

ビームロスモニター

1. ビームロスモニターの目的

加速器の運転では、ビームの状態を常にモニターし異常が起きた場合にすぐ反応しなければならない。ここでいう異常とは、機器の故障やビーム不安定性が原因となって、軌道異常やビームサイズ増大、ビーム振動等が起こり、期待されるビーム状態と異なる状態になることを指す。加速器では常にある程度のビームロスが起こっているが、異常時には通常では見られない量や分布のビームロスが起こり、期待していた運転性能を保持することが出来なくなる。ひどいときには機器に損傷を与え、長期的運転にも被害を及ぼすことがある。そのため、異常が発生した場合には、出来るだけ早く検知して、対応することが重要である。

大きなビームロスが起こると、加速器の外部に放射線をまき散らすことになり、人間の被ばくも起こる。運転時だけでなく、加速器運転停止時に加速器トンネル内に入域した際に、運転時に放射化した機器からの放射線被ばくも起こり得る。ビームロスを検知して警報を出す目的には、加速器・検出器のハードウェアを守る MPS (machine protection system) と、人間に対する被害を抑える PPS (personnel protection system) の両方がある。

KEK の PPS は加速器運転の安全システムとして、放射線管理センターと連携した、加速器運転とは独立に扱われる監視システムがある[1]。KEK の加速器群は地下の厚いコンクリート製の遮蔽体トンネル内に設置され、加速器が稼働したときに発生する種々の放射線や放射能を閉じこめる役目を果たしているが、加速器の運転状況によっては、発生する放射線の中でも透過力の大きい中性子やγ線が、遮蔽体の外側にごくわずかに透過してくる場合がある。放射線集中監視システムは、放射線や放射能が問題とならない基準以下であることを常時監視し、安全に万全を期している。放射線管理区域（放射線のレベルが有り、出

入管理を必要とする区域）と一般区域の境界に Fig. 1 の様なモニターを設置し、平均的なビームロスを測定している (mSv/h)。KEK では、国の法律で定められた値よりも厳しい基準（法令値の 1/2~1/10）で管理しており、単位時間内にそのレベルを超えた場合はビーム入射を停止する。そのため測定に必要な時間スケールは秒~時間単位で、絶対値の較正が重要である。通常我々の使うビームロスモニターは MPS としての役割が大きいが、PPS のバックアップ的な役割も果たす。

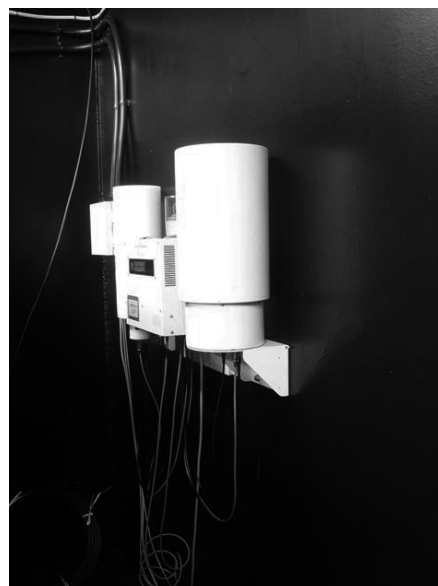


Fig.1 中性子測定用 6.5cm 厚ポリエチレン減速材付き He-3 比例計数管 (左) 及び光子測定用 10 リットル空気電離箱 (右)

ハドロン加速器や大電流加速器は、MPS として、ビームの不安定性やハードウェアトラブルが起こった際に、加速器・検出器のハードウェアに損傷を及ぼす前にビームを捨てる「ビームアポートシステム」を備えている。加速器の各機器は自分自身を守るためのインターロックシステムからアポートシステムにトリガー信号を送るが、それとは別にリング全周をモニターするためにビームロスモニター(BLM) を設置している。特にロスを検知しやすい場所には重点的に設置し、問題が起きた場合すぐにアポートトリガーを出せるようにしている。何度もビームがぶつかる機

器損傷のリスクはそれだけ高くなるので、時間スケールは数ターン ($\mu\text{s}\sim\text{ms}$) と非常に速い。

BLM は、ビームの状態に敏感なため、被害を抑えるだけでなく、入射パラメータや衝突パラメータを変更する際の反応を見ることで、ビーム性能向上のための調整にも使用することが出来る。

2. ビームロスモニターの原理

真空チェンバー中を周回中に失われたビームは、チェンバーの壁や電磁石などを通り抜ける際にシャワーを起こす。これらの粒子（放射線）を測定するために真空チェンバーの外に設置したセンサーが、ビームロスモニター (BLM) である [2,3]。シャワーによって出てきた粒子数は、ロスしたビームに比例しているはずだが、絶対値はセンサーの位置や大きさに依存するため、BLM の信号から、ロスしたビームの絶対値を正確に出すことは難しいが、シミュレーションや各種較正から必要な値を出すことは出来る。また、定常運転時にも一定のビームロスは起きているので、BLM の値を常にモニターすることで、定性的な運転状態の監視も行うことができる。BLM として使用されるセンサーには、シンチレーションカウンター、ダイヤモンドや PIN フォトダイオード (PD) といった半導体検出器、イオンチェンバー、光ファイバー等がある。

シンチレーションカウンターの原理を、Fig. 2 に示す。電磁シャワーによって発生した荷電粒子はシンチレーターに入射した時のエネルギーによって、価電子帯の電子を伝導帯に押し上げ、価電子帯には正孔が出来る。電子と正孔が自由運動した結果、再度電子が価電子帯に落ち込む時に、余分なエネルギーがシンチレーション光として放出される。このシンチレーション光を光電子増倍管 (PMT) や PD で読み出し、電気信号として取り出す。シンチレーターとして使われる物質には、NaI、CsI、YAG、アルミナ蛍光板等様々な種類があるが、反応時間、検出したい粒子（電子、 γ 線、中性子）、エネルギーなどを考慮して、それぞれの加速器の目的に適したものを選ぶと良い。

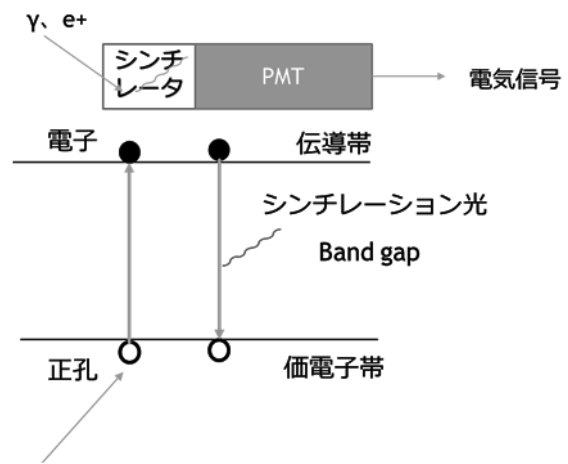


Fig. 2 シンチレーションカウンターの原理

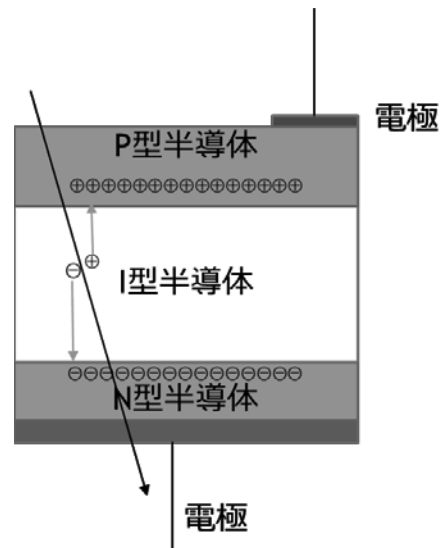


Fig.3 PIN フォトダイオードの原理

半導体は伝導帯に伝導電子が存在しないため電圧をかけても電流は流れないが、価電子帯のエネルギーレベルにある電子にエネルギーを与えて、その電子を伝導帯のエネルギーレベルにバンドギャップを超えて励起させると、電圧をかけることで電流が流れる。そこで半導体材料に放射線が入射するとエネルギーが与えられることを利用した検出器が半導体検出器である。BLM としてよく使われるようになってきたものに、ダイヤモンドがある [4]。UV から測定可能 (5.5 eV, 220 nm) で、放射線耐性が強い、ノイズレベルが低く、暗電流も小さく、測定速度もナノ秒オーダーと長所が多いが価格が高い。安価な PIN PD は、P 型半導体・I 型半導体・N 型半導体を接合したもの

で、粒子が入射すると絶縁性 I 型半導体で電子正孔ペアが出来る。その後、電子は N へ、正孔は P へ移動することで電流が流れる。材質にはシリコンやゲルマニウムなどがあり、検出に使用する光の波長（バンドギャップ<光の波長のエネルギー）、量子効率、暗電流（光の入射が無い時にフォトダイオードを流れる電流）が異なるため、必要に応じて選択する。

イオンチェンバーは、ガスを封入したチェンバーに電場をかけたもので、荷電粒子が通り抜けた際にガスを電離する。生成されたイオン電子ペアはそれぞれ負電極と正電極に集められ、電気信号を発生する。チェンバーを長くすることにより、広い範囲のロスの検出が可能である。N, Ar, Xe, 空気など、中に封入するガスによって、検出できる粒子のエネルギーや検出速度が異なる。

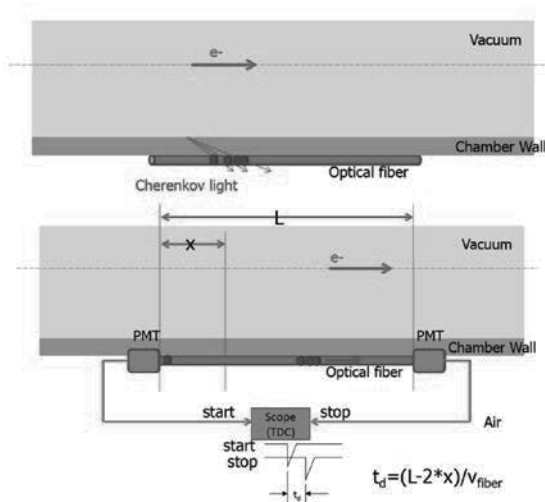


Fig.4 光ファイバーの原理[3]

光ファイバーを使う BLM は、ビームロスによる荷電粒子が光ファイバー中を通る時に発するチェレンコフ光を両端に取り付けた PMT 等の光検出器で読み出す。Figure 4 で示す通り、出てきた信号をオシロスコープで観測し、上流と下流の信号の時間差を取ることで、ビームロスの位置を計算することが出来る。コア径が 400~800 μ m と細いので真空チェンバーに直接取り付けることが出来る。また長距離にわたって設置できるため、細かい位置分解能が得られる。

3. SuperKEKB のビームロスモニター

3.1. SuperKEKB

SuperKEKB は、Table 1 のパラメータを持つ高ルミノシティを得るための大電流衝突型加速器である[5]。ビーム電流を最高 2.6A(電子:HER)と 3.6A(陽電子:LER)まで入射する。ビーム電流が高くなると共に、寿命も短くなるため、ビーム不安定性によるビームロスが起こった場合、加速器機器が受ける損傷は大きくなる。大電流から加速器・検出器のハードウェアを守るため、ビームの不安定性やハードウェアトラブルが起こった時に素早くビームをダンプするアポートシステム[6]を整備している。

Table1 : SuperKEKB の主なパラメータ

Parameter	LER	HER	DR	unit
Energy	4.0	7.0	1.1	GeV
No. of bunches	2500		4	
Circumference	3016		135.5	
Max. stored current	3.6	2.6	0.07	A
Emittance (h)	3.2	4.6	42.5	nm
Emittance (v)	8.64	12.9	3150	pm
Bunch length	6.0	5.0	6.53	mm
β_x/β_y at IP	32/ 0.27	25/ 0.30		mm
Luminosity	8x1035			$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
RF frequency	509			MHz

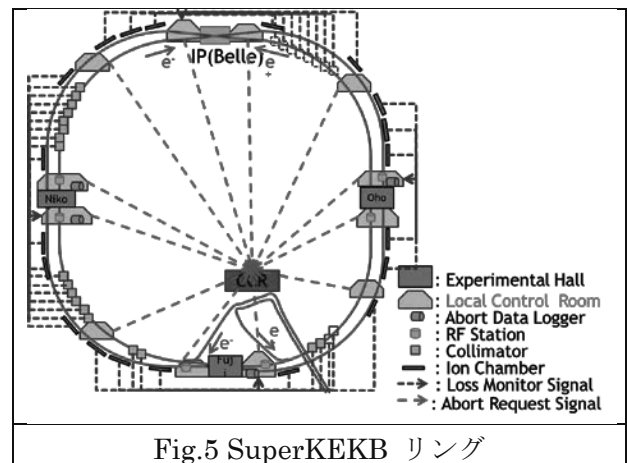


Fig.5 SuperKEKB リング

3.2. アボートシステム

リングを周回しているビームを蹴り出してダンプに捨てるためのアボートキッカーは、Fig. 6にある通り複数の磁石から成り立っている。傾斜を持った垂直方向電磁石、水平方向電磁石、ランバートソン DC セプタム電磁石、及び LER はパルス 4 極電磁石、HER は 6 極電磁石から成る。アボートの所要時間は、ビームの 1 周回時間に相当する $10\mu\text{s}$ 以内でなければならない。ビームパンチは 2ns を単位とした間隔で入射されているが、正しくアボートするために、キッカーの立ち上がりに必要な 200ns 間はバケットが空になっており、このビームギャップタイミングとキッカータイミングを正しく合わせることは重要である。

BLM を含むハードウェアからのアボートトリガー信号は、SuperKEKB 加速器の 12 か所のローカル制御室 (LCR) にいったん集約される。光信号に変換された各 LCR からの信号、ソフトウェア的なアボートトリガー、手動アボートトリガー信号を中央制御室で集約した後、アボートギャップと同期したトリガー信号を生成し、アボートキッカーに送る[7]。

実際に異常が起こってから全ビームがアボートされるまでの時間を示したのが Fig.8 である。異常が起こった時刻を 0 として、各センサーが反応してインターロック信号を出した時刻を t_1 、CCR で信号を受けとった時刻を t_2 、アボートキッカーがファイヤした時刻を t_3 、ビームがすべて捨てられた時刻を t_4 とする。 t_1 は各センサーの反応速度、センサーから LCR までの距離、センサーからの信号を解析してトリガー信号を作る回路内での時間等に依存する。 $t_2 - t_1$ は主に LCR から CCR までの光ケーブルの長さに依存し、CCR から遠い BelleII 検出器付近の LCR からは $10\mu\text{s}$ 、CCR に近い LCR からは $2\mu\text{s}$ と実測されている。ここままで集約されたアボートリクエスト信号と、ビームの周回信号を同期させ、アボートギャップの位置でアボートキッカーを立ち上がらせる信号を作るが、出来るだけ速くアボートするためアボートギャップを 1 周に 2 か所入

れているため最長で $5\mu\text{s}$ 、CCR からキッカーまで送る時間 (400m) $2\mu\text{s}$ 、キッカーに届いてからサイクロンが ON になるまで $1\mu\text{s}$ 、キッカー立ち上がりに 200ns かかるので、 $t_3 - t_2$ は $3 \sim 8\mu\text{s}$ かかる。最後に全ビームを捨てるのに $10\mu\text{s}$ かかるので、 t_1 を仮に $2\mu\text{s}$ とした場合アボートにかかる時間は $17 \sim 30\mu\text{s}$ になる。つまり、どんなに異常察知が速くともビームを捨て終わるまでに 2,3 ターンは周回してしまい、 t_1 が遅くなればなるほど異常な状態でビームが周回し続ける事になる。

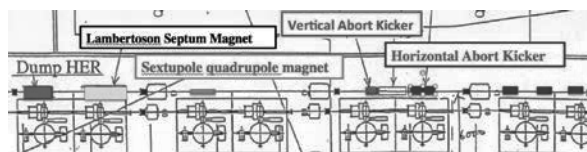


Fig.6 SuperKEKB Abort Kicker

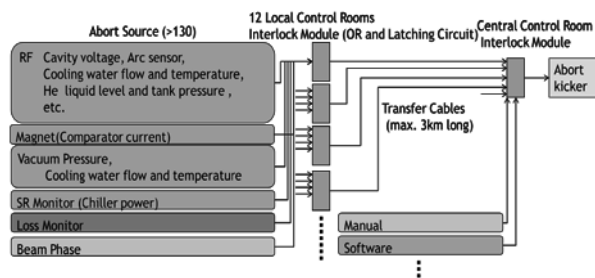


Fig.7 アボートトリガー信号

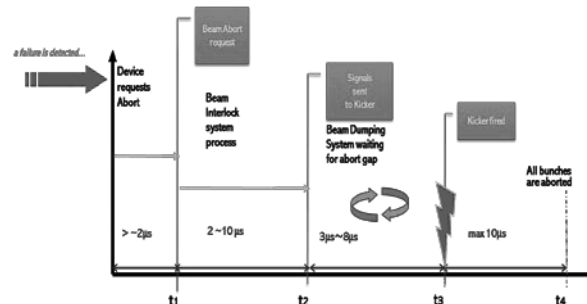


Fig.8 アボートトリガー所要時間

3.3. ロスモニター

特に異常ビームによる損傷が心配される機器にとって、アボートトリガーが高速である必要性は理解できることと思う。また、SuperKEKB の様な 3km という広い加速器リングのどこで異常が発生してもそれを感知しなければならない。そ

ここで SuperKEKB では BLM として、イオンチェンバーと PIN PD の 2 種類のセンサーをトンネル内各所に約 150 個配置している [8]。

イオンチェンバーの断面図を Fig. 9 に示しているが、20D の中空同軸ケーブル (FC-20D-S) で外部導体にノイズフィルターを通して 200V の電圧をかけ、内部導体でプラスイオンを収集することで電流が流れる。特にガスを封入していない空気イオンチェンバーであるため、200V の電圧に対してイオンのドリフト時間は 1km/sec 程度で、反応時間は 1ms 程度である。この信号を Fig.10 の積分回路で読み出す。運転条件に応じて 10ms~1s の積分時間と、1 倍/10 倍/100 倍 (場所によっては 1000 倍) の倍率の選択が可能である。その後設定された閾値に達するとインターロック信号を出す。同時に積分出力を ADC に入力、記録することで、長期間の常時モニターが可能である。イオンチェンバーの長さは 5~11m で、Fig.11 の写真の様に SuperKEKB のメインリング (MR)、ビームトランスポートライン (BT)、ダンピングリング (DR) の各トンネル内の壁やケーブルラックにほぼ均等に配置することで、広い範囲のビームロスに対応できる。

イオンチェンバーは広範囲のビームロスを検出できるが、イオンのドリフト時間が長いので、アボートを出すのに ms オーダーの時間がかかる。速いアボート信号を出すために使用されているのが、ns オーダーの応答速度を持つ PIN PD である。 SuperKEKB には、BelleII 検出器へのバックグラウンドを抑えるためのコリメータが設置されている [9]。コリメータはビームに非常に近い位置にあるため、軌道の変動に敏感である。コリメータ以外の場所で異常が起きた場合でもビームロスはアパーチャーの狭いコリメータ部で起き始める。そのため各コリメータの下流に PIN PD を設置している。2.65mm × 2.65mm の PD 2 個をアルミボックスに入れたものを真空チェンバーの上下左右 4 か所に直列に繋いで設置し、どの方向にシャワーが出ても検出できるようにしている (Fig.12)。PIN PD からの信号は同軸ケーブルで直接 LCR まで送られ、 Fig.13 の積分回路に

入力される。応答速度は入力インピーダンス 2kΩ とケーブル容量で決まるため、ケーブルが長いほど遅くなる。周長 3km のリングの 4 か所にある LCR 及び BelleII 検出器のある IR で信号を集約しているため、ケーブル長は数 10m から 400m に及ぶ。積分回路の後ろにコンパレータ回路を入れて設定閾値を超えるとアボートトリガーを出す様にしている。また、分岐したピークホールド回路には 1s の放電時間を持たせて、モニターのための ADC に入力する。PIN PD はビームロスを検出した後 1 ターン (10μs) 内でトリガーを出すことが可能である。また、真空チェンバーに直接取り付けられているため、HER と LER のどちらのリングがビームロスを起こしたのかを判定することが出来る。

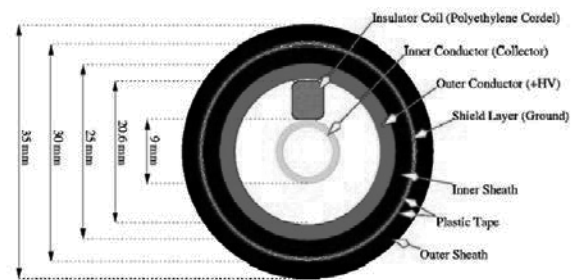


Fig.9 イオンチェンバーの断面図

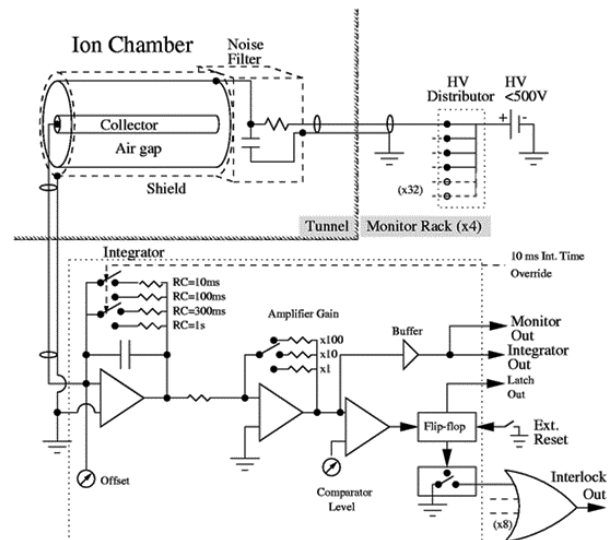


Fig.10 イオンチェンバーの読み出し回路



Fig.11 (a)SuperKEKB MR コンクリートシールドの壁に取り付けられたイオンチェンバー及び (b) DR ケーブルラックに取り付けられたイオンチェンバー。

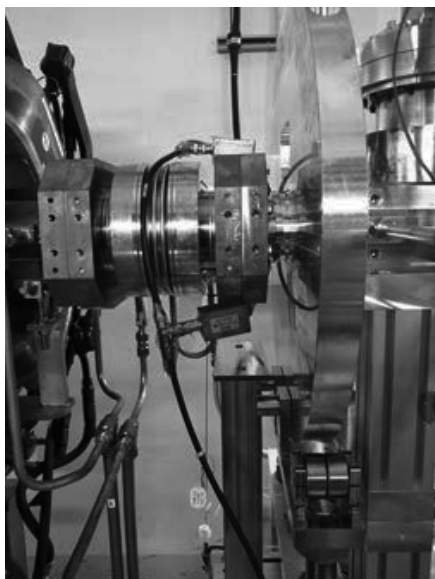


Fig.12 コリメータ下流に取り付けられた PIN PD ボックス

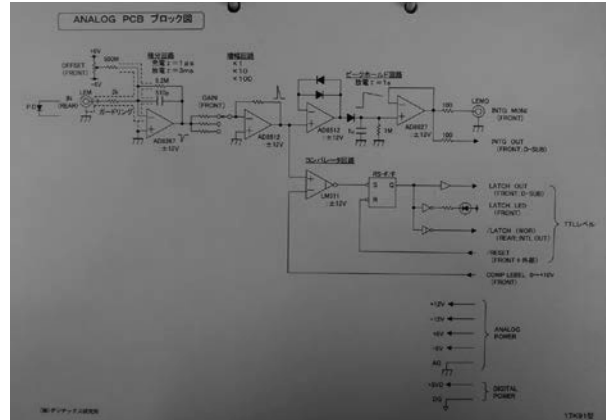


Fig.13 PIN PD からの信号読み出し回路

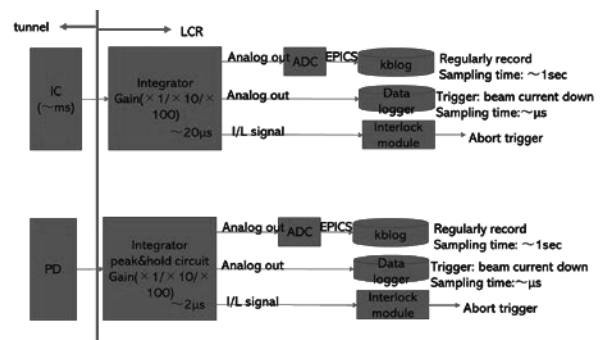


Fig.14 ビームロスモニター信号の流れ

イオンチェンバーと PIN PD は同じアポートシステムの下で動くため、積分回路より下流の信号の扱いは同じになっている。それぞれ、アポートトリガーとなるインターロック信号と、長時間記録のための ADC 入力信号、アポートの瞬間を記録するための信号の 3 つの信号を出力する。ADC は 16 ビットの VME モジュールで 1 秒のサンプリング時間でピーク値、平均値、最小値を常時記録している。3 つめの信号は、アポートトリガーが出た時のみ短い時間を速いサンプリングでデータログに記録し、アポートの原因解析に使用する。

イオンチェンバーと PIN PD の他に入射点付近には光ファイバーを張って、ビームロスの起きた場所をより精度よく見つけようとする試みもなされている。また、BelleII 検出器も検出器まわりに独自のダイヤモンドセンサーを使った BLM を配置し、アポートシステムの一部として使用している。

3.4. アボートモニター

BLM やその他のアボートシステムが正しく働いているか、またそのアボートはなぜ起こったのかを調べるためにアボートモニターシステムを導入した[10]。これはアボートの瞬間の BLM やその他のビームに直接関係する信号をデータログに入力し、アボートの前後の様子を記録するシステムである。前述した通り、加速器トンネル内でイオンチェンバーはほぼ均等に、PIN PD は主にコリメータ下流に配置されており、それらの信号は 4 か所の LCR 及び BelleII 検出器のある TSUKUBA 実験棟で集められる。RF 加速空洞は、トンネルの直線部 3 か所に設置されており、RF 関係の信号は 6 か所の LCR でやり取りされる。Figure 5 で分かる様に、アボートモニター用データログはロスモニター信号と RF 信号にアクセスしやすい 5 か所の LCR と TSUKUBA 実験棟に設置した。

データログへは、すべてのコリメータ部 PIN PD 信号とイオンチェンバー信号の一部、RF の空洞電圧、クライストロンの出力パワーを入力している。その他に、ビーム電流値、ビーム位相、入射トリガータイミング、アボートトリガータイミングも入力した。これらの信号を、アボートトリガーの前後 300ms から 600 ms の間、1 μ s または 5 μ s のサンプリングタイムで記録する（時間の違いはデータ

ログの種類による）。ハードウェア毎に応答が異なるため、各信号の応答や遅れを測定し、信号間の関係を調べ、必要な測定時間・サンプリング時間を決定した。Figure 15 は手動トリガーでビームアボートしたときの信号例である。手動トリガーは、ビームに異常はないが何らかの理由でビームを捨てたくなった時に使用する。この信号例を見ると、アボートトリガーが出てすぐに RF 空洞電圧やビーム位相が動き出していることが分かる。ビーム電流は直後に 10 μ s 内で捨てられたはずだが、測定回路内の遅れのせいで 45 μ s の遅れと、90 μ s の鈍りが見られる。これはデータを記録している LCR により異なり、制御室間の距離や介するモジュール数からの予測値と実測値は

矛盾がない。この信号例を基準として、実際に異常が起こった場合の信号遅れや形を判断する。

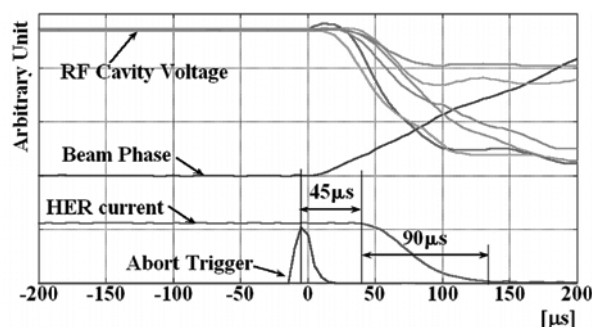


Fig.15 手動トリガーアボート時のアボートモニター信号

Figure 16 は、BLM のインターロックレベル調整前で、コリメータが傷ついたと思われるアボート例である。RF 空洞がトリップしたせいでビーム位相が振動を始め、約 1.4ms 後に HER ビームがロスを始めている。同時に各コリメータ部の PIN PD が信号を出し、アボートトリガーを出す前に何度もコリメータにぶつかっていることが分かる。実際にアボートリクエストまで 100 μ s かかり、コリメータ損傷に至った。この後、閾値を調整して数 mA のビームロスであってもアボート信号を出すようにした。

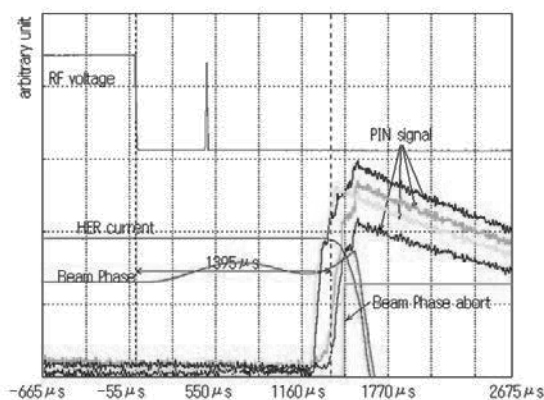


Fig. 16 コリメータが傷ついた時のアボート例

Figure 16 のビームロス、RF 空洞トリップが原因だったが、真空悪化が原因でビームロスが起こった例が Fig.17 である。BLM アボート発報後にアボートモニターを調べると、数 ms 前から

ビーム位相振動がおり、同時にわずかなビームロスが始まっていることも観測された。真空度を調べると、この様な信号が見られるときにリングのどこかでスパイク状に悪化していることが分かった。リングのどこで真空悪化が始まってもビームはリング内のアパーチャーの狭いところでロスを始めるため、コリメータを調整することで出来るだけ早いタイミングでPIN PDによるアポトリガーを発報させることができる。

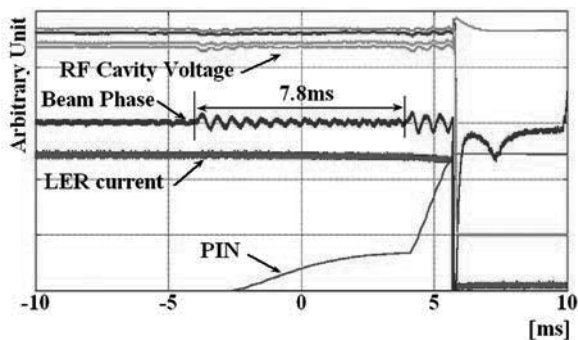


Fig.17 真空悪化が原因のロスモニターアポトリガー

SuperKEKBでは、超電導電磁石 (QCS) を使って衝突点 (IP) でのビームサイズを絞っている。IPでのアパーチャーは狭いため、コリメータ調整

が不完全な運転初期には、リング内にばらまかれたビームが QCS にも飛び込んでクエンチを引き起こすことが頻発した。Figure 18 はその一例である。左列上から2段は HER および LER のビーム電流、3,4段目はそれぞれの入射タイミング、5,6段目はそれぞれのアポトリガーで、7段目から右列8段目までは PIN PD 信号である。アポトリガーのタイミングで PIN PD が一斉に跳ね上がっていることが分かる。これを詳しく見るとリング内で失われたビームは、IR 前の曲線部のコリメータの PIN PD、IR に近い直線部コリメータの PIN PD、直線部のケーブルラックに付いたイオンチェンバーの順でアポトリガーを発報し、両リングアポトリガーに至っている。100mA 程度の大きなビームロスがおり、一瞬で IR 付近直線部にビームをばら撒き、QCS にも同時にロスしたビームが飛び込んで、アポトリガーとクエンチを引き起こしたと思われる。QCS クエンチが起これると加速器の再立ち上げまで時間がかかるため、安定した運転を続けるためにコリメータを調整して、QCS よりアパーチャーが狭くなるようにしたところ、QCS クエンチを引き起こすビームロスは減少した。



Fig.18 QCS クエンチを引き起こしたビームロス時のアポトリガー



Fig.19 入射ビームが原因のロスモニターレポート

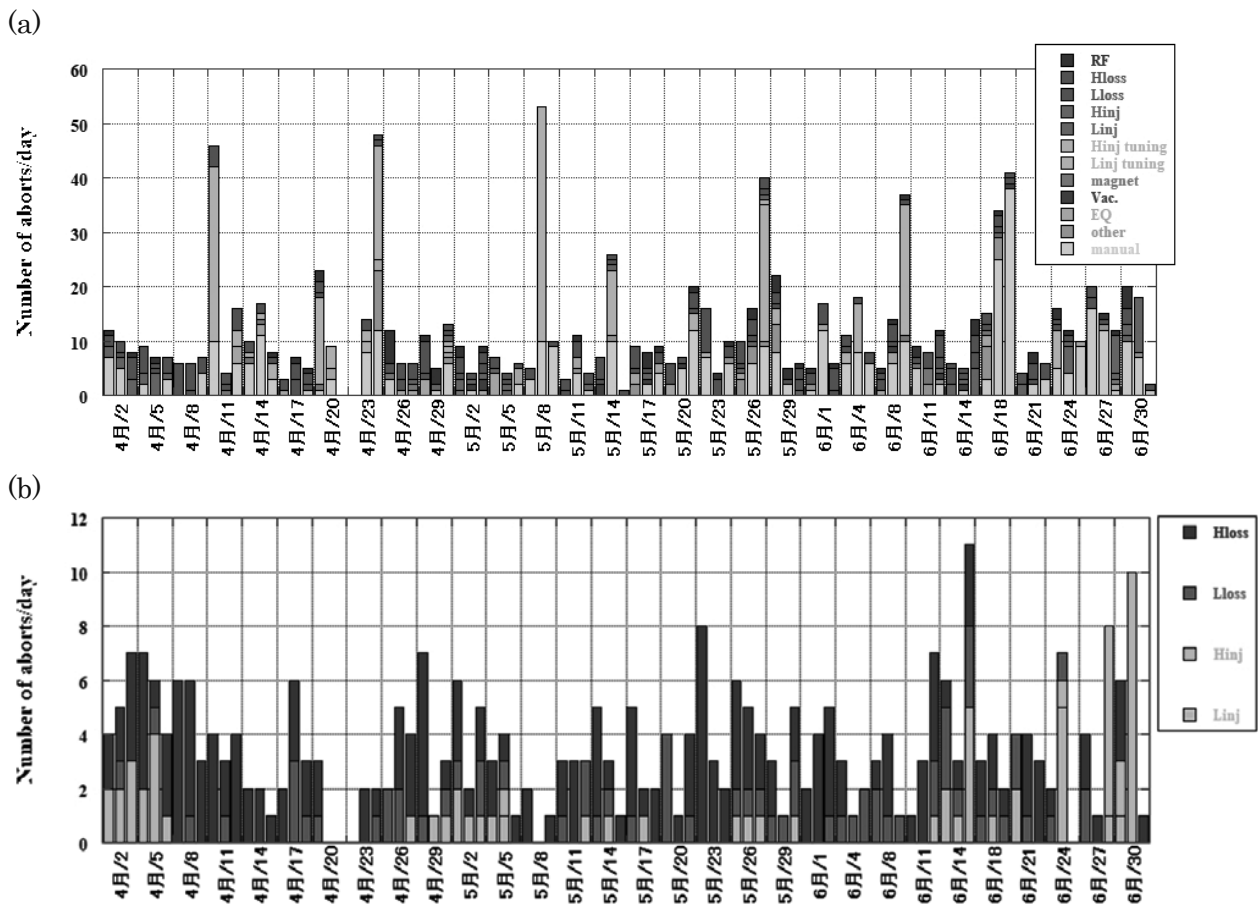


Fig. 20 2020年春の運転での全アボートの原因(a)と、ビームに起因すると思われるアボート (b)

入射ビームが原因でビームロスが起きることも多い。Figure19の例では、LER入射タイミングと両リングアボートタイミングが同期しており、7,8段目のPINPD信号も同時に跳ねていることがわかる。これは、入射器からMRにビームが入射された瞬間のアボートで、うまく入射が来ず、入射ビームが直接コリメータに衝突した

り、BelleII検出器まで飛び込んでアボートを誘発してしまったためである。入射異常の原因を探すと、入射器のパルスマグネットのトリガー抜けやクライストロンダウン等の入射器側の問題が見つかることが多い。リング側に問題がある例としては、入射キッカーの故障が見つかったこともある。

アポートモニターで記録されたデータは、アポートが起こってから数分以内に制御ネットワークで CCR に送られ、運転シフト員が原因解明に役立てることができる。2020 年春の運転での全アポートの原因を調べた結果が Fig.20 である。入射調整中や、スタディのための手動アポートをのぞくと、ビームが不安定になって起こる BLM アポート (BelleII 検出器のダイヤモンドセンサーも含む) の回数が多く、BLM の重要性が分かる。

3.5. 運転調整

ADC で記録される BLM 出力は、運転中常時モニターされている。Figure 21 のリング内のビームロス分布を表すパネルを見る事で、平常運転中にどこでロスが起こっているかが分かる。入射調整の初めには、どこでビームロスしたかを見ることで、どこまでビームが回ったかを確認することも出来る。衝突実験が始まると、BLM 信号と、ビーム電流や、入射効率を比較した Fig.22 を見ながら、コリメータや入射セプタム・キッカーのパラメータ、衝突パラメータを調整する。この様に BLM はインターロック信号としてだけではなく、運転調整のツールとしても役立てられている。

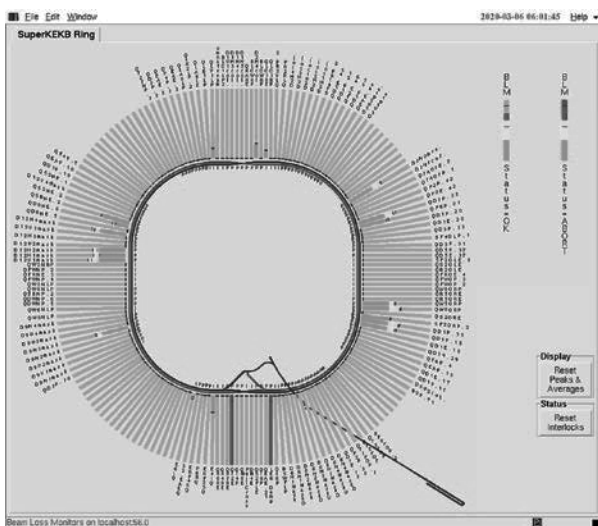


Fig.21 ビームロスモニターの出力分布

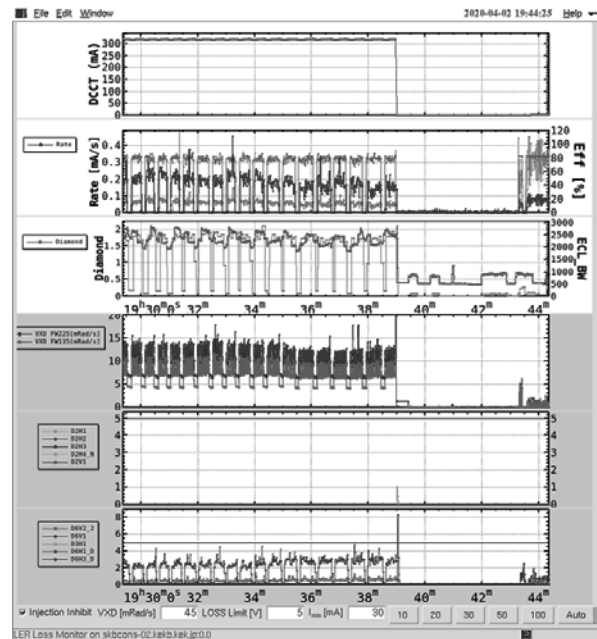


Fig. 22 ビーム電流、入射効率とビームロスモニター信号

4. まとめ

ビームロスモニターは、不安定なビームから人やハードウェアを守るために必要なモニターで、それぞれの加速器に応じてビームロスから起こる 2 次シャワーを検出するセンサーを選択して使用している。トンネル内に多数設置することで、どこでロスが起きたかを見分けることができるので、定性的に加速器の安定性を監視する役割を果たしており、特に電流値の高い加速器では重要なモニターである。同時に、正しい衝突状態、入射状態にビームを調整するためにも使用される。

参考文献

- [1] <https://www2.kek.jp/ja/newskek/2003/mayjun/norm.html>
- [2] K. Wittenburg, “Beam Loss Monitor”, CAS2008.
- [3] T.Obina, “Optical Fiber Based Loss Monitor for Electron Storage Ring”, IBIC2013, Oxford, UK, WECL1.
- [4] <https://cividec.at/>

- [5] Y.Funakoshi, “SuperKEKB のフェーズ 1 のビームコミッショニング”, 第 13 回日本加速器学会年会 千葉県 MOOL02.
- [6] T.Mimashi, “SuperKEKB 電子リングのビームアポートシステム”, 第 14 回日本加速器学会年会 北海道 TUP001.
- [7] S. Sasaki et al, “Upgrade of abort trigger system for SuperKEKB”, ICALEPCS2015, Melbourne, Australia, MOPGF141.
- [8] H. Ikeda et al., “Beam loss monitor at SuperKEKB”, IBIC2014, Monterey, CA, USA, TIPD22.
- [9] T.Ishibashi et al., “LOW IMPEDANCE MOVABLE COLLIMATORS FOR SUPERKEKB”, IPAC2017, Copenhagen, Denmark, WEPIK009.
- [10] H. Ikeda et al., “SuperKEKB でのアポート診断”, 第 14 回日本加速器学会年会 北海道 WEP089.