

MAGNET FABRICATION INSTALLED IN BEAM TRANSPORT LINE FROM SACLA TO SPring-8 STORAGE RING

Chikaori Mitsuda^{#,A)}, Kenji Fukami^{A)}, Masaya Oishi^{A)}, Haruo Ohkuma^{A)}, Noritaka Kumagai^{A)},
Tatsuro Nakanishi^{A),B)}, Makoto Hasegawa^{B)}, Hideyuki Hirayama^{B)}

^{A)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI) 1-1-1 Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo, 679-5198

^{B)} SPring-8 Service Co., LTD. 1-20-5 Kouto, Shingu-cho, Tatsuno, Hyogo, 679-5165

Abstract

Beam transport line (XSBT) from XFEL/SPring-8(SACLA) linac to SPring-8 storage ring is under construction in order to use the 8 GeV \sim 100 fs short bunch electron beam in SPring-8 storage ring. The electron beam distributed from SACLA is transported passing through the XSBT of 310 m, then matched to the SPring-8 booster ejection point. The required numbers of horizontal and vertical bending magnets were 9 and 4 respectively. The total number of 3 type quadrupole magnets for required field gradient of 13.4T/m, 50.1 T/m and 76.9 T/m were 57. Their magnets were designed as becoming compact as much as possible and fabricated by block iron. The details design of magnets will be reported mentioning how to meet the required field strength and small iron volume simultaneously keeping the enough field flatness. Especially, we will discuss the magnetic field measurement results of bending magnets which strongly makes an effect to beam dynamics.

SACLA から SPring-8 蓄積リングへのビーム輸送系電磁石の製作

1. 概要

SPring-8 施設内に建設の完了した XFEL/SPring-8(SACLA)線型加速器(Linac)は 8GeV まで加速した電子ビームを下流に設置したアンジュレーターにより X 線発振させ時間コヒーレントな最短波長 0.06nm に達する X 線レーザーを取り出すことが可能である。目標波長を達成するために線型加速器にてビームパンチ長は 30fs \sim 100fs、エミッタンスは 0.04nmrad で設計されている。この値は現状の SPring-8 蓄積リング(SR)での値と比較して 2 桁程小さい。この電子ビームを直接 SR にて利用することが可能になれば、SPring-8 蓄積リングにおいて更に高輝度、短パルスな放射光を得ることができる。そこで SACLA から分配された電子ビームをそのままの時間・空間分布とともに極小状態にて SR まで輸送する方法の検討・設計を行った。電子輸送は SACLA と SR への配置関係及び既存の SR の入射部を利用する考えから、SACLA 最下流部のビーム振り分けマグネットにより現在建設中である電子輸送ライン(XSBT)へ入射し、310m 下流の SPring-8 ブースターリング(BR)の出射部で合流する方法をとる。その後 BR 出射部から既存の電子輸送ライン(SSBT)の 300m を通り蓄積リングへ入射する。本論文では建設中の XSBT に据え付けられる電磁石の設計・製作・磁場測定結果について報告する。

2. ビームオプティクス設計

2.1 電子ビーム輸送系全体像

まず、電子ビーム輸送系全体像を図 1 に示す。蓄積リングへと導く SACLA の電子ビームはブースターの出射部の後のマッチングセクションへ向けて

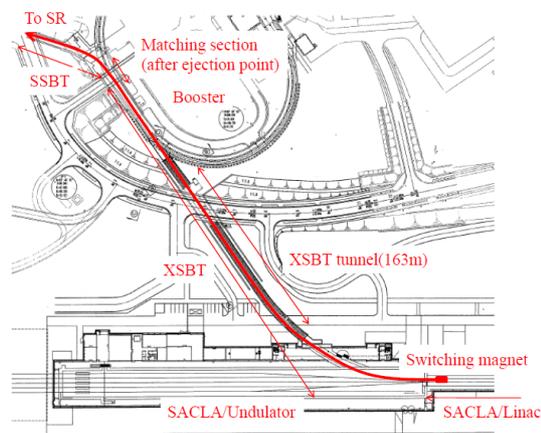


図 1: ビーム輸送系全体像

ブースターの出射部軌道と平行に外周側 1125mm の位置を通す。そのため、ビーム軌道は SACLA/Linac から 55.2 度曲げる必要がある。また、ブースターレベルは SACLA に比べて 9m と低い位置に位置するため下方に 10 度曲げ、上方に 10 度曲げ戻す必要がある。さらにブースター出射点から 13.4m 下流に設けられたマッチングセクションでは既存の SSBT ラインへ合流させるため、6.8 度曲げられる。ビーム軌道高さは SACLA/SPring-8 とともに 1.2m である。このビーム輸送経路のうち XSBT ラインのマッチングセクションまでのビームオプティクスを設計し、配置される電磁石の設計・製作・据え付けが完了している。

2.2 オプティクス設計

電子ビーム輸送系全体像に示されたように、ビームは水平方向のみならず垂直方向に偏向させられる。

[#] mitsuda@spring-8.or.jp

しかしながら電子ビームにとって偏向部が多いことは、次の主たる効果により電子ビーム特性の劣化をもたらす。一つ目はディスパージョンによるエミッタンスの増大及びバンチ長の伸びである。二つ目は偏向部で発生するシンクロトロン放射光のバンチ長より波長の長い成分のコヒーレント性(CSR)によるエミッタンスの増大とともにバンチ長の伸びである^[1]。そこで、ディスパージョンの発生量を抑制するため、偏向部をチャスマン-グリーン型ラティスとし、ディスパージョンを 0.57m 以下とした。特に、偏向電磁石はセクター型としエッジフォーカスの効果を低減するように設計した。直線部は FODO 型ラティスで組んだ^[2]。現在、マッチングセクション下流の既存の SSBT のラティスについては現状を維持するが、現状のままでのオプティクスではバンチ長の伸長及びエミッタンスの増大が顕著であるため、輸送系トータルでの検討を開始している^[3]。図 2 に既存の SSBT ラインを含めた輸送系全体の Twiss parameter の設計計算を示す。現在の SSBT ラインは FODO ラティスにより構成されているが、XSBT ラインとの同じ思想にてチャスマン-グリーン型ラティスにて電磁石を再配置した。この SSBT 改造案によりディスパージョンは XSBT ライン同程度に抑えることができ、CSR 効果を考慮してもバンチの伸長は低く抑えられ、500fs で輸送できる。更にシケイン型のバンチ圧縮器を SR 入射直前で設置すれば更なるバンチ圧縮が可能であると考えている。

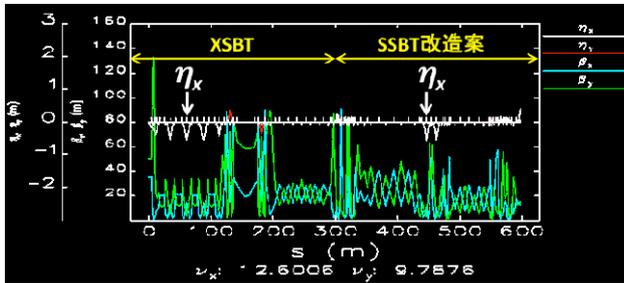


図 2: 横軸は振り分けマグネットからの経路長であり 310m 地点までが XSBT ラインである。

3. 電磁石の製作

3.1 電磁石の設計

XSBT ラインのオプティクスの設計より製作が必要とされる電磁石のタイプと必要台数磁場要求値・精度を表 1 に示す。入射ビームのエミッタンス及びエネルギー広がり は 0.01% と十分に小さいため、チェンバーサイズを小さくしギャップ・ボア径を小さくすることが可能である。しかしながら、チェンバー内壁によるウェイクフィールドの影響が大きくなりエネルギー広がり の悪化が引き起こされる。これらを考慮し、電磁石小型化のためのギャップ間・ボア径の狭小化・強磁場勾配・再利用電源の出力仕様とのバランスをとって決定した。

表 1: 電磁石タイプごとの設計仕様値

Type	Num. of magnets	Gap/Bore radius	Field /Gradient	Magnet length
BH	9	30.0 mm	1.20 T	2.252m
BV	4	30.0mm	1.20 T	1.941m
QA	8	29.0 mm	68.81 T/m	200mm
QB	30	29.0 mm	47.40 T/m	200mm
QC	16	29.0 mm	13.35 T/m	200mm
StH/StV	10/10	40.0 mm	0.76 T	200mm

また、偏向電磁石の磁場のフラットネスはビーム中心軌道±5mm の範囲にて 1×10^{-4} とし、四極電磁石においては同様に磁場勾配のフラットネスを 1×10^{-3} としている。電磁石の小型化のために、水冷式の B/QA/QB 電磁石のホロコンの設計については、SACLA 冷却水システムの能力から来る圧損 0.2MP と冷却水温度上昇を $\Delta t = 20^\circ\text{C}$ の許容値から B 電磁石の電流密度を $3\text{A}/\text{mm}^2$ とし、QA/QB 電磁石の電流密度を $5\text{A}/\text{mm}^2$ とし出来る限りのホロコンサイズのダウンを図っている。B 電磁石の小型化には再利用電源の定格 300A で十分な磁場強度出すためにターン数を増加させ、積分磁場で磁場強度を稼いでいる。その分、リターンヨークを薄肉にし小型化を図るため、磁場対称性が良く、かつ薄肉長尺電磁石の構造強度も持たせられる磁石断面形状の H 型とした。Q 電磁石の小型化のためには、狭小なコイルスペースの中でターン数を確保するため電流密度を高くし、ポール幅・リターンヨーク幅の最適化を行っている。特に 70T/m 以上の磁場勾配を生み出すためには電磁石筐体が大きくならざるを得ないが、磁石断面を $330\text{mm} \times 330\text{mm}$ の大ききで仕上げる事が出来ている。電磁石の小型化を進めながらコイルスペースを確保するためにはリターンヨーク、ポール幅の薄肉にする必要があるため磁場フラットネスの確保が難しくなる。そのため、B/Q 電磁石ともに、ヨーク内の飽和点を緩和しながら磁場フラットネスを確保するための磁極形状・シム形状構造を最適化した。最終的な B 電磁石・QA 電磁石の磁極形状を図 3 に示す。表 2 に設計された電磁石パラメーターを示す。磁場値については MAFIA により電磁軟鉄(SUY0)の B-H カーブを元に計算を行った。

表 2: 電磁石タイプごとのデザイン値

Type	Flux (AT/pole)	Hollow conductor	Water flow rate(l/min)	Design flatness
B	300x54	11.0□xΦ6	6.4	1.26(T) 3.0×10^{-5}
QA	220x32	7.5□xΦ4.5	4.3	68.80(T/m) 7.4×10^{-4}

QB	220x22	7.5□xΦ4.5	5.4	54.17(T/m) 1.0x10 ⁻³
QC	25x50	3x8	-	14.78(T/m) 8.7x10 ⁻⁴

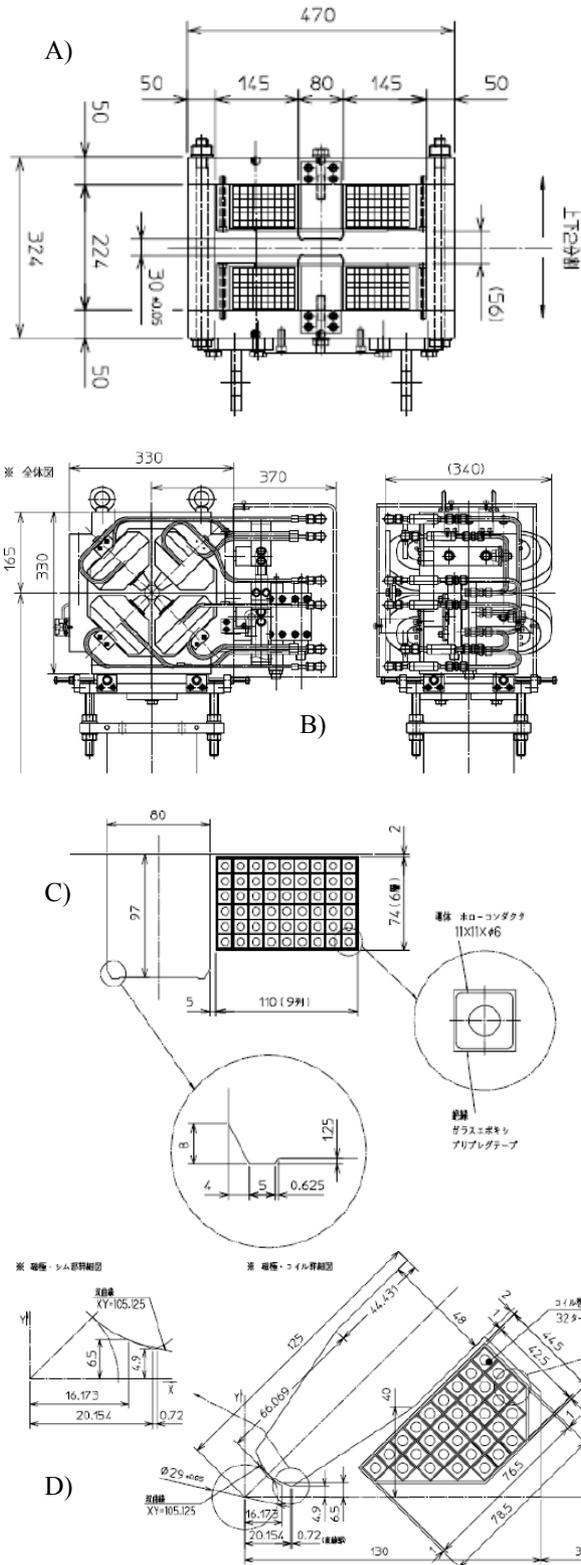


図3 B 電磁石断面形状(A)と磁極形状(C)、QA 電磁石の断面形状(B)と磁極形状(D)

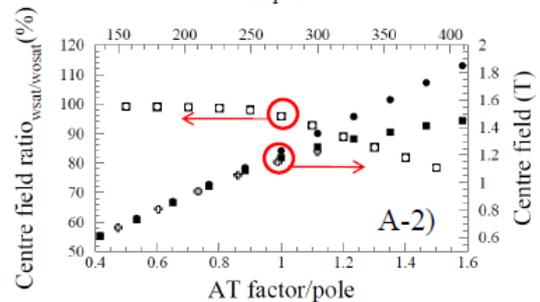
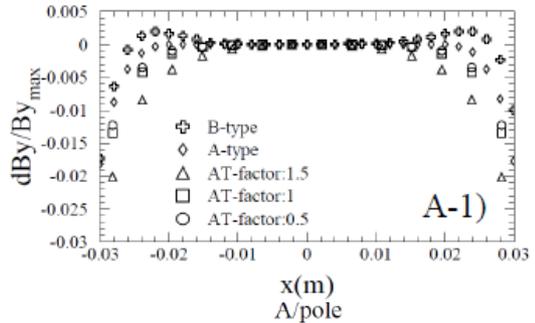
3.2 電磁石の製作

電磁石はブロックタイプを採用し、ポール形状はNCにより削り出しで行った。削り出しの精度は5μm以下とした。電磁石据え付け後のチェンバー挿入のため全電磁石はミディアムプレーンにて半割が可能になっており、組み上げ精度は半割面のピンで担保する。B 電磁石は冷間加工の圧延ロール板を天板、側板のリターンヨークとし、ブロックから削り出した上下磁極をビーム中心軌道に沿ってボルト止めした。Q 電磁石は四象限の磁極ごとにブロックから削り出しを行い組み上げた。アライメントのためのレーザートラッカー用の基準座は±0.02mradの平坦度で製作した。B 電磁石においては基準座を上下流2点にビーム中心軌道上に据え付けかつ電磁石端面磁極中心及び接線線にけがき線を入れた。Q 電磁石では長ボルトによる4分割ブロックの組み上げによりビーム軌道中心に基準座を設けられないためビーム外周側半面に基準座を設置した。製作において特に注意すべき点は偏向電磁石のロール板状のリターンヨークをセクター型に長ボルトにより精度よく組み上げねばならない点であるが、組み上げがうまくいかず後に大きな問題となった。傾斜部架台製作に関してはトンネル傾斜部に設置する電磁石は斜面をはつることにより据え付けるため架台支柱ははつり面に直立し、電磁石台座を斜度分傾ける設計としている。

4. 電磁石磁場測定

4.1 量産電磁石の磁場特性

まず、量産電磁石の磁場水平方向分布及び励磁特性について計算結果と比較した。結果を要求磁場精度の高いB電磁石とQA電磁石について図4に示す。



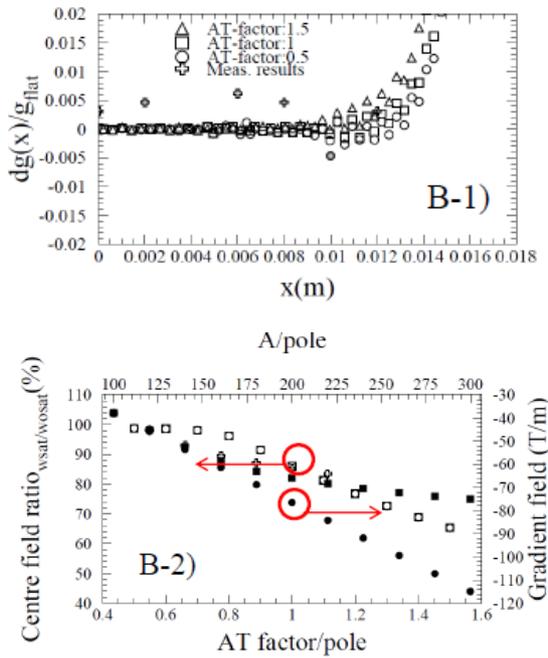


図4 A-1) : B 電磁石水平方向規格化磁場分布 (実測値 : 菱形、十字形)、A-2) : B 電磁石励磁特性 (実測値 : 十字形) B-1) : QA 電磁石水平方向規格磁場勾配分布 (実測値 : 十字形)、B-2) : QA 電磁石励磁特性 (実測値 : 十字形)

重ね合わせている実測値はメーカーでのホール素子プローブを用いた測定結果の平均値である。B 電磁石水平方向磁場分布については磁極中心磁場強度との差異を x 方向について定格励磁電流値の 0.9 倍の電流値に対し AT-factor=1 とし 0.5、1.5 と計算結果を示している。水平 B 電磁石を A-type、垂直 B 電磁石を B-type として実測結果を重ね合わせてプロットしている。励磁特性については電流値ごとの磁場計算結果を飽和がある場合/ない場合の比として (白抜き)、磁場強度計算結果とともに全電磁石の実測結果の平均値を重ね合わせてプロット (黒) している。QA 電磁石についても同様の内容にて計算値と実測値を比較している。ただし、磁場分布については磁場勾配を中心磁場勾配の差として表示している。B 電磁石の水平方向磁場分布は要求された磁場フラットネスを磁極中心から $\pm 5\text{mm}$ 領域にて計算値通りであるが、垂直 B 電磁石においては若干シム近傍でフラットネスが悪化した。また、B 電磁石の励磁特性から定格電流値 300A にて磁場出力が計算値から -2.6%ほど落ちた。QA 電磁石については、磁場勾配のフラットネスが 2.5×10^{-3} と計算値通りと一致せず、励磁特性としても定格電流値にて -6.6%の低下が見られた。製作寸法のばらつきと磁場出力強度(定格電流値での)のばらつきを表 3 に示す。磁場出力の項では括弧内に計算値/要求値とのずれ率を示している。磁場出力値は計算値よりも低く出ているが QA 以外要求値を十分に満たしており、積分磁場を考慮すると B 電磁石において 4.2%、QB/QC において 10.5%、21.7%の伸びが得ることが出来た。出力ばらつきはブロック組み上げの寸法精度も十分な値が出ており

特性のばらつきが低く抑えられていると考えられる。QA 磁場出力強度の計算値からの低下が目立つがこれは実際に使用した電磁軟鉄の B-H カーブによるところが大きい。図 5 に実際に使用した電磁軟鉄の B-H カーブと計算時に使用した B-H カーブの比較プロットを示す。

表 3 : 電磁石タイプごとの寸法及び出力ばらつき

Type	Ave.Field strength	Strength variation	Magnet leng. dev.	Gap/Bore dev.
BH	1.23 T (-2.4%/+2.5%)	0.15%	<100um 0.004%	0.018um 0.6%
QA	64.08 T/m (-6.9%/-6.9%)	0.21%	0.006um 0.003%	0.036um 0.12%
QB	51.43T/m (-5.3%/+2.3%)	0.12%	0.007um 0.004%	0.017um 0.06%
QC	14.90 T/m (+1%/+10.4%)	0.13%	0.008um 0.004%	0.019um 0.07%

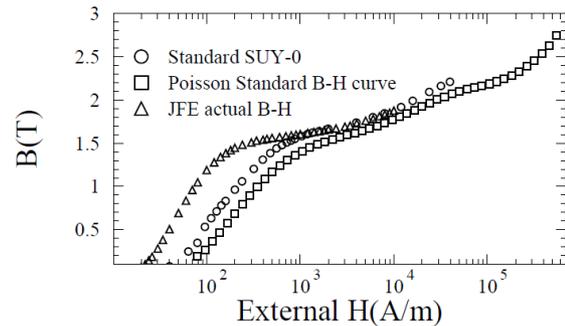


図 5: B-H カーブの比較

計算時に使用した B-H カーブを○、実際の電磁軟鉄の B-H カーブを△で示した。低磁場領域での磁場伸びが顕著であるが高磁場領域にて、特性が急激に悪化するため計算通りの出力が得られておらず、実際に実測 B-H カーブを用いた計算では同程度の悪化が示された。B 電磁石では要求値に対して +2.5%、BL 積では +4.1%となっており、QA においては GL 積を実測値と比較すると要求値を +0.1%で実現出来ており、全種の電磁石を通じて運転に支障のない出力強度、精度が得ることが出来た。

4.2 偏向電磁石磁場測定

偏向電磁石の磁場特性のバラつきは 1 台電源での複数台励磁を考えれば、エミッタンスの劣化などにつながるために特に注意を払い均一性を追求せねばならない。しかしながら、今回製作された偏向電磁石は圧延ロール加工されたリターンヨークを組み上げた際に曲げ加工精度が出ずに合わせ面がずれる問題が起きた。更にこの問題に対してメーカー側が面を外観上合うようにするため削り落してしまう問題が生じた。図 6 にその様子を示す。このリターンヨークの製作上の問題は BL に大きく影響することになるため改めて切削のばらつきが大きい水平 B 電

磁石 9 台につき磁場特性の精密測定を SPring-8 にて行った。今回製作の偏向電磁石は H 型であり、gap 間距離が狭いためプローブを 1.3m までしか前面開口部から挿入できない。挿入するプローブ支持治具



図 6: リターンヨーク合わせ面不一致及び切削問題最大で 3mm のずれと、-0.6%のヨーク切削

のたわみ及び熱による伸長を極力軽減するためアルミパイプ 1.2m の先端に 3 軸ホール素子プローブを取り付け測定を行った。Gap 間距離が狭いため水平方向のみの 1mm ステップのメッシュサーベを磁石長半分+100mm まで 10mm ステップにて測定を行い、さらに磁石を反転させ残りの磁石長のメッシュサーベを行った。セクター型のため積分磁場はこのメッシュ点からビーム軌道点を抽出し、その点に対して一つの水平面のデータから各断面でのフラットネスの評価を行った。この際に磁石正転・反転時のアライメントの再現性の確保が重要である。アライメントは N3、セオドライト、タリベルにより行った。また、正転・反転時の+100mm のオーバーラップする領域は、その再現性で確保されなかった微小なずれを補正するために本来あってはならないずれ量を補正值として使用している。これによる補正量は 6×10^{-5} である。H 型電磁石は励磁熱が磁石内にこもるため磁石内に磁石開口部から 10°C の温度勾配があるため、ホール素子の温度係数としてこの温度勾配を補正する必要がある。前もって温度分布をプローブ先端に熱電対をとりつけメッシュサーベ点において測定し、補正している。測定の再現性の確保のため、ヨーク・コイル・冷却水温度及び室温はモニターされ、電流値に対しては HITEC DCCT により 1ppm の精度で測定を行った。これによりヨーク温度は $\pm 0.25^\circ\text{C}$ 以内で、電流値は 3.5×10^{-5} の安定度で測定を行えていることを確認した。十分な初期化と、ヨーク熱膨張時の磁場のドリフトを防ぐために電磁石の warming up を 8h 以上行った。まず、電流値に対する励磁特性曲線を求め、磁石中心において 1.2T の出力が得られる電流値 275A にて BL 積の測定を行った。結果について図 7 に示す。図中には測定の再現性を考慮した誤差を付けてある。(1),(3) 図内の色違いの点は 2 カ月後に最測定をした結果であり、両測定は誤差の範囲にて一致している。図中直線は平均値を示している。高次成分の含有率は切削表面積に対して増加傾向があるが割合としては無視できる 10^{-6} のオーダーである。逆に、切削表面積

の違いにより BL 積は有意に異なり最大で 3×10^{-3} の差異が生じた。ヨーク内の各水平面での $\pm 10\text{mm}$ のフラットネスの結果についても電磁石全長に渡り

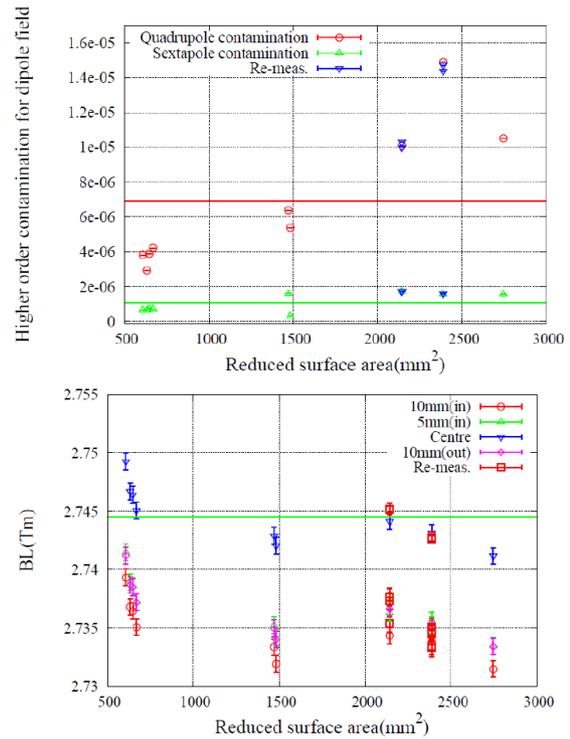


図 7: 上: 切削表面積に対する各ビーム軌道ごとの BL 積の違い 下: ダイポール成分に対する 4 極、6 極成分の含有率 (電磁石全長に渡る平均値)

平均値 2.8×10^{-4} と十分仕様値を満たすものであったが切削表面積とともに悪化する傾向が見られた。これらの結果から BL 積における誤差磁場が生じていることが判明したが、電源に対する特性をそるえることで回避している。また、薄肉で細長い長尺な形状となった偏向電磁石であるため、当初長手方向の「ねじれ」について心配がされたがアライメント時に観測された上流-下流間の最大 0.5mrad の S 軸ローテーションの影響は磁場測定結果から $B_x L / BL = 4 \times 10^{-4}$ となっており、問題ないレベルである。

4.3 まとめ

全電磁石の磁場特性は要求値を満たすものであることが確認され、XSBT ライン上への据え付け・アライメントが完了している。

参考文献

- [1] T. Watanabe, et al., "CSR EFFECT AT XFEL-TO-STORAGE RING BEAM TRANSPORT LINE, Spring-8", Proceedings of the 6th Particle Accelerator of Japan Meeting in Japan, Tokai, Aug. 5-7, 2009
- [2] K. Fukami, et al., "Spring-8 における XFEL-Linac から蓄積リングへのビーム輸送", Proceedings of the 7th Particle Accelerator Society of Japan Meeting in Japan, Himeji, Aug. 4-6, 2010
- [3] M. Masaki, et al., "mm-wave iFEL を用いた SPring-8 蓄積リングでの短パンチ生成の検討", In these proceedings