

# ACCELERATOR SYSTEM FOR THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY

Aki Murata <sup>#,A)</sup>, Koichi Nakayama <sup>A)</sup>, Naohisa Tsuzuki<sup>A)</sup>, Teruyasu Nagafuchi <sup>A)</sup>, Shinya Matsuda<sup>A)</sup>, Junko Watanabe<sup>A)</sup>, Kosuke Sato<sup>A)</sup>, Yoshifumi Takashima<sup>B)</sup>, Masahito Hosaka<sup>B)</sup>, Naoto Yamamoto<sup>A)</sup>, Kiyoshi Takami<sup>B)</sup>, Hiroyuki Morimoto<sup>B)</sup>, Atsushi Mano<sup>B)</sup>, Takumi Takano<sup>B)</sup>, Masahiro Katoh<sup>C),B)</sup>, Yoichiro Hori<sup>D),B)</sup>, Shigeki Sasaki<sup>E),B)</sup>, Shigeru Koda<sup>F),B)</sup>

<sup>A)</sup> Toshiba Corporation Power System Company, 8 shinsugita, isogo-ku, yokohama 238-8523

<sup>B)</sup> Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University, Furo-cho, Chikusa-ku, Nagoya, 464-8603

<sup>C)</sup> Institute for Molecular Science, National Institute of Natural Science, Myodaiji-cho, Okazaki 444-8585

<sup>D)</sup> High Energy Accelerator Research Organization, KEK, 1-1 OHO, Tsukuba, Ibaraki 319-1112

<sup>E)</sup> Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI/Spring-8), Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

<sup>F)</sup> Saga Light Source, 8-7 Yayoigaoka, Tosu, Saga, 841-000

## Abstract

Accelerator system for Central Japan Synchrotron Radiation Research Facility that consists of 50MeV electron S-band linac, 1.2GeV full energy booster synchrotron and 1.2GeV storage ring, has been constructed. Eight 1.4T bending magnets and four 5T superconducting magnet with compact refrigerator system provide beam lines.

For top-up operation, the 1ns single bunch electron beam from 50MeV injector linac is injected by on-axis injection scheme and accelerated up to 1.2GeV at booster synchrotron. The timing system is designed for injection from booster ring is possible for any bunch position of storage ring. To improve efficiency of booster injection, the electron gun trigger and RF frequency of 2856MHz is synchronized with storage ring frequency of 499.654MHz. The EPICS control system is used with timing control system for linac, pulse magnet and also for booster pattern memory system. The beam commissioning for 1.2GeV storage ring has been progressing.

## 中部シンクロトロン光利用施設 加速器システム

### 1. はじめに

愛知県では、次世代モノづくり技術の創造・発信の拠点として、「知の拠点」の整備を進めている。この拠点には共同研究施設とともに、中部シンクロトロン光利用施設<sup>1)</sup>（仮称）（以後中部シンクロトロン）を「地域共同利用施設」として、誘導・整備する計画を進めている。

中部シンクロトロンは、次世代のモノづくりに不可欠なナノレベルの先端計測分析施設として、地域の産・学・行政による連携・協力のもとで建設が進められ、2012年度の運用開始を予定している。

### 2 加速器システム

加速器は、直線加速器・低エネルギービーム輸送系（以後 LBTL）・ブースターシンクロトロン（以後ブースター）・高エネルギービーム輸送系（以後 HBTL）から構成される入射部と、光源リングから構成される。

55m×70m の小型施設に配置するため、光源リングの内側にブースターおよび直線加速器を配置し、

省スペース化を図った。ブースターの内側には、光源リング高周波システムを配置し、さらに電磁石電源を、2階に配置した。配置概念図を、図 2-1 に示す。

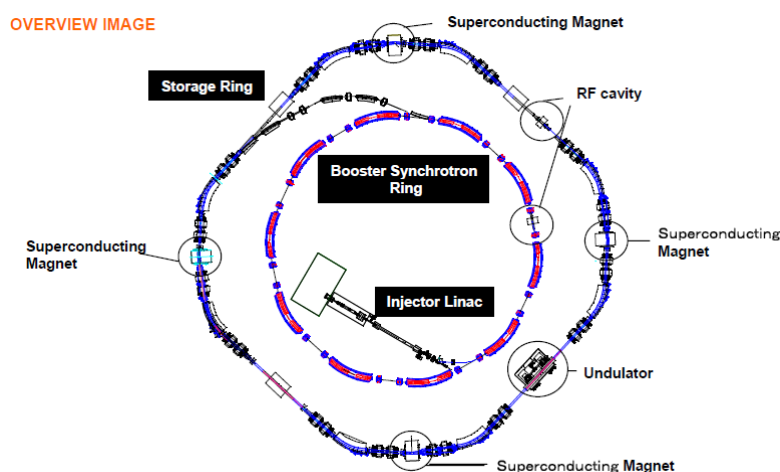


図 2-1 : 加速器配置概念図

<sup>#</sup> aki.murata@toshiba.co.jp

そして、以下の点を特徴として設計を行った。

- ① 55m×70m の小型施設
- ② 蓄積ビーム電流 300mA 以上
- ③ ビームエネルギー 1.2GeV
- ④ 当初整備予定のビームライン 6本
- ⑤ 超伝導偏向電磁石の採用により、硬X線の利用が可能
- ⑥ トップアップ入射による一定電流運転が可能
- ⑦ 運転管理容易化のため、制御システムを EPICS で構築

## 2. 1 直線加速器<sup>[2]</sup>

直線加速器は、電子ビームを発生させるための電子銃部と、50MeV まで加速する加速管部からなる。表 1 に、パラメータおよび図 2-2 に加速管部を示す。電子銃のカソードは、CPI 社の Y-845 を使用する。このカソードに約 55 V の引出し電圧を印可し、2 A の電子ビームを得る。高周波源は東芝電子管デバイス株式会社製 E3730A(共振周波数 2856MHz)を採用し、電源は東芝電波プロダクツ株式会社製の電源を採用した。

表 2-1 : 直線加速器パラメータ

電子ビームエネルギー	50MeV
加速電荷量	<1nC
エネルギー幅	±0.5%
パルス幅	<1nsec
規格化エミッタンス(90%)	100 π mm-mrad
加速繰り返し	1Hz
加速周波数	2856MHz

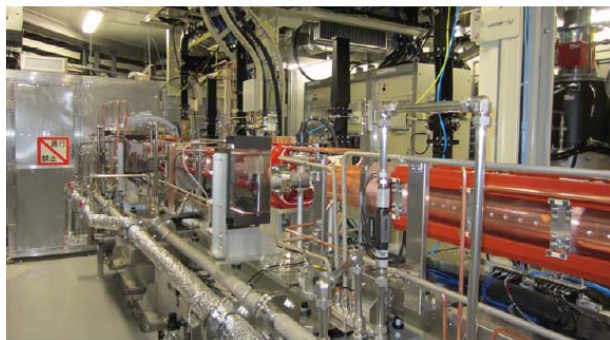


図 2-2 : 50 MeV 直線加速器

## 2. 3 ブースターシンクロトロン<sup>[3]</sup>

ブースターシンクロトロンは、周長 48m で、偏向電磁石・四極電磁石・六極電磁石・ステアリング電磁石、モニタ類、高周波空洞で構成され、直線加速器から入射された電子ビームを、1.2GeV まで加速する。共振周波数は、499.654MHz を採用している。

また、ラティス設計は、SPring-8 のブースターシンクロトロン並みの低エミッタンスを実現するために BESSY-II タイプとした。低エミッタンスの実現により、ビームサイズの縮小が可能になり、真空ダクト径及び電磁石のギャップを小さくすることが出来る。加えて光源リングに入射するビームのビーム径を小さくすることが出来るので、光源リングへの入射効率を向上させることが出来る。

高周波システムとしては、空洞に印加するパワーが 6.2kW と低いことから、高周波源に、10kW 出力の TOMCO 社製の半導体アンプを採用する。

真空システム<sup>[2]</sup>は、 $1.0 \times 10^{-5}$ Pa 以下を目標として、設計し、イオンポンプのみで構成した。

加えて、安定した運転を行うためシングルバンチ運転を行う。シングルバンチ運転は、リング内のある一箇所のバンチにのみビームを乗せる運転で、バンチあたりの電流を高くすることが出来る。

さらにトップアップ運転を行うことを前提とする。トップアップ運転を行うことにより光源リングの蓄積電流値が一定に保たれるため、加速器やビームライン光学素子への熱負荷が一定になり、ビームを安定化させることが出来る。

これらのシングルバンチ運転やトップアップ運転には、高精度のタイミングが要求されることから、SPring-8 の電子ビーム入射システムおよび KEK-PF 等での納入実績をベースに、直線加速器、ビーム輸送系およびブースターシンクロトロンのシステムを設計した。パラメータを、表 2-2 に示す。

表 2-2 : ブースター パラメータ

入射エネルギー	50MeV
出射エネルギー	1.2GeV
周長	48m
ベータトロンチューン	2.75/1.75
Chromaticity	-2.46/-2.34
Momentum compaction	0.129
エミッタンス(1.2GeV)	214nm
加速周波数	499.654MHz
ハーモニック数	80
繰り返し	1Hz

## 2. 4 光源リング

光源リングは周長 72m で、ブースター同様偏向電磁石・四極電磁石・六極電磁石・ステアリング電磁石、モニタ類、高周波空洞で構成される。4本の約 5.2m の直線部には、1ヶ所はビーム入射部、1ヶ所は高周波加速部、残りの 2ヶ所は挿入光源(現状 APPLE-II タイプのアンジュレータ 1台)を配置する。ビーム計測用機器等も、これらの直線部に分散して配置する。

ラティスは 4 回対称のセル構造で、ラティスのタイプは、Triple Bend (TB)で 3 組の偏向電磁石および 8 台の 4 極磁石で、長直線部のエネルギー分散関数および動作点のチューンを調整可能な構造にしている。全 12 台の偏向電磁石中 4 台を偏向磁場 5T の

超伝導電磁石としている。これにより小型・低エネルギーの加速器を用いても 10keV 超の X 線ビームラインを 10 本以上供給することが可能になる。図 2-3 に超伝導電磁石を示す。

光源リングの電子ビームのパラメータは、エネルギー 1.2GeV、電子ビームエミッタンス約 50nm-rad、300mA である。

光源リングには、放射によるエネルギーロスを RF 電場で補うために、高周波空洞を設置する。そして大電流運転を実現するためには、加速空洞の高次モードに起因するビーム不安定を抑制することが重要と考え、KEK-PF で開発された 500MHz の高次モード減衰型空洞を採用した。本空洞は、KEK-PF に 1997 年に納入後に入力電力 140kW の運転実績があり、現在まで約 12 年間安定に稼働している実績を持つ。国内ではニュースバルや佐賀放射光施設でも採用され、安定に稼働している。海外でも、豪州放射光に 2006 年に採用されて安定に稼働している。図 2-4 に、高周波空洞を示す。

高周波源であるクライストロンは、実績のある東芝電子管デバイス株式会社製 E3774A を採用した。図 2-5 に、高周波系システムを示す。これら高周波システムをブースター内側に配置することで、加速器の省スペース化を可能にした

真空システム<sup>[2]</sup>は、ビーム寿命確保のため  $1.0 \times 10^{-7}$ Pa 以下を目標として、イオンポンプや蒸着形のチタンサプリーションポンプを配置しており、放射光が当たってガスが出る偏向部のダクトには、NEG ポンプ(Non-Evaporable Getter pump)をダクト内に挿入している。

パラメータを、表 2-3 に示す。

表 2-3 : 光源リング パラメータ

蓄積電子エネルギー	1.2 GeV
周長	72 m
蓄積電流	> 300 mA
エミッタンス	53 nm-rad
ベータトロンチューン	4.72/3.23
RF 周波数	499.654 MHz
RF 加速電圧	500 kV
RF バケットハイト	> 0.990 %
エネルギーロス	86.2KeV /turn
周回周波数	4.164MHz
ハーモニック数	120



図 2-3 : 5 T 超伝導電磁石(左)

図 2-4 : 高周波空洞(右)



図 2-5 : 光源リング高周波系

## 2. 5 制御システム

運転制御システムは、計算機(ワークステーション)やコントローラによる自動化により、日常的な加速器の運転は運転員への負担を最小限とするようシステム設計を行う。構成要素には汎用品や加速器でよく用いられている製品を採用することを基本とする。

### 2. 5. 1 計算機システムとネットワーク

直線加速器から光源リングまで加速器一式の運転・監視を制御室で集中して行うため、各機器と計算機システムとの信号インターフェースは、ネットワークとする。必要に応じて、2 階電源室においてもネットワークに端末を接続して、機器の操作やデータ表示を行えるようにする。このシステムは、複数の計算機で構成した。

ソフトウェアとして、EPICS (Experimental Physics and Industrial Control System)を採用することにより運転・監視のためのソフトウェアの開発が容易にできる。

全体制御のため、ワークステーションは Cent OS 上に EPICS IOC を構築して制御ロジックを SNL で作成する。各機器の個別の制御は、機器装置により構成する。多くは汎用のプログラマブルコントローラ (以後 PLC) が利用されると想定するが、EPICS での利用が可能なものとする。

個別制御用 PLC は、EPICS に対応した Linux ベースの F3RP61-2L(横河電機製)を適用し、この上に IOC、SNL を組み込んだ。オペレーション用のウィンドウは EDM で作成した。

真空ポンプなどの通常は停止することなく運転したままとなる機器については、遠隔から運転状態の監視を可能とし、運転操作は現場制御盤から行う。

システムの全体構成図を、図 2-6 に示す。

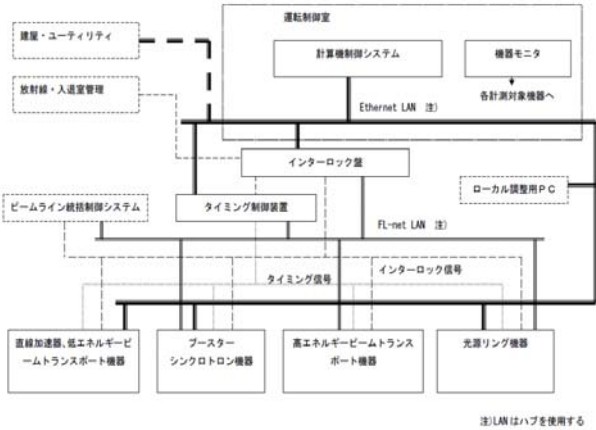


図 2-6 : 制御システム全体構成図

### 2. 5. 2 タイミングシステム

タイミングシステム（タイミング制御装置）は、光源リングのシングルバンチ、トップアップ運転に対応するため、リング用の RF(499.654MHz)発生と直線加速器用の RF(2856MHz)を同時に発生する高精度、高安定のマスターオシレータを開発した。このマスターオシレータは、図 2-7 に基本構成を示すように、直線加速器の 2856MHz はリングの 499.645MHz に同期して、ここでパルス変調して出力する。このため、直線加速器の RF 開始位相を光源リングのバケットに同期させることができ、シングルバンチ入射のジッタを低減する。トリガ系は、すべてのトリガをリングの RF に同期させるために SPring8 で開発された Synchronous Universal Counter(SUC)を適用した。またマスターオシレータや SUC の安定化のために、この部分を収納するラック内部を温度コントロールしている。

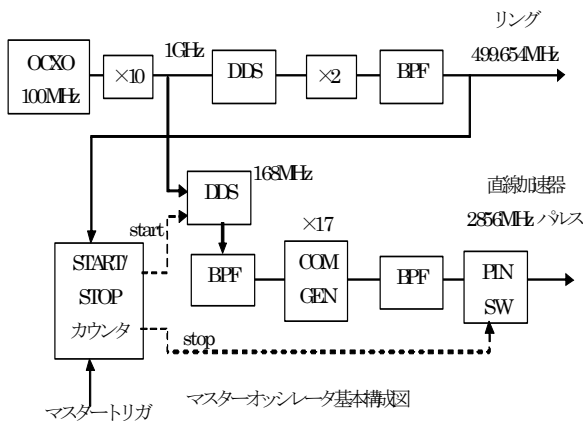


図 2-7 : マスターオシレータ構成図

ブースターシンクロトロン電磁石電源の電流と高周波加速空洞の電圧については、ビーム入射から加速して出射までの変化パターンを与える必要があり、このパターン発生のためにパターンメモリを採用する。このパターンメモリに対して、動作開始のトリガと出力動作のクロックとをタイミングシステムは供給する。

### 2. 5. 3 インターロックシステム

安全・機器保護インターロックについては、制御ネットワークとは独立して必要最小限の信号の授受を行って、インターロックシステムを構築する。このためにインターロック盤を備える。

### 2. 5. 4 自動起動・停止システム

日常的な運転で、待ち時間がある、あるいは煩雑で間違いやすい運転操作は自動化する。この自動シーケンス制御のロジックは、PLC や EPICS により作成する。タイミング制御については、各タイミング信号のディレイ値を設定ファイルから与えるロジックを自動シーケンスに組み込む。

## 3. 現状および今後の予定<sup>[5]</sup>

中部シンクロトロン光施設（仮称）の加速器システムは、機器の据付・アライメントおよび加速器機器調整が終了して 2012 年 3 月末に 50MeV 直線加速器でのビーム加速に成功して、所定の性能が得られている。2012 年 4 月末には、1.2GeV ブースターシンクロトロンへのビーム入射および 1.2GeV 加速を確認した。その後、光源リングへのビーム入射試験を続けて、2012 年 7 月末にビーム蓄積に成功し、ファーストライトを観測した。

今後は、定格の蓄積電流 300mA を目指してビーム調整作業を続けていく。

## 参考文献

- [1] Y. Takashima, et al., "Present Status of Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*, THPS012
- [2] M. Yamamoto, et al., "DESIGN OF THE 50MEV LINAC OF THE CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY", *These Proceedings*, THPS027
- [3] K. Nakayama, et al., "BOOSTER SYNCHROTRON FOR CENTRAL JAPAN SYNCHROTRON RADIATION FACILITY", *These Proceedings*, THPS046
- [4] S. Matsuda, et al., "Vacuum system for the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*, THPS058
- [5] N. Yamamoto, et al., "Commissioning of Accelerators of the Central Japan Synchrotron Radiation Facility", *These Proceedings*, THPS040
- [6] <http://www.astf-kha.jp/synchrotron/status/kougen/>