

[P8-23]

Conceptual Design of Energy Compression System for the SPring-8 Linac

T. Asaka, T. Hori, T. Kobayashi, A. Mizuno, S. Suzuki,
T. Taniuchi, K. Yanagida and H. Hanaki

SPring-8/Japan Synchrotron Radiation Research Institute
SPring-8, Mihara, Mikazuki, Sayo-gun, Hogo, 678-5198 Japan

Abstract

A beam energy analyzing system was completed at the end of 1-GeV linac in January 1999. This system, which has a chicane shape, consists of four rectangular bending magnets, a beam profile monitor and a non-distractive beam position monitor. We are planning to adopt the energy compression system (ECS), which comprises of the chicane section and a 3-m long accelerating structure. An analysis of the bunch length and energy spread of the beam passing the ECS have been performed by the simulation code PARMELA. It is found that the energy spread of 0.5% (rms) with the bunch length of 20psec is compress 0.2% (rms). In this paper, the composition of the ECS and the improvement of beam energy spread by the ECS are described.

SPring-8 線型加速器におけるエネルギー圧縮システムの概念設計

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 は 1997 年 9 月より 2、3 週間を 1 サイクルとした供用運転が開始しており、1GeV 線型加速器では 1 日 1、2 回の約 10 分間の入射に対して、安定したビームを供給するため、サイクル期間中はすべての高周波機器において常時 RF 電力投入を行っている。蓄積リングのビーム入射において均一なバンチ列形成を実現するために、昨年 2 月より線型加速器の入射電流の変動原因の調査が行われた [1]。結果として環境温度及び冷却水温度変化に伴う基準高周波信号の位相、クライストロンの出力位相変化が観測された。夏期停止期間中にはクライストロン冷却水温度制御、クライストロン変調器電源 de-Qing 率等の再調整が施され、改修以降のビームエネルギーにおいては $\pm 0.1\%$ (1 σ) 以下の安定度を實現している。また昨年 9 月より New SUBARU 1GeV 蓄積リングのビームコミッショニングが開始されているが、運転状況に応じて、ビーム入射電流増加に伴うエネルギー幅の抑制、またはエネルギーの安定維持が要請される。以上を請けて線型加速器ビーム性能高度化案の 1 つとして、エネルギー圧縮システム (ECS) の導入を計画している。本稿では線型加速器のビームエネルギー特性とシミュレーションコード PARMELA による計算で得られた ECS の効果について述べる。

2. エネルギー分析用電磁石の設置

1996 年の線型加速器ビームコミッショニング開始以来、エネルギー調整はシンクロトロンへのビーム輸送系 (LSBT) に設置してあるスクリーンモニター及びビーム位置モニターにより行われた。このため線型加速器単独

運転の場合でもシンクロトロンを運転しなくてはならず、放射線対策上、及びシンクロトロン寿命からも 4 台の偏向電磁石から構成されるシケインでのエネルギー分析が求められた。そこで設計当初に陽電子生成時のエネルギー幅圧縮のため考えられていた ECS に対してシケイン電磁石のみの設置を行い、エネルギー分析用に利用することとした。設置箇所は図 1 に示したように加速部最終段後方に 4 台の 24° の偏向電磁石を配置し、線型加速器のビーム軌道から平行に 1m 取り出す。 $\eta = 1m$ 部にはビームスリット、ビーム位置モニター、スクリーンモニターが設置された。特にスクリーンモニターの画像取得においてはビームトリガー信号と同期がとれるシャッターカメラを使用し、静止画像を得ている。シケイン電磁石設置後の性能試験で 1GeV 相当に対応する励磁を行ったとき 0.02T/m の四極成分が発生したため、シケイン後方では約 100mm のデイスパージョンが残ってしまった。現在は第 2、第 3 偏向電磁石間に四極電磁石を設けることで補正を行っている。

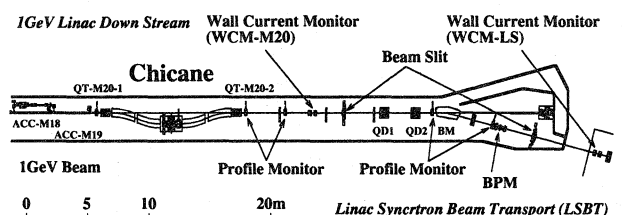


図 1 線型加速器 1GeV 部シケイン電磁石 ($\eta = 1m$) 及び線型加速器、シンクロトロンビーム輸送系 (Linac-Synchrotron Beam Transport : LSBT) の配置

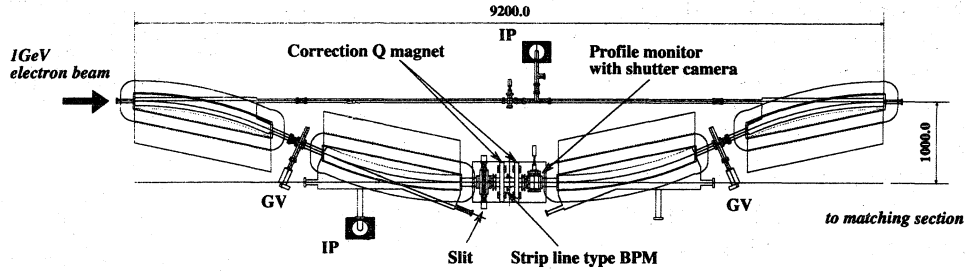


図2 シケイン電磁石及びモニター配置

3. ビームエネルギーの評価

図2に示したエネルギー分析用スクリーンモニターにより、1GeVエネルギー、エネルギー幅の測定が行われた。測定中のビームトリガー信号は蓄積リング周波数より生成される1Hzで行い、外部トリガー信号同期カメラ(東京電子工業製CS3700M)のシャッター速度は1/10000秒に設定された。図3には1Insecのビームパルス幅でビーム電流が1.9nCの測定例を示す。線型加速器のプリバンチャー、バンチャー、加速管の周波数である2856MHzと蓄積リングより規定されるビームトリガー信号は同期性をもたないことから、不規則に2及び3個のバンチを生成加速する。それぞれのバンチ当たりの電流量に応じて、加速管での過渡的ビーム負荷によるエネルギー差が生じる。このバンチ毎のエネルギー差は次式より求められ、計算結果を図4に示す[3]。図3から読みとられる測定値は計算結果とよい一致を示した。

$$E(t) = \sqrt{P_k R_s \ell (1 - e^{-2\tau})} \cdot \frac{R_s I \ell}{2} \left\{ \frac{2\tau e^{-2\tau} t - t_F}{1 - e^{-2\tau}} - \frac{1 - e^{-2\tau} \left(\frac{t - t_F}{t_F} \right)}{1 - e^{-2\tau}} \right\}$$

$$t_F \leq t \leq 2t_F$$

ここで P_k は加速管入力電力、 R_s はシャントインピーダンス、 ℓ は加速管長、 τ は減衰定数、 I はバンチ当たりの電流量、 t_F はファイリングタイムである。

蓄積リングのマルチバンチ運転で通常使用するビーム(ビームパルス幅が40nsec、ビーム電流が70mA (peak-peak))においては実測によりれば0.7% (full width)のエネルギー幅が生じている。一方、同じ条件のエネルギー計算で得られる値では0.64%である。したがって線型加速器において単バンチ及びマルチバンチビーム共に、シンクロトロンの入射エネルギーアクセプタンスである $\pm 1\%$ 以内のエネルギー幅を実現している。

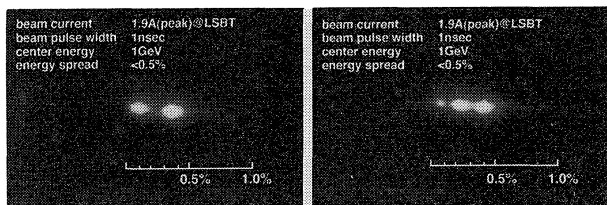


図3 2バンチ、3バンチで生じる過渡的ビーム負荷によるエネルギー差

さらにスクリーンモニターで得られたビーム形状に対して画像処理を施し、図5に示すようなエネルギーの時間変化についての測定を行っている。エネルギーにおいてはショット毎の安定性及び入射における再現性において $\pm 0.1\%$ (1σ)以下を達成している。

図5において重心エネルギー観測開始から約1時間にわたり変動がある。この主な原因としてはバンチャー空洞用クライストロンの印加電圧変動との相関が得られた。このクライストロンの出力電力変動に対してビームバンチング部(200keV-9MeV)でのビームの速度への影響をPARMELAにより評価した。観測された $\pm 0.5\%$ のクライストロン電力変動に対して0.1%の重心エネルギーの変動を与える結果を得た[2]。

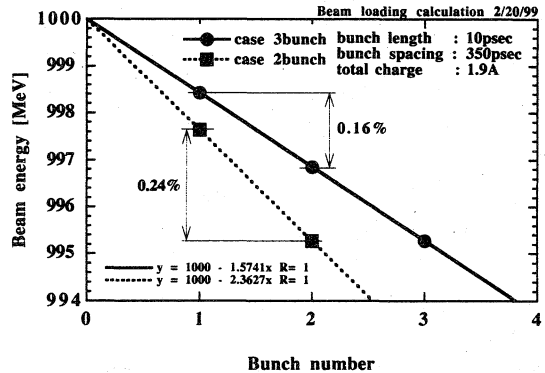


図4 各加速管入力電力に対する加速エネルギーと過渡的ビーム負荷によるエネルギー差

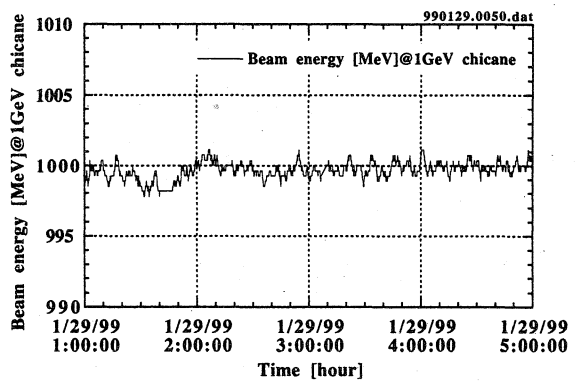


図5 シケイン部スクリーンモニターと同期型シャッターカメラによるエネルギー安定度測定

4. エネルギー圧縮システムの計算結果

エネルギー圧縮率の評価、ECS 加速管への投入電力及び位相の最適値を得るため、PARMELA による軌道解析を行った。ビームパラメータの初期値としてバンチ長は 20psec (full width)、エネルギー幅 0.1 ~ 0.5% (rms) とした。図 6 には各々のエネルギー幅に対して加速電場とエネルギー圧縮率、図 7 には加速管での設定位相によるエネルギー圧縮率の関係を示す。実際に観測されているエネルギー幅 (ビームパルス幅が 1nsec の場合 (図 3)) : 0.5% (full width)、ビームパルス幅が 40nsec の場合 : 0.7% (full width) に対して、図 6 に示した結果より、0.5% (rms) のエネルギー幅のビームには 6.86MV/m の加速電場で 0.2% (rms) までエネルギー幅圧縮が可能である。一方、位相設定については 40degree の範囲で一定のエネルギー圧縮が可能であるが、図 8 に示すように重心エネルギーは 1.0degree の位相変化に対して約 0.4MeV のエネルギー変化を与える。以上の結果から、エネルギー圧縮に加えて、現状よりさらにエネルギー安定度の向上を行うためには線型加速器上流部のビームバンチング部で決められるバンチの時間構造に対する ECS 加速 RF の位相安定度を 2.0degree 以内で維持することを要求する。したがって、本システムの高周波伝送部、クライストロン励振部、クライストロン変調器電源部などの各高周波機器の変動要因調査、変動抑制を行い、熱雑音の少ない装置の選択を行う必要がある。

ECS 加速管 ($R_s = 53M\Omega/m$) への投入電力は上述の計算結果から 5MW 程度が最適である。ショット毎の位相変動はクライストロン変調器電源電圧変動によるものが支配的であると考えられる。これはクライストロン管内において非相対論領域にある電子ビームの速度に依存するためである。この影響を縮小する手段として、クライストロン印加電圧の増大が有効である。現在、我々が使用している大電力クライストロン (TOSHIBA E3712) では最大 400kV ($\beta = 0.83c$) の印加電圧で 80MW の電力を発生する。最大電圧で使用した場合の安定度は $\pm 0.2\%$ (1 σ) で維持されており、このときの位相変動は 1.1degree と算出される。出力電力の調整は電力分配器、大電力位相器、電力結合器から構成される電力分配調整回路により最適電力を供給することを考えている。

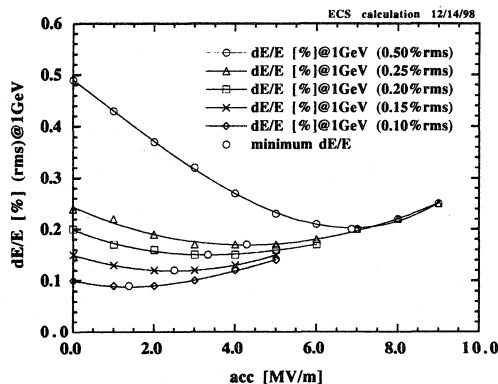


図 6 加速電場とエネルギー圧縮率の関係

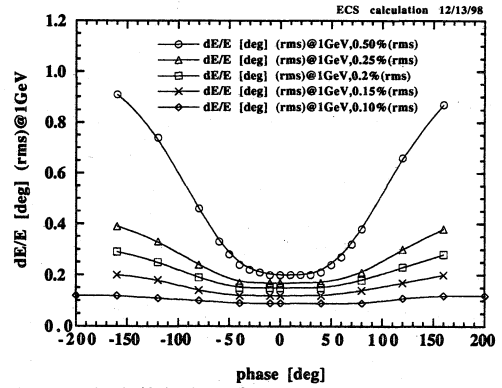


図 7 設定位相とエネルギー幅圧縮率との関係

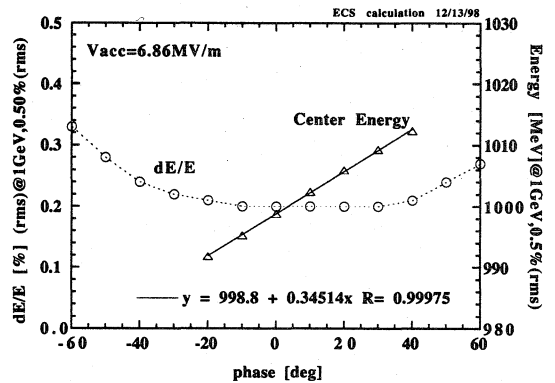


図 8 位相変化に対する重心エネルギーへの影響

5. まとめ

エネルギー分析を行うために 1GeV 加速後、4 台の偏向電磁石とビームモニターから構成されるシケインを設置し、現在、8GeV 蓄積リング及び New SUBARU 蓄積リングへのビーム入射においては、シケイン軌道でエネルギー及びエネルギー幅の調整、確認を行っている。シケイン直後に 3m 加速管を設け、バンチ長が 20psec (full width) のビームに対してエネルギー圧縮を行った場合、0.5% のエネルギー幅が 0.2% まで圧縮される計算結果を得た。さらに ECS 加速管の位相変化に対するエネルギーへの影響を評価し、その許容値を規定した。今年度中に高周波機器及び伝送部の選定を行い、来年の 9 月以降には ECS の性能試験を行う予定である。さらに、シケイン内のスクリーンモニターで使用しているデマルケストの代わりに金属フォイルを設け、遷移放射光によるエネルギー幅、バンチ長の同時測定を行うことを計画している。

参考文献

- [1] T. Asaka et al., "Stability of the RF System at the Spring-8 Linac", Proc. of 18th Particle Accelerator Conference, New York city, March 1999.
- [2] T. Asaka "Stability Evaluation of the 1 GeV Electron Beam by a Particle-dynamics Code" Spring-8 Annual Rep. 1998, to be published.
- [3] P. B. Wilson, "High Energy Electron Linac: Applications to Storage Ring RF Systems and Linear Collider", SLAC-PUB-2884, February 1982.