

[A16p06]

## Status and Performance of SPring-8 Linac

Yokomizo H., Yoshikawa H., Hori T., Kobayashi T., Suzuki S., Yanagida K., Abe H., Mizuno A., Taniuchi T., Sakaki H., Asaka T., Akimoto H., Ohnishi T., Nagasawa S.

SPring-8, Mihara, Mikazuki-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198, Japan

### ABSTRACT

The SPring-8 linac was improved in several points such as the beam monitors, stable solid state amplifier of microwave system, and the electron gun, etc. The beam qualities were measured to be good beyond the design values. Cooling water, room temperature and electric power voltage are observed to affect the stable beam operation.

## S P r i n g - 8 線型加速器の現状と性能

### 1. はじめに

大型放射光施設SPring-8は、平成9年10月から供用を開始し、順調に利用研究を進めている。入射用1GeV線型加速器は、平成8年8月1日からビームコミッション運転を始めて以来、平成10年7月3日の夏期シャットダウンまで約2年間大きなトラブルもなく運転を行ってきた。蓄積リングへのビーム入射は1日1回ないしは2回であり、その為に必要となる運転時間は1回あたり1時間程度であるが、線型加速器では待機時間でもマイクロ波を投入した慣らし運転（ビームは発生しない）を継続し、出力ビーム性能の安定化を図っている。装置を建設するときには初期コストを削減するためにモニタを削ることがあるが、装置の安定化、ビーム性能の向上には十分な測定システムが必要であり、不足するモニタを追加しながら、ビーム及び装置の性能改善や信頼性の向上に努めている。

### 2. 線型加速器の改善

#### 2.1 エネルギー分析用電磁石の設置

線型加速器は全長140mの直線型加速器であることから、線型加速器内部でエネルギー分析することは不可能である。実際エネルギーの調整を行うには、出力端で右15度に偏向し、シンクロトロンへの入射用経路を通して行ってきた。線型加速器単独でのビーム調整、試験を行うときにも、シンクロトロンを運転しなくてはならず、放射線対策上からも、シンクロトロンの装置寿命からも改善が求められていた。そこで当初計画ではオプションとして考えていたエネルギー圧縮システム(ECS)の電磁石を1GeV出力端に製作し、エネルギー分析用に利用することにした。1台あたり24度偏向する電磁石を4台使用し、ビーム軌道を平行に1m取り出す軌道を全長9.2mの範囲に渡り設置した。取り出された軌道での分散関数は1mであり、そこにスリット、プロファイルモニタ、非破壊型位置モニタが取り付けられ、エネルギー分析等が可能となっている。

#### 2.2 ビーム測定用250MeVライン

線型加速器での電子ビームの利用は、1GeVと250MeVのところで可能である。250MeVの場所には、ビームを45度、及び、90度偏向して小さな実験スペースに引き出せるようになっており、小型装置などを設置して容易に実験ができるようにしてある。当初250MeVでは、90度ラインのみ整備し、ビームプロファイルモニタ、電流モニタ、スリットなどの測定システムが設置されていた。ビームにエネルギー分散がある45度のラインでビーム性能の測定ができるようにモニタとビームダンプの増設を行った。

#### 2.3 RFガスカート

線型加速器では大電力高周波を取り扱っており、放電などでクライストロン、高周波機器、真空機器を破損しないように真空インターロックをかけている。この真空インターロックが時として多発し、実際の真空劣化に対応しないことが観測されていた。その原因は、カットオフ用のスリットで分離しているはずの真空排気用マニホールドに高周波が入り込んで、イオンポンプ電流を増加させていることが明らかとなった。そこで、導波管とイオンポンプの間に、高周波を完全に遮断するRFガスカートを挿入した。通常のカスケットの代わりに、小さな穴を多数あけた銅板を真空ガスカートとして使用するものである。これによって、真空インターロックの発生は大幅に削減できた。

#### 2.4 安定化半導体アンプ

マイクロ波の励振システムは、マスタオシレータ、TWTアンプ、小型クライストロンの組み合わせで行ってきた。この励振用マイクロ波は、バンチャーシステムにパワーを供給すると共に、大電力クライストロンの励振パワーとしても使われている。従って、出力パワー、位相共に安定にすることが重要である。商用電源の電圧変動、電源非同期の影響を大きく受けているのがTWTアンプであり、これを新たに製作をした半導体アンプに交換した。この半導体アンプは温度変化の影響

を抑え、パルス内位相・振幅も小さく抑えたタイプである[1]。電源変動、電源非同期の影響も小さくなった。この結果、位相変動幅がTWTアンプの時の1/3~1/4に縮小した。

## 2. 5 電子銃パルサ及びカソードの改造

SPRING-8では、当初蓄積リングでのビーム不安定性を抑えるために陽電子を使用することを考えていた。そのため線型加速器では大電流を発生できるカソードとしてEIMAC-Y796を採用した。このカソードは、最大20A程度の電流が発生できる。パルス幅はInsec(シングルバンチ用)から1 $\mu$ sec(マルチバンチ用)の広い範囲で切り替え可能であるが、Insecパルスは波形ひずみが起こったり、パルスの切れが悪かったり、技術的に難しいものである。そこで、各パルス幅に対応したグリッドパルサーを独立に用意しておき、伝送回路とともにグリッドパルサーを現場での手動操作で交換する方式を採用してきた。実際の利用運転では、シングルバンチモードとマルチバンチモードの切り替え頻度が高く、短時間で切り替えることが求められて来た。さらに、小型リングであるニュースバルの運転が始まると、常時Insecパルス幅での入射が必要になる。短時間かつ遠隔でパルス幅が切り替えられるようにする為に電子銃システムの改造を行った[2]。

陽電子ビームをしばらく使わないという前提で平成10年7月にカソードをEIMAC-Y796からY845に変更した。これにより、電子ビームの性能を改善できると共に、グリッドエミッションによる暗電流量を削減することができる。カソードのインピーダンスが12 $\Omega$ から50 $\Omega$ に変わることにより、パルス伝送路の変更を行う。Insec発生用グリッドパルサーを4kV高電圧パルス発生器とショートスタブの組み合わせ方式から、Insec以下3種類のパルス幅を切り替え可能な300Vパルス発生器方式に変更する。マルチバンチ用グリッドパルサーとの切り替えは、同軸ロータリースイッチによる遠隔操作で行えるようにする。新しい電子銃のエミッション試験を7月に行い、9月からの利用運転に備える。

## 3. クライストロン及びサイラトロン

装置を始めて運転して以来平成10年7月までの期間で、不具合が発生して交換したクライストロンは1本、サイラトロンは3本である[3]。クライストロンの故障(E3712;ヒータ11262時間、高電圧印可7673時間)は、コレクタの冷却水継ぎ手からの水漏れが原因であり、クライストロン本体は問題が無かった。修理後、再使用に備えて保管してある。サイラトロンの故障は、絶縁劣化にともなうグリッドスパイクが1本(F351;ヒータ19817時間、高電圧印可7673時間)、アノードドレイタイムとジッターの増大による性能劣化が2本(F175;ヒータ13170時間、高電圧印可10213時間、CX1938A;ヒータ14376時間、高電圧印可10291時間)である。これ以

外のもは特に目立った性能劣化など観測されておらず、使用開始してからの積算ヒータオン時間で14500時間、高電圧印可時間で10500時間を越えて、なお順調に稼働している。今後もサイラトロンなどの最適調整を行いながら使用経過を観察し、故障の原因や予兆、寿命に関する統計データなどを収集する。

## 4. 時間ドリフトの解析

マイクロ波位相や出力電流値等に時間ドリフトが観測されており、時定数は1分以下の変動、約25分の変動、1日のゆっくりした変動の3種類がある[4]。

1分以下の変動は、ショットごとのモジュレータ出力電圧の揺らぎ、タイミングジッター、商用電源の電圧変動などによるものと考えられる。関西電力の電圧変動は、大きな時で2.3%が観測されている。ところが、モジュレータの供給ラインである400V系の電圧は、最大6%の変動が観測された。線型加速器の変電設備は、パルス変動負荷であるシンクロトロンと一体となった設備であり、その影響を受けていることによる。モジュレータは出力電圧の安定度は $\pm 0.5\%$ 以下の性能を満足しているが、その範囲内でこのライン変動の影響を受けて揺らいでいる。

25分周期の変動は、冷却水系の変動である。加速管の温度を精密に制御する系統は0.1 $^{\circ}$ C以下の制御性能を有しているが、電磁石、電源類を冷却する系統は、温度管理を規定していなかった。結果として、冷却塔のファンの入切によって、約3 $^{\circ}$ Cの温度変化が生じており、この水温変化の影響をクライストロンが受けることになってしまった。冷却塔のファンの入切は、季節や、気候によって変化し、熱負荷と放熱がバランスすると冷却塔が停止しないで回り続けることもある。その場合は、この25分周期の変動は見られず、非常に安定した運転が可能となる。本年7月の保守期間に、冷却塔のファンの制御システムをインバータ方式に改造し、温度変化を現状の1/10程度まで改善する予定である。

1日周期の変動は、室温の変動に対応している。空調システムは外気を一部取り込む方式となっており、1日あたり約4 $^{\circ}$ C程度の室温の変化が観測されている。この室温の変化の影響を大きく受けているのが、全長約110mの励振マイクロ波分配用導波管である。ピンモジュレーション回路等の低電力マイクロ波系回路も影響を受けているようである。分配用導波管については断熱対策を行うことにしている。

位相変動と供給電源電圧、冷却水温度、室温の関係を変数自己回帰解析してみると、相互に大きな寄与率で関連しており、1つの設備が変動すると他の設備、加速器に悪影響を与えていることが明らかとなった[5]。ビーム性能の向上を図るうえで、これらユーティリティー全体の質の向上を図ることが重要である。

## 5. 出力ビーム性能

SPring-8の利用運転では、1シフト2週間(10日間)または3週間(17日間)の連続運転を行っている。線型加速器では、通常各シフトの最初にビーム調整を行い、その以降の入射運転時にはビーム調整をせずに、中央制御室でのビームスイッチON-OFFによる遠隔操作のみで電子ビームの供給を行っている。

マルチバンチモードの利用運転では、パルス幅40nsec、電流値100-150mAのビームが使われている。位相調整が適切に行われていると、2-30分間ビーム出力を継続した時の電流値の揺らぎは、115mAのビームの場合±2.5%以内である。1GeVでのエネルギーの広がり、±0.6%以内である。加速管のビームローディングによるエネルギーの広がりが、100mA、40nsecのビームの場合1%であることから、このエネルギー広がり、ビームロードによるものが主要因となっている。このときの中心エネルギーの揺らぎは、±0.2%以下である。揺らぎの原因としては、PFN電圧変動、モジュレータのトリガージッター、サイラトロンの点火ジッター、マイクロ波の位相の揺らぎなどが考えられる。PFN電圧は、リップル、サグを含んで±0.5%以下となっているが、実際ビームが加速されるタイミングでの電圧再現性はずっと良い値である。また、13台のモジュレータの統計的効果もあり、中心エネルギーの揺らぎが小さくなっている。x及びy方向の電流90%エミッタンスの測定値は、各々0.14及び0.12 $\pi$ mm $\cdot$ mradである。シンクロトロンへの入射のために設定した目標性能は、エネルギー広がり±1%以下、エミッタンス1 $\pi$ mm $\cdot$ mrad以下であり、それらを十分に満足している。

パルス幅1nsecのビームをカソードY796を使って試験的に発生させた。電流値1.6Aで、電流値の揺らぎは5%以下である。エネルギーの広がり、±0.35%以下となっている[2]。この1nsec幅のビームを蓄積リングに入射し、1nsecからこぼれた電流量の評価、及び、グリッドエミッションの量の評価を行った。その結果、隣のバンチへのビームの広がりは特に観測されず、パルスの切れは良いことがわかった。グリッドエミッションの量は、ピーク電流1.6Aに対して、 $1.7 \times 10^{-4}$ 程度であることが明らかとなった。大口径のカソードであること、並びに、約2年に渡って使ってきたことから、グリッドエミッションの量が増加しているようである。

## 6. 技術開発

### 6.1 RF電子銃

線型加速器のビーム性能の高度化として、電子ビームの低エミッタンス化、短バンチ化を目的としたRF電子銃の開発を行っている[6]。熱放出型のカソードと、将来的にはRF電子銃の2つの電子銃をオンラインで切り替えできるようにすることが望ましい。RF電子銃のテスト環境を整備してきており、試作キャビティ

を取り付ければ試験を始められる状況になってきている。放射線施設としての許可を受けたのち、試験を開始する予定である。

### 6.2 テスト用モジュレータ

大電力クライストロンやサイラトロンを受け入れ試験、保管中の品質管理や、高電圧部品の技術開発の場として80MWクライストロンのテスト用モジュレータを製作した。実機モジュレータではIVR、整流回路、De-Qing回路の組み合わせでPFN電圧を充電、制御してきたが、ここでは50kV、1.5Aのインバータ電源3台により直接PFNを充電、制御する方式を採用した。この結果、出力電圧の変動幅は、実機と比較して1/3に縮小できた。また、電源のサイズも実機のものより格段に小さくできた[7]。

### 6.3 1GeVビーム輸送ライン

線型加速器の1GeV電子ビームを利用したビーム科学(シングルパスFELなど)を推進したり、小型リング:ニュースバルへのビーム供給をするために、1GeVビーム輸送ラインを新たに建設した。ビーム科学の研究用は90度偏向したライン(L3ライン)であり、ニュースバル用は60度偏向したライン(L4ライン)となっている。特にL3ラインはtriple-bend-achromaticかつisochronousな軌道とした。

## 7. おわりに

SPring-8は運転開始後2年を経過し、順調に利用研究を推進するとともに、線型加速器では多様な運転条件に対応するべくビーム性能の向上に努めてきた。当初目標としていたビーム性能を十分に達成しており、さらにビーム性能を高度化することを考えている。加速器機器の性能向上のみならず、ユーティリティの性能もビーム性能に多大な影響を与えることが明らかとなり、冷却水設備の改善や室温変化の影響の低減化対策などを行い始めたところである。

## 参考文献

- [1]T. Ohnishi, et al., "Characteristics of S-band 200W transistor Amplifier", this meeting.
- [2]T. Kobayashi, et al., "Single bunch testing for SPring-8", this meeting.
- [3]S. Nagasawa, et al., "Operation status of klystron modulator for SPring-8 linac", this meeting.
- [4]T. Asaka, et al., "Stability of the RF system at SPring-8 Linac", this meeting.
- [5]H. Sakaki, et al., "System analysis for linear accelerator", this meeting.
- [6]T. Taniuchi, et al., "Design of high power model cavity for RF gun", 19th Int. FEL Conf. (Beijing, 1997).
- [7]T. Hori, et al., "Construction of pulse modulator with inverter power supply", this meeting.