

Present Status of SPring-8 Linac

H. Yoshikawa, H. Akimoto, T. Asaka, T. Hori, Y. Itoh, A. Kuba, A. Mizuno, T. Oonishi, H. Sakaki, S. Suzuki, T. Taniuchi,
K. Yanagida, H. Yokomizo and SES operator group
JASRI-JAERI-RIKEN SPring-8 Project Team, Kamigori-cho, Ako-gun, Hyogo-ken, 678-12.

Abstract

The results of SPring-8 Linac commissioning for a year are described. This linac was made as an injector of SPring-8 (Large Synchrotron Radiation Facility), and began the operation on August 1st in last year. The operation to inject beam to the synchrotron began on December 9th, injecting operation to the storage ring through the booster synchrotron began on March 12th in this year. We investigated the characteristics of this linac in the restricted individual machine time. Initial data at the beginning of this large accelerator operation are described here, and what we did to get the higher rate of operation as an commercial machine are shown.

SPring-8 線型加速器の現状

1 はじめに

SPring-8 線型加速器のこの1年間のコミッションの結果を報告する。この線型加速器は、SPring-8 (大型放射光施設) の入射器として建設され、去年の8月1日に使用許可を得て運転を開始した。その後12月9日からはシンクロトロンへの入射運転が開始され、今年の3月12日からシンクロトロンを経て蓄積リングへ入射する運転が始まり、7月12日まで運転された。その間に線型加速器のマシスタディとして運転できた限られた時間で得られた、大型加速器の起動時における初期のデータを示す。また、営業運転の線型加速器として稼働率の向上のために行った調査と対策を示す。

2 これまでの経過

この線型加速器の機器設置が終了して、エージングが開始されてから現在に至るまでの経過を示す。

【平成8年】

- 4月15日、M10を先行機としてエージング開始。
- 4月22日、先行機をソフトウェアでの自動エージング。
- 5月15日、全数をソフトウェア自動エージング開始。
- 6月5日、全数80MW出力を達成。
- 6月28日、H0のエージングを継続。
- 7月12日、最終アラインメント作業開始。
- 7月18日、アラインメント終了。
再調整は行わないことを決定。
- 7月23日、電子銃復活でエミッション測定開始。
- 8月1日、線型加速器使用許可
ビームは第1加速管を通過。
- 8月2日、加速管7本を通過。
キーボックスの動作調査のため運転停止。
- 8月7日、運転再開。
- 8月8日、ビームダンプまでのトランスポートに成功。
- 8月10日、夏期点検期間開始。
- 8月26日、夏期点検期間終了。

<線型マシスタディ>

- 9月9日、放射線測定のため、
パルス幅を10nsから1usに変更。
放射線線量測定のため、1us, 100mA, でサーベイしながら、繰り返しを徐々に60ppsまで上げる。
途中のロスを最小にするための軌道補正。
- 10月1日、電子銃で120mA,
1GeV地点で60mAで自主検査。
- 10月7日、12uAの20%として1.6uA, 60mA,
30ppsで運転。
- 10月28日、40ns, 20mAでシンクロ用ビームテスト。
- 11月7日、線型加速器の施設検査終了。
- 11月25日、線型加速器施設検査合格
- 12月9日、シンクロトロン使用許可
- 12月10日、LSBTのオプティクスが設計通りに
できない。
シンクロトロンで8周回を確認。
- 12月12日、シンクロトロンで1秒間の蓄積成功。
- 12月20日、年末の運転停止。

【平成9年】

- 1月17日、シンクロトロンへの入射再開。
- 1月27日、シンクロトロンが8GeVビームの出力に成功。
- 2月26日、シンクロトロン施設検査。
- 3月12日、シンクロトロン施設検査合格、リング使用許可。
- 3月19日、FC用電源のブレーカが焼損。この日、クライストロン1台欠損のまま1GeV運転。
- 3月25日、蓄積成功。
- 6月16日、リング施設検査。
- 7月4日、リング施設検査合格。
- 7月13日、マシン停止。夏期点検期間にはいる。

1年間の運転を行ったが、施設検査のための放射線計測のための運転や、ブースタシンクロトロン、蓄積リングのコミッション対応の入射運転の時間が多く、線型加速器単独でパラメータサーベイを行った時間は意外と少なかった。また、連続した長時間を線型加速器の調整時間として割り当て

られても、機器の調整と試験運転を繰り返す必要があるため有効に活用できないので、入射運転の合間をうまく使った断続的なスケジュールが必要であった。また、エネルギー分散などを測定するためには、シンクロトロンへの輸送系ラインにビームを曲げなければならないが、許認可や運転スケジュールの都合で思うように時間が確保できなかった。

入射器であるので、後段の加速器が運転される時には当然正常動作していなければならない。従って調整は他の加速器が休止しているときに行わなければならない。初期故障もあり、通常動作している時に手放していただけるほど安定度が確保できている訳でもないので、数少ないスタッフが休み無しで稼働しなければならなかった。

3 ビーム性能

この線型加速器は、当初陽電子ビーム生成も要求されていたので、電子銃は大電流生成用のものを用意していた。電流値の調整は、電子銃パラメータの選択と、アノードの直後に設置された2種類の口径を持つアリスで行った。パルス幅については、ロング(1 μ s)、ショート(10~40ns)、シングル(1 ns)の3種類のモードを持つ。線型単独の許可申請や蓄積リングのコミッションには主にロングで運転し、シンクロトロンのコミッションにはショート(40ns)で運転した。

エネルギーは常に1 GeVで、前述の表の中にもあるように、クライストロンが1台動作させられない状況でも他のクライストロンで利得を補って同じエネルギーで運転できることも確認した。

電流値は、概ね100~200 mAで運転する事が多かった。放射線測定のために電流を10 mAまで絞り込んだ運転をしたこともあるが、それはアリスだけでは制限しきれない値であり、電子銃ヒータ電力を飽和領域に満たないところまで下げて運転するため、電流値が短期的にも長期的にも数十%も変動してしまった。電子銃は大電流対応になっているので、最大20 Aまで出力可能であるが、加速試験はまだ行っていない。

エネルギー分散は0.8%以下である。LSBTの偏向磁石のあと、分散2.5 mの位置に20 mmのスリットを設置してシンクロトロンのアパチに合わせているが、この偏向磁石の前とスリットの後で電流値の差はない。

エミッタンスは、1 GeVで $\epsilon_x = 0.19 \pm 0.05 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ 、 $\epsilon_y = 0.77 \pm 0.47 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$ であった。LSBTの偏向磁石のすぐ手前にあるエミッタンス測定用のワイヤキャプ3台を使って、四極電磁石の励磁量によるエンベロープの変化からツイストパラメータを求め、縦横それぞれに射影した電流密度分布から3 σ をとった値である。値からわかるように、y方向のエミッタンスが特に大きい。これはアライメントエラーか磁場のエラーの影響でLSBTのドリフトが設計通りアコマットに設定できていない問題を、偏向磁石手前のマッチングセクションの起動をゆがめることで暫定回避しているためである。

4 運転状況

初期故障はあったが、運転に重大な障害となるよう

なトラブルはなかった。13台の大電力パルスクライストロンを有する加速器の初期起動としては順調であったと考える。

シンクロトロンへの入射効率が安定しないためその原因を調査した。具体的には、シンクロトロンへの入射電流値が変動してしまう(数十%)という問題であり、エネルギー変動なのか電流値変動なのか軌道の変化なのかを切り分けるところから原因調査を始めた。

線型加速器の出力電流値は、応答速度の帯域が異なる2つのCTで観測しているが、エネルギースペクトルはシンクロトロンへのLSBTへの偏向磁石を経由しないと見ることができない。

シンクロトロンでは、線型加速器の電流値変動だけでなく、エネルギーのドリフトも電流値変動に写し込まれて観測される。さらに現状では、ビームの中心エネルギーはシンクロトロンの周回軌道の位置で測定する以外に十分な解像度が得られない方法がない。

4.1 エミッション変動

電流値変動の主要な原因として、電子銃の出力特性を調べた。電子銃出力を決める主なパラメータは、電子銃電圧、グリッドに引加するパルス電圧、バイアス電圧、ヒータ電力等であるが、実際にはヒータオン時間やエミッション時間、ヒータ電力のヒステリシスなどシークス依存を持つパラメータが多い。

電子銃のヒータ電力を飽和領域よりも60%も低い領域で使用しているために、エミッションが経時変化することがわかった。これは、陽電子生成のために大電流型カートを採用したものの、コミッション時に要求される電流値が極端に低い値であることから、やむを得ない使用方法をしているためで、当然予測されたことであり、時定数の長いヒータ電力を随時調整することで対応せざるを得ない。

さらに、電子銃直後に1.2 mmと2.6 mmのアリスを置いてビームの中心を切り出して電流値を制限しているが、電流値が大きい場合にアリスブロックのダクトに対する浮遊容量が増大して見えるため、アリスが接続されているにも係らずビームが若干瞬きをする。

これら電子銃関連の対応策として以下のものを計画している。「電子銃カートの小電流型のものに変更する(年度内)」、「口径の小さなアリスを用意する(ただしアリスブロックの構造の検討と試験が必要)」、「ヒータ電源の安定化(直流化またはAVR)」しかし、施設全体の運転計画にあわせて、低電流低エミッタンスの高精度ビーム生成と、大電流短パルスビーム生成を、どのように使い分けていくのかを、施設全体の総意として方針を打ち出していないと、今後の改善作業の優先度決定と最適化ができないため、現在対応を検討中である。

4.2 RF位相変動

RF系統の調査としては、励振系の位相とパラーの安定度、各クライストロンの入力RFの位相と安定度(伝送系)、各クライストロンの出力RFの位相安定度(クライストロン)、を長期間観測をとって問題の入射電流変動との相関を調べた。RFの位相変動による、ショットごとのエネルギーゲインのばらつきがある。各元素の入力と出力の位相変動を詳細に観測した結果^[1]、以下の原因によることがわか

った。

2856MHzのSG後段にあるTWTアンプが位相不安定であることが一因であった。このアンプの性能は、マイクロ波電源商用周波数と同期していることが条件となっているが、入射運転のためのタイミングシステムで正しく電源同期をとれていなかったためである。また、半導体アンプに置き換えることも検討している。これにより短期的な位相変動は改善される。

励振系伝送用ラックに沿った温度勾配と、その温度勾配が建物空調の影響で変化することが、伝送系での位相変動を引き起こしていることがわかった。空調吹き出し口の風の向きをいろいろに変えたり、伝送系がのっているラックに風防をするなどして、効果を調べた結果、伝送系に直接風が当たらないようにして、室内の対流で十分に鈍った空気に触れている範囲であれば、分から時間オーダの影響は無視できることがわかった。夏期休止期間に入ってから、風防をラック全体に渡って用意し、風の向きと室温設定の再調整を行った。これにより長期的な位相変動は改善される。さらに、各クライストロンのRF位相を自動調整するためのシステムを用意しており、基礎データ収集と位相調整装置の手直しを行っている。

4.3 軌道(磁場)の変動

ビーム軌道の変動がないか調査した^[2]。磁場の変動を長期測定して、ドリフトがないことを確認した。また磁石の最短の再現化手順を探し、通電とオフの繰り返し回数と保持時間の経過にもなうドリフトを測定した。再現化手順を踏めば、ビーム軌道に変動を与えることはないことが確認された。

ただし、前述のようにLSBTのオペティクスが設計した70kVの加速管にできないという問題があった。理由は解明できていないが、これが原因で微少なエネルギー変動がシンクロトロンへの入射角度に反映してしまうために、入射電流値が変動してしまう。夏期停止期間中に構成機器の調査と改善を行う。

5 稼働率

営業マシンの入射器として、稼働率を最大にする事は最も重要な使命である。各機器のフォルトとその要因を調査して、それぞれ対策を行った。もっとも支配的であったのはモジュールのフォルトであり、クライストロンとサイクロンという放電素子を持つ機器の宿命であると考えられる。大電力RFの発振源であるパルスクライストロン用モジュールのフォルトには外部要因として、加速管内や導波管で放電が起こって真空が悪化し、CCG(またはIP)の電流値が閾値を越えてインターロックが働く場合や、クライストロン内部での放電が起こって真空が悪化してインターロックが働く場合がある。また、モジュール自体の内部要因としては、高電圧パルス回路の絶縁破壊や過電流を検知して動作する場合がある。この線型加速器における主なフォルト原因は、導波管内での放電発生とモジュールの充電電流過電流であった。

導波管内での放電発生は、IPの電流値で検出していたが、近傍に設置されたCCGとの相関を調べると、IPの電流値のみが変化している場合が非常に多かった。

導波管に取り付けられたIP引き口ポートのシートのカット周波数と減衰を計算し、高次モードを含めたRFがIP内部に伝搬している可能性があるかと判断し、金属メッシュを引き口部に入れたところ、「導波管部の放電によるフォルト」がその箇所に置いて激減した。現在、ベッパポート型がカットを上流部3カ所に組み込んであり、残り部分についても夏季点検期間中に手当する。

モジュールの充電電流過大は、サイクロンのミファイにより、PFN充電中に、直流充電部がショートされてしまう現象であった。このミファイがなぜ起こるのかを調べたが、トリガ回路がノイズの影響などをうけているのか、サイクロン自体が自爆してしまうのか完全には解明されていない。このモジュールはコマンド充電方式ではないので、自爆して放電すると引き続いて充電が開始されるが、この充電中に正規のトリガが来て、充電回路をショートしてしまうことが問題であるので、充電開始後に1周期分の時間はトリガを受け付けないようにする回路を取り付けた。これにより、自爆した場合はそのショットのみパルス出力のタイミングがずれるが、停止することはなくなった^[3]。

制御系は極めて順調に稼働した。上位のワークステーションではマシン継続的な改善が行われているが、下位のVME計算機は1月にIPの位置変更を行って以来半年間、22台すべてが完全にメンテフリーであった。

6 まとめ

1GeVクラスの大型電子線型加速器の初期起動におけるデータは加速器工学的な面からも今後の運転維持の面からも非常に重要で、設計性能は順調に達成された。7月13日から8月中の夏期休止期間に、前述の明らかになった問題点の改善策が施されるので、9月からの運転にその成果が期待される。また、入射器として運転する時間はリングのコミッションが終了とともに減少するので、単独運転での有効利用としていくつかのテーマを検討している^[4]。

7 参考文献

- [1] T.Ohnishi, et. al., "Phase Instability Measurement of The RF Driver System for SPring-8 Linac" Proceedings of The 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan. 1997
- [2] H.Akimoto, et. al., "Clear up causes of beam energy(E,dE) drift using the regression analysis for SPring-8 Linac" Proceedings of the 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan. 1997
- [3] T.Hori, et. al., "Present status of 80MW klystron modulator for SPring-8 Linac" Proceedings of The 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan. 1997
- [4] H.Yokomizo, et. al., "Future Plan of SPring-8 Linac" Proceedings of The 22nd Linear Accelerator Meeting in Japan. 1997