

蓄積リングのビーム性能

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
熊谷 教孝

1. 概要

平成9年3月13日より開始された蓄積リングの電子ビームの調整は、翌14日にfirstターンの観測、3月25日RF捕獲の成功、4月17日に19.6mAの蓄積電流を実現した。その後、電子ビームの寿命を改善するために、放射光によるクロッチやアブソーバ等の真空機器の焼き出しによる真空度の向上、電子軌道の設計軌道からのずれ(COD)と運動量分散関数の補正、軌道安定化のための原因調査と対策が実施された。それと並行して、最初の2本のビームラインの立ち上げ調整も実施された。7月3日には、蓄積リングとビームライン2本の放射線発生装置の使用時検査に合格し、更に、第二期および第三期の申請分の8本のビームラインの使用時検査も10月3日までに無事終了した。そして10月8日より放射光利用が開始された。本稿では、現在までに実現されている蓄積リングのビーム性能と今後の予定について報告する。

表1 ビーム性能の設計値と実測値との比較

	設計値	実測値
エミッタンス	7nmrad	10nmrad
x - y結合比	10%以内	1% (?)
チューン		
水平	51.25	51.24
垂直	16.38	16.31
運動量分散関数		
BPM (3)	0.27m	0.26 ~ 0.28m
直線部		
水平	0.0	0.02m
垂直	0.0	0.01m
蓄積電流	20mA	19.6mA
(当初設計)	(100mA)	
ビーム寿命		
多パンチ	20時間	100時間
21パンチ		13時間

2. 蓄積リングのビーム性能

電子ビーム性能の設計値と実測値との比較を表1に示す。

2-1. 閉軌道 (COD) の補正

第三世代の低エミッタンスリングでは、チューンやクロマティシティーおよび運動量分散関数等の基本パラメータの測定には、まずCODを補正する必要がある。SPring-8では、ビーム位置検出器 (BPM) の中心を電子ビーム軌道を用いて較正を行い、この結果をもとにして水平と垂直方向のCODを補正した。その結果を図1に示す。補正されたCODのrms値は水平垂直方向ともに0.05mm程度である。

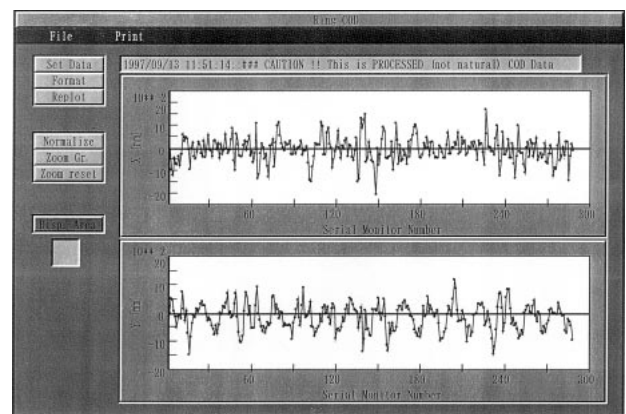


図1 補正後のCOD
上が水平方向、下が垂直方向のCOD

このCODのもとで測定されたチューンの値は、表1に示すように、電磁石の磁場測定結果から計算された値と、水平方向で0.01、垂直方向で0.07以内で良く一致している。また、図2に示すように、測定された運動量分散関数の無分散域 (挿入光源設置場所) での誤差分散値が水平方向で2cm、垂直方向

で1cm程度とほぼ0に近い。この二つのことから、蓄積リングの実際のラティス関数（ベータ関数等）が、設計値から大きくずれていないと推定される。今後、シングルキックを用いた軌道測定から、リング1周のベータ関数を正確に測定する予定である。

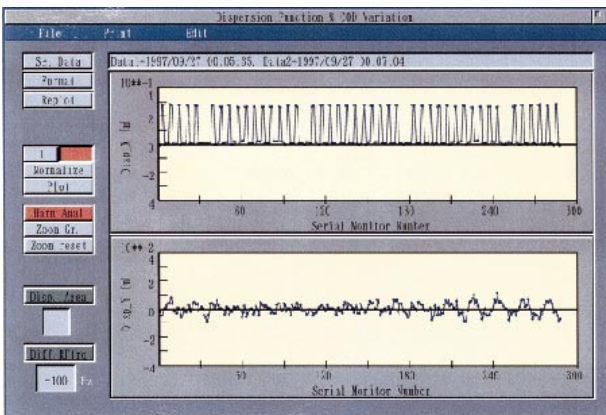


図2 運動量分散関数（測定値）
上が水平方向、下が垂直方向

2-2. 電子ビームの寿命

蓄積電子の寿命は、ビーム電流20mAで真空度 10^{-7} Paでは、リング1周の2436バケットに全て電子を入れたマルチバンチモードで、挿入光源（ID）のギャップが8mmの時80時間、ギャップが開の時100時間、そして116バンチ間隔で電子を蓄積した21バンチモードでは、ギャップが8mmの時20時間、ギャップが開の時13時間であった。代表的な結果を図3に示す。前半がマルチバンチモード、後半が21バンチモードでのビーム寿命である。マルチバンチで

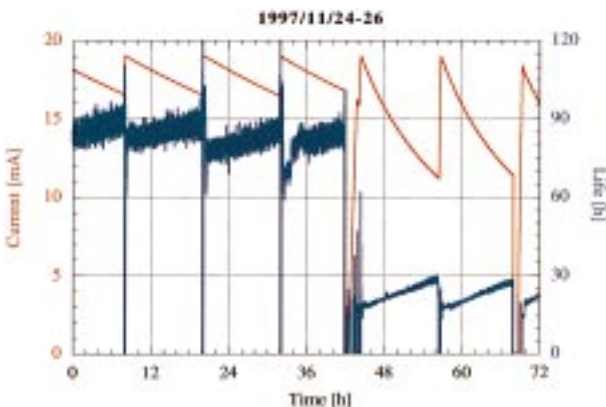


図3 ビーム寿命とビーム電流

横軸で42より左側がマルチバンチ右側が21バンチ運転に対応する

の寿命は、チェンバー内の真空度で、そして21バンチでは、タウチェック効果（バンチ内の電子間のクーロン散乱によって電子が失われる効果）によって決まっている。また、21バンチの場合、特定の挿入光源（プレーン型の垂直アンジュレータID45）のギャップを閉じると、ビーム寿命が1.5倍ほど延びる。これはおそらくID磁場内のスキュー型誤差磁場等で、電子ビームの三次元実空間の体積が大きくなっている効果と考えられる。

2-3. 蓄積ビーム電流値とrf電圧

蓄積リングには、4カ所のrfステーションがあり、現在その内3カ所に定格1MWのクライストロンと8台の高周波空洞がそれぞれ設置されている。この状態で、標準型ID（エネルギー損失が約0.1MV）の設置可能本数は、rfステーションで供給できる高周波電力を800kW、ビーム電流を今後予定している100mAと仮定すると、加速器の調整の余裕度を取った上で約20本程度となる。現在のIDの建設予定からすると、平成11年から平成12年には、この数を上回ることが予想される。そのため、平成10年から残り1カ所のrfステーションの整備を進める予定である。この整備によって、IDでの可能な総エネルギー損失は約6MV程度、全放射光パワーは、ビーム電流100mAで600kWとなる。

また、蓄積電流値については、現在の20mAから当初設計の100mAへの変更申請を平成10年の早い時期に予定している。しかしそれ以上のビーム電流の増強は当面考えていない。その理由は、第三世代の高輝度光源であるSPring-8ではアンジュレータ光を主体とするため、ビームの質の高度化が本質的であること、そしてクロッチャやアブソーバ等の機器の熱負荷対策が100mA対応であることによる。

2-4. ビームの入射時間

シンクロトロンから蓄積リングへの電子ビームの入射効率は、マルチバンチ、21バンチモードによらず90%以上が実現されている。そのため、最初に20mAまで蓄積する時間は、マルチバンチモードで数分、21バンチモードで1時間から1.5時間である。ただし、1日2回の定時入射時は、周回ビームに追加するため、マルチバンチモードで1分程度、21バンチモードで20から30分である。特に、現在21バンチモードで入射に時間がかかるのは、マルチバンチと21バンチの利用運転に短時間で対応できるよう、線

型加速器で加速した40ナノ秒長（バンチ数で20バンチ）のビームから、シンクロトロンでrfロックアウトによって1バンチだけを残して蓄積リングに入射することから、1入射当りの平均電流が極端に少なくなるためである。現在は、21バンチモードでの入射に要する時間がビーム寿命より短いため問題にはならない。しかし、蓄積電流値を100mAに変更したとき、バンチ当りのビーム電流値が5倍ほど高くなるため、タウチェック効果によってビームの寿命がさらに数分の一程度に悪化する。そのため入射時間の短縮が重要な問題となる。この問題を解決するために、現在線型加速器でピーク電流が現状の100倍程度高い単バンチ用電子銃の準備が進められている。これにより入射時間は大幅に改善される予定である。また、この電子銃はマルチバンチモードでの40ナノ秒長のビーム生成にもそのまま対応することができる。

2-5. 単バンチモードでのバンチ純度

平成9年の第11、12サイクルで21バンチ、20mAの運転が行われた。図4にBL09で測定された純度測定の結果を示す。純度として 10^{-7} 台が実現されている（この状態は入射を含め数日間保存された）。しかし、時々シンクロトロンで作られた単バンチが、タイミング系のジッターと思われる原因によって蓄積リングの目的とするバンチの両サイド数バンチに入射さ

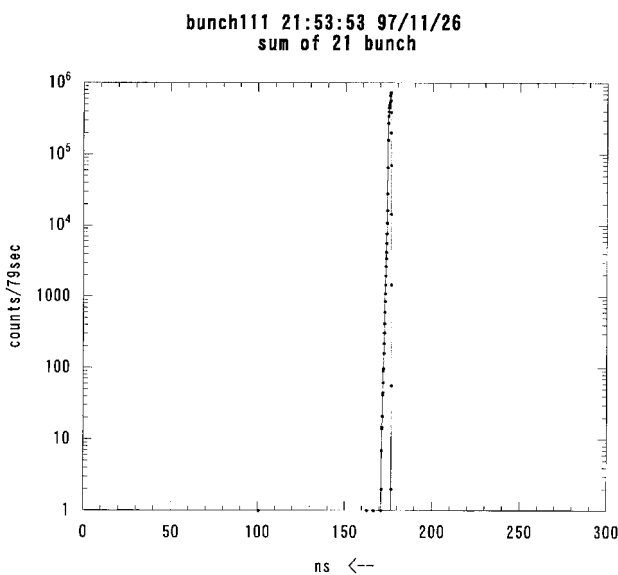


図4 21バンチ運転での純度測定の結果

れることが観測された。この原因について、回路系自身の問題と電源ラインからのノイズの混入によるものの二つの面から現在調査中である。

2-6. 電子軌道の安定度

蓄積リングのビームサイズは、設計上の7nmradのエミッタンスと結合比10%を仮定すると、挿入光源を設置する直線部で水平方向に0.4mm、垂直方向で0.08mm程度となる。したがって、電子軌道の変動はこれらの値より十分小さくしなければならない。そのため、地盤の硬い現サイトが選択され、同時に加速器と建物の設計時に、軌道変動の要因となる建物構造や電磁石構造に対して各種の対策がとられた。

試験調整運転開始以降、変動原因を探るため原則CODを30秒に1回の割合で測定した。そのデータから各種エラーに対してCODの振幅が最も敏感に反応するチューンの整数部である水平方向で51、垂直方向で16のフーリエ成分を計算し、その結果からリング周上の電磁石の位置変動や誤差磁場の発生場所を推定した。図5は平成9年11月6日から12月12日までの3サイクルの51と16の成分の変動である。これら一連の測定から分かった軌道変動の要因をまとめると次のようになる。

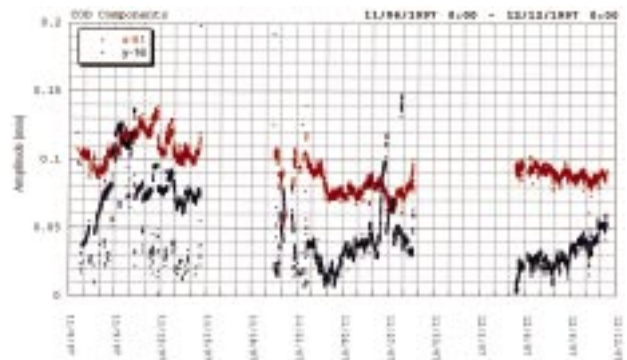


図5 CODの中の水平方向51（上）、垂直方向16（下）のフーリエ成分の約1カ月間の変動

a) 大雨による蓄積リングアンダーパス部の地盤変化

図5で11月26日早朝、大雨が降り始めたのに対応して16の成分が数時間で100 μ mほど急激に増加した。このデータを解析すると蓄積リングのアンダーパス部に局所的に垂直方向にエラーが

発生したと見える。この部分の内周側は、特に水はけが悪くかつ地盤改良の境界であることが影響していると思われるので、しばらく様子を見、必要があれば排水設備や地表の舗装等を検討する。

b) 挿入光源の永久磁石冷却用チラーからの温風の影響

収納部内の室温は、2セルを1単位として温度センサーと冷温水を用いたファンコイルで通年 27 ± 1 に制御されている。このセンサーの近傍にチラーが設置されたため、その温風のon、offによって局所的に収納部内の温度が変化し、その結果垂直成分で50から100 μm 程度の軌道変動が生じた。現在は、この変動はセンサーに直接温風が当たらないようにパーティションで仕切った事では落ちついてはいるが、チラーセットを収納部外に出すことでこの変動は完全に排除することができる。

c) 電磁石コイルの発熱による電磁石鉄芯および共通架台の熱変形

電磁石鉄芯と共通架台の温度は、リングの主電磁石の通電開始から3日程で一定になる。その間垂直方向の電子軌道が大きく変動する。図5の11月6日から9日までの変化がこれに当たる。この変動はサイクルとサイクルの間の休止期間中(図5の11月29日から12月5日)も主電磁石電源を通電することで大幅に改善された。

d) 挿入光源の誤差磁場のギャップ依存性

特定のIDのギャップ長を変更したとき軌道変動が生じる。これは、図5で11月6日から11月22日に見られるもので、16の成分が入射時IDギャップを開にした状態で20から30 μm であったものが、特定のIDs (ID08とID39) のギャップを8mmにすると80 μm に増加する。これは、誤差磁場のギャップ依存性の補正が不完全であるため、一応補正関数が修正された後(11月22日以降)は、20 μm 以内に落ちついてはいる。しかしIDの独立チューニングを行うためには、更に補正関数の精度を改善する必要がある。

e) 太陽と月の引力による地殻の変形

太陽と月の位置関係によって、地球上での引力の強さが変化する。それに伴って地殻が変形し、この変形によってリングの周長が変化する。蓄積リングの場合電子が一周回る時間はrf周波数により 10^{-9} 以内の精度で固定されているため、電子はエネルギーを変えて軌道長を一定に保つ。すなわ

ち周長の変化がエネルギー変化に変換される。図6に引力による周長変化の測定結果を示す。図中の上の実線が引力の計算値(相対値)、下のプロットが測定値で実際の周長変化はこの値の2倍となる。蓄積リングでは、この効果により1436mの周長が最大約40 μm 程が変化している。

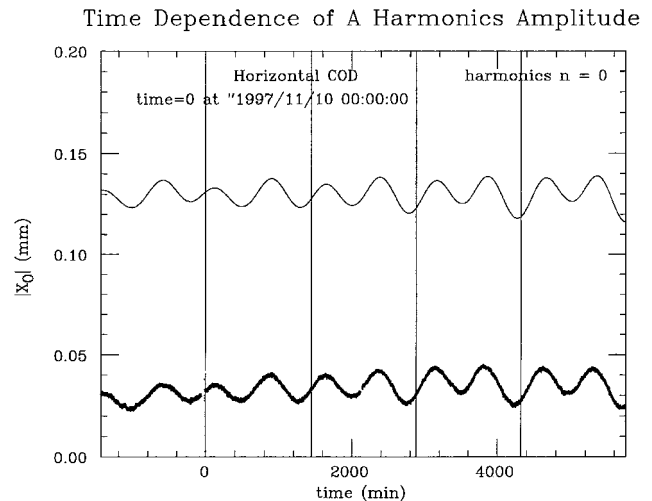


図6 太陽と月の引力による周長変化
図中の上の線が引力の計算値(相対値)下の線が周長の変化量の測定値(実際の変化量は図中の値の2倍)

f) 電磁石冷却水の温度変化

電磁石の冷却水の温度は、設定値に対して ± 1 に制御されている。この制御温度内での水温の変化に対し水平方向51の成分が30 μm 程変化する。この変動は偏向電磁石のコイルに面した鉄芯表面の温度が、冷却水の温度変化に比較的短時間で追従して生じる“するめ効果”によってギャップ長が変化し、磁場の強さが変わって起こる。変動の周期は数分から20分程度である。

g) 6極電磁石電源の電流リップル

複数の6極電磁石電源で2Hz程度の電流リップルが観測される。このリップルにより発生する渦電流磁場は、6極電磁石内の真空チェンバーが左右非対称な形をしているため、水平方向の二極磁場として現れる。現在ビーム位置検出用電極からの信号をスペアナで解析すると2Hz付近にピークが観測されるが、これが電源のリップルによるものかどうかを確認するため、電源を再調整した後再度測定する予定である。

2-7. 蓄積ビームのエネルギー変動について

蓄積リングにおいてエネルギー変動を引き起こす現象としては、先ほど説明した太陽と月の引力による周長変化によるものと、高周波電力発生用のクライストロン電源の電圧リップルがシンクロトロン振動を誘起して生ずるものがある。測定されたエネルギー変化量は、両者とも $\pm 0.01\%$ 程度とビームの持っているエネルギー自然幅の10分の1程度と小さく、これによって実行的エミッタンスとx-y結合比が極端に悪くなることはない。しかし、今後ビーム性能の高度化に際して問題が生じる場合には、前者については、rf周波数の調整で、後者はリップルが整流回路の論理高調波から生じていることからrf位相へのフィードフォワードまたはフィードバック制御で対応することができる。

2-8. ビーム不安定性について

試験調整運転開始から平成9年12月までのビーム運転でビーム不安定性によると思われる現象は、試験調整運転当初のマルチバンチ運転で真空度が 10^{-6} Pa台でBPM電極で観測されたイオントラップ(?)と思われるものと単バンチ運転で観測された垂直方向での不安定性以外、手持ちのビーム診断系では観測されていない。これらについても、前者は真空度の向上とともに見えなくなり、後者については、クロマティシティーを+1程度にすることでバンチ当たり4mA程度まで不安定性を抑えられることが確かめられている。今後、ビーム診断系の整備を待って、これら不安定性について詳細にスタディーする予定である。

3. まとめ

この1年のビーム運転を通して、電子ビーム軌道の振る舞いについてはある程度まで理解することが出来、その結果軌道安定度としては水平垂直共に図5に示すように $\pm 20 \mu\text{m}$ /週程度まで安定化することができた。しかし、第三世代の高輝度リングで重要なエミッタンスと結合比については、現在これらを測定する診断装置を持っていないので早急にこれら物理量を精度よく測定する診断装置の開発を行い、電子ビームの性能の高度化と軌道のさらなる高安定化を目指す予定である。しかし、それらの高度化にはリング側の問題や挿入光源側の問題そして診断系の問題が複雑に絡み合っているため、これらの

測定方法について十分検討する必要があると思われる。

また、今後の予定であるが、現在放射線的な問題も真空的な問題もないので出来る限り早い時期に蓄積電流を20mAから100mAへの変更申請をする。そして、できれば7月までに50mA以上のビームで真空機器の放射光による焼き出しをある程度まで済ませ、夏の休止中にNEGの再活性化を行った後、秋からの運転で100mA近い供用運転を目指したいと考えている。