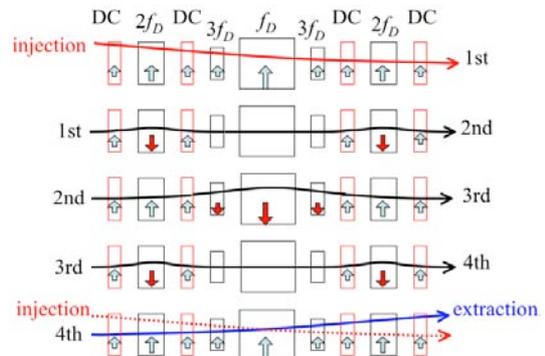


図2: 4周回装置。DC磁石(DC)および周波数 $f_D$ 、 $2f_D$ 、 $3f_D$ の空洞(それぞれ $f_D$ 、 $2f_D$ 、 $3f_D$ )からなる。 $3f_D$ は、1周回後と3周回後に $f_D$ が生成するcrab運動の補正に用いる。リングの周期は $T_0 = (h \pm 1/4) T_D$ である。リングの電流、バンチレートはERLの4倍である。

<sup>1</sup> E-mail: nakamura@spring8.or.jp

### 3. SPring-8蓄積リングでのERL

SPring-8の蓄積リングに多重周回させた場合について検討する。リングおよびERLのパラメータを表1に示す。ERLのパラメータは各所での計画の典型的な値としている。ERLの運転モードとして、fluxを大きくとるfluxモードと、低エミッタンスビームを用いるcoherenceモードを考える<sup>[3,4]</sup>。リング内のRF加速システムは、ビームが周回する際に失うエネルギーの補給および通常の蓄積リング運転に用いる。またビーム品質をより生かすための超長直線部の設置を今後、検討する必要がある。

表1：SPring-8蓄積リングでのERLのパラメータ。リングのラティスは直線部でのディスパージョンがないアクロマートとする。表中、 $N_{turn}$ はリングでの多重周回数を示す。

Storage ring			
Energy	$E_0$	8	GeV
Revolution period	$T_0$	4.8	$\mu$ s
Momentum compaction factor	$\alpha$	$1.4 \times 10^{-4}$	
Radiation Damping Time (transverse/longitudinal)	$\tau_\beta/\tau_E$	8.3/4.2	ms
Radiation loss at arc /turn	$U_0$	9.2	MeV
Radiation loss at IDs /turn	$U_{ID}$	1.0	MeV
Natural emittance (rms)	$\epsilon_{Ring}$	6	nm rad
Natural energy spread (rms)	$\sigma_{\delta, Ring}$	0.11	%
Average current	$I_{Ring}$	100	mA
Bunch rate		1.3	GHz
Storage ring RF acceleration system			
Acceleration voltage	$V_{Ring}$	16	MV
Acceleration Frequency	$f_{RF}$	1.3	GHz
ERL beam			
Bunch length (rms)	$\sigma_\tau$	2	ps
Energy spread (rms)	$\sigma_{\delta, ERL}$	0.02	%
Normalized emittance (flux mode/coherence mode)		0.3 / 0.1	$\mu$ m rad
Average current	$I_{Ring} / N_{turn}$		
Bunch rate	$f_D$	$1.3 \text{GHz} / N_{turn}$	
ERL			
Effective gradient	10 MV/m		
Frequency	1.3 GHz		

多重周回装置によりERLのビーム電流を低減できるので、ビーム電流の増大がもたらす beam break up不安定性等の困難が克服できると仮定し、2回通過型ERL (2-pass ERL) を適用する。すなわち、ビームは加速および減速される際に、同じlinacを2回通過するとする。これにより、1回通過の通常のERLに比べコストを2/3程度に圧縮できることが期待される。2-pass ERLでは、linac中で、加速ビーム、減速ビームのそれぞれで2つのビームが共存するが、多重周回装置によりバンチレートが多重周回数分だけ

低くなっているため、これをそれぞれ独立のバケットに置くことができる。これによりそれぞれのバンチについて位置などのモニタおよび制御が可能となる。図3は蓄積リング内に設置する場合のERLの配置例である。Linacは、直径約500mのリング内周に2分割して設置する。図4は多重周回装置をカスケードして周回数を増やした場合を示す。

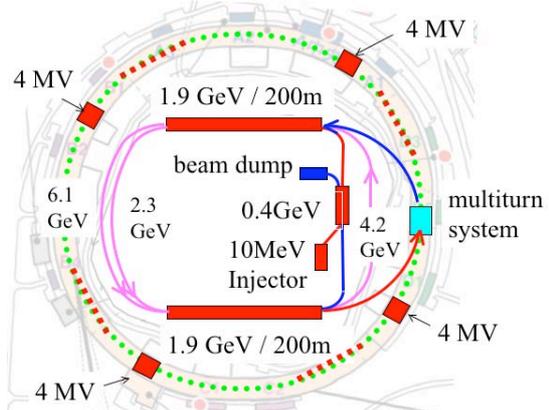


図3：2本の1.9GeV linacを用い、それぞれのlinacでビームを2回加速、減速させる2-pass ERLの配位としている。低エネルギー部には、0.4GeVのlinacを設置する。多重周回装置は multiturn system として示されている。

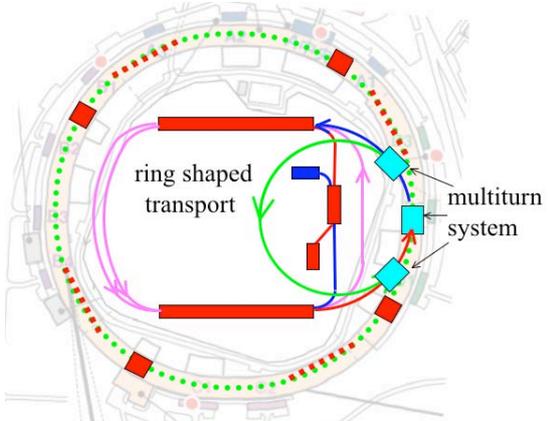


図4：リング形のビーム輸送系(ring shaped transport)を用いて多重周回装置をカスケード化し、周回数を増やした場合。多重周回装置はリングと、リング型ビーム輸送系の双方に設置される。ビームはリングを多重周回したのち、リング形のビーム輸送系へスイッチされ、ふたたびリングを多重周回し、最後にERLへとスイッチされる。これにより例えばリングに2周回装置、ビーム輸送系に4周回装置をもちいると、リングを8周回させることが可能となる。ビーム輸送系はエミッタンス増大の抑制のため低エミッタンス光学系とする。

多重周回装置をSPring-8蓄積リングにある30mの長直線部を利用して設置するとする。このとき多重周

回装置の両側に10mの自由空間がとれるとして、その端部での入出射のためのビーム分離を10mmとすると、必要な偏向角は、1mradとなる。このうち、静磁石が半分程度を受け持つので必要なRF偏向角は0.5mrad、RF偏向電圧では4MVとなる。この電圧はKEKのcrab空洞をはじめ現在、各所で検討されている偏向空洞の性能の範囲内と考えられる。

RF偏向では、偏向力の時間依存性によりビームに角度広がりが発生するが $f_D$ を0.65 GHzとすれば周波数の高い空洞をもちいる4周回装置でもビーム固有の広がり比べて十分に小さい量とすることができる<sup>[6]</sup>。また、4周回装置では加えて、 $3f_D$ と $f_D$ の空洞の間のジッタが問題となるが<sup>[6]</sup>、図4のようにビーム輸送系に装置を設置すると、そこでのバンチレートはリングより多重周回分だけ少ないので、 $f_D$ を低周波とすることができ、影響が低減される。

リング周回時には放射励起とCSRの効果による水平エミッタンスやエネルギー広がりが増大が生じるが、ここでは、バンチ電流が少なくCSRの効果は小さいと考えられるので<sup>[5]</sup>、放射励起について検討する。エミッタンス $\epsilon$ の変化は、放射励起の項を $Q_\epsilon$ とおくと、通常蓄積リングと同様に

$$\frac{d\epsilon}{dt} = -\frac{2}{\tau_\beta}\epsilon + Q_\epsilon$$

となるが<sup>[7]</sup>、この平衡解( $d\epsilon/dt = 0$ )がリングの自然エミッタンス $\epsilon_{Ring}$ であるので、 $Q_\epsilon = \frac{2}{\tau_\beta}\epsilon_{Ring}$ が得られる。

ERLビームでは $\frac{2}{\tau_\beta}\epsilon \ll Q_\epsilon$ となるので、 $n$ ターンした後のエミッタンスは、ERLのエミッタンスを $\epsilon_{ERL}$ として

$$\epsilon = \epsilon_{ERL} + n \frac{2T_0}{\tau_\beta} \epsilon_{Ring}$$

となる。さて、 $\epsilon_{Ring}$ 、 $1/\tau_\beta$ はそれぞれエネルギーの2乗、3乗に比例するので、エミッタンスの増大率は、エネルギーの5乗に比例する。すなわちエネルギーを下げれば増大率は急激に減少する。

エネルギー振動の振幅 $A$ の変化を表す式は、放射励起の項を $Q_E$ とおくと通常蓄積リングと同様に

$$\frac{d\langle A^2 \rangle}{dt} = -\frac{2}{\tau_E}\langle A^2 \rangle + Q_E$$

となるが<sup>[7]</sup>、リングでの平衡時( $d\langle A^2 \rangle/dt = 0$ )には、リングの自然エネルギー幅 $\sigma_{\delta, Ring}$ と $A$ の関係は $\langle A^2 \rangle = 2\sigma_{\delta, Ring}^2$ となるので $Q_E = \frac{4}{\tau_E}\sigma_{\delta, Ring}^2$ となる。さて、ERLビームの多重周回の場合、リング内RF加速による可能なシンクロトロン振動の最小周期に比べ

ても十分短いため、ビームのエネルギー広がり $\langle A^2 \rangle = \sigma_\delta^2$ となり、また、 $\frac{2}{\tau_E}\langle A^2 \rangle \ll Q_E$ であるので、

$$\frac{d\sigma_\delta^2}{dt} = \frac{4}{\tau_E}\sigma_{\delta, Ring}^2$$

となる。これからエネルギー広がり増大は、

$$\sigma_\delta^2 = \sigma_{\delta, ERL}^2 + n \frac{4T_0}{\tau_E}\sigma_{\delta, Ring}^2$$

となる。

リング周回時のエミッタンスおよびエネルギー広がり増大を図5に示す。カスケードする場合には円形ビーム輸送系でのターン数を加味する必要がある。8GeVであれば、エミッタンスの増大はかなり大きく多重周回の利点が生かせるのはFluxモードでの2ターン程度までと見なせるが、5GeVであれば、Coherenceモードでもかなりのターン程度でもエミッタンスやエネルギー広がり増大は大きくはない。

ERLのビームのエネルギー広がりによるバンチ長の増大は、周回数が大きいときには無視できない値となるが8GeVの場合でも、リング内のRF加速システムの位相調整により補正することが可能である。

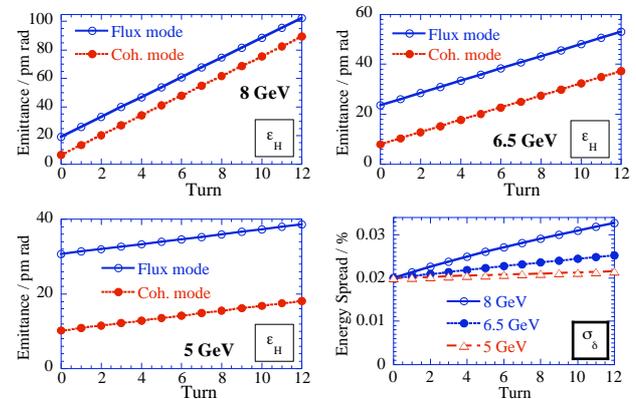


図5：周回数に対する水平方向エミッタンス(左上：8GeV、右上：6.5GeV、左下：5GeV)とエネルギー広がり増大(右下)。垂直軸のスケールは図毎に異なる。Flux modeおよびCoherence mode (Coh. mode)での値が示されている。これらの結果はtracking simulationの結果<sup>[8]</sup>をよく再現している。

## 参考文献

- [1] T. Kasuga *et al.*, in Proc. of PAC 2007, p. 1016 (2007).
- [2] C. Hoffstaetter *et al.*, in Ref. [1], p. 107 (2007).
- [3] G. Hoffstaetter, FLS 2006 Workshop, DESY (2007).
- [4] M. Borland *et al.*, in Ref. [1], p. 1121 (2007).
- [5] N. S. Sereno *et al.*, in Ref. [1], p. 1145 (2007).
- [6] T. Nakamura, Phys. Rev. ST-AB 11, 032803 (2008).
- [7] M. Sands, "The Physics of Electron Storage Rings An Introduction", SLAC-121 (1979).
- [8] Courtesy of Dr. J. Shimizu, Accelerator Division, JASRI/SPring-8.