

3. 施設の現状と進展

3-1 加速器

1. 運転・軌道解析グループ

1-1 加速器の運転

図1にユーザー運転開始以来の運転時間の推移を示す（脚注）。2007年のSPring-8加速器総運転時間は5027.9時間であった。この時間には、加速器立上げ調整時の入射器系の先行運転なども含まれている。2007年の蓄積リングの運転時間は5019.6時間、ユーザータイムは3900時間であった。2006年と比べると、加速器総運転時間および蓄積リング運転時間がほぼ変わっていないのに対して、ユーザータイムは100時間以上増加しているという結果であった。

2007年のユーザータイムは蓄積リング運転時間の77.7%であり、トラブルによりユーザータイムを停止しなければならなかった時間は計画ユーザータイムの0.7%に当たる27.6時間であり、ユーザータイム達成率は計画ユーザータイムに対しては99.1%という今までで最も高い値を達成した。また、トラブルとして、23回のビームアポートあるいは計画外のビーム廃棄が発生している。最も長い中断時間は落雷による瞬時電圧低下によるもので3.4時間、ほとんどのものが1時間程度でユーザータイム再開を果たしている。ビームアポートの原因として特に際だって多いものではなく、例年、比較的多い加速器の機器異常の1つであるRF空洞の反射によるものが少なくなり、機器安定度は増していると言える。ユーザータイム中断には至らないが、トップアップ入射の中断が23回発生した。入射系のトラブルに起因するものがほとんどであるが、地道な対策を施しており、トップアップ中断は減少していくものと思われる。また、加速器およびビームラインの調整は1100.3時間であり、ユーザータイムが増加した分だけ例年に比べて約100時間減少している。

以前より減少傾向にある多バンチモードの運転の割合は、2007年はユーザータイムの17%であり、大きく減少した2006年の8.7%よりは増加した。少数バンチモードでの運転の割合は51.9%で、2006年の56.3%と大きくは変わっていない。特に203バンチモードでの運転はユーザータイムの32.4%（2006年は36.3%）と全ての運転モードの中で際だって多く、SPring-8の主要な運転モードとなっている。多バンチモードと少数バンチモードが共存するハイブリッドモードは31.3%（2006年は34.9%）と、ここ数年の割合とほぼ

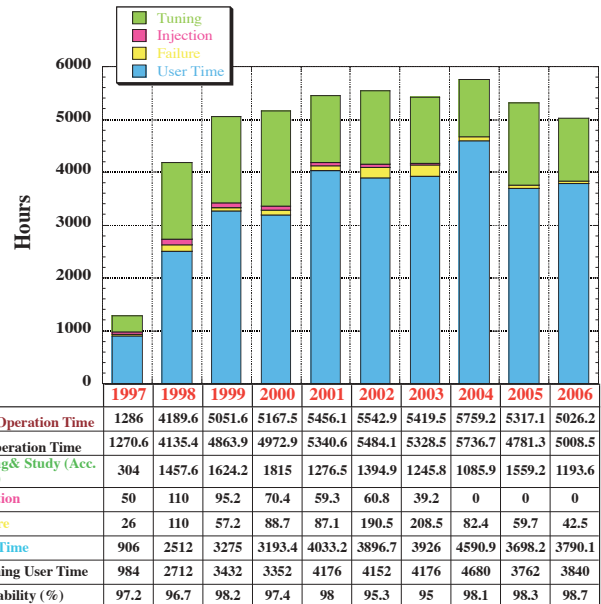


図1 1997年の供用開始以来の運転時間の推移

同様であった。多バンチモードの運転時間が減少傾向にある原因は、本格的なトップアップ運転の導入により、高電流バンチの短いビーム寿命を気にする必要が無くなったために、パルス放射光利用実験がいつでも実施できるようになったためと思われる。この傾向は今後も続くと思われる。2007年は、7つのフィリングモードでの運転が実施されている。前述した均等203バンチ（1バンチ当たりの電子数 1.5×10^{10} ；電流換算0.5mA）、11バンチトレインを全周に均等に29配置したモード（1つのバンチには 9.5×10^9 ；電流換算0.3mA）等が実施された。

表1に、蓄積リングの主要なパラメータを示す。

（大熊）

1-2 トップアップ運転

1-2-1 蓄積電流値変動の改善

SPring-8では、蓄積電流値を一定に保ち積分輝度の改善やビームライン機器熱負荷安定化を目的に、利用運転中もビーム入射を行うトップアップ運転が2004年5月に導入された。以来、利用運転中の蓄積電流値変動は0.1%以内に抑えられている。現在では、この蓄積電流値一定度は精度を要求される利用実験においては不可欠なものとなっている^[1,2]。

SPring-8のトップアップ運転では、1ショット当たりの入射電流値は30pAに固定されている。これは、セバールバンチモードでのバンチ電流値一様性を10%以内に納める

脚注：SPring-8年報は年度ごとのまとめであるが、運転統計は従来通り1月～12月で集計する。

表1 蓄積リングの主要パラメータ

Energy [GeV]	8
Number of buckets	2436
Tunes (ν_x / ν_y)	40.15 / 18.35
Current [mA]:	
single bunch	12
multi bunch	100
Bunch length (σ) [psec]	13
Horizontal emittance [nm-rad]	3.4 ^{S1}
Vertical emittance [pm-rad]	6.8 ^{S1}
Coupling [%]	0.2
RF voltage [MV]	16
Momentum acceptance [%]	± 3 (± 240 MeV)
Beam size (σ_x / σ_y) ^{S1} [μm]	
Long ID section	294 / 10
ID section	301 / 6
BM section	107 / 13
Beam divergence (σ'_x / σ'_y) ^{S1} [μrad]	
Long ID section	13 / 0.7
ID section	12 / 1.1
BM section	56 / 0.6
Operational chromaticities (ξ_x / ξ_y)	+2/+2 ^{S2}
Lifetime [hr]:	
100mA (multi bunch)	~200
1mA (single bunch)	~20
Horizontal dispersion [m]:	
Long ID section	0.103
ID section	0.107
BM section	0.032
Fast orbit stability (0.1 – 200Hz) [μm]:	
horizontal (rms)	~4
vertical (rms)	~1

^{S1} Assuming 0.2% coupling for “Low Emittance Optics”^{S2} With bunch-by-bunch feedback

ためである。即ち、最もバンチ数の多いフィリングモード 11バンチトレイン×29 (バンチ数319、バンチ電流値0.3mA) において1ショット入射してもバンチ電流値増分が10%を越えないようにということから決まっている。一方、入射のタイミングを知りたいというユーザーの要求により、これまでは入射間隔一定 (セベラルバンチモードでは1分、マルチバンチモードでは5分) でのトップアップ入射が行われていた。この時、入射電流値30 μA では入射間の蓄積電流値減少分を1ショットの入射では補うことができず、入射1回当たりのショット数は1から3の間で不定となる。例として、2007年10月のトップアップ運転における典型的な蓄積電流値の振る舞いを図2に示す。このため、蓄積電流値の変動幅は入射電流値30 μA の3倍である0.1mA程度となる。ところが、ビーム入射による蓄積ビーム振動を抑制するためのマシン調整^[3, 4, 5]によって、トップアップ運転導入当初から入射に伴う蓄積ビームの振動は利用実験に影響を及ぼすことはないものとなっていた。そこで、蓄積電流値変動を改善するため、2007年11月よりトップアップ運転モードをそれまでの入射間隔一定から随時入射に変更することとした。

新しいトップアップ運転モードでは、1入射当たり丁度1ショットになるよう入射間隔が可変となる。図3は、新しいトップアップ運転モードでの蓄積電流値変動を示している。そこでは、蓄積電流値変動幅は期待通り入射電流値の30 μA となっている。この時のビーム寿命は約18時間であったので、平均入射間隔は20秒であった。新しいトップアップ運転モードを電流値優先モード、旧来のものをインターバル優先モードとした。図4は、両モードでの8時間に亘

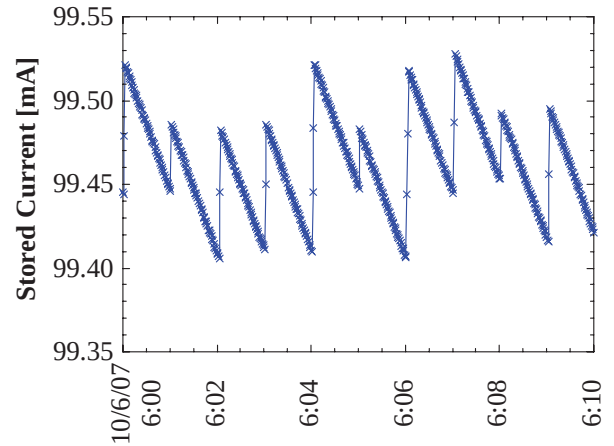


図2 入射間隔一定 (インターバル優先モード) でのトップアップ運転時の10分間の蓄積電流値の変化

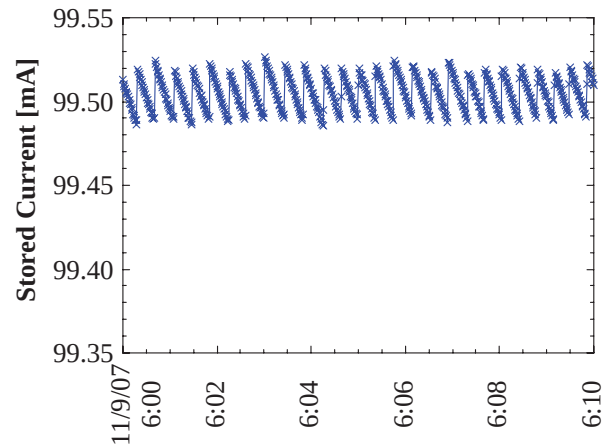


図3 入射間隔可変 (電流値優先モード) でのトップアップ運転時の10分間の蓄積電流値の変化

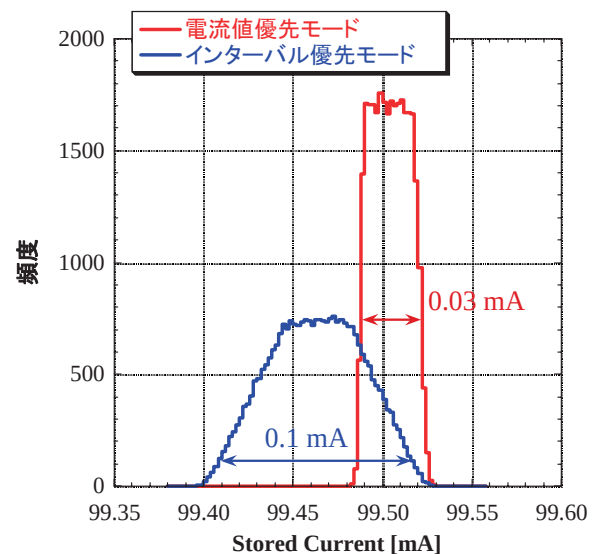


図4 インターバル優先モードと電流値優先モードの8時間運転での蓄積電流値の分布

る蓄積電流値の分布を示している。蓄積電流値変動0.03%が達成されていることがわかる。この高い蓄積電流値安定度が利用実験の精度向上に寄与することを期待する。

(高雄)

1-2-2 入射バンパ電磁石の遠隔tilt調整機構の開発

蓄積リングにトップアップ入射を行う際、蓄積ビームの振動を極力抑制することが重要である。ビーム入射時にはバンパ電磁石4台（BP1～4）をパルス励磁してバンパ軌道を作るが、バンパ電磁石にs軸（ビーム軸）周りの設置誤差（tilt）があると、ビームは水平方向磁場を受けるため垂直方向に振動する。振動抑制のため遠隔にてtiltを調整できる調整機構を開発し、前年度にバンパ電磁石のうちBP4について試験的に調整機構を設置した（2006年度年報参照）のに続き、今年度残りの3台についても調整機構を導入し、オンビームでの完全遠隔調整を行った。

全ての調整機構について、tiltの設定値に対する応答を測定するため、全ての電磁石の基準座の上に水準器を乗せて、tiltの設定値に対する実際のtilt、及びx軸周りの回転（pitch）を測定した。ここで、tiltの極性はビーム進行方向に対し時計回りを正とした。この測定では再現性やギアのバックラッシュの影響を評価するため、tiltを正方向、負方向、正方向の順で設定を行った。同じ方向で同じtiltに設定した場合の測定値の差（再現性）は4.4～18.7 μ radであり、目標精度0.1mradに比べて十分小さかった。また、

tiltの設定値と実測値は1.9%以内で一致し、pitchへの影響は2.7%以下であった。

まずBP2について、調整前を中心（0mrad）にtiltを ± 3.1 mradの範囲で変えて、tiltに対する蓄積ビームの垂直方向振動振幅を測定した（図5）。最小の振動振幅を与えるtiltの設定値を求めるため、ノイズレベルをバックグラウンドとして差し引いたうえ、バンパの励磁波形スタート（ターン数0）から7ターン分について測定値の二乗和（以下、overall amplitude）をとってtiltに対してプロットした（図6）。二次関数によりフィッティングを行った結果、BP2のtiltを+1.02mradとすると、overall amplitudeは17.4 μ m

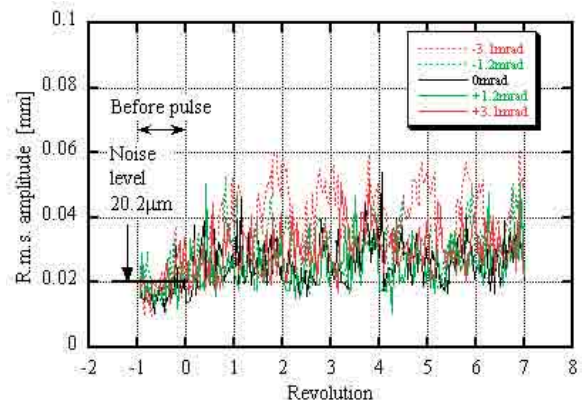


図5 BP2のtiltに対するビーム入射時の蓄積ビームの垂直方向振動振幅（7ターン分）

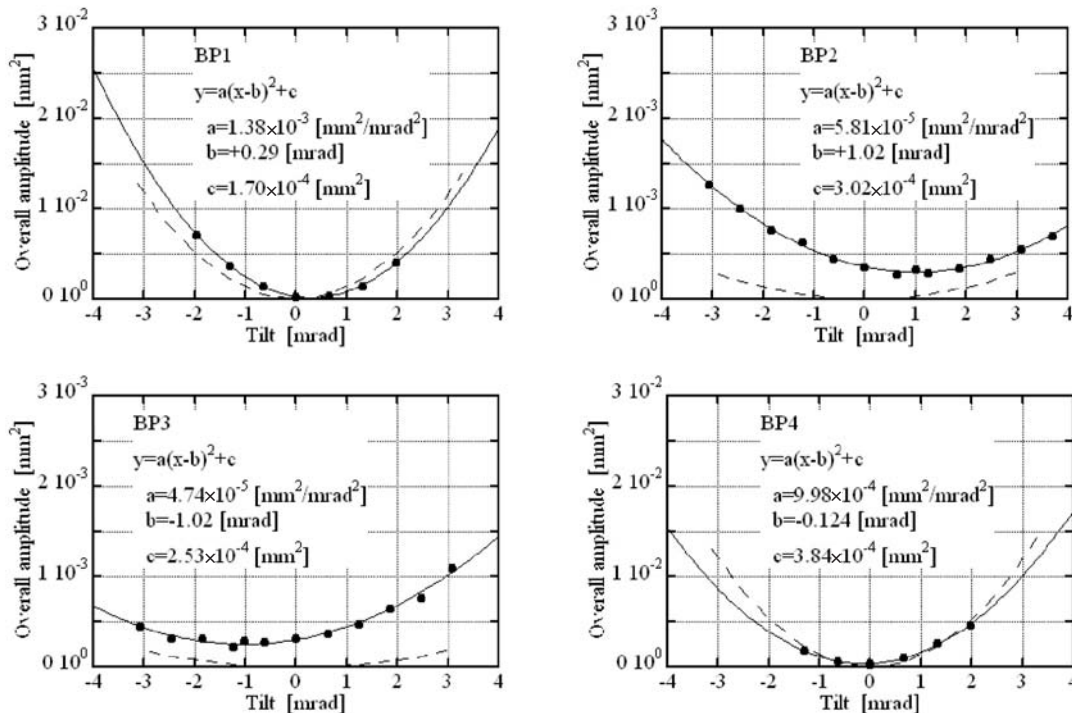


図6 BP1～4のtiltに対する7ターン分の垂直方向振動振幅の二乗和（overall amplitude）。実線は二次関数による最小二乗フィッティングの結果を示す。点線はそれぞれ調整対象以外のバンパ電磁石にtiltエラーがない場合のビームトラッキングコードによる計算結果を示す

で最小となることがわかった。そこで、BP2のtiltを+1.02mradとした。次に、この状態においてBP3、BP1、BP4の順に同様な解析を行った(図6)。今回の調整では、各電磁石に対する解析が終わった後、最小の振動振幅を与えるtiltに設定して、この状態で次の電磁石の解析を行った。調整前後の振動振幅を図7に示す。調整機構据付け前よりも振幅を小さく抑えることができた。

以上の調整方法は調整対象電磁石以外のtiltエラーの影響を無視して個別に調整可能であると仮定した方法である。このような仮定のもとでは振動振幅の最小値は0に近づくはずであるが(図6、点線)、実際はオフセットをもっており、単独での調整ではこれ以上振動振幅を小さくすることはできなかった。後日の計算により、測定対象電磁石以外のtiltによりオフセットが生じるが、調整前に全ての調整台についてオフセットを正確に測定することができれば、応答関数を用いて全ての電磁石のtiltの絶対値を見積もることができることがわかった。但し、BP1~4の測定で得られたオフセットの量は13.0~19.6 μm で、いずれも測定系のノイズレベル20.2 μm (図5)と同じオーダーである。今後、オフセットの測定をもとにさらに振動振幅を小さくするための測定方法についての検討を行う予定である。

(深見)

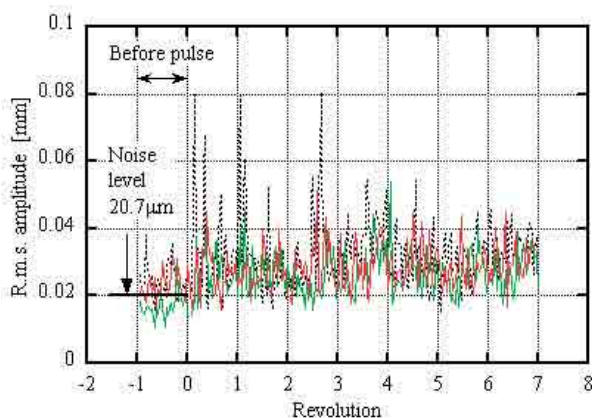


図7 ビーム入射時の蓄積ビームの垂直方向振動振幅(7ターン分)。黒点線は調整機構据付け前、緑実線は調整機構による調整前、赤実線は調整機構による調整後の振動振幅を示す

1-3 線形共鳴結合補正

電子蓄積リングの垂直ビーム拡がり、放射光子の角度拡がり、で生成される本来大変小さいものである。実際には、誤差磁場などによる水平垂直運動の結合(X-Y結合)があると、水平ビーム拡がりの垂直方向への回り込みが垂直ビーム拡がりに大きく寄与することになる。垂直ビーム拡がりの拡大は輝度低下に繋がることから、X-Y結合は高輝度放射光にとって重要なパラメータであるので、SPRING-8蓄積リングでは定期的にその結合強度を測定して来た。その

結果、近年徐々に結合強度が強くなってきたことが観測されていたので、2006年度よりX-Y結合の補正を実施することにした^[6, 7]。以来、X-Y結合の変動の確認も兼ねて加速器立上げ調整毎に結合補正を実施している。

通常、誤差磁場は非常に弱くて蓄積ビームに重大な影響を及ぼすことはないが、誤差磁場分布が蓄積ビームの運動と共鳴することによって大きく影響することがある。最も影響が大きいのはskew(捻れ)四極磁場による線形共鳴結合で、SPRING-8蓄積リングの場合 $v_x \cdot v_y = 22$ の差共鳴が運転点(40.15, 18.35)に最も近く影響が大きい。線形共鳴の励起強度は振幅と位相の2自由度を持つので、2ファミリーのskew四極電磁石を用いて共鳴結合を補正することができる。SPRING-8蓄積リングでは、偶数セルアーク部と長直線部に設置されたskew四極電磁石が共鳴結合補正に用いられている。その補正の様子を図8に示す。結合補正は、垂直ビームサイズをモニタとしてこれが最小となるようskew四極電磁石の強さを決めることで行われる。過去1年のskew四極電磁石の補正強度をまとめると表2のようになっており、誤差磁場分布がかなり変化していることがわかる。

最近、我々はturn-by-turnビーム位置モニタ(BPM)を用いて共鳴励起強度を簡便に測定する新しい方法を開発した^[8]。X-Y結合により水平垂直振動は混合するが、その振動を固有モードで展開するとその係数として共鳴結合強度が求まる^[9, 10]。蓄積ビームにキックを与え、turn-by-turn BPMでその振動を測定し、これを解析することで共鳴励起強度を測定することができる。図9はその測定例で、丸印はturn-by-turn BPMによる測定データ、実線は固有モード展開のfitting結果を表している。このようにして求めた共鳴励起強度は、これまでの垂直ビームサイズをモニタ

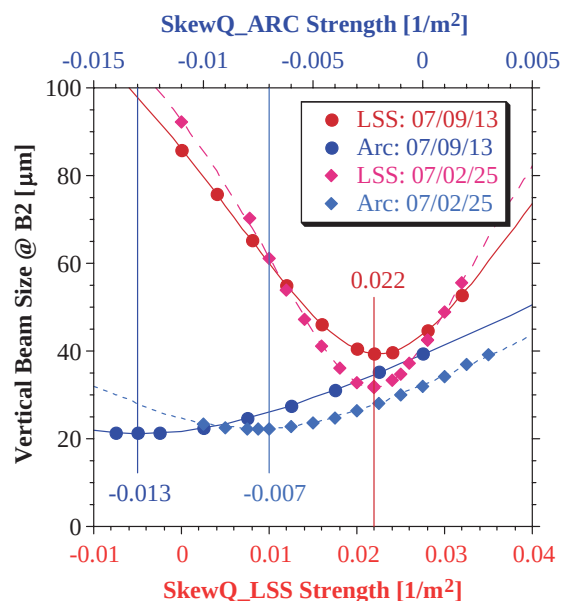


図8 結合補正の現状

としてskew四極電磁石補正量を最適化する方法で求めた結果とよく一致している。今後、この方法を用いて簡便にX-Y結合補正を行うことも検討している。

(高雄)

表2 skew四極電磁石補正量

実施日時	長直線部合計 [1/m ²]	アーク部合計 [1/m ²]
2007/02/25	0.022	-0.0075
2007/09/13	0.022	-0.0130
2008/02/27	0.027	-0.0115

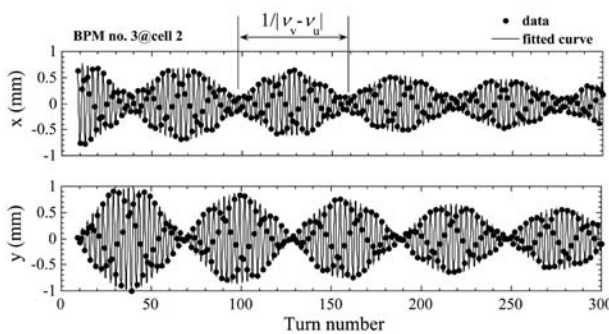


図9 ビーム振動測定例。上：水平、下：垂直

1-4 低アルファ・オブティックス

蓄積リングのオブティックスを調整することで、蓄積ビームのパンチ長をある程度の範囲で制御することが可能である。通常運転時のパンチ長は、パンチ電流値がゼロの極限で RMS 13ps (FWHM 31ps) である。パンチ長を短くして、よりパルス長の短い放射光を発生させることができれば、放射光利用の幅を拡げることができる。

一般に、パンチ電流値が低い場合には、蓄積ビームのパンチ長はmomentum compaction factor α の平方根に比例する。ここで α は、電子の運動量 p に対する平衡軌道の長さの依存性を示す量であり、運動量のずれ Δp の高次項も含めて $\alpha = \alpha_0 + \alpha_1(\Delta p/p) + \alpha_2(\Delta p/p)^2 + \dots$ と書ける。通常は最低次の定数項 α_0 が支配的であるが、四極電磁石を調整して水平ディスパージョン関数を制御することで、これを小さくすることができる。そのような低アルファ・オブティックスの例を図10に示す。水平ディスパージョン関数が部分的に負になるように四極電磁石を調整して α_0 の値を下げており、この例では通常時の約1/11となっている。ただし、これによってエミッタンスは7倍程度(25nmrad前後)に増加する。これは、要求される水平ディスパージョン関数の変化が、エミッタンス低減のための最適条件から離れる方向に向かうためである。定数項 α_0 の値は、四極電磁石の調整により、さらに下げることができる。このよう

にして α_0 の値を下げていくと、次の次数の項 $\alpha_1(\Delta p/p)$ が効き始める。この項が支配的な場合には、電子のエネルギー振動に対する安定領域が狭められるため、 α_0 の値を下げると同時に α_1 の値も下げる必要がある。この α_1 の制御は、六極電磁石を調整して行うことができる。

四極電磁石の調整と六極電磁石の最適化を行い、 α_0 の値が異なるオブティックスを何種類か設定してビーム試験を実施した。ビーム試験では、ストリークカメラを用いたパンチ長測定を行い、図11及び図12に示す結果を得た。パンチ電流値0.01mA時のパンチ長を α_0 の関数としてプロットしたものが図11である。また、2種類のオブティックスに対して、パンチ電流値の関数としてパンチ長をプロットしたものが図12である。

一般には、 α_0 の値が小さいほどビームの安定性が乏しく調整が困難となり、ビーム寿命も短くなる傾向がある。図11に示すように、これまでに得られた最短のパンチ長は RMS 2~3ps (FWHM 5~7ps) であるが、この時のビーム寿命は極端に短く、実用化のためには、更なる調整と安定領域拡大のための改善が必要である。このために、次の次数の項 α_2 を八極電磁石で制御する可能性について検討を行う予定である。また同時に、短パルス放射光の試験的利用に関しても検討を進めている。

(早乙女)

1-5 ビームロスモニタの開発

2003年、蓄積リングにおいて、電子ビームアボートのタイミングで、周回電子ビームが真空チェンバーに衝突し、チェンバーの損傷により真空漏れを引き起こした。原因の調査と対策の為に、電子ビーム損傷試験装置が蓄積リングに設置され、バンパ軌道とRFパワーオフによるアボートシステムを利用して、リング内を周回している電子ビームを試料に照射する実験が行われている^[11, 12]。

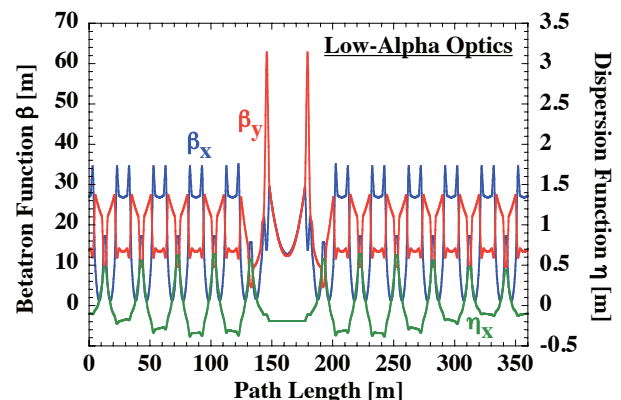


図10 低アルファ・オブティックス。リング 1/4 周分の水平および垂直ベータ関数 (β_x および β_y) と水平ディスパージョン関数 (η_x) を示す

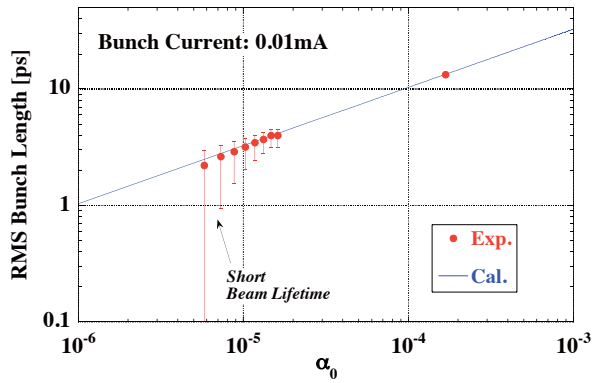


図11 バンチ長と α_0 の関係。バンチ電流値0.01mA、RF加速電圧 16MV時のバンチ長測定データを計算値とともに示す。測定に用いたストリークカメラの時間軸スケールをビームを用いて較正し、ジッターを2.5psと評価してバンチ長を求めた。ジッターの評価誤差は1ps程度で、この分をエラーバーとして表示した

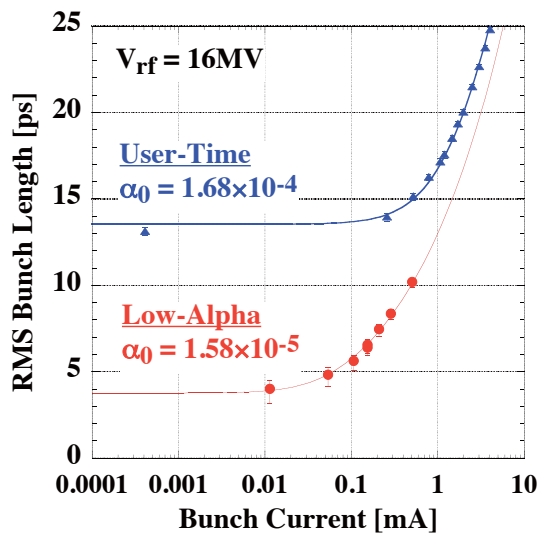


図12 バンチ長の電流値依存性。RF加速電圧 16MV時のデータを、ユーザー運転用オプティクスと低アルファ・オプティクスの場合でプロットした

また、リング内を周回している電子ビームが真空封止型挿入光源用の永久磁石に衝突すると、永久磁石を減磁する可能性がある^[13]。このため、これら近傍の電子ビームロスを監視する必要がある。

なんらかの原因で電子ビームが真空チェンバーに当たると、相互作用により2次粒子を出す。これを検出するのがビームロスモニタである。いつ・どこで・どの程度、電子ビームを損失したかがわかる。SPRING-8の立上げ調整時、およびユーザー運転時において、(1) 電子ビームロスの監視、(2) 電子ビームロスメカニズムの解明、および (3) 電子ビームロスハンドリング（電子ビームロスの抑制、ま

たは適切な廃棄点への電子ビームの誘導）の為に、ビームロスモニタは非常に有用^[14]であるが、現在SPRING-8 蓄積リングにはこれら目的のために使用される全周ビームロスモニタがインストールされていない。

そこで安価なPINフォトダイオードを検出部に持つビームロスモニタ^[15, 16]を開発中である。逆バイアス電圧に関しても、安価でかつメンテナンスフリーとするため、使用しないこととした。8×5×3.3cm³の小型なアルミシャーシ内にPINフォトダイオードをセットし、信号はシールド付きのツイスト線を用いて取り出している。

ビームロスモニタの性能を評価する為に、蓄積リング収納部内の入射部、および上記電子ビーム損傷試験装置（セル48直線部）近傍にビームロスモニタをインストールし、電子ビームの廃棄方法を変えてビームロス信号を観測した。結果を図13に示す。

セル48直線部に設置された試料を狙って、周回電子ビームを廃棄する場合（ローカルバンパ軌道とRFパワーオフによる）、予測通りセル48直線部に設置したビームロスモニタではビームロス信号が観測され、入射部に設置したビームロスモニタでは信号が観測されなかった。一方、通常廃棄の場合（RF電圧の振幅を下げ、アボート磁石で鉛直

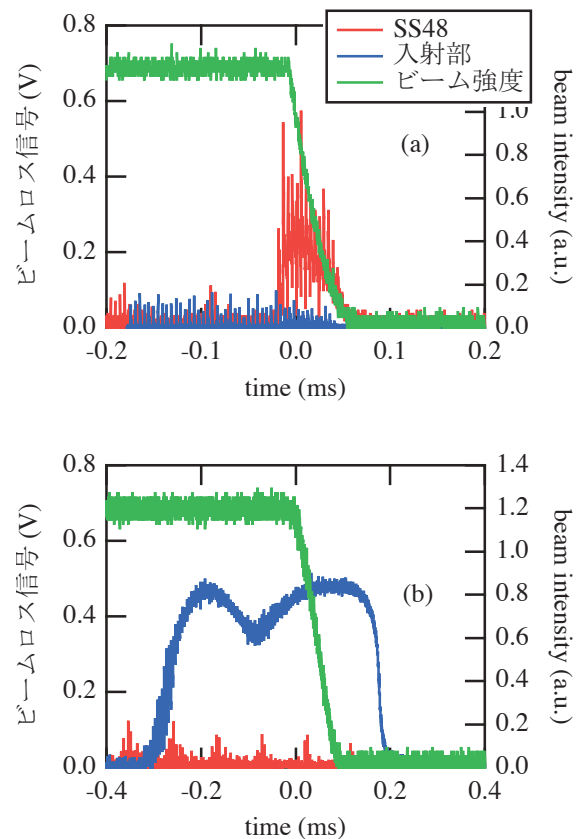


図13 SR入射部およびSS48におけるビームロス信号と電子ビーム強度。(a) SS48に設置された試料を狙った電子ビーム廃棄時、および (b) 通常の手続きによる電子ビーム廃棄時。電子ビーム強度はそれぞれ100mA

方向に電子ビームを蹴る)、ビームロス信号は入射部のビームロスモニタで観測されたが、セル48直線部のビームロスモニタでは観測されなかった。次にビームロス信号の立上がるタイミングについて、セル48直線部の試料を狙った廃棄の場合、ビーム強度が減少するタイミングからビームロス信号は立上がるが、通常廃棄の場合、電子ビーム強度の減少する約0.3ms前から立上がっている(原因調査中)。廃棄方法により「リング全周におけるビームロス分布」、および「ビームロス過程」が異なる事を示唆する結果が得られた。

今後、放射光がクロッチ・アブソーバに当たって出てくるバックグラウンド放射線などをビームロス信号から切り離すための改良、およびデータ収集系の整備を行う予定である。

(下崎)

1-6 不安定性抑制

1-6-1 シングルバンチモード結合不安定性の抑制によるバンチ電流の増大

一般に、蓄積リングにおいては、バンチあたりの蓄積電流、すなわちバンチ電流をある程度まで増やしていくと、バンチが水平および垂直にベータatron振動を開始し、そのため、入射時等に蓄積ビームの一部が失われ、バンチ電流が制限されるという現象が生じる。これはシングルバンチでのモード結合不安定性と呼ばれるバンチ自身で不安定となるビーム不安定性が発生したためであり、SPRing-8蓄積リングでは、この不安定性がバンチ電流の上限を2.5mAに制限していた。SPRing-8では、ベータatron振動を検出し、その振動をアクティブに打ち消して減衰させるbunch-by-bunchフィードバックを開発し、種々の不安定性を抑制してきているが、このモード結合不安定性の成長率は他の不安定性の成長率に比べて大きく、フィードバックの減衰力を上回っていたため、これまではこの上限を超えて蓄積することが困難であった。

特に、水平方向では、入射時のバンパ軌道の形成の際に水平方向のベータatron振動が強く励起されるが、フィードバックにはこの振動の振幅を受け入れるのに十分なダイナミックレンジが必要となっており、また、フィードバックの減衰力を高めるとダイナミックレンジの低下を招くため、広いダイナミックレンジと強い減衰力の両立が困難であった。これに対し、今回、水平方向について、その減衰力及びダイナミックレンジの積(これをここではフィードバック能力とよぶ)について増強を行い、また、同時に垂直方向の減衰力を強めることにより、水平、垂直の両方向での不安定性を抑制に成功し、バンチ電流の上限を12mAまで高めることができた。この水平方向の減衰力の増強には、これまで垂直方向に用いていた40cmストリップラインキッカーを水平方向のキッカーに転用し、また、垂直方

向のキッカーとして、これまで位置モニタとして用いられていた15cmストリップラインをキッカーに転用している。垂直方向については、そのストリップライン電極長が短くなったため、フィードバック能力については低下しているが、垂直方向には、バンパの形成時のベータatron振動の励起は小さく、大きなダイナミックレンジはさほど必要ではないので、減衰力を強めることができています^[17]。

なお、SPRing-8ではバンパ軌道の形成に伴う水平、垂直方向のベータatron振動の励起は、バンパ磁石の波形のアンバランスや磁場の傾きなどにより生成されているので、これを補正するための、補正パルス磁石の開発や、バンパ磁石の傾きを遠隔で操作する機構の開発など、励起を抑制する研究が精力的に行われてきている。これらの研究の成果により水平、垂直方向の励起が現状ではかなり抑制されており、低ダイナミックレンジでのフィードバックの運用が可能となっているが、以下に述べるように、ハイブリッドフィリングを達成するためには、さらに水平方向について励起を低減するか、フィードバックのダイナミックレンジを増やす必要がある。

1-6-2 大電流バンチを伴うハイブリッドフィリングの蓄積

バンチ電流10mAのバンチと、それを取り巻く小電流バンチのトレインからなるハイブリッドフィリングが放射光利用から期待されているが、このようなフィリングについて、バンチ電流感応型自動アッテネータを用いてこの試験を行った。結果として、10mAのバンチと0.3mA程度のバンチ電流のトレインとが共存するフィリングを達成したが、10mAのバンチに対するバンチトレイン部の相対位置の自由度に制限が残されている。これは前述のバンパ軌道形成時の水平方向のベータatron振動が強く励起される相対位置が存在し、この場所での振動がフィードバックのダイナミックレンジを超えているためと考察され、減衰力をたもったままダイナミックレンジを増やすために水平方向のキッカーへのパワーアンプの高出力化および、高効率型キッカーへの交換を検討している^[17]。図14にバンチ電流感応型自動アッテネータを示す。

1-6-3 RF ダイレクトサンプリングによるフィードバック

SPRing-8で開発したbunch-by-bunchフィードバック用のデジタル信号処理装置では、位置信号を入力するためのADCにアナログ帯域が750MHzと高周波まで対応できるデバイスをを用いている。これにより、従来では、ビーム位置モニタから得られる高周波信号を、ミキサ等を介してベースバンド(数kHz~250MHz)に周波数変換し、ADCに読み取らせていたところを、位置モニタからの高周波信号を直接ADCに読み取らせることが可能となった(図15)。これにより、これまでの回路構成を図16に示すように大幅に簡略でき、調整点数、コスト、場所の低減を実現すること

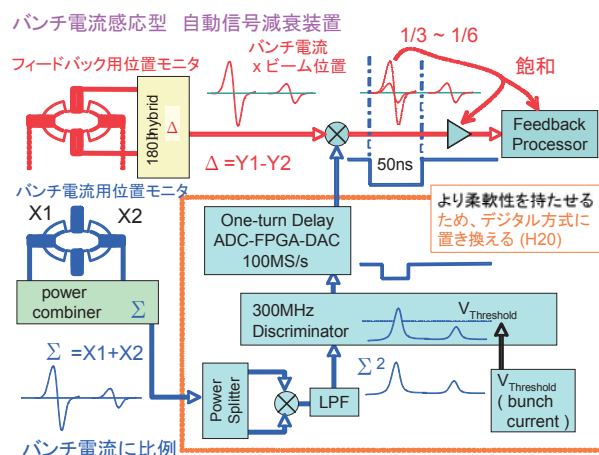


図14 パンチ電流感応型自動アッテネータ。もう1台の位置モニタ電極を用いてパンチ電流を計測し、それがある値を超えたときにミキサーの変調信号を変化させて位置信号を減衰させる。ミキサーでの変調信号の位置信号に対する遅延はかなり大きく、変調信号をADC-FPGA-DACボードにより位置周回分だけおくらせてミキサーで位置信号と出会うように調整している。

ができた。このような場合に問題となるのは高周波信号のサンプル時にADCのサンプリングジッタがもたらすノイズである。このノイズは高周波信号のレベルに比例するが、そのような信号は、位置モニタの信号の差分の信号（図15参照）を取り出す際にキャンセルしきれずに残留したものであり、これをもたらすコネクタや位置モニタ本体での反射を、減衰器を必要に応じて各所に配置することにより低減し、ジッターによるノイズの生成を抑制することができた^[18]。

(中村)

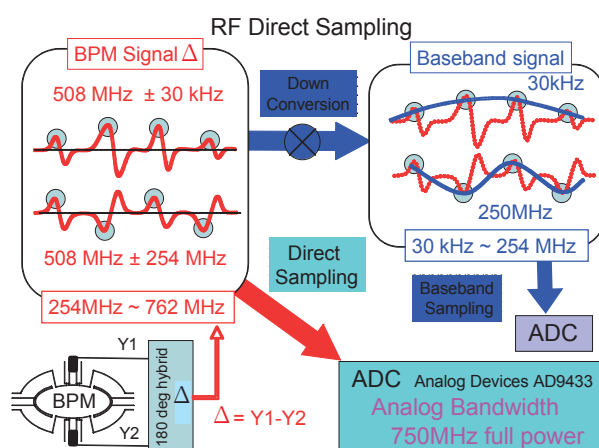


図15 RFダイレクトサンプリングの模式図。左下の位置モニタ(BPM)からの信号は、2つの電極からの差分信号へと変換される。その信号を、従来では、上の線のようにミキサーによりベースバンド信号へと周波数の下方変換を行い、それをADCでサンプリングしていたが、RFダイレクトサンプリングでは差分信号のピークの値を直接ADCで変換し、位置情報として用いている。

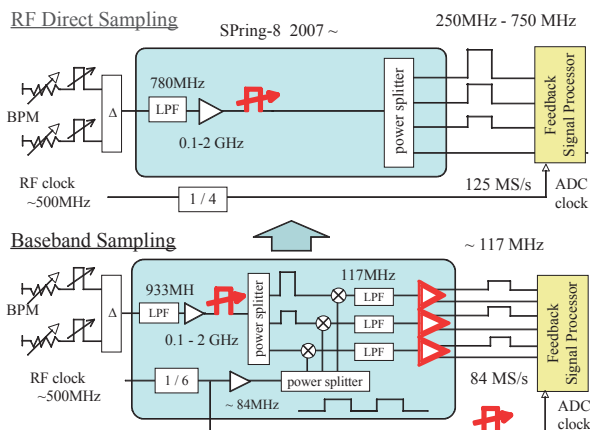


図16 RFダイレクトサンプリングによる回路構成の簡略化。下が以前に用いていた回路であり、上が現状の回路である。RFダイレクトサンプリングでは、ミキサー、それを駆動するLO信号生成系およびベースバンド用増幅器が不要となっており、調整点数、構成機器の低減、コストの低減が達成できている。

1-7 加速器診断

(1) 加速器診断 I

加速器診断 I では、偏向電磁石を光源とする可視光及び X 線領域の放射光を利用して、パンチ純度、パンチ長、ビームプロファイル等の測定を行っている。

パンチ純度モニタでは、昨年度整備したパンチ純度の自動測定機能を改良し、測定結果をデータベースに保存する機能、直近にビームが注ぎ足し入射された RF パケットを自動選択して測定を行うトップアップ運転との同期測定機能などを追加した。ユーザータイム中は常時継続的にパンチ純度を監視し、パンチ純度の安定化に貢献した。常時測定で蓄積されたデータの解析から、マルチパンチ部分と孤立パンチ群とが共存するいわゆるハイブリッドモードでの運転において、電流が大きい孤立パンチのカウン数が時間の経過とともに見かけ上減少していくこと、マルチパンチ部分の直後の孤立パンチのカウン数が実際の値より小さな値を示すことなど、パンチ純度の測定精度を向上させる上で課題のあることがわかってきた。これらについては、今後対策を行う予定である。

X 線プロファイルモニターでは、昨年度、ユーザー運転時の 100 mA 蓄積ビームのプロファイルの観測を継続的に行うと、フレネルゾーンプレートを用いて結像した電子ビームの X 像の検出器である X 線ズーミング管の入射光電面が X 線照射により劣化し、光電面の X 線検出感度が低下するという問題点が見い出された。この対策として光電面を改良するために、光電面の X 線照射試験を始めた。引き続き今後も、製作メーカーとの共同研究を行い光電面の改良に取組む予定である。

加速器診断 I で生成試験に成功した遠赤外線レーザー光と電子ビームとの逆コンプトン散乱による 10 MeV 領域の

ガンマ線生成^[19]については、蓄積リング直線部を有し相互作用領域を増大できる利点のある加速器診断Ⅱにおいて実用光源を目指した高強度の逆コンプトンガンマ線生成を行うために、レーザー等の装置を加速器診断Ⅱに移設する準備を進めた。

(2) 加速器診断Ⅱ

加速器診断Ⅱでは、直線部に設置した挿入型光源装置から出力される放射光を光学ハッチ1および2で利用可能とするために、輸送チャンネルの整備を進めた。光学ハッチ1では、昨年度に輸送チャンネル真空機器の設置と真空立上げを行った。引き続き今年度は、冷却水配管や圧空配管などユーティリティの整備を行い、挿入光源からの定格出力の放射光を導入して光学ハッチ1の放射線漏洩検査を完了し、蓄積リング機器の放射線損傷対策やフォトンアップバ等高熱負荷機器の開発などのために挿入光源の放射光を用いて照射実験を行うことが可能となった。光学ハッチ2では、昨年度製作した二結晶分光器、分光器から出射される単色X線をビーム診断などに利用するため大気中に出すのに用いるBe窓チェンバ、およびこれらを上流の光学ハッチ1輸送チャンネルと真空で接続する放射光輸送ダクト等の機器を設置して、真空の立上げとユーティリティの整備を行った。二結晶分光器は分光結晶の冷却に液体窒素による間接冷却機構を用いるが、液体窒素を分光器に循環供給するための液体窒素循環冷却装置および液体窒素輸送用真空断熱配管の設置工事を行った。輸送チャンネル機器の整備に伴い、従来の冷却水供給系統では光学ハッチ1および2で必要とする流量の冷却水を供給することが困難となってきたため、冷却水供給系統を蓄積リングの電磁石系と真空系と共通の冷却水系統であるL1系に変更する工事を行った。分光器に入射する放射光熱負荷を液体窒素冷却系の冷却能力内に調整するためには、放射光ビームを整形し不要な軸外光を除去することが必要である。この目的のために昨年度製作したXYスリットを、フロントエンドに設置した。また、フロントエンドのXYスリットや、光学ハッチ1および2の輸送チャンネル機器を遠隔で操作するための制御系の整備を行った。挿入光源の放射光を光学ハッチ2に導入して放射線漏洩検査を行うための準備として、輸送チャンネルの真空内部に取付ける放射光散乱体を製作した。光学ハッチ2の漏洩検査を、2008年4月に開始する予定である。

加速器診断Ⅱでは、挿入型光源装置が設置された直線部の上下流にある偏向電磁石の端部からの放射光（エッジ放射光）を観測することが可能である。直線部下流側の偏向電磁石の直下流に設置されている逆コンプトン散乱ガンマ線生成のための遠赤外線レーザー光導入用ミラーを、エッジ放射光を大気中へ取出すためのミラーとして利用し、ミリ波の領域である50-75GHzと75-110GHzの二つの帯域で検波器を用いてエッジ放射光の強度を測定した。図17に、蓄

積リングを単バンチビームで運転した時のエッジ放射光強度の測定結果を示す。ビームの周回毎に測定したエッジ放射光の強度が時間的に変動していたので、グラフの縦軸には時間平均した強度を示す。強度が時間的に変動していたこと、平均強度がバンチ電流に単純に比例してはいないことなどから、単バンチビームの電流を増大させた時に生じるビーム不安定性に伴って発生したコヒーレント放射光を検出したと考えられる。

(高野)

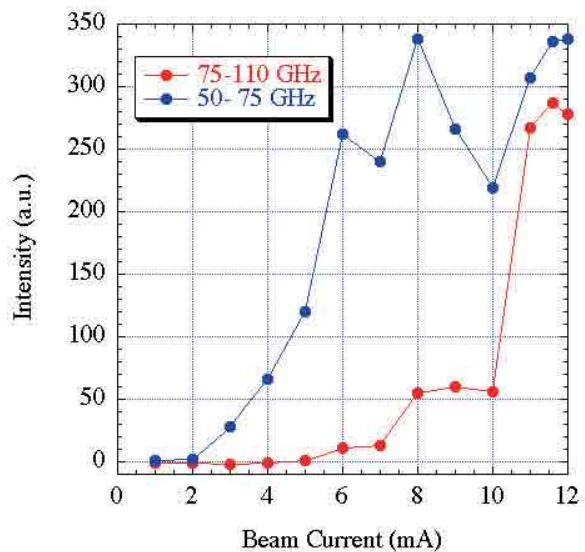


図17 単バンチビームで測定したエッジ放射光の時間平均強度とバンチ電流の関係。50-75GHzと75-110GHzの二つの周波数帯域での測定結果を示す

参考文献

- [1] H. Tanaka, et al.: Proc. of EPAC04 (2004) 222.
- [2] H. Tanaka, et al.: Proc. of EPAC06 (2006) 3359.
- [3] T. Ohshima, et al.: Proc. of EPAC04 (2004) 414.
- [4] H. Tanaka, et al.: Proc. of EPAC04 (2004) 1330.
- [5] H. Tanaka, et al.: Nucl. Instrum. Method A 539 (2005) 547.
- [6] M. Takao, M. Masaki, J. Schimizu, K. Soutome and S. Takano : 第4回日本加速器学会年会第32回リニアック技術研究会報告集 (Proc. of 4th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and 32nd Linear Accelerator Meeting in Japan) (2007) 622 (TP69).
- [7] SPring-8年報 (2006) p.19.
- [8] M. Masaki, M. Takao, K. Soutome and S. Takano : Proceedings of EPAC08, Genoa, Italy (2008) p.3035.
- [9] G. Guignard : Phys. Rev. E51 (1995) 6104.
- [10] M. Takao : Phys. Rev. ST Accel. Beams 9 (2006) 084002.
- [11] 大石真也、他：SPring-8 スタディレポート SR06-007.
- [12] 依田哲彦、他：「SPring-8電子蓄積リング真空チェンバの8GeV蓄積電子廃棄時における損傷の調査」、真

- 空 Vol. 48 (2005) pp.103-105.
- [13] T. Bizen : Nucl. Instr. and Meth. A 574 (2006) 401.
- [14] N. Catalan et al.: "Summary of Sessions A and D: Lattices, Beam loss Handling and Collimation & Diagnostics and Instrumentation", AIP Conf. Proc. 773, pp.449-451.
- [15] K. Wittenburg: "The PIN-Diode Beam Loss Monitor System at HERA", AIP Conf. Proc. 546, p.3.
- [16] H. Ikeda et al.: "A Diagnostic System for Beam Abort at KEKB", Proceedings of the 10th biennial European Particle Accelerator Conference (Edinburgh, UK 26-30 June, 2006), TUPCH057.
- [17] T. Nakamura, T. Fujita, K. Fukami, K. Kobayashi, C. Mitsuda, M. Oishi, S. Sasaki, M. Shoji, K. Soutome, M. Takao, Y. Taniuchi and Z. Zhou: "Filling of high current singlet and train of low bunch current in SPring-8 storage ring", Proceedings of EPAC08 (2008) 3284.
- [18] T. Nakamura, K. Kobayashi and Z. Zhou: "Bunch-by-bunch Feedback by RF Direct Sampling", Proceedings of EPAC08 (2008) p. 3287.
- [19] K. Kawase, Y. Arimoto, M. Fujiwara, S. Okajima, M. Shoji, S. Suzuki, K. Tamura, T. Yorita and H. Ohkuma : Nucl. Instr. and Meth. A 592 (2008) 154.

加速器部門
 運転・軌道解析グループ
 大熊 春夫

2. 加速器第1グループ

2-1 線型加速器の運転状況

「1-2 トップアップ運転」に述べたように、トップアップのためのビーム入射間隔は、2007年の11月より電流値を一定にするような任意の間隔となり、約20秒～5分に1回となっている。NewSUBARUでは蓄積電流によるが6、7秒に一度の入射を行っている。トップアップ入射中の入射ビームエネルギーの安定度は、0.01%rmsであった。NewSUBARUでの1.5GeV運転は現在日中のみ行われており、必要に応じて、1日1、2回の入射を行っている。

このように頻繁に入射を行うトップアップ運転中は、機器のフォールトやビーム調整によるビーム入射の中断を最小限にせねばならず、線型加速器には高度の安定度と信頼性が求められる。SPring-8線型加速器では、1998年よりビーム安定化のための改良およびフィードバック制御導入を進めてきており、2004年度末までにほぼその作業を終えた。また、ビーム入射中断を最小限にとどめるため、信頼性の向上にも精力的に取り組んでおり、2007年度には第二電子銃の設置を行った。

両蓄積リングに入射するビームの種類とその質は、昨年と同じく表1の通りである。両蓄積リング同時トップアッ

プ運転の際、入射経路切換における加速器パラメータの変更を最小限にするため、トップアップ入射専用の共通1nsビームを用意している。ただしNewSUBARU入射時は、入射路途中のスリットでビーム電流を約1/3に削減する。

2007年における線型加速器総運転時間は、約5,940時間であった。図1に2007年中のサイクル毎のインターロックフォールト統計を示す。左のグラフは1日あたりの回数で、平均すれば1日1回以下となっている。フォールトの原因のほとんどはクライストロンモジュレータによるものであるが、13台のモジュレータで二日に1回程度まで下がっている。後半のサイクルでも1回/日を超えるフォールトが見られるが、これは、入射要請のトリガーに対して、ビームが出射されなかった事象が起こっており、今も原因を調査中である。この事象は単発で生じるもので、トップアップ運転に対する影響は小さい。右のグラフがトップアップ運転の中断時間であるが、後半が回数の割に中断時間が少ないことがわかる。逆に前半では、回数の割に中断時間が長い。これは、クライストロンに関するフォールト発生後十分に間をおかずに変調器の高圧を投入して再び同じフォールトを起こしてしまうような、操作に起因する事例や、ノイズなどによる誤動作も多く含んでいる。後者については順次対策を施している^[1]。

表1 線型加速器のビームパラメータ (ECS動作)

	Synchrotron		Top-Up
Pulse Width	1 ns	40 ns	1 ns
Repetition	1 pps	1 pps	1 pps
Current	1.7 A	70 mA	660 mA
dE/E (FWHM)	0.45%	0.55%	0.32%
Energy Stability (rms)	0.02%	—	0.01%

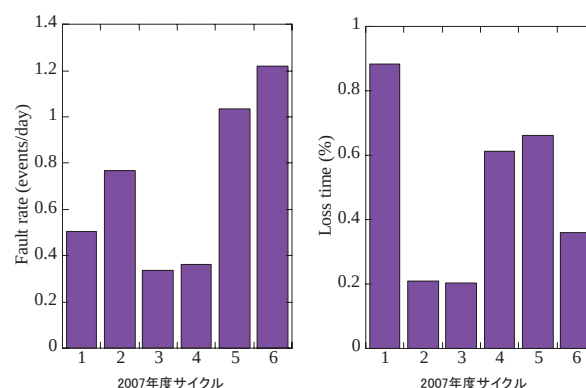


図1 インターロックフォールトの頻度

2-2. 加速器の改良

2-2-1 電子銃システムの二重化²⁾

電子銃カソードの交換には、真空排気作業、カソード活性化などを含め、約3日運転を停止しなければならなかった。この時間を大幅に短縮するために、電子銃システムの二重化を進行中である。

図2は第二電子銃を設置した電子銃部の写真である。第二電子銃からのビームは90度偏向電磁石を経由して、線型加速器に送られる。この偏向電磁石のポールピースは、集束効果をもたせるよう設計してある。また第一電子銃を運転時にも第二電子銃のビーム確認ができるように、第二電子銃直線部には各種モニタが配置されている。

2007年春に機器の製作を完了し、2007年の夏期停止期間

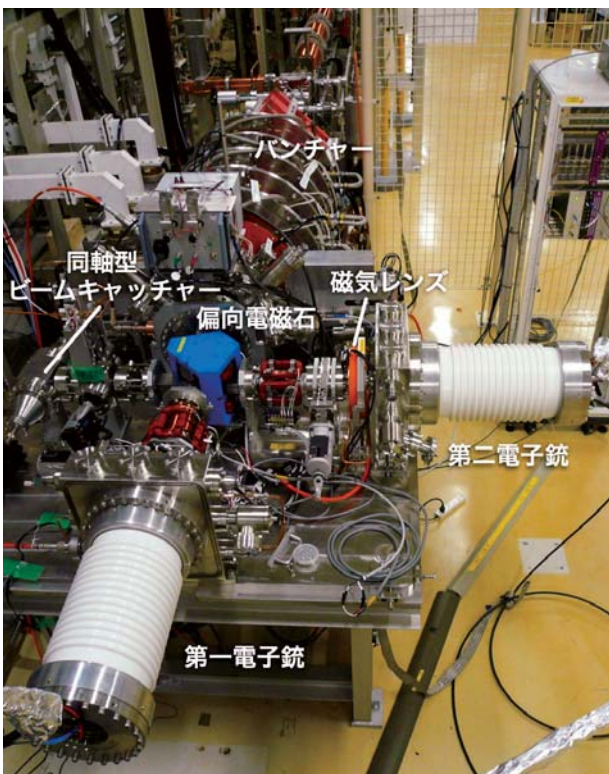


図2 第一および第二電子銃と輸送系

に設置を行った。その後、冬期停止期間にエミッション試験を行ったが第二電子銃からのビーム電流が確認できなかった。カソード自体に何らかの問題がありビームが出ないと判断し、2008年の年度末停止期間にカソードの再交換を行い、中間点検期間に再度エミッション試験を行った。その結果、第一電子銃と同程度のビーム電流値が確認され、シンクロトロンへのビーム輸送も問題なく行われることを確認した。

現時点では、第一電子銃のトラブル時は、現有電子銃電源および高圧デッキを第二電子銃につなぎ替えて使うことになるが、2008年度以降に専用の電源や高圧デッキを設置することにより、完全な二重化を行う準備を進めている。

2-2-2 電圧積分回路の開発³⁾

シンクロトロンおよびNewSUBARUへのビーム出射電荷量はCT (Current Transformer) からの信号電圧波形を時間ゲート内で積分することにより計測されている。現在、電圧積分回路にはSTANFORD RESEARCH SYSTEMS社のFast Gated Integrator and Boxcar Averager Moduleを使用している。

トップアップ運転を行う入射器では、蓄積リングの電流変動を押さえるために、より小さな電流での入射を行うことが要求される。現在の積分回路はノイズが大きく、小電流で高精度な電荷測定という更なる要求に応えることが難しくなっている。将来的には上記2カ所を含む線型加速器の全CTに電圧積分回路を設置する予定であるが、その際に入力ダイナミックレンジおよび積分時間幅の拡大も同時に行う予定である。そのため、より高精度な測定を目指して電圧積分回路を開発した。

回路のブロックダイアグラムを図3に示す。標準的な回路構成であるが、スイッチにGaAs FETを用いることにより、リーク電流の少ない高速なスイッチングが可能となった。試験の結果、現在用いている積分回路に比べ、ノイズレベルは1/12であることが確認された。従って、実機へのインストールを行えば、さらに小電流での入射にも対応できる見込みである。

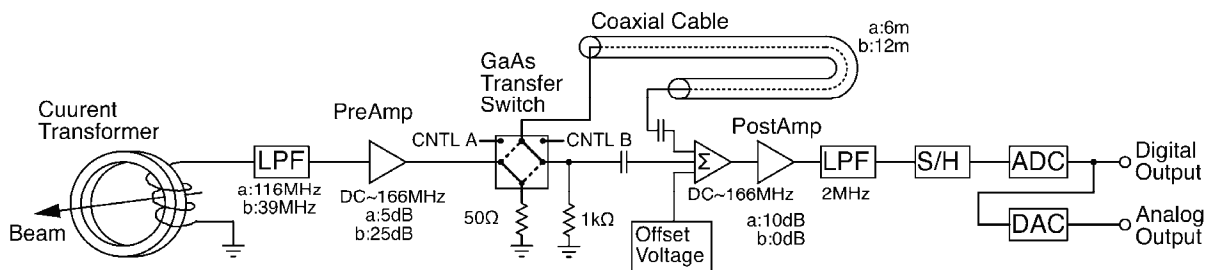


図3 電圧積分回路のブロックダイアグラム

2-2-3 高分解能タイミングモニタシステムの構築

線型加速器の電子銃トリガー系では、従来からタイミングがずれる、あるいはトリガーが途中で消失するという問題が発生していた。そこでVME上で動作するTDC (Time-to-digital converter) としてCAEN社のV1290N 16チャンネル マルチビットTDCを使用したタイミングモニターシステムを構築した。

V1290Nは1ch当り語長21bitを有し1bit当り25psの分解能をもつTDCである。現在は、タイミングシステムにおいてシンクロトロン入射時の電子銃およびデフレクタータイミングのモニターを行っている。シンクロトロンから送られてきたトリガー信号をch0のスタート信号とし、電子銃トリガーおよびデフレクタートリガーに関わる信号計8点をV1290Nにストップ信号 (ch1-8) として入力して、時間差を測定している。測定された時間差データはVMEから1秒に1度データベースに送られ、WEBでデータを確認することができる。

このモニタシステムを用いると、トリガータイミングのずれあるいはトリガー信号の消失などが起きた時に、それがタイミング系のどの部分で発生したのかがわかるため、原因箇所の特定に役立っている。

2-2-4 タイミングセレクターの高寿命化改良

利用運転では常時トップアップ運転が行われるようになり、またビーム電流の高安定化のために入射間隔が短くなってきている。これに応じて蓄積リングとNewSUBARUの入射の切り替え回数も増加する一方である。そのため、にわかにトリガー切り替えスイッチの寿命が問題になってきた。従来より使用しているトリガー切り替えスイッチは機械式リレーを使用したもので、リレーのスペックによれば切り替え寿命30万回と短く、現在の切り替え頻度では寿命は1年も持たない。

そこでリレーを半導体リレーに交換して対応しようと考えたが、半導体リレーのジッターは機械式リレーと比べて大きくなることが予想された。電子銃トリガー以外のモジュレータートリガーやモニター用トリガーはタイミングに厳しくないの、機械式リレーを半導体リレーに交換する改造を行うことにした。一方ジッターが問題となる電子銃トリガー用のトリガーセレクターには高耐久の同軸リレーを使用した新しいNIMモジュール ((株) デジテックス研究所17K93) を開発した (図4)。ここで使用されているリレーはアジレント社製の87106Aで500万回の寿命がある。

それぞれの回路のジッターを、サンプリングオシロスコープを用いて測定した。17K48A (半導体リレー使用) のトリガー信号ジッターはおおよそ20ps (1 σ) 程度、一方17K93 (機械式同軸リレー使用) のジッターはおおよそ2ps (1 σ) であった。



図4 高耐久リレーを使用した新しいガントリガー用トリガーセレクター (17K93)

2-3 低暗電流加速管の開発

SPRING-8蓄積リングに単バンチを蓄積するときのバンチ不純度は、シンクロトロンのRFノックアウトにより 10^{-10} 程度と、きわめて小さな値を維持しているが、そのためには線型加速器からシンクロトロンに入射される暗電流もできる限り小さくしておく必要がある。線型加速器の主な暗電流源の一つに加速管内の電界放射を原因とする電流があり、加速管を大気開放した後に著しい。そこで、電界放射による暗電流そのものが少ない加速管の開発を開始した。

我々の対策は次の通り。(1) 加速管ディスクアイリス部の最大表面電界強度を低減、(2) 加速管カップラ内のパルスヒーティングによる銅壁表面の劣化を回避、(3) RF電子銃空洞で実績のある化学エッチング法による銅壁表面の改質。

まず (1) については、ディスク部アイリス断面を従来の真円に近い形状から扁平率0.375の楕円に変更した。これにより最大表面電界を10%程度低減できる。図5は二つのアイリス形状を比較したものであり、楕円断面では表面電界が均一化されていることがわかる。電界放射電流を与えるFowler-Nordheimの式によれば、放射電流すなわち暗電流は、 $I \propto E^{2.5} \exp(-6.53 \times 10^9 \times \phi^{1/2} / \beta E)$ と表される。軸上最大加速電界を20MV/mとすると、従来の加速管ディスクアイリス部の最大表面電界 E は約3倍の60MV/mである。エッチング後の β を60と仮定して放射電流 I を計算すると、表面電界強度10%減の場合、放射電流は約1/10に下がることになる。

(2) については、従来の磁界結合型では結合孔の周囲でパルスヒーティングが発生し、その結果徐々に結晶が壊れて銅壁に微細なクラックが発生するなど暗電流発生の一因の一つとなっていたことが知られている。そこで、この問

題を回避するため局所的なパルスヒーティングの少ない電界結合型シングルフィードカップラーを新たに開発した。本カップラーは構造的に単純であるため、従来の構造と比べて加工調整が行いやすくなっている。さらにカップラー内電磁場の対称性も改善されるため、電子ビームのエミッタンス増大を抑えることができる。図6は、このカップラを採用したモデル空洞の図である。

2007年度、前述（1）および（2）を採用したRF特性測定用の低電力試験空洞を製作し、楕円断面アイリスおよび電界結合型カップラーの設計・調整技術を確立した。

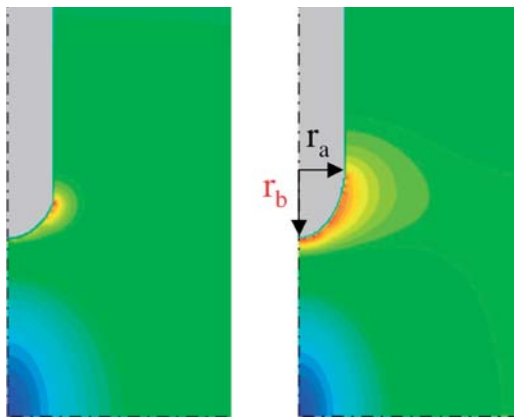


図5 加速管ディスク断面形状と電界強度分布。左は従来のほぼ真円形状（ $r=2.85\text{mm}$ ）、右は今回採用した楕円形状で、 $r_a=2.5\text{mm}$ および $r_b=4\text{mm}$

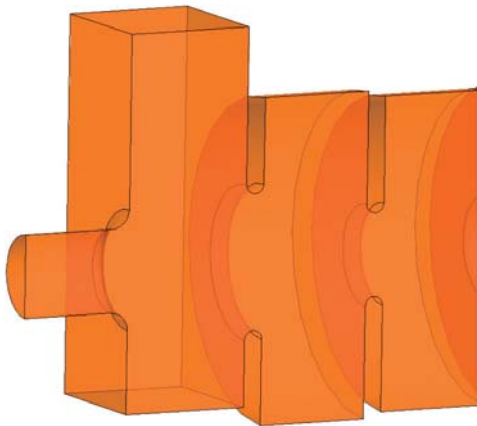


図6 電界結合型カップラのモデル。左の空洞が導波管、中央がカップリングセル、そして右がレギュラーセル

2-4 フォトカソードRF電子銃の開発

2-4-1 フォトカソード照射光源の開発⁴⁾

(1) パルススタッカーの性能向上

フォトカソードRF電子銃から 1nC のビームを低エミッタンスで発生するためには、RF電子銃のカソード照射用のレーザーパルスはパルス幅 20ps 程度の矩形波であるこ

とが必要である。SPRING-8では、パルス幅 2.5ps の紫外線レーザーパルスの分配・遅延・合成を繰り返し、最終的に交互に直交偏光したパルス列 8 個をつなげるパルススタッカーにより、 20ps の矩形形状レーザーパルスを生成している。

これまでカソード面にて 2.5ps のパルス幅が完全には得られなかったため、合成されたパルスの平坦部に若干のモジュレーションが残っていた。この問題に対処するために、今年度 2.5ps 幅のレーザーの生成用として、DAZZLERを導入した^[4]。DAZZLERはAO変調器の一種で、回折された光の二次分散を調整することができる。これを利用することによりパルス圧縮後に高調波変換されて生成される 3 倍波のパルス幅を調整することができる。図7は、RF電子銃が生成した電子ビームバンチの時間軸分布をエネルギー分布に変換して観測した例である。調整前はリップルが残るエネルギー分布が、調整後には滑らかになっていることがわかる。このことは電子ビームの時間分布が滑らかになり、ほぼ理想的な矩形形状の時間プロファイルを得ていることを示している。

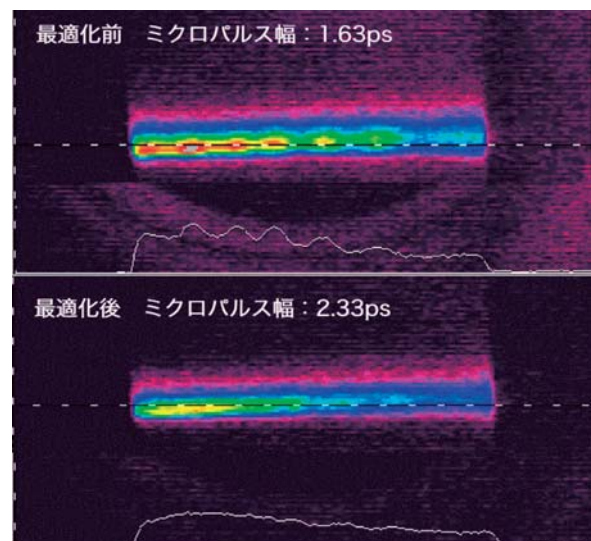


図7 DAZZLERの最適化によるフラットなレーザーパルスの生成

(2) パルススタッキングロッドの開発

パルススタッカーよりもシンプルなパルス遅延および合成が可能な光学装置としてパルススタッキングロッドを開発した。図8に示すパルススタッキングロッドは 3 つの長さの異なる複屈折結晶からなる。結晶の光学軸に対して 45° 偏光したレーザービームを入射すると、電場の方向が結晶軸に平行常光線と垂直な異常光線間で屈折率の違いにより遅延に時間差が生じ 2 つの直交偏光したパルスに分離する。遅延の時間差は結晶の長さ按比例する。続く 2 番目の結晶で 4 つのパルス、さらに 3 番目の結晶で 8 つの交互に直交偏光したパルス列に分離できる。このような仕組みで

2.5ps UVパルス 8 個を幅20psのパルス列に配列できる。パルススタッキングロッドはパルススタッカーと比べ光学部品が少なく、また原理的に重ね合わせのずれが少なくビームの調整が容易である点で優れている。

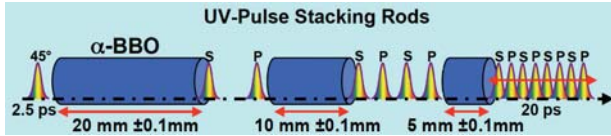


図8 UVレーザーパルススタッキングロッドの原理

2-4-2 電子ビームの非対称性の原因の追及^[5]

現在レーザーパルスは、円筒形に形状整形してカソードにほぼ垂直に入射されている。そのため、カソードを飛び出す電子ビームの形状も対称な円筒形のはずである。それにも関わらず、実験による観測ではy方向エミッタンスがx方向エミッタンスよりも1.5～3倍程大きい。この非対称性の原因として考えられたのが、非対称構造を持つ加速管カップラーセルの影響、および電子ビーム軸近傍に設けられたレーザービーム垂直入射用のミラーである。

(1) 加速管カップラーセルの影響

RF電子銃下流にある3m加速管の入口および出口でのRFカップラは構造的な非対称性を有するため、内部の電磁場にもxとyの非対称性が存在する。電磁場解析コードHFSSを用いて計算しても、 H_x と比較すると H_y の一様性が悪い事が明らかであった。このことは、xエミッタンスの方がyエミッタンスよりも大きくなる事を示唆し、yエミッタンスがxエミッタンスより大きいという実験事実とは矛盾する。さらにビームシミュレーションによれば、両エミッタンスの差はほとんどない。しかし念のため加速管を90度回転させ、カップラーセルがエミッタンス非対称性の原因なのかどうかを実験的に確かめた。

その結果、yエミッタンスの方がxエミッタンスよりも大きいという傾向は変わらなかった。このことからカップラーセルはエミッタンスの非対称性の原因ではないと結論づけられる。

(2) レーザー垂直入射ミラーの影響

次に非対称性の原因と考えられるのはビーム軌道の近い場所に位置する垂直入射ミラーである(図9)。垂直入射ミラーはカソード面から560mm下流にあり、ビーム軸から水平方向に約6mmのところミラーホルダーの端がくる配置になっている。ミラーホルダーによりビームが削られたり、電子ビームがミラーのそばを通過する際にウェイクフィールドが発生しその影響を受ける可能性が考えられた。

そこで電磁場解析および荷電粒子軌道解析コードMAFIAをつかって、ビーム軸近くに金属板をおいたモデルについてウェイクフィールドの影響を計算した。

計算結果(図10)から垂直入射ミラーまではxとyのエ

ミッタンスはほぼ同じであるが、垂直入射ミラーでのウェイクフィールドによる力を受けて、yエミッタンスは増加することがわかった。

次にこれをさらに検証するため、垂直入射ミラー直後に、ミラーホルダーを模したダミープレート鉛直方向に挿入し、x方向とy方向の形状ができるだけ同一となる状態でエミッタンス測定実験を行った。その結果、図11のようにほぼ対称的なエミッタンス測定値が得られた。

以上の計算および比較実験から、エミッタンスのxy非対称性は垂直入射ミラーが原因であると結論づけられる。従って非対称性を改善するためには現在の入射方法を変更することが必要であり、そのために今後ホローミラー入射光学系並びに垂直入射ミラーをチャンバー外部に設置するような光学系の開発を進めていく予定である。

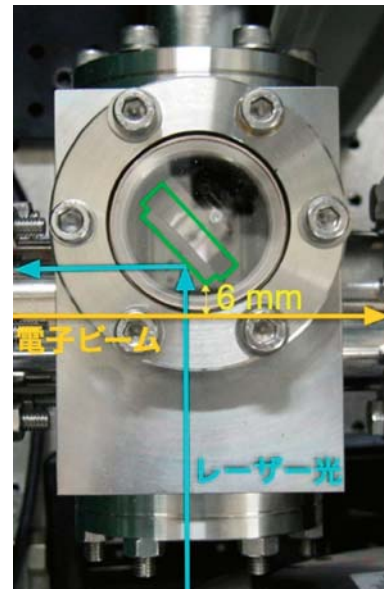


図9 垂直入射ミラー

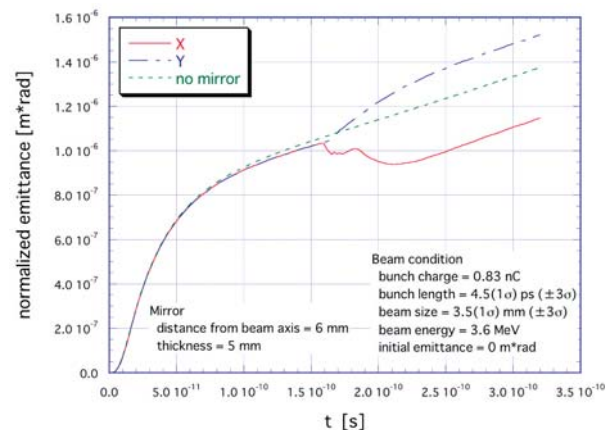


図10 MAFIAによるエミッタンスの計算結果

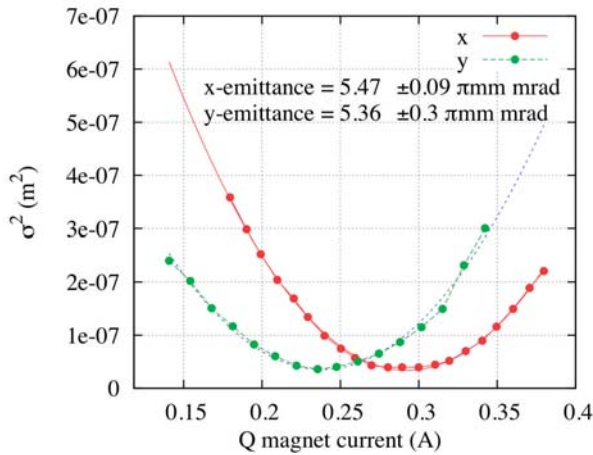


図11 Qスキャン法によるダミープレート装着後のエミッタンス測定結果

2-4-3 RF電子銃が生成する短パルスビームの周回実験

RF電子銃の持つ低エミッタンス、短パンチ特性を生かした利用方法の一つとして、NewSUBARUでの短パンチビーム周回実験を検討している。NewSUBARUは、偏向電磁石の一部が逆ベンドになっておりモーメントコンパクションファクター α をほとんど0にすることができる。この条件では短パンチビームは周回してもパルス長が長くないので、短パンチ電子ビームをNewSUBARUで多数周回させ、X線ポンププローブ実験など短パンチ放射光の利用が可能である。

SPRING-8の蓄積リングにおいても将来の短パンチ周回による短パルス放射光の発生および利用が検討されているが、1GeV線型加速器の短パルスビームを利用することはできない。なぜなら、短パルスビームをシンクロトロンで加速する過程でパンチ長は伸びてしまうからである。しかしNewSUBARUを利用すれば、短パンチ周回の先行的な予備実験を行うことができる。

RF電子銃からNewSUBARUへ短パルスビームを入射するためのビームトランスポート案を図12に示す。RF電子銃下流の加速管で約30MeVまで加速し、後段の加速管でエネルギーチャープを与えた後、90度偏向電磁石によりパンチ圧縮を行い線型加速器に入射する。現在のところ1nCの電子ビームを300fs (1σ) までパンチ圧縮できる解が見つかったが、さらに効率よく圧縮できる光学系を検討中である。

(出羽)

2-5 フェムト秒パルスX線の生成

フェムト秒パルスX線生成のためには超伝導クラブ空洞を使用し、電子ビームを偏向する高周波電界の位相を高精度で制御する必要がある。その実現のために必要な要素技術の開発をこれまで続けてきた。2007年度は超伝導空洞の共振周波数を調整するチューナと移相器の研究開発を行った。

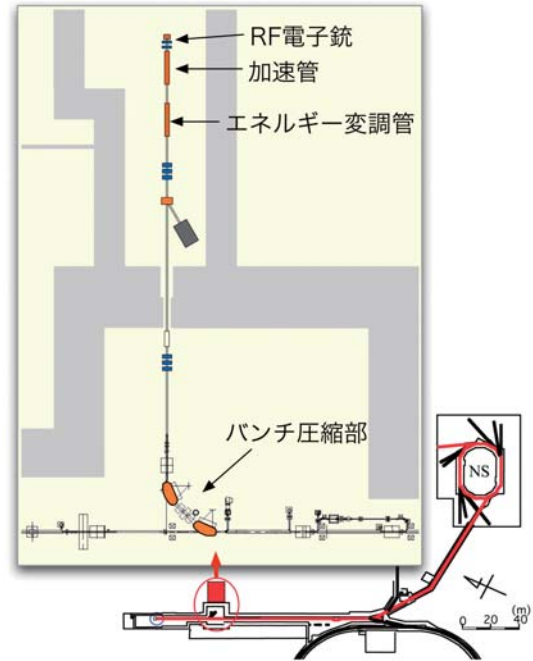


図12 RF電子銃からNewSUBARUへのビームトランスポート案

(1) 超伝導空洞のチューナ（共振周波数調整機構）の試作と試験

超伝導クラブ空洞はわずかな空洞の形状変化で共振周波数が変化し、その結果として空洞内の電磁場の位相が変化する。従って、空洞内電磁場の位相を高精度に制御するために、外部からの振動などで空洞の形状が容易に変化しないように空洞の剛性が高くなるように設計されている。一方、クラブ空洞の共振周波数の調整は空洞の形状をチューナで変形させて行われる。このため、剛性の高い空洞のチューナは大きな力が発生でき、かつ微小な調整ができる機械構造である必要がある。今年度は高剛性空洞に対応したチューナを試作し、その性能試験を行った。その結果、チューナの剛性や発生力は十分と考えられるが、性能試験のための治具の剛性に問題があり、治具を改良して更に試験を行う必要がある。

(2) 高速大電力移相器の改良機の性能確認

この移相器は超伝導空洞の位相変動を抑制するために使用される。導波管の中に挿入された磁性体に導波管の外から磁場を印加することにより、大電力高周波（CW300kW, 508MHz）の位相を高速制御（ $\pm 1\text{deg}$ 、目標10kHz）する。最初の試験で大電力領域において性能が劣化する現象が見られたため、磁性体の形状と磁場透過窓の改良を行った。大電力試験（図13）の結果、最大電力（300kW）においてもほぼ設計どおりの性能が得られることが確認された。しかし、磁場透過窓の改良の代償として周波数特性の劣化が見られ、今後の課題となった。

(3) 移相器用電源の開発

上記の移相器は誘導性の負荷であり、位相を高速制御し

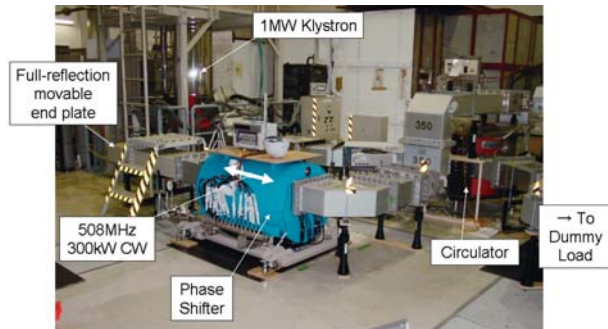


図13 高速大電力移相器の改良機の性能試験

ようすると通常の電源では駆動できない。そこで新たに階調制御方式の電源（500V、 ± 60 A、10kHz）を開発し、昨年度はそのハードウェアの製作を行った。この方式はDSPにより制御され、今年度はその制御ソフトウェアを制作実装して基本的な動作確認を実施した。しかし、設計時のシミュレーションで得られた性能を達成するためには、今後、雑音対策や帰還パラメータのチューニングが必要である。

(中里)

参考文献

- [1] 鈴木、他：“SPRING-8線型加速器の現状”、第5回加速器学会・第33回リニアック技術研究会、2008、東広島。
- [2] 小林、他：“SPRING-8線型加速器の電子銃2重化システム”、第5回加速器学会・第33回リニアック技術研究会、2008、東広島。
- [3] 柳田、他：“ビーム電化測定用電圧積分回路”、第5回加速器学会・第33回リニアック技術研究会、2008、東広島。
- [4] H. Tomizawa, et al.: "REVIEW OF MANIPULATION RASER TECHNOLOGY ON 3-D PULSE SHAPE & POLARIZATION FOR THE CONVENTIONAL PHOTOCATHODE RF GUN AND THE FUTURE Z-POLARIZATION SCHOTTKY EMISSION GUN", FEL2008, Gyeongju, Korea.

- [5] 水野、他：“フォトカソードRF電子銃における水平垂直エミッタンス非対称性の原因究明”、第5回加速器学会・第33回リニアック技術研究会、2008、東広島。

加速器部門

加速器第1グループ

花木 博文

3. リング加速器グループ

3-1 ブースターシンクロトロンの間欠運転による使用電力削減への取り組み

トップアップ運転時の蓄積リングへのビーム入射は蓄積電流値を一定に保つように数十秒～1分毎に行われている。ブースターシンクロトロンでは電力使用量の節約を目的として、ビーム入射時以外の電磁石電源のパターン励磁を停止する運転（間欠運転）の試験運用を行っている。図1に間欠運転時の電磁石の励磁パターンを模式的に示す。ブースターの偏向・四極・六極の各電磁石電源は1Hzのパターンスタート信号を受けてビームエネルギー1GeV～8GeVに相当するパターン励磁を行っているが、トップアップ運転モードのビーム入射時のみ線型加速器へのガントリガー信号に連動してパターンスタート信号が出力されるようにタイミングシステムを変更した。ビーム入射が行われない間は1GeV相当のDC出力のまま待機状態となる。1分間隔で2発のビーム運転という条件で試験的に間欠運転を行った結果、偏向電磁石の連続運転時の電力量1200kWhが210kWhへ、四極電磁石については300kWhが70kWhへと大幅に低下できることが確認されている。

ただし、間欠運転をユーザー運転に適用するには問題が残されている。ブースターは蓄積リングへのビームの積み上げ時には1Hzの連続運転を行い、その後トップアップ運転モードに移行してから間欠運転に切り替わる。この運転形態の変更による電磁石通電時間の変化が電磁石のコイル温度、ならびに電磁石や電磁石電源の冷却水温度を変化させ、それに伴いベータートロンチューンが変化することがわかっている。蓄積リングでの高いパンチ純度を達成す

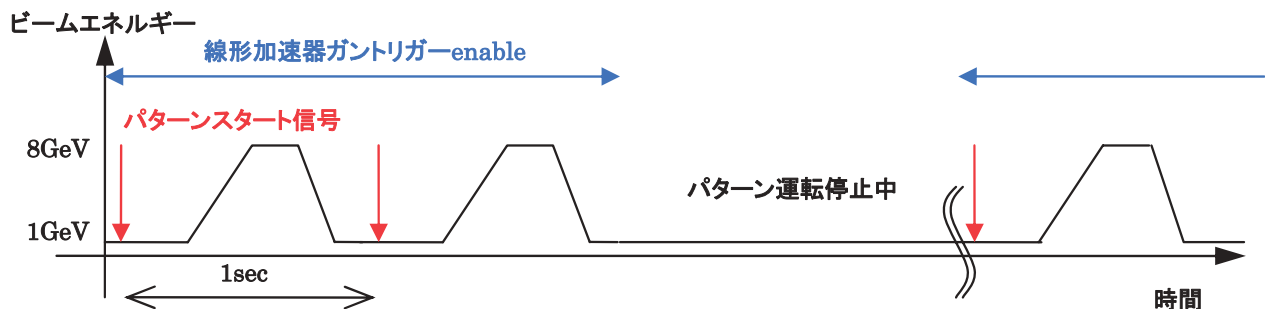


図1 間欠運転時の電磁石電源の励磁パターン模式図

るために、ブースターではベータトロン周波数に共鳴した高周波を用いて不要なバンチを除去するRFKOを行っている。連続・間欠運転の切り替えによるベータトロン振動周波数の変動はRFKOの効率を低下させ、バンチ純度の悪化を引き起こす。このため、現在は高いバンチ純度が必要とされないマルチバンチのフィリング時にのみ間欠運転を行っている。今後は運転形態に影響されることなく励磁電流を一定に保つような対策を検討する予定である。

また、チューンの変動を抑えるための手段としてビームエネルギーが1GeVのフラットボトムの領域においてもCOD補正を検討中である。現在のステアリング電磁石は80台中61台が単極型で、主に8GeVフラットトップでのCOD補正とビーム出射軌道の安定化を目的としている。フラットボトムでもCOD補正を行う場合、ステアリング電源は極性が反転可能な双極型である必要があるため、今後は全ての電源を双極型へ変更する予定である。

(青木)

3-2 SSBT系のビーム軌道安定化

トップアップ運転時に挿入光源のビームによる損傷等を防ぐため、蓄積リングへの高いビーム入射効率を安定に保つ必要がある。さらに蓄積する個々のバンチ電流の均一性を保つため、ビーム損失等による入射ビーム電流量の変動をできるだけ少なくする必要がある。入射効率低下やビーム電流値の変動の原因の一つとして、ブースターからのビーム出射軌道の変動やビーム輸送系（SSBT系）でのビーム軌道の変動が考えられる。SSBT系の上流部には水平方向のビームサイズを小さくし、蓄積リングへの入射軌道を周回軌道に近づけることで入射効率を高めるためのコリメータが設置してある。ブースターからの出射軌道はその変動がコリメータ入射位置のずれとなり、ビームの通過率に大きく影響するため、蓄積リングへの入射電流値を安定化させるためには非常に重要である。この軌道変動を抑制するためSSBT系電磁石電源の出力電流の変動を中心に原因の調査を行い、蓄積リングへのビーム入射軌道の安定化を行っている。

SSBT系電磁石電源出力の主な変動原因としてシャント抵抗を使用した出力電流検出部に劣化等の問題があると推測し、今年度の夏期停止期間を目処に偏向電磁石と四極電磁石全ての電源を、DCCTを用いたフィードバック系へ改造する事により電源出力の安定化を試みた。励磁電流の安定度はシャント抵抗使用時には1ヶ月間で 1×10^{-3} 以上の出力変動が観測されていたが、DCCTに変更後には短期的な出力変動を抑制することができた。図2はSSBT系偏向電磁石（BM1-ss）のDCCTへの変更後の電流値の変化を示す。短期的な変動は抑制できているが、1年間にわたり 1×10^{-3} 程度の長期的な変動が観測された。電流安定度には外気温との相関が見られるため、電源室の温度変化が影響している可能性が考えられる。今後はSSBT系電源室およ

び出射パルス電源室の温度が電源に与える影響調査を行い、対策を検討する予定である。

(青木)

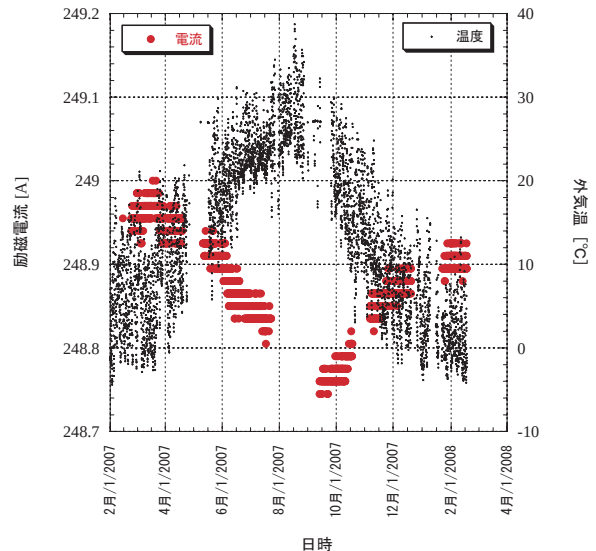


図2 SSBT系偏向電磁石電源（BM1-ss）の電流値の変化

3-3 SSBT系での垂直方向エミッタンス増大の抑制

蓄積リングへの入射ビームのプロファイルは水平軸に対し傾きをもっている。プロファイルが傾くと垂直方向ビームサイズは実効的に大きくなり、これにより入射効率が悪化する可能性がある。これまでの観測から、ビームの垂直方向エミッタンスはシンクロトロン出射部に比べて蓄積リング入射部で1桁以上大きく見えている。原因の一つとして、SSBT系の2台の垂直方向偏向電磁石（BV1、2）両端部のスキュー六極成分が考えられる。スキュー六極磁場があると垂直方向ビームサイズが実効的に大きくなるだけでなく、ビーム軌道の変動に伴いエミッタンス増大の度合いが変化するため、プロファイルの傾き角度はサイクルごとに変化している。

スキュー六極成分を補正するため、2006年度にそれぞれの偏向電磁石両端部に合計4台のスキュー六極電磁石（SK1～4）を試験的に設置した。これにより、傾き角を0にすることはできなかったが、スキュー六極電磁石の積分磁場を 0.2m^2 程度に設定すると、傾き角はBV1、2端部での軌道によらず一定値になった（図3）。従って、この磁場に設定すると偏向電磁石両端部のスキュー六極磁場は補正され、軌道変動に伴うプロファイルの傾き角度の変化を抑制することがわかった。しかしながら、これらの電磁石および電源のDC運転可能な定格磁場（ 0.086m^2 ）では補正できない。電磁石を改造し電源も定格の大きいものに置き換え、発生磁場を3.5倍（ 0.3m^2 ）とした。2008年度のマシン

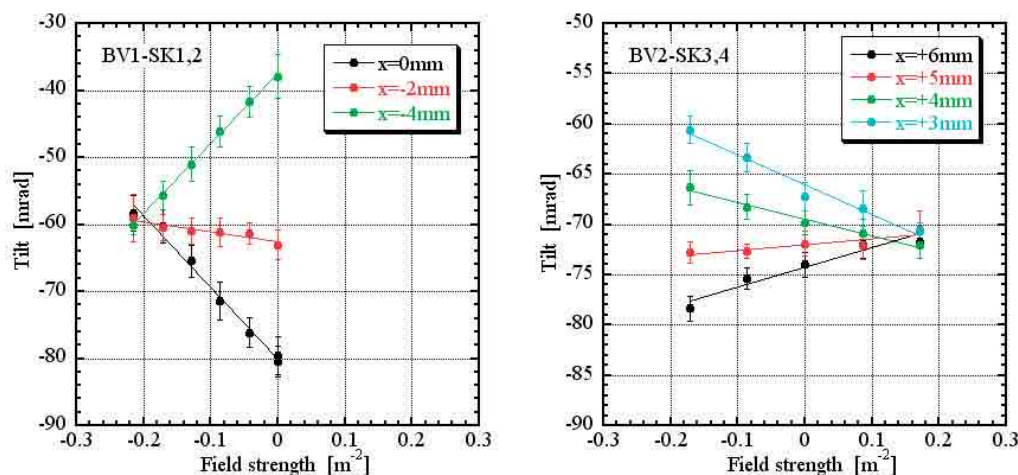


図3 垂直方向偏向電磁石両端部のスキュー六極電磁石の積分磁場に対する蓄積リング入射部でのビームプロファイルの傾き角度。左がBV1両端部のスキュー六極電磁石SK1、2による補正、右がBV2両端部のスキュー六極電磁石SK3、4による補正の結果を示す

スタディにより再度スキュー六極電磁石の最適なパラメータについてサーベイし、10月以降のユーザー運転に適用する予定である。また、スキュー六極成分を補正してもなお残るプロファイルの傾きについて、原因の調査を行う。

(青木)

3-4 ブースターシンクロトロンの経年劣化と対策

以下に示すような主に機器の経年劣化によると思われるトラブルが多数発生している。これらについての修理の状況や今後の対策について記述する。

3-4-1 偏向電磁石部ダクトの真空リーク

偏向電磁石部の真空ダクトに真空リークが見つかった。これまでに微少なリークは観測されていたが数分で塞がってしまうため、リークテストが行えず場所の特定ができなかった。今回のリークは長時間持続していたため、リーク箇所が偏向電磁石部のダクトであると確認することができた。ダクトは厚さ0.3mmの薄肉状のステンレスパイプに補強リブをロウ付けした構造である。調査の結果、ロウ付けが不十分な部分がハンダ付けで補強されており、この部分のフラックス除去が不完全であったためにフラックスの成分である塩素が残留し、隙間腐蝕あるいは孔蝕を引き起こしたものと判明した。全64台の偏向電磁石用ダクトのうち約半数がハンダ付け補修を行われており、今後もこれらが真空リークを引き起す可能性が高いため予備品の製作を含めた対応策を検討中である。

3-4-2 SSBT系電磁石電源のトラブル

SSBT系偏向電磁石電源 (BM2ss) が定格の励磁電流に達しなくなるトラブルが発生した。原因はオートトランスの動作不良であり、螺旋溝付きロッドの回転により移動す

る摺動子 (ブラシ) がグリス不足によりスムーズに移動できない状態であった。修理では磨耗した駆動部分の交換とグリスアップを行った。また、同電源にて電磁接触器に接続されている400V電源供給ケーブルの焼損による欠相異常のトラブルも発生している。圧着端子部分の焼損が激しいため、圧着の度合いが弱かったか端子のネジ止めの緩みが原因と思われる。今後はこのような長期運転の影響によると思われるトラブルの発生を防止するため、点検内容の見直しを行う予定である。

3-4-3 キッカー電磁石電源のトラブル

出射キッカー電磁石電源のサイラトロン故障による電源停止が発生した。サイラトロンの故障はグリッド線の断線であり、10年以上の長期に渡り使用したものであるため、経年劣化の可能性が疑われる。出射キッカーは全3台で機能しているため、1台分の電源が故障してもトップアップ運転が継続できるよう、残り2台の出射キッカー電磁石電源とバンパ電磁石電源の出力を調整してビーム出射が可能なパラメータを設定することによりビーム運転停止時間を短縮化できるようにした。今後、他の電源において長期間使用しているサイラトロンはマシン停止中に予備品と交換する予定である。

この他のトラブルとして、キッカー電磁石は真空容器に収納されており、真空度の悪化により電源を停止させるインターロックシーケンスが組まれているが、ビーム運転中の瞬間的な真空悪化により電源が停止する現象がたびたび発生し、その度に20分程度のビーム運転停止を余儀なくされていた。この対策として、真空度の悪化が30秒以上持続した場合のみ電源を停止させるインターロックシーケンスに変更することで運転時間のロスを少なくした。

(青木)

3-5 放射光アブソーバの改良

蓄積リングの偏向電磁石から出る放射光のうち、実験に使用する放射光は1%弱で、残り99%は蓄積リング内に設けた放射光アブソーバで吸収し、冷却水でそのエネルギーを取り去っている。蓄積リングで加速器部門が担当している4種類のアブソーバのうちの1種AB1で不具合が見つかり調査を行った結果、構造的に問題があることがわかった。そのため、新たに設計・製作を行った。

蓄積リングのセル48で使用していたAB1を配置変更のため外したところ、チェンバ内面に銅が蒸着しているのが見つかった(図4)。アブソーバの受光体(実際に放射光が照射する部分)の無酸素銅部品の表面が荒れ、結晶粒は粗大化していた。かなりの高温になっていたと思われ、受光体の銅がチェンバに蒸着したことがわかった。また、挿入光源の設置に伴い撤去された他のAB1を観察した結果、受光体の表面の荒れ、結晶粒の粗大化が観察された。AB1は、外径40mm、内径30.0+0/-0.01mmリング状の無酸素銅製の受光体の内径部分にアルミ製冷却管(外径30.08±0.1mm)が冷やしバメで接合されている。この冷やしバメによる受光体と冷却管の密着がアブソーバとしての冷却健全性の鍵となる。撤去されたAB1の観察で、受光体が手で動き冷却管と密着していないものも確認されたため、解体



(a)



(b)

図4 (a) AB1を上流から見る。90mm×40mmのビーム室右側(リング外側)の銅色の部品が受光体である。(b) AB1受光体の拡大。受光体の結晶粒が粗大化しているのが見られ、アルミチェンバ内面に銅が蒸着している

調査を行った。

調査の結果、受光体と冷却管は簡単に外れ(図5)、冷やしバメが効いておらず密着していないことによる熱伝導の劣化が受光体の温度上昇、蒸着の原因とわかった。解体調査した他の5体も、いずれも無酸素銅製受光体の内径が設計値そしてアルミ製冷却管の外径よりも若干大きくなっており、受光体が容易に外れる物もあった。

アルミ-銅の組合せ円筒モデルで計算すると、加工公差範囲内で製作されていると140℃ベーキングを行っても問題はないが、加工公差を0.03mm外れるとアルミ-銅の相互圧力が無酸素銅の引張強度を上回ることが確認された(図6)。

この不具合改善と、蓄積電流200mA対応のために、新たにAB1および同じ構造のAB5の再設計を行った。図7に新型のAB1のカットモデルを示す。受光体とチェンバを一

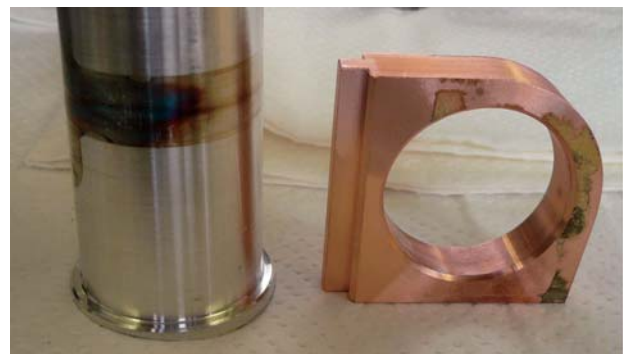


図5 冷やしバメで組み立てた銅製受光体とアルミ冷却管が容易に外れた

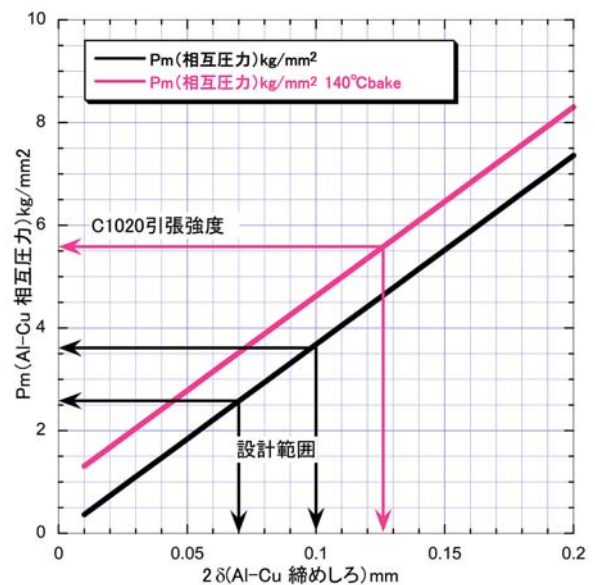


図6 冷やしバメによる締めしろ(アルミ製冷却管外径-銅製受光体内径)と相互圧力の相関。締めしろが0.13mmを超えると、ベーキング時に相互圧力により銅製受光体の引張強度を越し、冷やしバメが緩む恐れがある

体で、無酸素銅ブロックから削り出す構造とし、アルミフランジ、SUSペローズと取り合うため、両端は熱間水静圧成形HIP（Hot Isostatic Pressing）でアルミ（A5052）、SUS316Lと接合した。解析の結果、蓄積電流200mAでもAB1の最高温度は約90℃、AB5は約120℃で問題はない。2007年度に新型のAB1とAB5を製作した。2008年度から順次交換予定である。幸いにもAB1は挿入光源が設置されていないセルのみにあるため2008年度中に交換を終える予定である。AB5は長直線上流セルの4セルのみにあるが、長さ3.3mのアルミ製チェンバに溶接されているため、長期停止期間に1本ずつの交換となるため、2009年度に交換終了予定である。また、同構造のAB2については、パワー密

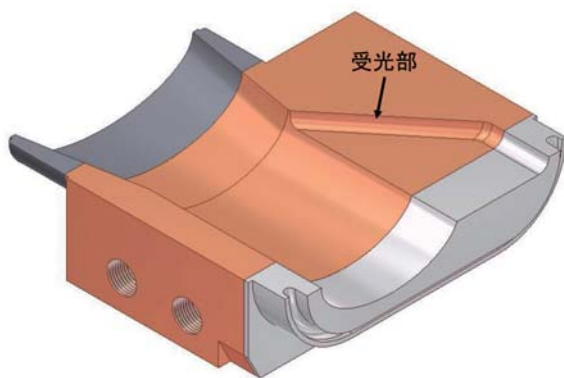


図7 新型AB1の構造。受光部とチェンバを無酸素銅一体で作り、さらに上流のアルミフランジ、下流のSUSペローズと溶接するため、アルミとSUSとHIP接合を行った

度がAB1の1/3であり、チェンバ外面温度を調査したところAB1が110℃に対し、AB2は50℃以下のため、すぐに損傷の恐れは無いと思われる。今後調査を行い、必要に応じ、改造・交換を行う。

(大石)

3-6 BPM信号処理回路のフィリングパターン依存性対策

2006年夏期停止期間中にビーム位置モニタ（BPM: Beam position Monitor）のCOD（Closed Orbit Distortion）測定用の信号処理回路を更新し、夏期停止期間明けから運用を開始している^[1]。運用開始とともに、ビーム位置測定の性能評価を行った結果、分解能・測定速度などには顕著な向上が見られたが、蓄積リングのフィリングパターンを変更した際、実際の軌道は変化していないと判断されるにもかかわらず、ビーム位置が最大で100μm程度ずれて観測されてしまうという大きなフィリングパターン依存性があることがわかった。この量はSPring-8蓄積リングBPMの要求性能である分解能1μm以下、フィリングパターン等測定条件の変更に対する再現性10μm以下に比べ非常に大きな量となっている。2007年度はこの対策として帯域通過フィルタ（BPF: Band Pass Filter）を3種類試作し、性能

を比較・評価した上で採用機種を決定した。量産・実装は2008年度となる予定である。

SPring-8蓄積リングは様々なフィリングパターンで運転しているが、利用実験に用いられる場合でフィリングパターンの変更にともないバンチあたりの電流値は50μA～3mAと二桁近く変化する。これにともない信号処理回路に入力される信号強度も同程度変化する。信号処理回路の入力端には静電破壊から回路を保護するために保護ダイオードが実装されているが、大振幅の信号によりダイオードの応答が非線形領域にかかり、線形応答を前提に算出しているビーム位置が正しく得られない結果となっている。このためフィリングパターンの変更にともないビーム位置計測のデータが異なってしまうというフィリングパターン依存性が発生している。これに対する対策は保護ダイオードの上流側にBPFを設置して信号の帯域を制限し、検波周波数近傍の信号強度の減衰を最小にしつつ、帯域外の信号を阻止して信号の振幅をダイオードの線形領域におさめるようにすることである。

ビームの誘起する信号は周回周波数（209kHz）を基本波とする高調波列で構成されている。この中には高周波加速の周波数成分（508.58MHz）も含まれているが、この成分はフィリングパターンによらず蓄積電流値のみの関数となる。フィリングパターンによって高周波加速周波数成分以外の周回周波数の高調波成分が大きく変わり、それらの合成で得られる時間領域の信号振幅が大きく変化する。このため高周波加速周波数成分のみを通過させるようなBPFを用いればフィリングパターンによる信号強度の変化を最小化することができ、また高周波加速周波数を検波周波数とするような信号処理回路にすればフィリングパターンによらず蓄積電流値に応じた振幅の信号を扱えばよいことになる。

昨年度の年報では帯域幅20MHz程度のBPFを付加すればフィリングパターンの違いによるビーム位置測定値の変動が測定再現性以内となることを報告した。本年度（2007年度）は3種類、各々25ないし50個のBPFを、試作後特性測定を行って比較検討し、採用・量産するBPFを決定した。

ビーム位置の測定は電子ビームが通過する真空チェンバに4個の電極を取り付け、電子ビームがチェンバ壁に誘起する誘導電荷の信号を取り出し、その強度比からビーム位置を計算することによって行う。信号強度とビーム位置は、ビームが例えば1mm移動したときに信号強度が相対的にどれだけ変化するかという位置感度係数で結ばれている。この係数は真空チェンバの形状と電極の形状・配置によって決まり、SPring-8蓄積リングの場合は1mmのビーム移動に対して10%程度の強度変化の割合となっている。これは信号強度がビーム位置の変化とは関係のない何らかの理由で1%変化すると、見かけ上のビーム位置が100μm変化して見えるということを意味している。

SPRING-8蓄積リングではビーム位置の測定分解能は1 μ m以下を要求している。また、ビーム電流値の変更、回路のゲイン設定値の変更、フィリングパターンの変更などの測定条件の変更に対する再現性10 μ m以下を要求している。位置分解能は主としてランダムな雑音に起因するS/N (Signal to Noise ratio：信号対雑音比) によって決まり、要求分解能と上記の位置感度係数から雑音による変動を10⁻⁴以下、S/Nにすると10⁴以上が要求される。また、測定条件の変更に対する信号強度比の再現性は0.1%以下が要求される。

フィリングパターン依存性対策として導入するBPFは各電極からの信号入力端に取り付けるので、個々のBPFの特性が変動するとビーム位置の変動となって現れる。BPFの特性の変動による影響はビーム位置測定分解能1 μ mに対応する10⁻⁴以下でなければならない。

BPFの特性に起因する4電極間の相対信号強度が変化する場合としては、(1) 通過帯域での減衰率平坦度が十分でない場合に検波周波数が変化すると、測定される信号強度が変化すること、および、(2) BPFが温度依存性を持っている場合に周囲温度が変化して測定される信号強度が変化すること、があげられる。

BPMの信号処理回路は高周波加速周波数である508.58MHzを検波周波数としている。高周波加速周波数は地球潮汐の影響や建屋の大きさの季節変動により蓄積リングの周長が変化するのに追従するように変更されている。この変化量は一日ないし一週間などの短期的には最大数十Hz程度であるが、年周変化は約 ± 0.5 kHz程度となる。高周波加速周波数の変化にともない回路の検波周波数も変化するが、この周波数変化に対してBPFの透過率は10⁻⁴以下の変化である必要がある。また、信号処理回路は0.1℃で温度コントロールされた環境に設置されているが、この範囲の温度変化に対して中心周波数の変化量が1kHz以下であれば、温度変化率と平坦度の積から温度変化に対する透過率変化は10⁻⁴となる。これらの点を考慮してBPFの仕様

には中心周波数、帯域幅、帯域内減衰率の他に表1のように温度依存性、帯域内透過率平坦度を加えた。

試作した3種類のBPFについて特性を測定し、また回路に実装してフィリングパターンを変更しながらビーム位置測定を行った。特性測定、ビーム位置測定の結果を比較して採用するBPFを決定した。ビームを用いた測定の一例を図8に示す。また、ビームを用いたテストの際のフィリングパターンをまとめたものを表2に記す。3種類BPFの比較結果を表3にまとめた。これらの結果から表3中のAタイプを採用することとした。蓄積リング全周のBPMに実装するのに必要な1000個を超える量産、および実装は2008年度中に行う予定である。

(佐々木)

表1 BPFの仕様

中心周波数	508.58MHz
3dB帯域幅	20MHz
減衰率	2dB
中心周波数温度依存性	20ppm/℃以下
帯域内透過率平坦度 508.58MHz $\pm$ 0.5kHz	10 ⁻⁴

表2 BPFのビームテストで採用したフィリングパターン

	パターン名	
パターン1	マルチバンチ	(連続160バンチトレイン+連続43空バケットトレイン) $\times$ 12、1バンチ当り50 μ A
パターン2	203バンチ	等間隔203バンチ、1バンチ当り0.5mA
パターン3	1/12 フィリング +10シングル	連続203バンチトレイン：合計82mA + 等間隔の孤立した10バンチ：バンチ当り1.8mA
パターン4	シングルバンチ	1バケットのみのフィリング10mA

表3 各BPFタイプのフィリングパターン依存性等のビームを用いた測定結果。AおよびBタイプのBPFは12箇所、CタイプのBPFは6箇所のBPMに取付けた。数値はすべて μ mで各BPFタイプごとに鉛直方向COD測定値の差のrmsを計算した。測定条件を変更する間のCODのドリフト等を含んだ値である。周波数依存性は高周波加速周波数を500Hz下げた場合と標準の場合との差で評価した。温度依存性は28℃から30℃へ2℃温度上昇させた場合の位置測定値の変化量

	Aタイプ	Bタイプ	Cタイプ	BPFなし
[パターン2]-[パターン1]	4.4	3.5	2.2	50.9
[パターン3]-[パターン2]	4.1	2.1	2.5	59.8
[パターン4]-[パターン1]	10.7	8.7	8.9	3071.8
周波数依存性： (-500Hz)-(0Hz)	5.4	8.2	14.7	11.7
温度依存性 ($\Delta T = 2^\circ\text{C}$)	3.2	11.2	19.9	6.3

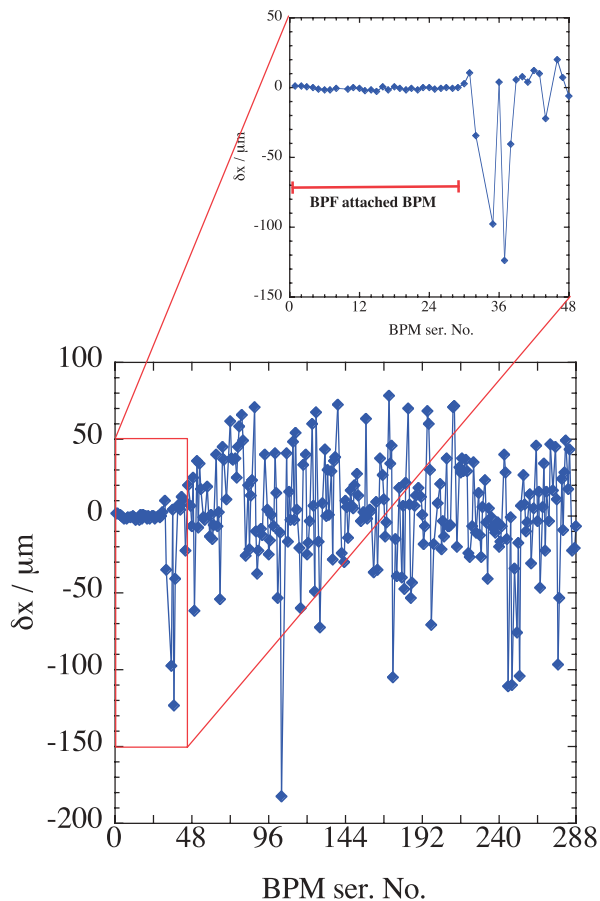


図8 異なるフィリングパターンでの水平方向COD測定値の差の例。横軸はBPMの通し番号。縦軸は203パンチとマルチパンチのでのCOD測定値の差。通し番号の1～30にのみBPFが取付けられている

3-7 SCWの磁場測定

高エネルギー放射光 (MeV領域) の発生を目指して、最大ピーク磁場10Tの超伝導ウイグラー (以下SCWと略記) を蓄積リングに設置する検討を行っている。これまでSCW励磁用電源は、Budker原子核研究所により製作されたものを使用していたが、SPring-8の標準的な制御体系には馴染まない仕様となっていた。そこで標準的な制御用インターフェースシステムに接続でき、遠隔制御・状態監視ができる電源を新規に製作し交換した。新電源は、第1及び第2電源の2系統で構成され、積分磁場を調整することができる。またそれぞれがクエンチ検出器および電源保護装置を備え、高い電流安定度 (2×10^{-5} 以下) を持っている。

また、SCWの電子ビームへの影響を評価するために磁場測定を行っているが、これには張力をかけた非磁性のベルトにホール素子を固定したステージを使用している。しかし、SCWチェンバの垂直開口が狭く (全幅20mm)、往復分のベルトの厚みによって、ホール素子の移動範囲に限界があった。そこで、磁場測定範囲を拡大するために、ベルトの還り側をSCWの外に通すなどしてステージを改良した。また、水平方向のベルト移動用に、ステッピングモ

ーターを追加し、長手方向と併せて、2次元での自動走査を計算機で行うことが可能になった。今後、新電源での励磁試験と磁場測定を予定している。

(早乙女)

参考文献

[1] SPring-8年報、(2006) p36-37.

加速器部門

加速器第2グループ

米原 博人