

# SPring-8 線型加速器におけるエネルギー圧縮システムの諸特性

安積 隆夫、小林 利明、鈴木 伸介、谷内 努、水野 明彦、柳田 謙一、花木 博文  
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

現在、SPring-8 線型加速器では 8GeV シンクロトロンと New SUBARU への入射を行っている。入射ビーム電流増加に対して肥大化するエネルギー幅を縮小し、安定な入射を実現するために、昨年 7 月に線型加速器最下流部にシケイン電磁石と加速管から構成されるエネルギー圧縮システム (ECS) を導入した。ECS のビームコミッショニングを経て、今年 4 月から通常運転を行っている。本論では ECS の高周波システムの構成、並びにその諸特性とビーム試験結果について述べる。

## 1. はじめに

SPring-8 蓄積リング、及び New SUBARU への入射条件により、ビームパルス幅 (1nsec、40nsec)、ビーム電流 (~2A peak) は線型加速器の電子銃部グリッドパルサー電圧、アイリスで規定される。生成されたビームは 2 台のプリバンチャーとバンチャーにより 15psec (FWHM) (計算値) まで集束された後、2.5 台の加速管により 1GeV までビーム加速が行われる。線型加速器最下流部にて 2 つのビーム輸送系に分けられ、New SUBARU、シンクロトロンへ入射が行われる。シンクロトロンでは 8GeV までのエネルギー増加の後、蓄積リングへ入射される。

蓄積リングでは入射時間の短縮のための入射ビーム電流増加、また均一なフィリングを実現のための入射ビーム電流の安定化が要請されている。これを請けて、線型加速器高度化案の 1 つである ECS の導入が計画された。1999 年から供給電力に対するエネルギー圧縮効率の詳細計算をシミュレーションコード "PARMELA" で行い、高周波パラメータを決定し、基本設計を行った。2000 年夏期停止期間に高周波系励振部、及び大電力部の設置工事が完了し、2000 年 10 月よりビームコミッショニングが始められた。また、これと並行して ECS 基準高周波励振部に導入される位相フィードバックシステムの開発を行い、4 週間を 1 サイクルとした通常運転において安定動作を実現している。

## 2. システムの構成

ECS はエネルギー幅を有するビームがシケイン軌道を通過する際に生じる行路差を利用し、その後段

にある加速管によりエネルギー変調を与えることでエネルギー圧縮を行う装置である [1, 2]。さらに、このシステムはエネルギー圧縮効果だけでなくエネルギー安定化においても効果的である。

シケイン部は 4 台のレクタン型偏向電磁石と補正用四極電磁石から構成されており、 $\eta=1\text{m}$  のエネルギー分散を発生する。シケイン部は 9.2m 間で構成され、コンプレッションファクターは 23.8deg/% となる。ECS 用加速管は主加速部で使用している同型の 3m 長進行波型定勾配加速管 ( $R_s=53.6\text{M}\Omega/\text{m}$ ) を採用し、2% (full width) のエネルギー幅、20psec のバンチ長に対して 7MV/m の電界強度で 1% までのエネルギー圧縮が可能となる [3]。このとき約 40deg の位相範囲で一定の圧縮効率を維持し、中心エネルギーは 0.35%/1deg の変化を与える。このことは位相の不安定性が生じた場合、これに伴うエネルギーへの変動を及ぼすことを示唆している。長時間運転にわたって安定した ECS の位相設定を第 1 に考慮し、図 1 に示す構成とした。ECS の励振はバンチング部で形成されるバンチ位相に正確に同期する必要があるため、バンチング部に高周波電力を供給しているクライストロン出力の高周波モニター用ベータホールカップラーより励振電力を得ることとした。最下流部にあるクライストロンまでは 2ppm の高周波ケーブル (7/8" SUCOFEED) により 120m の励振電力伝送を行い、900W 増幅器、減衰器、移相器を経て 80MW クライストロン (M18) に入力される。クライストロン出力電力は 4dB 方向性結合器により分岐され、50MW の高周波電力は最終段加速ユニットに供給し、30MW は大電力型移相器、減衰器により高周波パラメータを最適化の後、ECS 用加速管へ入力される。

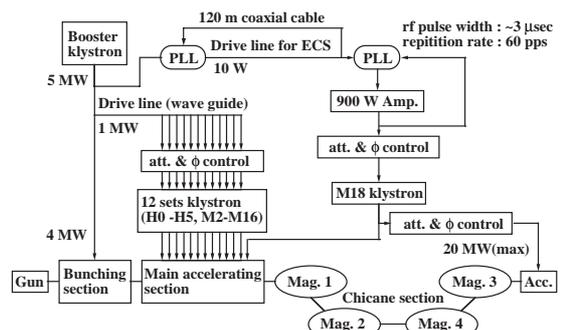


図 1: ECS 高周波系ブロック図

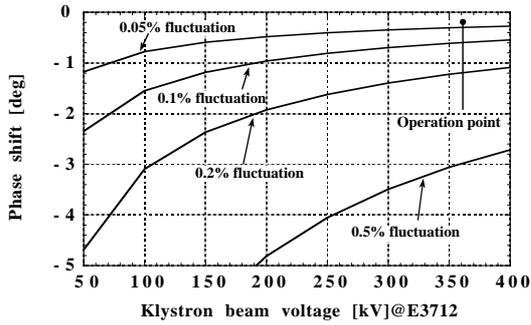


図2：80MW クライストロン変調器電源電圧変動による位相への影響

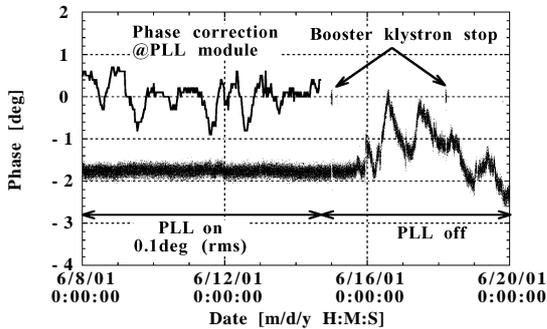


図3：120m にわたる高周波伝送系への位相フィードバックシステム導入による位相安定化

80MW クライストロン出力から ECS への分岐比は、最大定格出力に合わせて設計された。これはクライストロンの印加電圧変動 0.03% (rms) に対して最大出力電圧 360kV で使用することで、より高い位相安定化を実現するためである (図2)。これによりクライストロン出力で生じるショット毎の位相変動は 0.5deg (rms) と見積もられる。また、遅い位相変化は環境温度変化に依存する 120m の励振電力伝送ケーブルで発生することが予測される。この補正を行うために図1に示されるように同種高周波ケーブルにて同じ敷設経路で帰還ラインを設け、伝送部入力と帰還部出力との位相比較を行い、それぞれの移相器を同量駆動させることで、位相フィードバック

を行う。図3に位相フィードバックシステム有無による位相測定結果を示す。5日間 (6/15~6/22) の位相変化は環境温度変化に応じて 3deg (peak to peak) 程度発生している。これに対して位相フィードバックシステム動作 (6/8~6/15) により 0.5deg (peak to peak)、0.1deg (rms) の位相安定化を実現した。

### 3. ビーム試験

ECS 用加速管への供給電力の評価は 1GeV ビームを ECS 用加速管で加速位相に設定し、それによるエネルギー増加を測定することで行われた。エネルギー測定は図4に示すように線型加速器とシンクロトロン間のビーム輸送系 (LSBT) の  $\eta=2.3\text{m}$  に配置されるビームプロファイルモニター (PM3-LS) により行われた。ビーム条件は通常運転で使用される 200mA (peak) のビーム電流で 1nsec のビームパルス幅である。このときのエネルギー幅は 0.2% (full width) 以下であった。設定された位相量で生じる電力損失は移相器の低電力試験結果から、それぞれの設定位相量に対して補正値を与えている。得られた最大高周波電力は 18MW (設計値 : 20MW) となり、このときの加速電界は 13MV/m である。

エネルギー圧縮効率の評価測定のためのビーム試験はビームパルス幅 40nsec、1nsec それぞれについて行った。ECS 用加速管への供給電力によるエネルギー圧縮効果を図5、図6に示す。計算で得られた最大圧縮効果を得る電界強度は 7MV/m であり、良い一致を示している。特にビームパルス幅 40nsec においてはビーム負荷により発生するエネルギー幅 (2% (full width)) の効果的な圧縮 (1.1% (full width)) を実現している。しかしながら、エネルギー幅に関して、いずれのビームパルス幅においても計算結果より大きくなっている。この理由として、バンチング系における調整が不十分であることによるバンチ長の悪化、また 25 台の各加速管の最大加速位相からのわずかなずれにより、規定のバンチ内エネルギー分布から異なることによる影響であると考えられる。

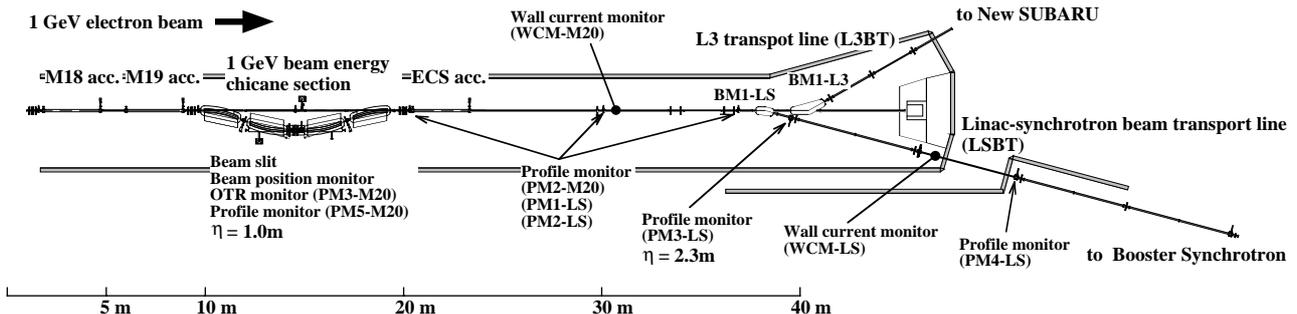


図4：エネルギー圧縮システム (ECS)、及び線型加速器・シンクロトロンビーム輸送系 (LSBT)

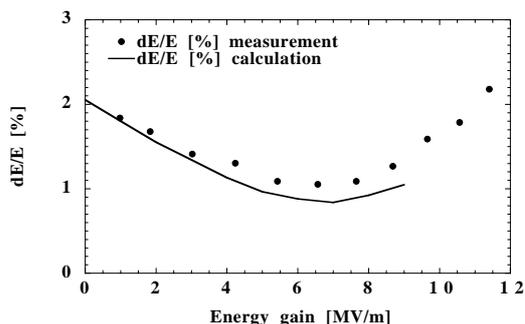


図5：エネルギー圧縮効率測定結果  
(ビームパルス幅：40nsec)

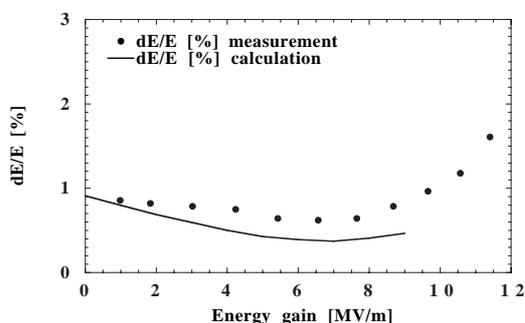


図6：エネルギー圧縮効率測定結果  
(ビームパルス幅：1nsec)

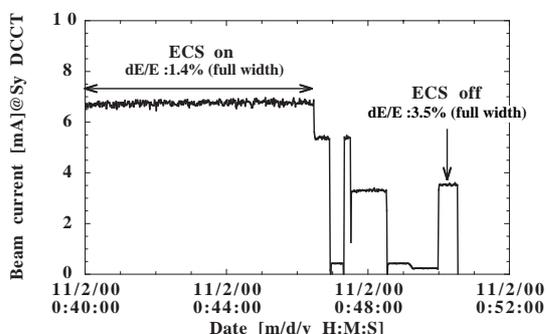


図7：エネルギー圧縮によるシンクロトロン内のビーム電流増加

40nsec ビームパルス幅でビーム電流増加に対するエネルギー圧縮試験を行った。通常、マルチバンチ運転の場合、シンクロトロンへ入射されるビーム電流は 70mA (peak)、エネルギー幅が 0.8% (full width) であり、シンクロトロン内でのビーム電流は 1mA (8GeV) となる。今回のビーム試験では 350mA (peak) の入射ビーム電流でのエネルギー圧縮を行った。ECS 用加速管の供給電力、位相調整後、エネルギー幅は 3.5% (full width) から 1.4% (full width) まで圧縮した。このときのシンクロトロン内ビーム電流の様子を図7に示す。シンクロトロンへのビーム入射のエネルギー許容値である  $\pm 1%$  (full width) に対して、

エネルギー圧縮による効果的なビーム電流増加が実現できていることが確認された。

#### 4. エネルギー安定度測定

ECS の位相安定度、並びにエネルギー安定度を確保するために数時間運転のビームエネルギー測定を行った。測定条件として、1nsec のビームパルス幅、1.9A (peak) のビーム電流とした。このとき発生するエネルギー幅は 0.5% (full width) である。ビームトリガー信号と 2856MHz が非同期であるためにバンチング系で形成されるバンチ列が2、3バンチとなり、ショットごとのバンチ数変動が生ずる。このためバンチ当たりの電荷量の異なるビームが加速されてしまうことから、エネルギー利得に差が生じてしまう。これは先頭バンチのエネルギーがショット毎の変動として観測される。測定は LSBT にあるビームプロファイルモニター (PM3-LS) から画像データとして取得された。画像処理は高エネルギー方向のビームに対して、ビームの輝度にしきい値を規定し、その値となるビーム位置 (エネルギー) をショット毎に取得した。これによりエネルギーの時間変動を得ることができる。図8に ECS on/off の安定度測定結果を示す。システム動作時における位相安定性を反映し、ショット毎のエネルギー変動 0.06% (rms) から 0.02% (rms) まで抑され、長時間わたって安定したエネルギー圧縮を実現している。

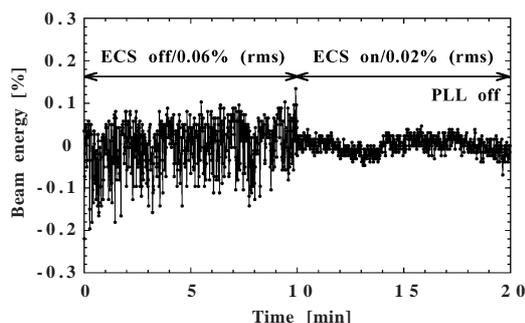


図8：エネルギー圧縮システムの動作安定性

#### 参考文献

- [1] H. Herminghaus and K. H. Kaiser, "Design, Construction and Performance of the Energy Compressing System of the Mainz 300MeV Electron Linac", Nucl. Instr. and Meth. 113 (1973) 189.
- [2] M. Sugawara et al., "Performance of an Energy Compression System for the Tohoku 300MeV Linac", Nucl. Instr. and Meth. 153 (1978) 343.
- [3] T. Asaka et al., "Design of the Energy Compression System at the SPing-8 Linac", Proceedings of the 7th European Particle Accelerator Conference, Vienna, June 26-30, 2000.