

ビーム透過型薄膜スクリーンモニターの開発

安積隆夫¹、小林利明、鈴木伸介、花木博文、柳田謙一、山下明広

高輝度光科学研究センター 放射光研究所

〒679-5198 兵庫県佐用郡三日月町光都 1-1-1 SPring-8

概要

SPring-8 線型加速器の 1 GeV シケイン部ではスクリーンモニターによるエネルギー分布測定がおこなわれている。このモニターは薄膜スクリーンが使用され、高エネルギー電子ビームとスクリーンとの相互作用で発生する遷移放射光のビームスポット形状を観測することで重心エネルギー、エネルギー幅を取得する。薄膜スクリーンには 12.5 μm のカプトンフォイルに 0.4 μm のアルミニウムを真空蒸着したものを採用している。1 GeV 電子ビームがスクリーンを通過することによるエミッタンスの増大は入射リングのビームアクセプタンス以下に抑えられているため、スクリーンの有無によるリングの入射ビーム電流への影響は無視できる。このモニターの実用化によりブースターシンクロトロン、ならびに NewSUBARU へのビーム入射中に線型加速器でのエネルギー分布が常時測定可能となった。

1. はじめに

SPring-8 線型加速器からの 1 GeV 電子ビームは 8 GeV ブースターシンクロトロン、1.5 GeV 蓄積リング "NewSUBARU" に供給されている。ブースターシンクロトロンへのビーム入射は蓄積リングの運転モードに応じて 40 ns、1 ns のビームパルス幅が使用され、1日に1、2回の約10分間の入射がおこなわれる。それ以外の線型加速器の運転は NewSUBARU 対応となり、数秒に1回の連続したビーム入射がおこなわれている。このため線型加速器には長期間の安定性が要求されている。さらに現在検討されている 8 GeV 蓄積リングへの Top-up 運転の実現のためには、線型加速器からのビーム電流強度、ビームエネルギーの安定化が必要不可欠である。高安定な入射ビームを実現するために 2001 年 4 月からはエネルギー圧縮システム [1, 2] が導入され、さらに 9 月からはリングの加速周波数である 508.58 MHz と線型加速器の加速周波数である 2856 MHz との RF 周波数同期タイミングシステム [3] による運用がおこなわれている。これらビームエネルギー、およびビーム電流強度の安定化に貢献する装置を導入することにより常時 0.02% (rms) 以下のエネルギー安定度を達成している。エネルギー圧縮システムにて補正される前のエネルギー変動を常時観測することは多くの RF 装置、電磁石電源などの故障等による不安定箇所を早期に探知する上で有効

である。このため 1 GeV シケイン部中央へビーム透過型薄膜スクリーンモニターの導入をおこなった。このモニターは薄膜カプトンフォイルにアルミニウムを真空蒸着したスクリーンを使用しており、このスクリーンをビームが通過するときに発生する遷移放射光をランダムシャッター機能を搭載した CCD カメラによりエネルギー分布を取得する。リングへのビーム入射中にエネルギー分布が撮像され、自動化された画像解析装置により、重心エネルギー、エネルギー幅が得られる。これらの数値は随時データベースへ蓄えられる。本稿では薄膜スクリーンモニターシステムの構成と特性、ならびに実際に測定されたエネルギー分布変動について述べる。

2. システムの構成

1 GeV シケイン電磁石は図 1 に示すように 4 台の偏向電磁石から構成されており、第 2、3 偏向電磁石の間で最大 1 m のエネルギー分散を発生する。このエネルギー分散部の有効口径は 100 mm であり、ビームエネルギー選別用スリット、ビーム透過型薄膜スクリーンモニターが配置されている。薄膜スクリーンホルダー部は圧空によるアクチュエータにより駆動し、ビーム進行方向に対して 45° 傾いたスクリーン表面から下方に発生した遷移放射光をランダムシャッター機能搭載 CCD カメラ (TAKEX FC300M-T1) により撮像する。CCD カメラはパンチ長と同程度の時間で放射する遷移放射光を得るために、外部トリガー信号入力部が設けられ、ゲート時間幅が RS232C により遠隔設定が可能である。さらにビーム電流値による光量に合わせてゲイン調整も可能である。

薄膜スクリーンの有効寸法は 70×30 mm であり、この範囲内の任意の位置から発生する遷移放射光を正確に撮像するために対物口径が 80 mm のテレセントリックレンズを採用している。テレセントリックレンズとは主光線が焦点を通過するように配列された光学系であり、主光線が光軸に対して平行 (画角が 0°) となるレンズである。これは平行光線に近い光だけを拾うため、物体の大きさが像に正確に反映され、一般のレンズでは避けられなかった視差による画像歪みを発生しない特徴をもっている。したがってテレセントリックレンズの使用により計算機上で画像補正をかけることなく正確な画像計測が可能となる。

¹ E-mail: asaka@spring8.or.jp

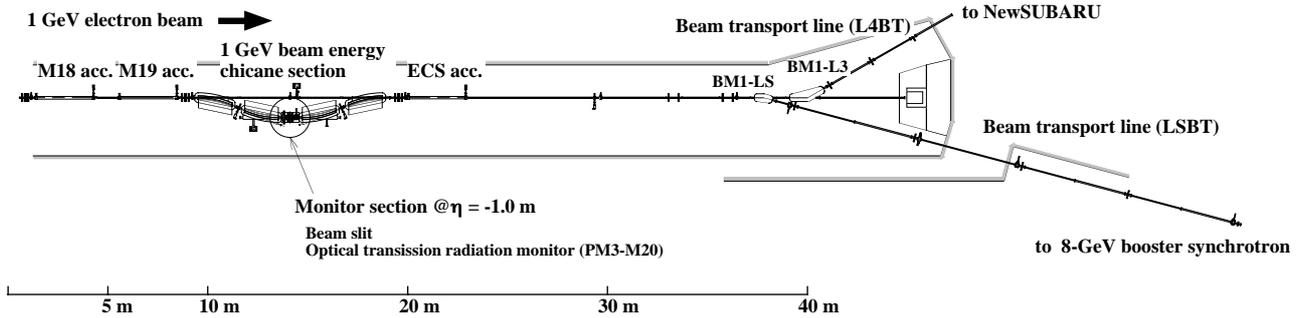


図1 1 GeV 線型加速器下流部、シケイン部、エネルギー圧縮システム、ビーム輸送系

薄膜スクリーンからテレセントリックレンズまでの距離は光軸アライメントが容易であることを第一に考慮し、モニターチャンバーのビューポートの直近に配置されるように最小至近距離 (115 mm) を決定した。

薄膜スクリーン挿入時のエミッタンスへの影響はブースターシンクロトロン、NewSUBARU への入射ビーム条件として規定されている $1 \times 10^{-6} \pi \text{ m rad}$ 以下でなければならない。薄膜スクリーンの選定においては多重クーロン散乱によるエミッタンスへの影響と機械的強度を考慮し、12.5 μm のカプトンフォイルに 0.4 μm のアルミニウムを真空蒸着したものを採用した。

1 GeV ビームにおいて、スクリーン材質とその厚さによる多重クーロン散乱は図2に示すような特性となり、現在、到達している 1 GeV ビームの $5 \times 10^{-8} \pi \text{ m rad}$ のエミッタンスは薄膜スクリーンの通過により $5 \times 10^{-7} \pi \text{ m rad}$ と見積もられた。

図3は薄膜スクリーンホルダーの写真である。薄膜スクリーンホルダーは外部フレームと10個のスクリーン固定部とから構成されている。スクリーン全域の平面度を確保するため、薄膜スクリーンは上下左右で固定され、外部フレームと独立したこれらの固定部は常時テンションがかけられる機構となっている。

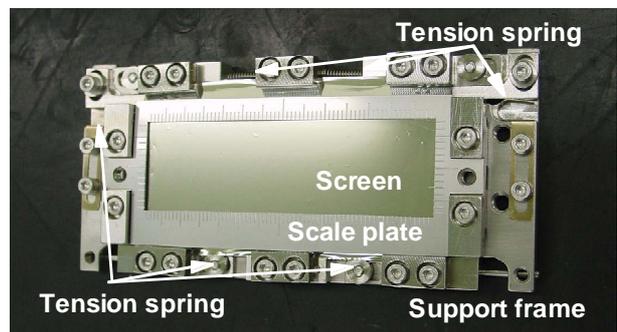


図3 スクリーンホルダー

CCD カメラへの外部トリガー信号はカメラ本体の内部遅延時間を考慮し、ビームトリガー信号に対して 300 μs 前に入力される。シャッター速度はフレームメモリに画像を書き込むことで最小ゲート幅 90 μs の高速シャッターを実現する。このためビームショット毎に静止画像が連続して取得、更新される。撮像されたエネルギー分布は NTSC 信号に変換され、ビデオスイッチ、CATV を経て画像処理装置へ入力される。

画像処理装置ではあらかじめ指定された測定画像領域にてエネルギー分布の重心を検出し、水平、垂直方向のビームスポット重心位置とビーム形状の標準偏差を算出する。これらの数値はビームショット毎にデータベースへ保存される。データベースからの履歴データの取得は Web browser へアクセスすることでリアルタイム表示がおこなえる。

3. エネルギー分布測定

薄膜スクリーンから得られるエネルギー分布を図4に示す。このときのビーム条件は 1 ns、1.5 nC であり、画像処理装置から得られるエネルギー幅は 0.2% (rms) である。測定領域を確認のために、シケインの磁場強度変化に対する重心エネルギー、およびエネルギー幅の測定をおこなった。測定結果を図5に示す。エネルギーに対応する縦軸の単位は CCD 素子のピクセル数で表示されている。 $\pm 3.0\%$ のシケイン磁場強度の範囲内でエネルギー幅はほぼ一定値であることから、光学系による著しい画像の歪み等が発生していないことが確認された。さらにこ

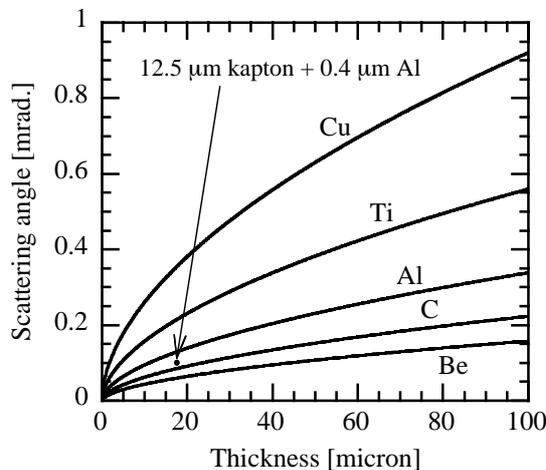


図2 1 GeV 電子ビームの多重クーロン散乱特性

の結果から 1 GeV のビームエネルギーに対して 1 ピクセル当たり 0.014% のエネルギー分解能となる。

薄膜スクリーン有無によるリングへのビーム入射効率への影響についてブースターシンクロトロン、NewSUBARU のそれぞれについて調べるために、リングにあるビーム電流モニターと薄膜スクリーン前後に設置されている壁電流型モニターから得られるビーム信号強度の比較をおこなった。その結果、リングへのビーム入射効率への影響は無視できるレベルであった。さらにエミッタンスへの影響を調べるために、1 GeV シケイン前後にあるビームサイズモニター (4 台のスクリーンモニター、3 台のワイヤースキャナー) によるエミッタンス測定の結果、1 ns のビームパルス幅で 1.7 nC のビーム電流強度の場合、薄膜スクリーン挿入時には $4.0 \times 10^{-8} \pi \text{ m rad}$ から $1.2 \times 10^{-7} \pi \text{ m rad}$ のエミッタンス増加が確認された。前節で示した多重クーロン散乱を仮定した場合の見積もりと比べて上記したエミッタンスの増加は 1 / 4 であった。これは電子ビームのほとんどが薄膜スクリーンと相互作用せずに通過しているためだと考えられる。

図 6 には NewSUBARU へのビーム入射中に得られた重心エネルギー、およびエネルギー幅の変動を示す。エネルギーに対応する縦軸の単位は CCD 素子のピクセル数で表示されている。9 時間のビーム入射の間で $\pm 0.28\%$ (peak to peak) の重心エネルギーの変動が観測された。

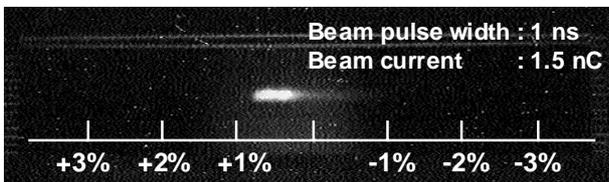


図 4 遷移放射光による 1 GeV エネルギー分布

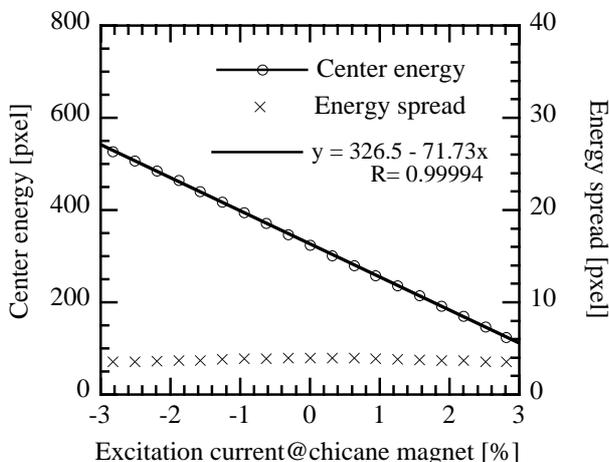


図 5 シケイン電磁石励磁電流強度による重心エネルギー、及びエネルギー幅への影響

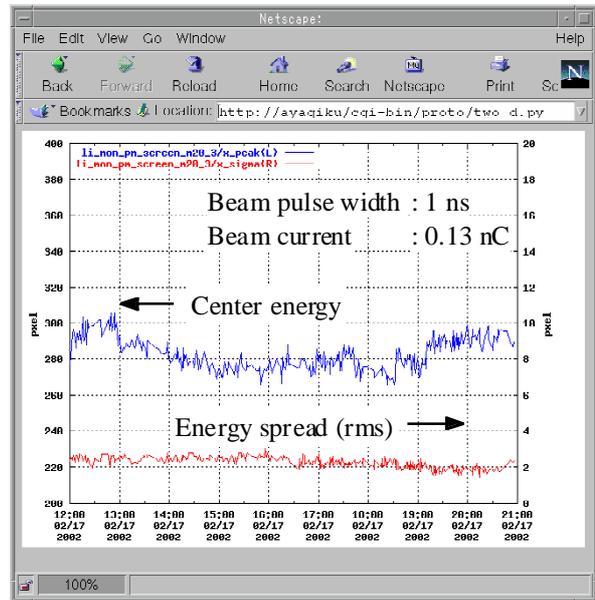


図 6 Web browser により履歴データ表示した重心エネルギー、およびエネルギー幅の時間変動の様子 (0.014%/pxel@1 GeV beam energy)

4. まとめ

線型加速器の運転において重心エネルギーとエネルギー幅の時間変動の取得は多くの機器の安定性を把握する上で有効である。特に Top-up 運転を目指している放射光リングの入射器では長期間に及ぶ連続運転がおこなわれるため、安定したビーム入射電流強度、ビームエネルギーの維持が要求される。これを請けてビーム透過型薄膜スクリーンモニターの開発がおこなわれた。ビーム入射効率の低下、およびエミッタンス増加を極力抑えることを考慮し、スクリーン材質の選定、製作した。さらに常時測定可能なモニターシステムとするため自動化された画像処理装置による画像データ解析後、重心エネルギー、エネルギー幅の数値データはデータベースへ蓄積される。

導入されたモニターについてビーム試験をおこない、薄膜スクリーン前後のビーム透過効率、エミッタンスへの影響を評価した。さらにリングへのビーム入射効率はスクリーンの有無に関わらず安定したビーム供給が実現していることを確認した。

参考文献

- [1] T. Asaka et al., "Design of the energy compression system at the SPring-8 linac", 7th EPAC, Vienna, June 2000, p.806-808.
- [2] T. Asaka et al., "Performance of the energy compression system at the SPring-8 linac", 8th EPAC, Paris, June 2002.
- [3] Y. Kawashima et al., "New synchronization method of arbitrary different radio frequencies in accelerators", Phys. Rev. ST Accel. Beams 4, 082001 (2001)