

## 論文の内容の要旨

論文題目 小型シンクロトロン放射 (SR) リング用電磁石の磁気設計と評価

氏名 松田哲也

放射光リング (SR リング) にて電子ビームを長時間蓄積し、このとき発生する X 線 (SR 光) を使用しギガビットクラスの半導体のパターン転写を行う、X 線リソグラフィーが注目を集めている。SR リングは従来大型であったが、工場にも配置可能な小型の SR リングの開発が望まれた。このため、SR リングに配置する電磁石群は、小型化が必要となりかつ電子ビーム蓄積に十分な磁気性能を満足することも必要になる。更に、電子ビームを曲げる偏向電磁石は小型化のため高磁界化可能な超電導方式としたが、長期連続運転時の低コスト化・信頼性向上も課題である。

SR リングは、図 1 に示す様に、電子ビームを 180 度偏向させる超電導偏向電磁石を 2 台配置したレーストラック型とした。直線部には、ビーム収束用の常電導 4 極電磁石を 2 台、ビーム形状調整用の常電導スクュー 4 極電磁石を 2 台配置した。筆者は、これら電磁石群の磁気設計、磁界測定装置の開発、磁界評価の研究を行ってきた。

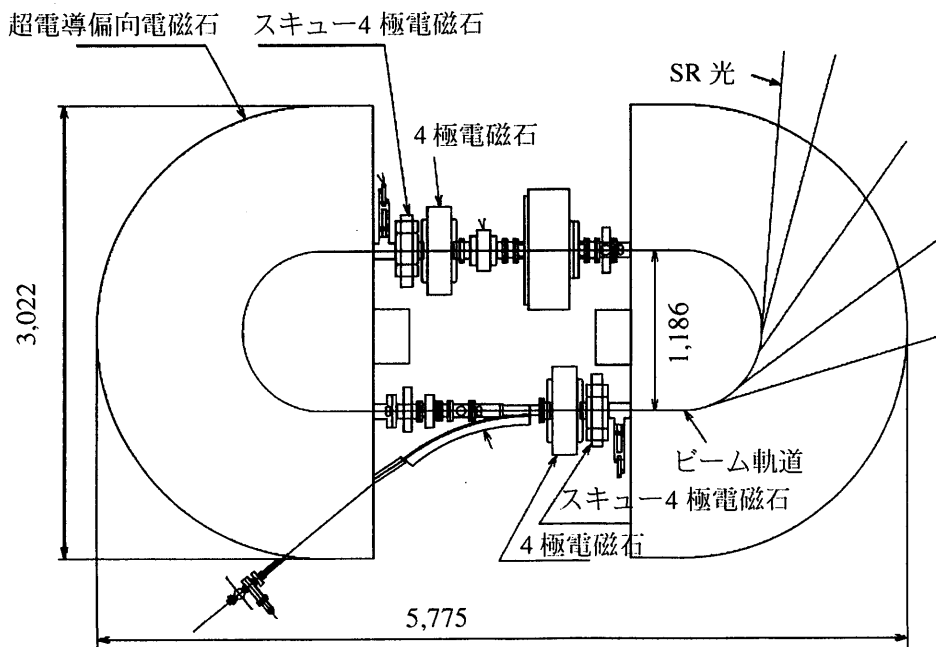


図 1 SR リング平面図

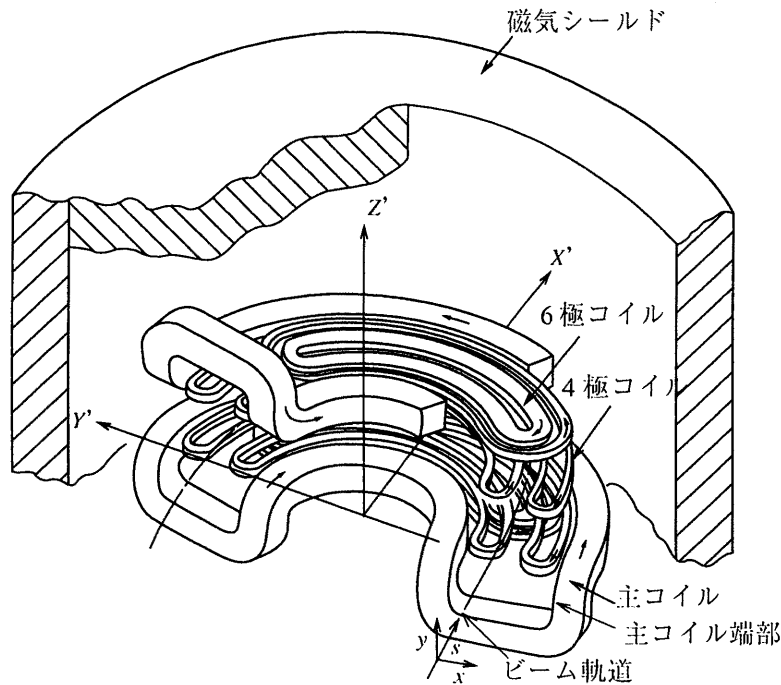


図2 超電導電磁石外観図

まず、超電導電磁石の基本構成の決定と磁気設計研究を行った。超電導電磁石は、図2に示す様に、偏向磁界を発生させる主コイル、ビーム収束用4極コイル、主コイルが発生する誤差磁界補正用6極コイル、漏れ磁界を低減させるための常温磁気シールドで構成した。

①ビーム進行方向である  $s$  方向に垂直な面で、空間的に高均一な磁界が必要である。この条件を満足しながら電子ビームが通過するビームチェンバーを挿入できる空間を確保するため、主コイルは、上下分割式かつビーム軌道に沿ってコイルが湾曲したバナナ型とした。 $s$  方向に沿って両端部がビーム軌道面上に不均一な磁界を発生するが、これを低減させるため端部を跳ね上げた構造とした。②従来、SRリングの直線部に配置していたビーム収束用の常電導4極電磁石を、超電導化し超電導電磁石に組み込んだ。更に、主コイルが発生する4極磁界を左記4極コイルで補正する、即ち補正コイルも兼用することを提案した。6極補正コイルは従来3対コイルで構成されていたが、2対で構成可能であることを示した。これらにより、超電導電磁石の小型化が可能になり、レーストラック型として世界最小の周長のSRリングを得た。③SR用超電導電磁石として初の永久電流モード運転の採用により、超電導コイル部への主な熱侵入源である電流リードを取り去った。これにより、SR用超電導電磁石として世界最少の液体ヘリウム蒸発量(1台当たり1l/hr)を実現できた。④主コイル、補正コイル、磁気シールド形状のパラメータと磁界均一度、電磁力などの関係を三次元磁界計算により明らかにし、形状パラメータの最適化を行った。これらを全てモデル化した磁界計算結果から、磁気設計仕様を満足する磁界均一度が得られることを示した。

次に、完成後の小型SRリング用超電導電磁石の磁気特性を確認するための高精度の磁界測定装置について研究を行った。

実際のビーム軌道は  $s$  方向に沿って曲線部と直線部を有するが、この軌道にほぼ沿って高精度で磁界分布を測定可能な図3に示す装置を提案した。この装置では、ビーム軌道に近い形状のレールを取り付けた高精度の磁界測定専用チェンバーを電磁石内部に組み込み、レール上を磁界測定素子であるホール素子を搭載したセンサー部がベルトにより  $s$  方向に沿って駆動する。従来装置に比較し、ビーム軌道により沿った磁界分布を測定でき、かつ超高真空対応のビームチェンバー

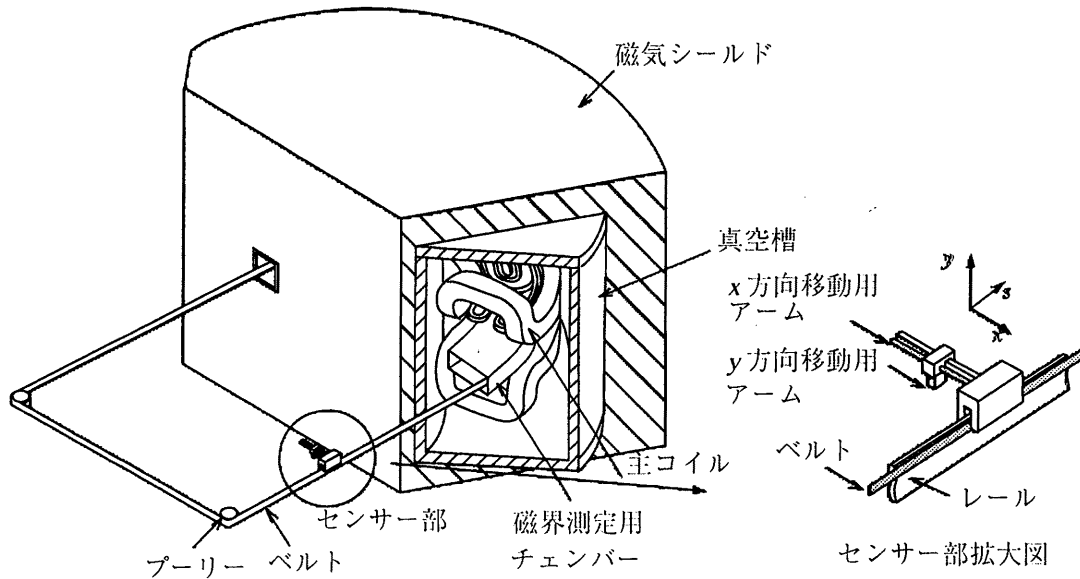


図3 磁界分布測定装置

の汚染の可能性も減少できる。なお、磁界測定用チェンバーは磁界分布測定後ビームチェンバーと交換する。

この磁界分布測定装置の精度向上方法について研究した。①  $s$  方向に沿った長い領域で、ホール素子を高精度で位置設定するため、(a)  $s$  方向に沿った磁界分布の形状を活かした測定手順の工夫、(b) ホール素子の  $s$  方向への駆動に用いるベルトの特性向上を行った。② 磁界測定素子であるホール素子の高精度化のため、(a) 磁界分布測定時ホール素子が超電導電磁石内部で傾くと測定誤差になるが、この密閉空間内においてもホール素子平面の水平面からの角度ずれを確認できる方法についての提案、(b) 従来、ホール素子の校正に用いられてきた高精度 NMR 磁界測定装置は、低磁界では測定不可能であったが、低磁界領域から 4T の高磁界領域の広い範囲に渡り、高精度でホール素子を校正可能な方法の提案、(c) ホール素子は 1mm 程度の大きさにパッケージ中に収納されているが、ホール素子中心を 0.1mm 精度で決定できる二次元高精度位置決定方法についての提案を行った。これらより、本研究成果に基づく磁界分布測定装置は超電導電磁石の磁気設計仕様の確認に十分な精度を実現できた。③ 偏向磁界の鉛直方向からの傾きは 1mrad 以下である必要がある。この傾き測定は困難なため従来は実施されなかった。本研究成果に基づく超電導電磁石の主コイルの形状は特殊であるため傾きが発生しやすく、傾きの確認が必要である。超電導電磁石内部の  $s$  方向に沿った偏向磁界の傾き分布を測定できる方法を提案した。この方法は以下の様である。鉛直方向磁界発生する角度補正電磁石の下でホール素子を鉛直方向に向けた後、超電導電磁石内の水平方向磁界を測定する。角度補正電磁石から超電導電磁石移動時の角度誤差を傾きセンサーで補正する。これらから、偏向磁界の傾きが評価できる。傾き測定装置の実際の調整結果についても述べ、1mrad の傾き測定に十分な測定精度を有することを明らかにした。

次に、完成後の超電導電磁石に関し、上記で述べた磁界測定装置を用いて磁界測定を行った。

① 磁界分布の一例として  $s$  方向に沿った磁界均一度の分布を計算結果と併せて図 4 に示す。 $s$  方向中心部で仕様  $1 \times 10^{-3}$  を満足し、計算値  $6.8 \times 10^{-4}$  に対し実測値  $6.4 \times 10^{-4}$  と高い精度で一致していることを確認できた。その他、偏向磁界、4 極、6 極磁界等の各種  $s$  方向に沿った磁界分布も、計算と良く一致していることを確認でき、両者の差は他の研究機関に比較し数分の一と良い結果

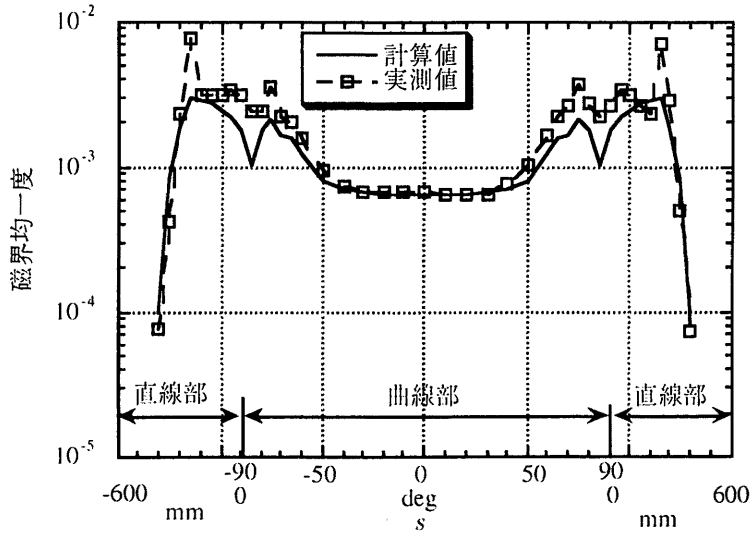


図4 s方向に沿った磁界均一度分布

であった。②BI特性、s方向に沿った磁界分布の電流依存性に、磁気シールドの鉄の飽和特性と超電導線の磁化特性が混在した複雑な現象が観測され、この理由について定性的な説明を行った。③初めて0.5mradという微小な偏向磁界の傾き測定を実施し、偏向磁界の傾きが仕様1mrad以下であることを確認した。これらの測定より、本研究成果に基づく超電導電磁石は、SRリング用電磁石として十分な磁気性能を有することが確認できた。

超電導電磁石の長期の永久電流モード運転を実現するため、コイル保護回路を構成するクエンチ検出器について、上記運転モードに対応した設定方法について提案した。これにより、大きなインダクタンス68Hを有する超電導電磁石としては他に例を見ない最大約二年の永久電流モード下の安定な運転が可能となり、高信頼性を実証できた。上記連続運転中、磁界基準であるNMR磁界測定装置では測定不可能な不均一4極磁界の存在下で、ホール素子を用いた磁界の連続測定を可能とし、 $6 \times 10^{-5}$ /年という極めて微小な磁界減衰を確認できた。

次に、常電導電磁石の磁界補正結果について述べた。SRリング直線部に配置する4極、スキュー4極常電導電磁石には、高均一な磁界、即ち4極、スキュー4極磁界成分以外の誤差磁界成分が仕様以下であることが必要である。これには磁極構造の最適化が必要であるが、電磁石構造が複雑であり高精度三次元磁界計算は困難なため、従来は分解可能な磁極を磁界測定結果に基づきNC加工した後、再度電磁石に取り付け磁界測定する方法を繰り返していた。①4極あるいはスキュー4極電磁石の8カ所存在するs方向両端部の磁極部に微小鉄板を張り付け、鉄板の厚みの調整により磁界分布を補正する、従来に比べより簡易かつ実用的な方法を提案した。この補正方法を実際の補正に適用した結果数回で補正でき、従来方法に比較し大幅に補正時間を短縮できた。

②補正鉄板厚みを変化させた場合の、4極、スキュー4極常電導電磁石の磁界分布の傾向が逆であり、この原因について考察した。POISSON方程式の解を元に高次の誤差磁界成分を評価したが、この磁界成分の符号が、4極、スキュー4極電磁石とは逆であった。これが、上記補正鉄板の磁界分布への影響が逆になる理由であることを明らかにした。

上記で述べた超電導・常電導各電磁石を配置したSRリングは、レーストラック型として世界最小の周長を実現でき、また電子ビームの最大蓄積電流は440mA、蓄積に要する時間は10分と充分短くX線リソグラフィーに十分な性能を有することを実証できた。これにより超電導・常電導各電磁石とも十分な磁気性能を有することが実証できた。