

高速ロスモニターとその放射線劣化

川久保 忠通^{A)}、佐波 俊哉^{A)}、石田 忠治^{B)}

^{A)} 高エネルギー加速器研究機構 〒305-0801 茨城県つくば市大穂 1-1

^{B)} 三菱電機プラントエンジニアリング株式会社 〒110-0015 東京都台東区東上野 5-24-8

概要

石英や個体シンチレーターのファイバーやロッド、それに液体シンチレーターを用い、陽子シンクロトロン各バンチ毎のビームロスを観測できる高速ロスモニターを開発した。このモニターは特にビーム引き出し時の調整に有効である。しかしながら長期間の使用では放射線劣化による信号減少が生じる。そこでこれらのモニターヘッドの構成要素である各種シンチレーターの試料に、線やブースターリング引き出し時のビームロスによる放射線を照射し、サンプルの発光量と透明度の放射線照射量依存性を測定した。

1 ロスモニター本体

1.1 モニター構造 [1]

陽子シンクロトロン中で周回しているビームが壁面に衝突すると大気中に放射線を発生する。その放射線粒子が以下に述べるモニターヘッドを通過する時光を発生する。本モニターはこの光を光電子増倍管(以後“PMT”と略する)で検出してビームロスをアナログ的に測定する装置である。このヘッドの種類によって2種に大別する。

(1)ファイバー型：(図1)に示すように任意の長さ(例えば2m)のシンチレーションファイバーか石英ファイバーを全面遮光し、片端をPMTに接続する。ファイバーとPMT受光面との接続法は、ファイバー端部を中央に穴の開いたプラスチック円盤に差し込んで接着固定し、この円盤をグリスでPMT受光面に密着させる。この接続面とPMT全体を遮光と磁場シールドを兼ねて厚さ1mm程度の鉄パイプで覆う。

この場合ファイバー中での発光は、石英ファイバーの場合、チェレンコフ効果によるものであり、シンチレーションファイバーの場合、シンチレーション発光による。



図1: ファイバー型

(2)ブロック型：(図2)に示すようにモニターヘッドをプラスチックシンチレーターブロックや、液体シンチレーターを入れた石英ビンか石英窓を持つSUSパイプで製作し、その端面に石英ファイバーを接続する。石英ファイバーの残りの端末にPMTを接続する。

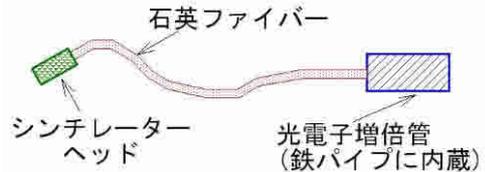


図2: ブロック型

この2種のモニターヘッドの特徴として、(1)は1次元的に長い距離間のロスの発生が監視出来るが、(2)は局所的な監視しか出来ない。ロスの監視範囲によって使い分ける。このモニターを製作する時に肝要なのは後述するようにガラスは放射線によって劣化しやすいからPMTの受光面を石英ガラスにする事である。又、PMTの放射線劣化を防ぐ為にファイバーの長さが許す限り周回ビーム軌道から離して設置する。

1.2 測定結果

上記のファイバー型のモニターをKEK-PSブースターリングの入射点と引き出し点付近に設置した時のHビーム入射時(40MeV陽子のロスによる)と引き出し時(500MeV陽子のロスによる)のロス波形をそれぞれ(図3)と(図4)に示す。

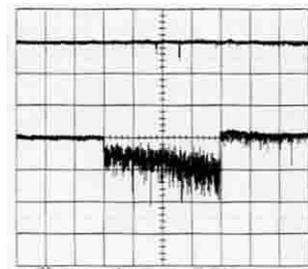


図3: Hビーム(40MeV)入射時のロス波形

- * 上図: 石英ファイバーによる($V_{PMT}=1kV$)
($10\mu s/d$, $50mV/d$)
- * 下図: プラスチックシンチレーションファイバーによる ($V_{PMT}=1kV$) ($10\mu s/d$, $50mV/d$)

(図3)より分かるように石英ファイバーではチェレンコフ発光のエネルギー依存性により40MeV陽子ビームのロスは測定出来ない。(図4)の最初のバンチ毎のロス波形はバンプマグネットの励磁によりビームが引き出しセパタムに寄せられる事によって生じるロスであり、最後の鋭いピーク状のロスはキッカーマグネット励磁によってビームが取り出される時のものである。キッカーロスは石英フ

ファイバーでもシンチレーションファイバーでも見えるがバンプロスには石英ファイバーの方は検知しにくくなる。これはキッカーロスとバンプロスの生じる場所が異なっていて石英ファイバーによる検知では方向依存性がある事に起因する。この場合も PMT のバイアス電圧を増加すると良く見えるようになるがキッカーロス信号が飽和して線形性を得る事が出来なくなる。

これらの波形はモニターヘッドがプラスチックシンチレーションファイバーに限らず、(シンチレーター入り)プラスチックブロックや液体シンチレーターをヘッドにしたものでも同様に検知出来る。

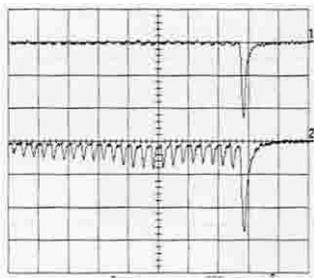


図 4 : 引き出し時(500MeV)のロス波形

- * 上図: 石英ファイバーによる ($V_{PMT}=800V$) (500ns/d, 2V/d)
- * 下図: プラスチックシンチレーションファイバーによる ($V_{PMT}=600V$) (500ns/d, 2V/d)

2 ロスモニターの放射線劣化

2.1 放射線照射

第 1 章で述べたようにモニターヘッドの材質として石英・プラスチックシンチレーター・液体シンチレーターを用いるが、放射線によって信号の減少をもたらす要因はシンチレーターの発光量(石英を除く)とその光を PMT まで伝達する為のシンチレーター内光透過度の放射線劣化の 2 点である。そこでこれらのヘッドの照射試験を以下のように行った。

(1) γ 線照射 (Co^{60} による)

- 照射期間: 2003 年 5 月 28 日から 6 月 5 日 (8 日間)
- 場所: 日本原子力研究所高崎研究所 (第 2 セル室)
- 照射サンプル: プラスチックシンチレーター ((a)EJ200, (b)EJ208)、液体シンチレーター ((c)EJ399-06 バブリング無し, (d)EJ399-06 バブリング有り) の 4 種
(注: 使用したシンチレーターは ELJEN Technology 社製。液体シンチレーターはガラス瓶に封入した)
- 照射線量: (0.2kGy/h ~ 2.33kGy/h の位置と照射時間変化)
① 6.8kGy, ② 9.7kGy, ③ 46.9kGy, ④ 65.2kGy, ⑤ 277.6kGy, ⑥ 434.1kGy の 6 種

(2) 500MeV 陽子の引出し時ビームロスによる放射線 (陽子・中性子・ γ 線が混在)

- 照射期間: 2003 年 3 月 27 日から 7 月 22 日 (117 日間)
- 場所: KEK-PS ブースター室 (500MeV 引出し付近)

- 照射サンプル: プラスチックシンチレーター ((a)EJ200, (b)EJ208)、液体シンチレーター ((c)EJ399-06 バブリング無し)、(d)パイレックスガラス、(e)石英ガラスの 5 種
- 照射線量: (線源からの距離と照射日数による)
① 0.4kGy, ② 1.3kGy, ③ 3.0kGy, ④ 3.3kGy, ⑤ 6.7kGy, ⑥ 8.5kGy, ⑦ 8.8kGy, ⑧ 9.5kGy, ⑨ 14.9kGy の 6 種

2.2 劣化測定法

プラスチックシンチレーター、ガラス、石英の形状は 1cm 角で長さが 4cm の四角柱であり、液体シンチレーターでバブリング無しはガラス瓶、バブリング有りは石英ガラス瓶に密封され、それらの瓶形状は外形 1cm、高さ 4cm の円筒状である。

(1) α 線源による発光量と透過度測定

(図 5) の左図に示すように試料の頭部に密着させて Am^{241} の α 線源を置いてシンチレーター内で発光させ、その光を試料底部に密着させた PMT で測定する。試料内部での α 線の飛程距離が短いのでシンチレーターによる発光は試料頭部で起きる。従って PMT に入力する光量は試料頭部付近の発光量と試料内部 (4cm の光路長) の光透過度の劣化に依存する。PMT の信号を波高分析機にかけ、発光量のスペクトルを測定した。

(2) 光学的透過度測定

(図 5) の右図に示すように光源の波長を 200nm から 600nm まで 4nm ステップで変化させ、透過度を測定した。この場合の光路長は 1cm である。

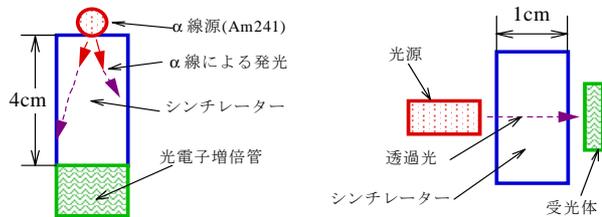


図 5 : 劣化度測定システム

- * 左図: Am^{241} の α 線源による発光量と透過度測定
- * 右図: 光学的透過度測定

2.3 劣化度測定結果

(1) α 線源による測定結果

γ 線を照射した試料を α 線源によって測定した典型的な結果を (図 6) に示す。上図がプラスチックシンチレーター (EJ200) の未照射の場合であり、下図が 65.2kGy の γ 線を照射した場合である。 γ 線照射によりシンチレーター内部での 1 回の発光による PMT の受光量が減少しているのが分かる。発光回数の総量は両者共に殆ど同じであるところからシンチレーターの劣化は無く、発光源から PMT までの光の透過度が減少しているのが原因だと見て良いだろう。

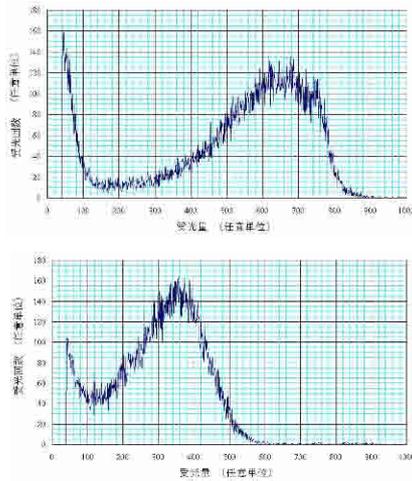


図 6 : α 線源による波高分析測定結果 (試料:EJ200)

- * 上図: 未照射
- * 下図: 65.2kGy の γ 線を照射した場合

(図 7) に EJ200 の場合の、受光量の重心の放射線照射量依存性を示す。累積放射線量を x とすると規格化した PMT 受光量(y)は $\exp(-a \cdot x)$ と近似出来、500MeV 陽子ビームロスの場合($a=0.018$)は γ 線の場合($a=0.005$)より約 4 倍劣化が大きい。これは放射線照射量を測定したモニターが γ 線の場合アラニン線量計という確立した測定法であるのに対し、陽子ビームロスによる陽子・中性子・ γ 線が混在した放射場の測定には AI の放射化測定という未だ確立していないモニターを用いた事によるのかも知れない。

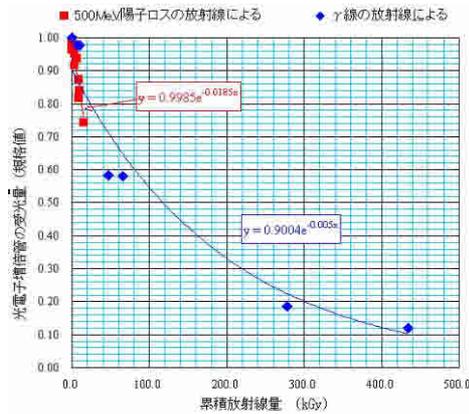


図 7 : α 線源による EJ200 の受光量重心の放射線照射量依存性

(2) 光透過度測定結果

シンチレーターの発光波長のピーク値は 420nm である。従ってその波長の透過度の放射線照射量依存性を求めた。液体シンチレーター(EJ399-06)や石英ガラスも測定したが紙数の都合で省略し、EJ200 とパイレックスガラスの測定結果をそれぞれ (図 8) と (図 9) に示す。EJ200 の場合は α 線源による測定と同様、 $\exp(-a \cdot x)$ と近似出来、500MeV 陽子ビームロスの場合($a=0.0043$)は γ 線の場合($a=0.0009$)より約 5 倍劣化が大きい。

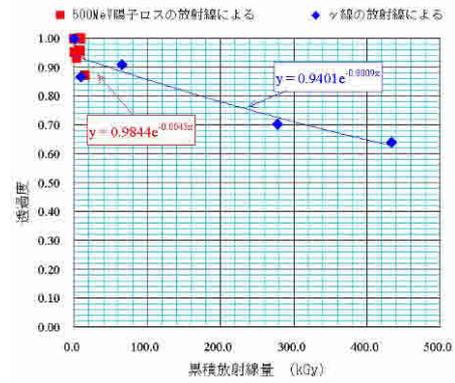


図 8 : EJ200 の光透過度の放射線照射量依存性

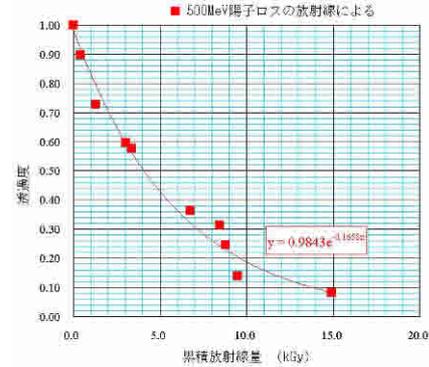


図 9 : パイレックスガラスの光透過度の放射線照射量依存性 ($y=\exp(-0.166x)$)

(3) 測定結果のまとめ

- シンチレーションブロック(EJ200)に於いて、 α 線による劣化度(a)が光透過度の場合の約 4 倍である事より、シンチレーションモニターの信号劣化は主にその材質の光透過度の減少に起因すると言える。(←光路長の違い)
- γ 線と陽子ビームロスによる照射量をそれぞれアラニンと AI で測定する時、EJ200 のプラスチックシンチレーターを使用する場合の EXP(-1)倍に信号が減衰する放射線照射量は 4cm の光路長の時、 γ 線で 200kGy、陽子ビームロスで 54kGy である。1cm の光路長ではそれぞれ 1100kGy、230kGy である。
- パイレックスガラスの放射線照射による劣化は著しく、EXP(-1)倍となるのは陽子ビームロスで 6kGy である。一方石英ガラスは 15kGy までは全く劣化しなかった。

参考文献

- [1] T. Kawakubo, *et al.*, Proceedings of the 15th Meeting of the International Collaboration on Advanced Neutron Sources (ICANS-XV), Tsukuba, Nov. 6-9, 2000.

謝辞

試料に γ 線照射の機会を与えて下さった日本原子力研究所の草野譲一氏と森下憲雄氏にこの紙上を借りてお礼を申し上げます。又、放射場測定に多大な御協力と御指導を頂いている KEK の沼尻正晴氏にも深く感謝致します。