

OPTICAL FIBER BEAM LOSS MONITOR

Yoshiharu Yano[#], Takashi Obina, Shinichiro Michizono

High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba, Ibaraki 305-0801 Japan

Abstract

We have been developed an arc sensor with high sensitivity since 2007. When the arc sensor was installed into the cavity coupler located in the beam tunnel, it is found that an arc sensor reacted to beam loss sensitively. This is because Cherenkov light occurs in the optical fiber by the charged particle. This means that the state of the beam loss can be detected by observing the Cherenkov light. Large-diameter optical fibers were set into the acceleration structures and vacuum ducts. We observed light from an optical fiber by the photomultiplier tube (PMT). When we observed light from the upstream, we can identify the point of the beam loss in position resolution of 8.3 nsec/m. We observed beam loss at various points of the Linac.

光ファイバービームロスモニター

1. はじめに

光ファイバーを加速器のエLEMENTに密着して布設しファイバー端から出てくる光を高電子増倍管(PMT)で観測する。この光は、ビームロスによって発生した荷電粒子が光ファイバーの中を通過する時に発生するチェレンコフ光である^[1]。この信号にはビームロスの場所と強度の情報が含まれている。ビーム上流側から観測するとほぼ(0.12m/nsec)の時間分解能で荷電粒子がダクトに当たっている箇所を特定出来る。ここでは電子陽電子入射器のビームロスの多い場所の特定を行なった。さらに PF リングにも光ファイバーを布設しビーム入射時の何ターン目に何処でビームロスが発生しているか観測した。

2. 光ファイバー中のチェレンコフ光

図 1 に示すようにビームダクトに沿わせて設置した光ファイバーを考える。ビームロスにより発生した荷電粒子はシャワーを作りダクト外に出て光ファイバーを通過する。これらの荷電粒子は充分エネルギーが高いので光ファイバー内でチェレンコフ光を発生する。この発生箇所は電子の速度であるほぼ光速(3.3 nsec/m)で下流方向に移動して行く。一方、光ファイバー中の光速は約 5 nsec/m であるから 1 m 離れた箇所で発生した 2 つの光は上流から観測すると 8.3 nsec、下流から観測すると前後の位置が入れ替わった 1.7 nsec の間隔を置いて見える。この光を上流側から観測出来れば 8.3 nsec/m の位置分解能でダクト上のシャワーの箇所を特定することが出来る。

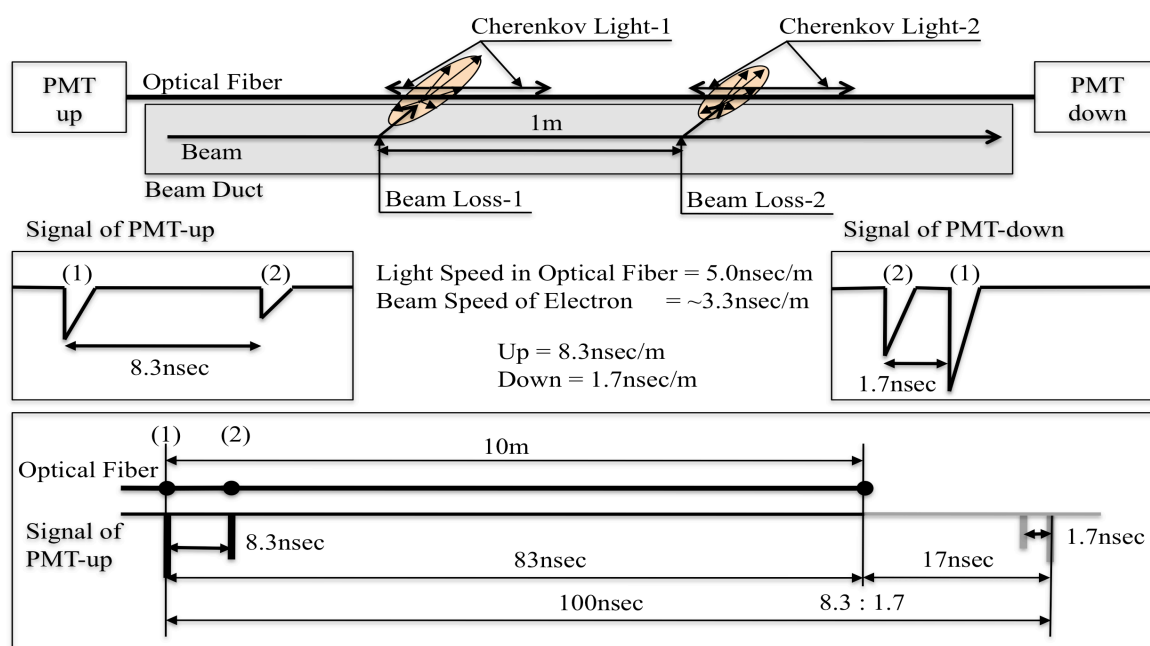


図 1 : 光ファイバー中のチェレンコフ光

[#] yoshiharu.yano@kek.jp

3. ビームロスモニター

3.1 ビームロスモニター

PMT(H10721;浜松フォトニクス) 2個または4個をNIM モジュールに組込んだものと大口径の純粋石英光ファイバーを組合せたものが光ファイバービームロスモニターである。図2に測定の様子を示す。

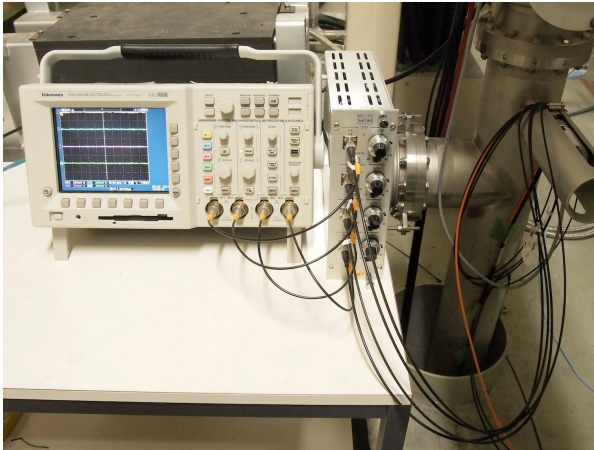


図2：ビームロスモニター

光ファイバーのコア径は用途に応じて $400\ \mu\text{m}$ 、 $600\ \mu\text{m}$ 、 $800\ \mu\text{m}$ のものを使用している。前章で示したように光ファイバーをダクトに密着して布設し、ビームの上流側から出てくる光を観測すると $8.3\ \text{nsec/m}$ の位置分解能でビームロスの場所を推定することができる。但しこれはビームロスの発生箇所を示しているのではなくビームロスが発生した結果荷電粒子がダクトの外に出て来た場所を示しているということ、また光ファイバーの末端では下流側に出た大量の光が反射し上流側に来ている事にも注意が必要である。何が原因でビームロスが起きているかによってシャワーの方向も異なるため一概にはいえないが、経験上同じロスポイントで発生した光を上流側と下流側で観測すると下流側の方が上流側の信号より $3\sim 4$ 倍大きい。ワイヤスキャナーのセンサーの様に信号が小さく出る場所がはっきりしている場合は下流側に出る信号を観測するのが有効である。

3.2 パルスマグネット内部のビームロス

PF ビームを振り分けるパルスマグネット (BM_58_1) の下流で大量にビームロスが発生している事が分かっている^[1]。BM_58_1 の内部でもビームロスが発生しているとセラミックダクトに損傷を与える可能性があるのでマグネット内部に光ファイバーを布設し内部のビームロスの測定を行った。その結果、通常の運転状態ではマグネット内部でビームロスが起きている様子は観測出来なかった。ビームチューニングを行なった時もマグネット内部でビームロスが起きる事は無かった。上流のワイヤスキャナーを動作させた時にマグネット上流のフラン

ジから内部にかけてビームロスが観測された。図3にビームロスが起きている分岐ダクトの写真を示す。

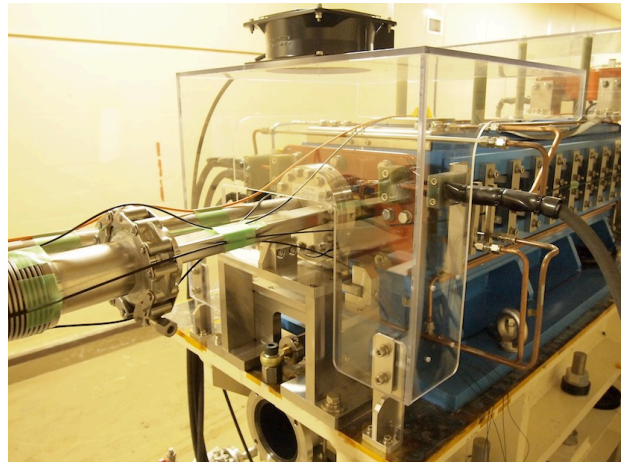


図3：BM_58_1 下流の分岐ダクト

3.3 PF ビームラインのビームロス

BM_58_1 から BM_61_F1 の間でビームロスが発生している事は既に分かっており、様々なビームチューニングを施したが殆ど効果はなかった^[1]。今回はさらに下流のビームロス分布を観測するために $400\ \mu\text{m} \times 110\text{m}$ の光ファイバー2本をダクトの左右に布設した。図3にその観測波形を示す。CH1(通路側)、CH3(壁側)は $400\ \mu\text{m} \times 110\text{m}$ の光ファイバー、CH2(通路側)、CH4(壁側)は既存の $600\ \mu\text{m} \times 30\text{m}$ の光ファイバーで QF_61_F1 まで布設してある。

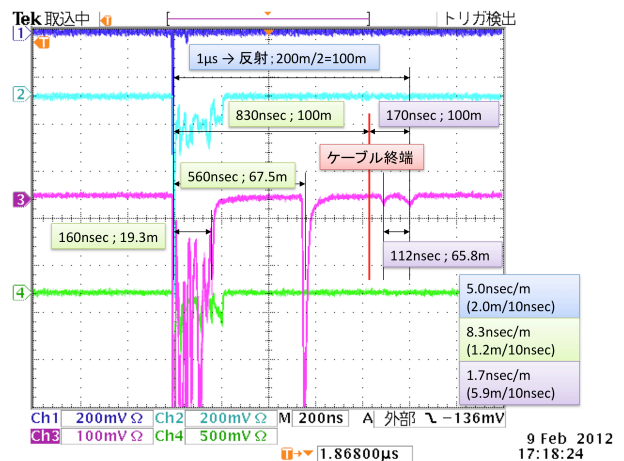


図3：PF ビームラインのビームロス

CH3 の信号に注目すると最初の信号は分岐ダクトでのロスによるものである。最後の信号はそれがファイバー端で反射して見えているものでそれらの間隔は $1\ \mu\text{sec}$ である。つまり分岐ダクトからファイバー端までの距離は 100m である。ビームライン末端付近でビームロスがあった場合を考慮してビームライン末端から 5m 余分にケーブル長を取ってあるので分岐ダクトからビームライン末端までは 95m である。一方、ビームラインの図面から読み取るとその長さは 94.8m になる。分岐ダクトから BM_61_F1 の間は波形から計算すると 19.3m 、図面から読み取

ると 19.5m となる。

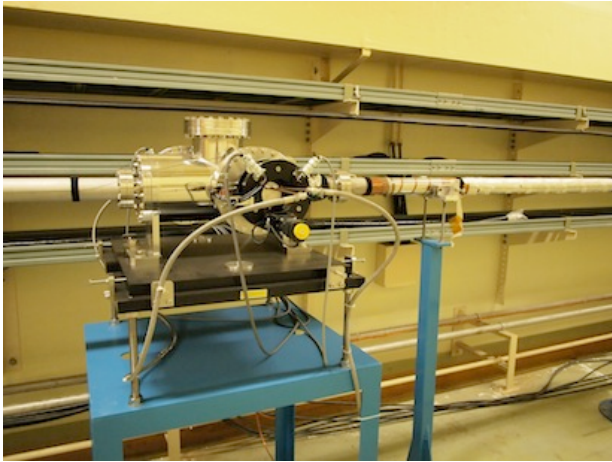


図 4 : PF ビームライン下流のスリット

3.4 PF リングのビームロス

PF リングの中でビーム入射時に放射線レベルが高いところや残留放射能が高いところが複数箇所ある事が分かっていたが詳しくは調べられてはいなかった。ここでは入射部と超伝導ウィグラーマグネット (VW14) 付近のビームロスを観測した。

3.4.1 入射部のビームロス

図 6 に入射部の写真を示す。

PF の入射モードにはキッカー入射と偏向 6 極マグネット (PSM) 入射があるが両者のビームロスのパターンに明らかな違いが見られた。図 7 に二つの入射モード時のビームロスのパターンを重ね合わせたオシロスコープの波形を示す。

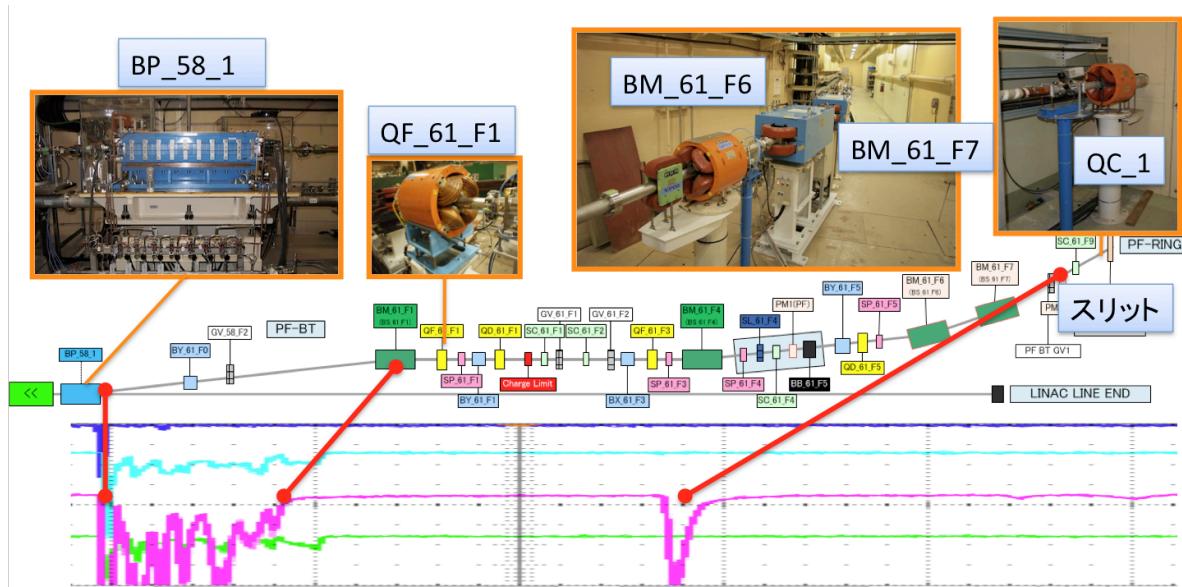


図 5 : PF ビームラインのビームロスの分布

CH4 に末端の反射の影響が見て取れる。CH4 の最後に見られる信号は 2 分岐ダクトでロスして下流側に出た光がファイバー端 (QF_61_F1) で反射して前後が逆になって重ね合わさった波形である。

分岐ダクトから 67.5m の位置に大きく出ているビームロスであるが図面にコンポーネントが記載されていないため現場で実測したところ BM_61_F7 の中心から 7.5m の位置にスリットが設置されていた。図 4 にその写真を示す。

BP_58_1 直後の分岐ダクトから BM_61_F7 までは図面から 58.8m である。ビームロスが見えている場所は分岐ダクトから 67.5m であるからスリットの下流 1.2m の位置になる。おそらくスリットに削られたビームはスリットの後方 1.2m 付近に当たっていると思われる。図 5 に各コンポーネントの配置とビームロスの位置関係を示す。

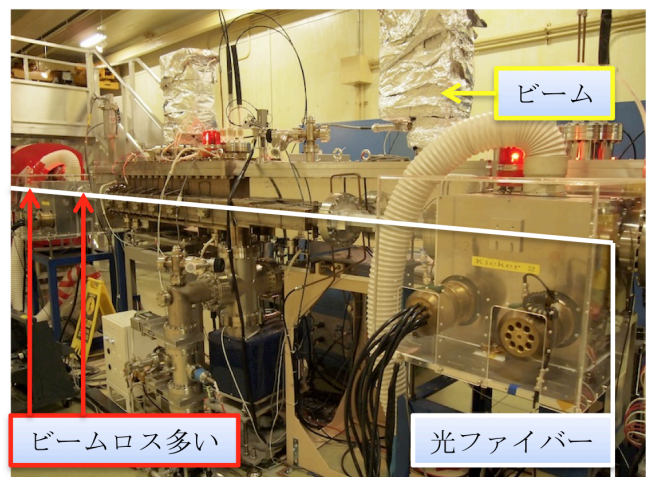


図 6 : PF リング入射部

ビームロス場所の特定をするためにケーブル終端からの反射波形を考慮する。PSM 入射の波形で最後のピークは最初のピークの反射波形であることを考慮すると、このビームロスはセプタムマグネット直後のダクトで発生していることが分かる。またキッカー入射、PSM 入射ともに同程度出ているビームロス量はセプタムマグネット後方の Q マグネットで起きていることがわかる。PSM 入射ではセプタムマグネット直後のダクトで大量にビームロスがあるがキッカー入射の場合はあまりビームロスしていない。

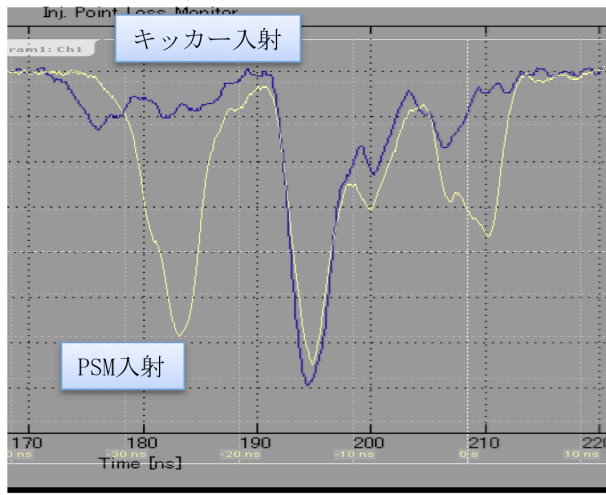


図 7 : キッカー入射と PSM 入射

3.4.3 VW14 付近のビームロス

図 8 に VW14 付近の写真を示す。

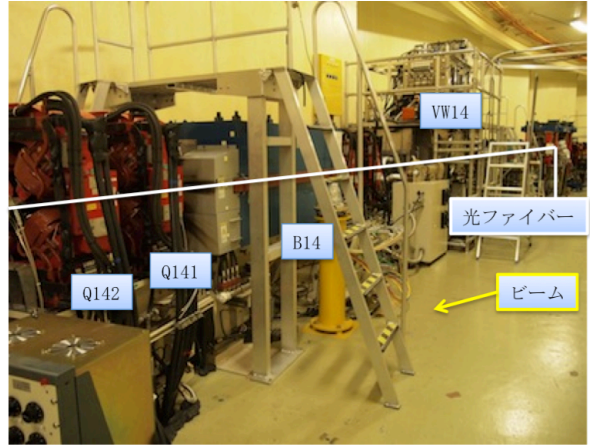


図 8 : VW14 と下流のマグネット

図 9 にビームロスの波形と VW14 付近の各コンポーネントの対応を示す。CH1 は壁側、CH2 は通路側に布設した光ファイバーの信号である。VW14 以外はコンポーネントの中のダクトに接して布設している。ビームロスが見えている灰色の部分にはベローズである。

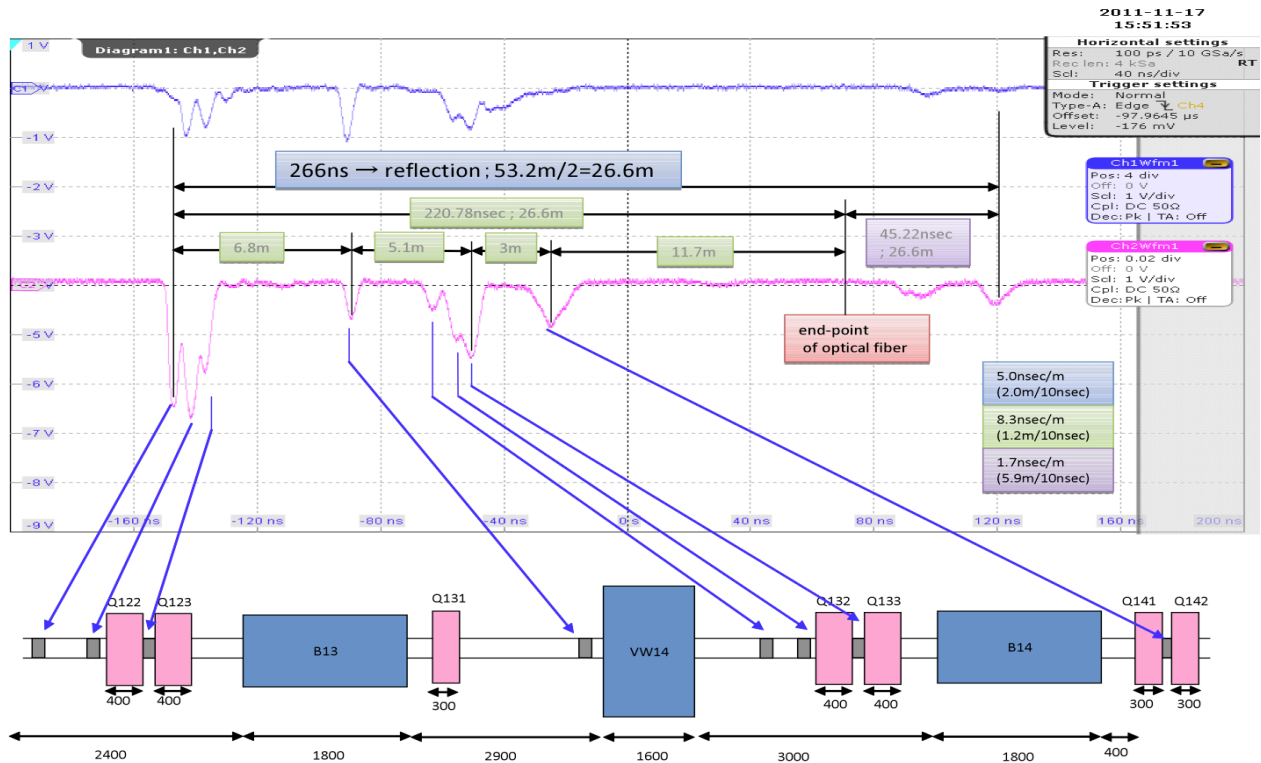


図 9 : PF ビームラインのビームロスの分布

3.4.4 PF 入射時のビームロス

これまでリング上でビームロスが起きている場所の特定を行なって来た。図 10 に VW14 付近に布設したロスモニターの信号を示す。ビームロスのマクロな様子を見るために時間レンジを広げてある。これによって入射何周目にどの様なビームロスが起きているかが分かる。

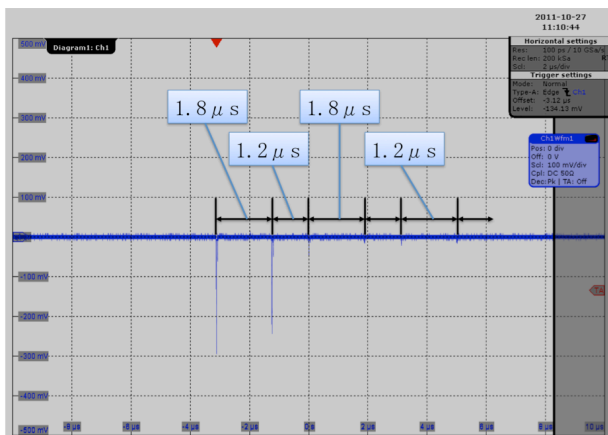


図 10 : 入射時のビームロス@VW14

PF リングの周回時間は $0.6 \mu \text{ sec}$ であるから、3 周回、2 周回ごとに起きていることが分かる。図 11 に入射部付近に布設したロスモニターの信号を示す。

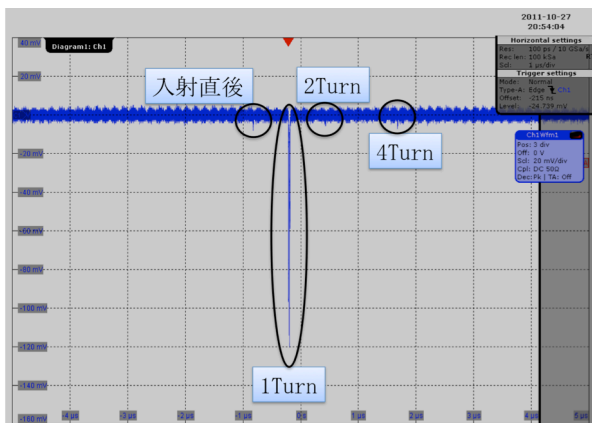


図 11 : 入射時のビームロス@入射部

入射時のビームロスはわずかに見えている。入射ビームがリングを 1 ターンして戻って来た時にセプトマグネット直後のダクトで大量にロスしている。その後 2 ターン目と 4 ターン目にロスがわずかに見える。リングに入射されたビームはベータatron 振動を起こしながら主に VW14 近傍でビームロスを起こしていることが分かった。

4. まとめ

ビーム（電子、陽電子）の速度と光ファイバー中を進む光の速度差からビームロスの場所の特定が出来る事を示して来た。但し、あくまでもビームロスの結果荷電粒子がダクト外に出て来た場所を特定出来るだけである。これを理解して使用すればビームチューニング時の強力なツールになると確信している。また、敷設も非常に容易であるため観測場所の移動等も即座に対応可能である。

さらにリング型加速器の場合は周回ごとのビームロスを解析すればリング内でビームがどの様に振動しているかを推測する事が出来る。

但し、敷設経路を充分考慮しておかなくてはならない。見たくない光が混ざっている可能性がある事を常に頭に入れて信号を解析しないと間違った結論を出してしまう可能性がある。

今後は測定精度を上げるとともに、表示系の整備を行い運用して行きたい。

参考文献

- [1] Y. Yano, et al., “光ファイバービームロスモニターの開発” Proceedings 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, Tsukuba, August 1-3, 2011