

## SAGA Light Source 新セプトラム電磁石の設計

岩崎 能尊<sup>1</sup>、高林 雄一<sup>1</sup>、江田 茂<sup>1</sup>、吉田 勝英<sup>1</sup>、富増 多喜夫<sup>1</sup>、大垣 英明<sup>2</sup>

<sup>1</sup>九州シンクロトロン光研究センター、<sup>2</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

SAGA Light Source は現在 150mA でのユーザー運転を行っているが、大電流化および性能向上に向けた電子蓄積リングの高度化を進めている。旧セプトラム電磁石は放射光による真空容器の発熱を冷却する機構がないため、大電流化を行うためには新規セプトラム電磁石の設計が必要であった。新規セプトラム電磁石を設計するにあたり冷却機構の他、耐久性、漏れ磁場対策、アライメント精度、真空性能を高める検討を行った。ビームトラッキングコードを用いた入射シミュレーションにより蓄積リングに入射可能なアクセプタンスを算出したのち、セプトラム電磁石が真空の中に入るタイプと真空の外にあるタイプでそれぞれ磁場計算を行った。旧セプトラム電磁石は電磁石が真空の中に入るタイプであるが、セプトラム電磁石が真空の外にあるタイプの場合、真空面でのメリットの他、アライメントが容易であること、ビームダクトによるセプトラム電磁石およびリターンコイルの支持が可能であることから、新セプトラム電磁石では電磁石を真空の外に出すタイプとした。ビームダクト形状はビーム経路を最大限に確保するため角型のパイプ形状とした。ビームダクトの材質は当初、形成された部材の入手が容易な SUS304 で試作したが曲げ加工によりマルテンサイトを生じ磁化したため、SUS316L とした。ビームダクトはコイルの支持もかねており、振動を極力抑えるために±0.1mm の製作精度とした。セプトラムコイルと蓄積リング側真空容器との間には厚さ 0.35mm の電磁鋼板を 2 枚設置し蓄積リング側への漏れ磁場の影響を低減した。また、コイルのターン部分は極力薄い構造とし、電磁石ヨーク外の空芯による漏れ磁場を抑えた。ビームダクトのトランスポート側にはセラミックダクトを設置し、セプトラム電磁石励磁に伴い発生するビームダクトの渦電流が蓄積リング側真空容器に回り込まないようにした。アライメント用の基準点は、レーザートラッカーによるアライメントを当初より計画しビーム軸外位置に設置した。電磁石の形状は積層鋼板を平行に並べて形成される片エッジフォーカスの形状とし組立てをできるだけ容易にし占積率は 98%以上とした。

# SAGA Light Source 新セプタム電磁石の設計



岩崎 能尊<sup>a</sup>, 高林 雄一<sup>a</sup>, 江田 茂<sup>a</sup>, 吉田 勝英<sup>a</sup>, 富増 多喜夫<sup>a</sup>, 大垣 英明<sup>b</sup>

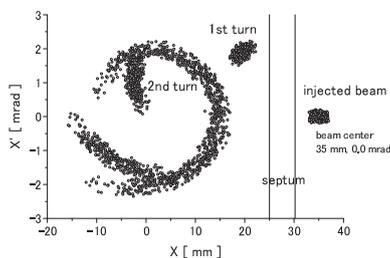
<sup>a</sup>九州シンクロトロン光研究センター, <sup>b</sup>京都大学エネルギー理工学研究所

## 概要

SAGA Light Source電子蓄積リングは現在150mAでのユーザー運転を行っているが、大電流化に向けた各種高度化を進めている。セプタム電磁石はトランスポートを通過した電子を蓄積リングに入射するためのパルス電磁石であり、入射効率を決定する極めて重要な装置の1つである。旧セプタム電磁石は、放射光が当たる面に冷却構造がないため、大電流化を達成するためにはセプタム電磁石の新規製造が必要であった。新規セプタム電磁石を設計するにあたり、旧セプタムで問題のあった真空面、耐久性、アライメント精度、漏れ磁場、アパーチャーについて検討を行い、新セプタム電磁石は真空面とアライメント精度に優位な電磁石が真空の外に置かれるタイプとした。電磁石を真空の外に設置した場合、電磁石ヨーク内部を通過する真空ダクトの真空度を維持する必要があるため、セプタム電磁石上流部のスクリーンモニタにイオンポンプが接続できるよう、スクリーンモニタ2台も新造した。また、セプタム電磁石の形状は、占積率に有利な積層鋼板を平行に重ねるタイプとし、上流のみにエッジフォーカスが働く片エッジの形状とした。セプタム電磁石出口端部のコイルターン部分は、空芯による漏れ磁場を抑えるため、極力ヨーク端部に接近させた構造としている。蓄積リング入射部は、セプタム電磁石電源のトランス、蓄積リングスクリーンモニタ、キッカー等、非常に機器が密接した区域であり、設計にあたっては架台等の干渉がないよう十分な現場検証を行った。また、セプタム電磁石電源は旧セプタム電磁石で使用していたものをそのまま使用するため、励磁電流およびインダクタンスの整合が取れるように電磁石ギャップおよびコイル形状を検討している。

## アパーチャーサーベイ

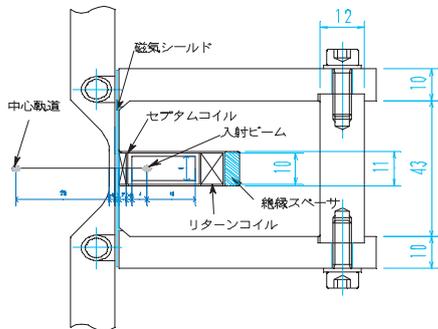
蓄積リングに入射された電子ビームは、バンブ軌道と入射位置の差に相当する振幅を持ったベータトロン振動をする。ベータトロン振動の振幅が大きくなると、蓄積リングに入射された電子ビームはセプタムの内壁に衝突して蓄積されない。バンブ軌道の高さ（中心軌道からバンブ軌道までの距離）に対して入射可能な入射位置をトラッキングによりサーベイした。キッカーパルスは0.5  $\mu$ sで立上がり（立下り）する直線で近似し、実際にキッカーが出力するhalf-sine形状を模擬した。トラッキングコードにはTRACY2を用いている。



		Injection point [mm]			
		30	35	40	45
bump [mm]	5	○	×	×	×
	10	○	○	×	×
	15	○	○	○	×
	20	○	○	×	×

左図：蓄積リング中心軌道から35mmの位置に入射された電子ビームのターンごとのビーム位置を示す（バンブ軌道20mm）。ビームサイズは2 $\sigma$ （5mm）。

右表：バンブ軌道に対する入射可能なビーム位置。



横方向のアーチャーは、中心軌道より**35mm**を規準として、外側に**7mm**以上、内側に**4mm**以上とした。

縦方向のアーチャーは、 $\pm 2.5\text{mrad}$ 以上入射角度が大きくなると入射できないので、**8mm**で十分とした。

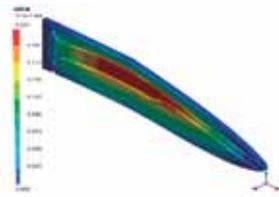
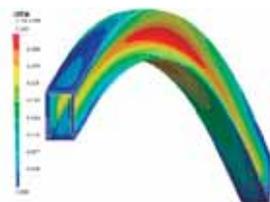
磁場の均一性確保と、入手可能な真空ダクト形状より、横方向アーチャーは、中心軌道より**35mm**を規準として、外側に**13mm**、内側に**4mm**、縦方向は**8mm**とした。真空ダクト、シールドも含めたセプタムの実効厚さは**6mm**である。

放射光による発熱を抑えるため、蓄積リング真空容器には上下の冷却チャンネルを設けた。

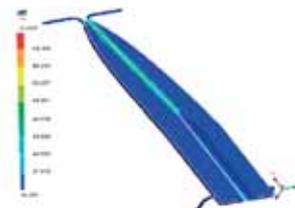
コイルの振動を抑えるため、リターンコイル内側にはFRPによる絶縁スペーサを設置し、真空ダクトの製作精度は $\pm 0.1\text{mm}$ 以下とした。

旧セプタムのギャップ長**8mm**に対し、新セプタムは**11mm**であり、励磁電流は約**1.4**倍となる（電源の定格内）。Lは同程度（ $2\mu\text{H}$ ）。

### 構造計算および熱解析

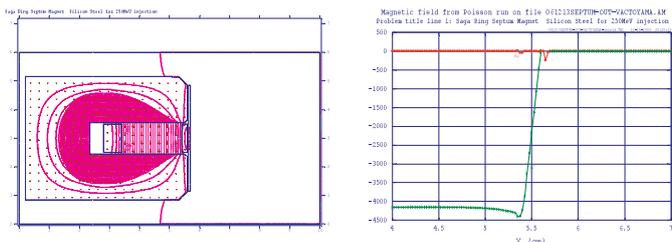


左図：電磁石ヨーク内部を通過する真空ダクト変形量、右図：蓄積リング側真空槽変形量。どちらも真空に対して**0.1mm**以下の変形量となっている。電磁石ヨーク内部を通過する真空ダクトは、**SUS304**の場合、曲げ加工によりマルテンサイトを生じるため、材質を**SUS316L**とした。



左図：入熱分布を示す。放射光があたる部分は一律に幅**1mm**の範囲に**0.36W/mm<sup>2</sup>**（**300mA**相当）の入熱があるとした。右図：**35°C**冷却水が**3L/min**で通水された場合の熱分布。最大温度で**62°C**。構造計算および熱解析は、セプタム電磁石製造を受注した株式会社トヤマに依頼した。

## 磁場解析



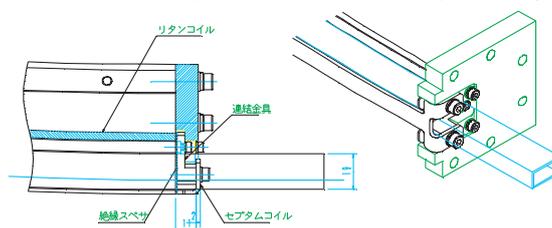
蓄積リング側への漏れ磁場を抑えるために、セプタムコイル外側に厚さ0.7mm(0.35mm厚珪素鋼板2枚)のシールドを設置した場合の磁場分布。

磁場によるビームのキック角は  $\Delta\theta \approx 0.3BL/E$  (B[T], L[m], E[GeV]) であるので、例えばビームが感じる水平方向磁場が0.01T、 $L=0.1m$ 、 $E=0.26GeV$ の場合には $\Delta\theta \approx 1mrad$ 程度となって無視できない(キッカー2および3のけり角は0.6mrad程度)。蓄積ビームは入射の際にキッカー電磁石により、中心軌道から20mmの距離の位置にキックされる。真空ダクト直近での磁場が0.001T以下であれば、蓄積ビームがセプタムによって蹴られる量は0.1mrad以下となるため、中心軌道から20mmの位置における漏れ磁場の大きさを0.001T以下となるようにシールド厚みを決定した。

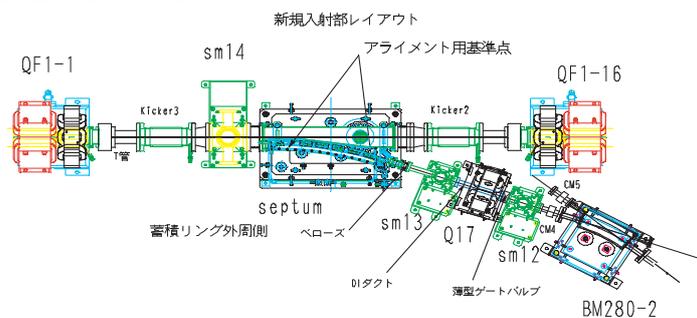
電磁石は珪素鋼板を平行に重ねて形成し98%以上の占積率とした。入口のみのエッジ構造であるが、トランスポートのツイストパラメータへの影響は調整範囲内である。

セプタムコイルおよびリターンコイルは絶縁性を高めるため、セラミックコーティングの上、カプトン膜にて保護している。

コイルのターン部分がヨークの外側にある場合、空芯による漏れ磁場は厚さ0.7mmの珪素鋼板を置いたとしてもバンク軌道上で0.03Tとなり(L=0.01mとして $\Delta\theta \approx 0.3mrad$ )無視できない。コイルリターン部分を極力薄くし、ターン部分での漏れ磁場を抑制した。



## レイアウトおよびアライメント



水平面アライメント用基準点は、セプタム電磁石上の2点(OFF-AXIS)に設置した。レーザートラッカーにより、蓄積リング4極電磁石(QF1-1およびQF1-16)により設定される座標系に対して $\pm 0.2mm$ 以下の精度でアライメントを行っている。レベルはセプタム電磁石側面の罫書き線をQF1-1内側合わせ面に対して $\pm 0.1mm$ 、傾斜度は $\pm 1mrad$ 以下。

### 現状

- 2007年12月に新規セプタムのインストールが終了し、現在、順調に稼動している。旧セプタムと比較して2倍以上入射効率が改善した。
- ホールプローブおよびビームを使っての地場測定によって、漏れ磁場は計測されていない。
- 蓄積リング入射部真空系の増強を予定している。