

末武 則夫
SUETAKE Norio

中山 光一
NAKAYAMA Kouichi

永淵 照康
NAGAFUCHI Teruyasu

高エネルギー物理学，原子核物理学，放射光利用研究のための加速器はさまざまな要素技術が集大成されたシステムである。個々の要素がシステムの目的に従って機能を発揮しなければならず，各機器を設計・製作する場合もシステムの設計思想に基づき基準を決めなければならない。

当社の加速器要素技術の具体例として，大型放射光施設(SPring-8)シンクロトロン電磁石，真空系，モニタ系およびイオン蓄積リングの電子ビーム冷却装置について記載し，機器設計の考え方を示す。

Accelerators used in high-energy physics, nuclear physics, and as synchrotron radiation sources are systems incorporating many types of component technologies. Since each component must work according to the purpose of the system, the standards for the equipment are determined based on the concept of the system.

This paper describes the magnets, vacuum system, and monitoring system for the SPring-8 booster synchrotron and the electron cooler for an ion storage ring as examples of technologies for accelerator components, and explains their equipment design concepts.

1 まえがき

高エネルギー物理学，原子核物理学，放射光利用研究のための加速器は電磁石，真空系，高周波系，モニタ系，電源，制御系など多くの構成要素からなり，システムとして十分な機能を発揮するためには個々の機器が所定の性能を満たしていなければならない。

当社が個々の機器について開発・設計した要素技術の具体例として，大型放射光施設(通称 SPring-8)シンクロトロン電磁石，真空系，モニタ系およびイオン蓄積リングに設置される電子ビーム冷却装置について述べる。

2 電磁石技術

シンクロトロンおよび蓄積リングでは，ビームを偏向，収束発散，軌道補正および入出射するために，偏向電磁石，多極電磁石，補正電磁石，パルス電磁石が多数設置されている。ここでは，電磁石の設計，製作，据付けについて SPring-8 シンクロトロン電磁石およびキッカー電磁石を例に述べる。

ビームが周回するシンクロトロンおよび蓄積リングでは，電磁石特性のばらつきとアライメント精度を規定値以下に抑えることが重要である。偏向電磁石の磁場の強さと実効長の積(以下，BL 積と略称する)のばらつきは COD (Closed Orbit Distortion: 閉軌道のひずみ)を生じ，COD がビーム径に比べて大きいと，これに比例して真空ダクトの内径寸法を大きくしなければならず，電磁石のギャッ



図1. シンクロトロントンネルに据え付けられた偏向電磁石 偏向電磁石は製作後，検査，磁場測定試験を経て精密にアライメントされた。

Bending magnet aligned in synchrotron tunnel

プ，有効磁場領域が大きくなる。また，入出射時のビーム軌道がずれ，入出射効率が低下する。このため偏向電磁石の BL 積のばらつきを $\pm 5 \times 10^{-4}$ 程度以下に抑えなければならない。偏向電磁石の BL 積のばらつきを生ずる原因は，①有効長，②ギャップ，③鉄心透磁率，④鉄心保磁力である。

シンクロトロンではビームエネルギーを 1~2 けた上げるため，磁場強度を 1 けた程度変える。このとき入射エネルギーに対応する鉄心保磁力のばらつきが電磁石の BL 積のばらつきを支配する。SPring-8 シンクロトロンでは磁場強度が 8 倍変わるため，保磁力のばらつきを $\pm 5\%$ 以下となるように鉄心材料の製品管理を行った。

シンクロトロンはパターン運転を行うため、電磁石は薄板のけい素鋼板を積層して溶接により一体化したものとなる。磁場強度一定の蓄積リングでも、台数が多いものはブロック鉄心を用いるよりも積層鉄心の方がコストが安く、かつ磁場の低いところで運転する場合は保磁力の影響が少ない。積層鉄心の場合、溶接ひずみおよび剛性不足によるギャップの変形などを極力抑える必要がある。そこで事前にR&D(研究開発)を行い、特にひずみを抑える溶接方法を確立した後、実機を製作した。図1にシンクロトロンネル内に据え付けられた偏向電磁石を示す。

偏向電磁石は据付け前に、ホール素子を用いた磁場分布の測定およびロングフリップコイルを用いたBL積の測定を行った。BL積のばらつきは標準偏差で $\pm 2 \times 10^{-4}$ 以下の目標を達成した⁽¹⁾。

CODは偏向電磁石のBL積のばらつきだけでなく、偏向電磁石、四極電磁石の据付け誤差にも依存する。シンクロトロンリングはレーストラック形状に電磁石の設置場所が設計され、全体を同時に見渡すことができず、従来の方法が使用できないため、新たな測量方法を採用する必要があった。今回測長器の入手性、作業性を考慮し、レーザトラッキングシステムを利用した三次元測定器を用いて、長さ測定を実施し、その測定結果を網計算により補正し、アライメントにフィードバックさせる方法を採用した。これにより測定時間の短縮と同時に測定データの精度向上を実施し、64台の偏向電磁石、80台の四極電磁石、60台の六極電磁石を最終的な精度 ± 0.2 mm以下という厳しい仕様を満たしてアライメントすることができた⁽²⁾。

さらに偏向電磁石はBL積に起因する閉軌道のCODが極小小さくなる配置方法を採用した。BL積の平均値からのずれができるだけ等しく、平均値より大きい物と小さな物と一台ずつで組をつくる。これらを適当な磁石間隔で配列することにより、偏向電磁石の誤差磁場による蹴り角が相殺して閉軌道のCODが小さくなるようにした⁽²⁾。

シンクロトロンのビーム入射には中心軌道上に乗せる方法が採用され、立上り立下り時間の短いキッカー電磁石^(注1)が必要である。出射には速い取出しが採用され、同様のキッカー電磁石が必要となる。そこでフェライト装荷型の分布定数系のキッカー電磁石を採用することにした。

電磁石と電源を組み合わせて磁場測定を行い、所定の仕様を満たしていることを確認した。図2に測定結果を示す。立上り時間、立下り時間ともに100 ns以下で、ビームの周回時間 $1.3 \mu\text{s}$ に比べて十分短く入出射の効率を落とすことはない。単バンチ(8バンチ)運転^(注2)にも支障がない。

(注1) 短いパルスでビームを急激にキックし、角度を曲げる電磁石。

(注2) バンチとは電子の塊のことで、電子を塊の最小単位に局在させる運転のことを単バンチ運転という。

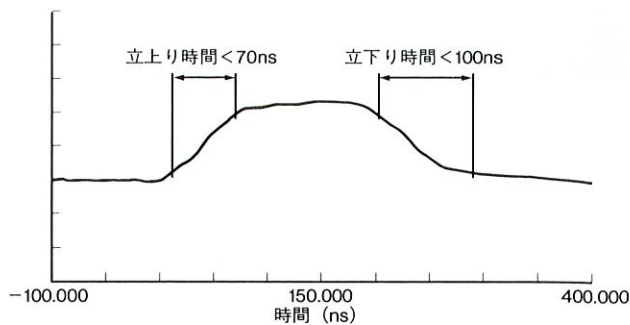


図2. 出射キッカー電磁石磁場波形 立上り時間、立下り時間ともに100 ns以下である。

Waveform of extraction kicker magnet

3 真空系

ビームエネルギーを増大させるシンクロトロンの場合、電磁石の磁場強度が時間とともに変化する。真空ダクトは電磁石のギャップの中に収納されるので渦電流が生じ、磁場分布が乱される。特に偏向電磁石の場合は六極磁場成分が大きくなり、また発熱も大きくなる。このため蓄積リング、ビーム輸送系でよく使われる3~4 mmの厚肉ダクトを用いることができない。渦電流を小さく抑えるためにはダクトの抵抗値を大きくする必要があり、ペローズタイプで真空ダクトを形成することも可能であるが、支持構造、電磁石のギャップの最小化に問題がある。また、非磁性材料を使用して真空ダクトを形成することも可能であるが、コスト・製作性の問題から採用できない。

そこで、シンクロトロンにも放射線医学総合研究所の重

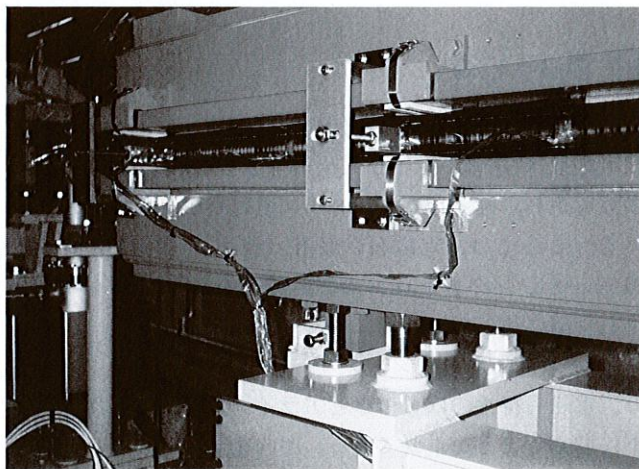


図3. 偏向電磁石用真空ダクト リブ付き薄肉のダクトにより構成され、電磁石の内部挿入時には絶縁処理を施し、支持構造部材を取り付けている。

Vacuum duct of bending magnet

イオンシンクロトロン用に開発したステンレス製薄肉ダクト³⁾を採用することにした。このダクトは薄肉のステンレス板にペローズ機能をもたせるとともに、真空による外圧座屈防止のための補強リブを取り付けた構造である。開発した自動溶接機を用いて所定長さの薄肉ダクト間を溶接し、全長 3.5 m の真空ダクトとした。これにより製品の信頼性を確保するとともに工程短縮を図った。また、現地組立開始前にこのダクトを偏向電磁石に挿入し、曲げ半径、位置出しなどの確認を行い、機能的に問題ないことを確認した。図 3 に偏向電磁石真空ダクトを示す。

この当社独自の薄肉真空ダクトによりシンクロトロンを 1 Hz のパターン運転させることが可能となった。

4 モニタ系

シンクロトロンリングは入射したビーム電流の損失率を極力小さくして加速および出射するように、ビーム調整して運転する。設置したモニタ系はスクリーンモニタ、ノックアウト電極、ファースト CT (Current Transformer)、DCCT (直流 CT)、ボタン位置モニタ、ストリップライン位置モニタである⁴⁾。

線形加速器から入射したビームの入射軸の確認、入射セプタム電磁石、出射用キッカー電磁石、出射用セプタム電磁石の励磁量を調整するために固定式スクリーンモニタが設置されている。また、シンクロトロン内をビームが 1 回転することを確認するために、可動式スクリーンモニタをノーマルセル部および直線部に設置している。

ファースト CT は周回するビーム電流を検出するものであり、ビーム電流を 1 ns 以下の応答時間で測定することができる。1 ターン終了後から入射、加速、出射の各段階において四極電磁石励磁電流値を調整しながらビーム寿命の伸びを測定する。

ファースト CT は入射直後から出射直前までのビーム調整に有効であるが、ビーム電流値の測定は DCCT を用いて行う。

電極が発生する電磁場によりビームを振動させ共鳴周波数を測定するノックアウト電極、ビームがストリップラインに誘起する電圧信号の周波数スペクトルを測定するストリップライン位置モニタを用いてチューン測定を行うことができる。

高周波加速空洞部にパワーを入力するとビームはバンチ化され、ボタン位置モニタによるビーム位置測定が可能となる。

ビーム軌道位置の測定精度としては 0.5 mm 以下が要求された。そこで、80 台すべてについて製作据付け精度が十分既定値以下に納まるように各ボタン電極間距離および電極中心のダクト中心に対するずれを規定し、モニタ単体

を製作した。次に校正用テストベンチを用いて電極中心位置を測定した。その結果、ダクト中心に対する電極中心のずれの固体差は ± 0.2 mm 以下であった。測定された校正係数は計算機に入力され、各モニタ出力に対する補正後 COD を計算し画面表示するシステムとした。

現地で真空ダクトを据え付けるときには、四極電磁石端板からモニタ本体の支持を行い、電磁石中心に対してモニタ中心位置が決まるようにした。

さらに各電極に取り付けられるアテニューエータ、ケーブルの減衰量も既定値に収め、四つの電極特性のばらつきを小さくした。

図 4 にビーム調整中の COD の測定結果を示す。最大値は 1 mm であり十分小さい⁵⁾。これは電磁石の製作精度、アライメント精度が所定の規定値を満たしており、ボタン位置モニタの製作据付け精度が十分良かったことを示している。

COD 計測に使用したボタン位置モニタを図 5 に示す。

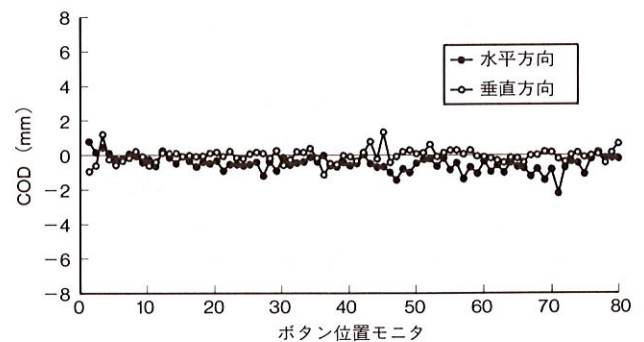


図 4. COD の測定結果 COD は、真空ダクトに精密に取付けられたボタン位置モニタにより測定した。COD の最大値は 1 mm 以下であり、電磁石の製作精度、アライメント精度が十分良かったことを示す。

Results of closed orbit correction distribution measurements

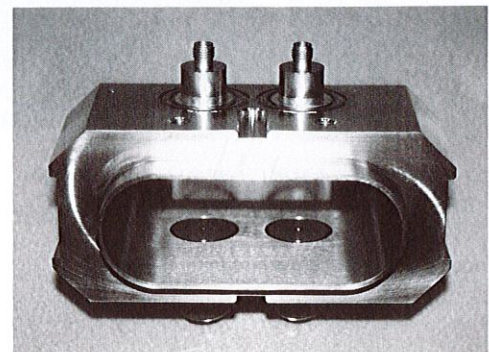


図 5. ボタン位置モニタ 直径 $\phi 18$ mm の四つのボタン電極が対称に並んでいる。電極に誘起される電流により生ずる電圧をピックアップし、信号強度の比により、水平方向、垂直方向のビーム位置を測定できる。

Beam position monitor

5 電子ビーム冷却装置

電子シンクロトロンを中心に加速器の要素技術を述べてきたが、ここではイオン蓄積リングに設置される電子ビーム冷却装置について述べる。

電子ビーム冷却装置は、周回するイオンビームと平行に等速度で電子ビームを走行させ、相互作用により、イオンビームのサイズを小さくするために用いられる。エミッタンスの大きなイオンビームは、その重心系で観測すると各粒子が種々の運動方向をもっている状態すなわち温度の高い状態にある。相互作用する電子ビームの温度のほう十分に低いため、相対的にイオンビームの温度は低下する。これによりビームのエミッタンスは縮小し、ビームエネルギーも均一化する。ビームサイズの縮小化により、内部標的にビームを衝突させて行う物理実験などでは精度が飛躍的に向上する。このような実験を行うため電子ビーム冷却装置の設置が望まれ、東京大学原子核研究所向けに製作した⁶⁾。

1984年に製作開始した装置は最大ソレノイド磁場が0.12 Tであり、種々のビーム試験で所定の性能を発揮していることを確認した⁶⁾。

96年にイオンビームの温度をさらに低くするため電子銃部のソレノイドコイルを超電導化し、断熱膨張比を100とさらに大きくする改造が行われ、所定の機能を発揮していることが確認された⁷⁾。図6に3.5 T直冷式超電導電磁石を装備した電子ビーム冷却装置の外観を示す。

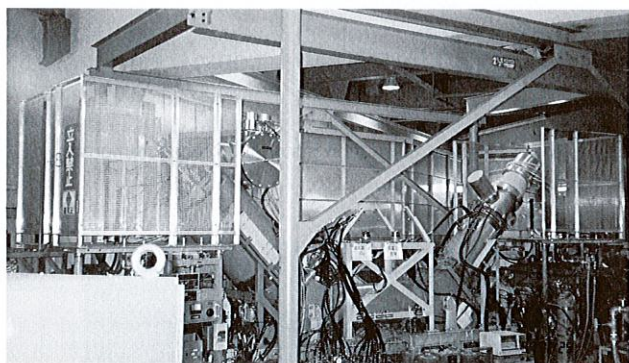


図6. 3.5 T 超電導電磁石を装備した電子ビーム冷却装置 TARN II (イオン加速器)蓄積リングに設置された超電導電子ビーム冷却装置の外観を示す。

Electron cooler with 3.5 T superconducting magnet

6 あとがき

加速器要素技術の一例として、SPring-8シンクロトロンの電磁石、真空系、モニタ系およびイオン蓄積リングの電子ビーム冷却装置についてハードウェア面を中心に述べた。当社では今後ともトータルシステムとしての性能を十分得るため、ハードウェアおよびソフトウェアの両面から要素技術の開発に取り組み、先端科学の進歩に貢献していく所存である。

謝 辞

大型放射光施設(SPring-8)シンクロトロンの設計製作、建設のすべてにわたりご指導いただいた日本原子力研究所、高輝度光科学研究センター、および電子ビーム冷却装置の開発にあたりご指導いただいた東京大学、放射線医学総合研究所をはじめ、関係者各位に深く感謝の意を表する。

文 献

- (1) Fukami, K., et al. "Manufacture and Arrangement of Bending Magnets of SPring-8 Synchrotron" Proc. of Jaeri-Conf. 95-021 1995, p.109.
- (2) Fukami, K., et al. "Alignment of Magnets for SPring-8 Synchrotron". SPring-8 Annual Report. 1995, p.105.
- (3) Kanazawa, M., et al. "Vacuum System for HIMAC Synchrotrons", Proc. of 9th Symp. on Accelerator Science and Technology, Tsukuba, Japan. 1993, p.184.
- (4) Aoki, T., et al. "Beam Position Monitor for the Spring-8 Synchrotron", Proc. Syn. Rad. Instr. 1995.
- (5) 米原 "シンクロトロン現状報告", SPring-8利用者情報1, 2, Mar. 1997.
- (6) Tanabe, T., et al. "Electron cooling experiments at INS", Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., Sect. A 307, 1991, p.7.
- (7) Tanabe, T., et al. "Operation of the Superconducting Electron Cooler at the Cooler Ring TARN II", Proc. of 11th Symp. on Accelerator Science and Technology, Harima, Japan. 1997, p.104.



末武 則夫 SUETAKE Norio

京浜事業所 機器装置部主査。
加速器機器の開発・設計に従事。日本機械学会会員。
Keihin Product Operations



中山 光一 NAKAYAMA Kouichi, D. Sc.

電力・産業システム技術開発センター 超電導・量子応用
技術担当主査、理博。加速器機器の研究・開発に従事。
日本物理学会会員。
Power and Industrial Systems Research and Development Center



永淵 照康 NAGAFUCHI Teruyasu, D. Sc.

京浜事業所 機器装置部主務、理博。
加速器機器の開発・設計に従事。
Keihin Product Operations