

KEK 電子陽電子線形加速器 24 度ビーム合流ラインのパルス偏向電磁石の設計

DESIGN OF THE PULSED DIPOLE MAGNET FOR KEK ELECTRON/POSITRON INJECTOR LINAC 24-DEGREE BEAM MERGER LINE

紙谷 琢哉*, 飯田 直子, 恵郷 博文, 榎本 嘉範, 柿原 和久, 佐藤 政則, 諏訪田 剛, 清宮 裕史,
田中 窓香, 峠 暢一, 夏井 拓也, 肥後 壽泰, 古川 和朗, 三浦 孝子, 横山 和枝, 吉田 光宏
Takuya Kamitani*, Hiroyasu Ego, Yoshinori Enomoto, Kazuro Furukawa, Toshiyasu Higo, Naoko Iida,
Kazuhiisa Kakiara, Takako Miura, Takuya Natsui, Masanori Satoh, Yuji Seimiya, Tsuyoshi Suwada,
Madoka Tanaka, Nobukazu Toge, Kazue Yokoyama, Mitsuhiro Yoshida,
High Energy Accelerator Research Organization(KEK)

Abstract

This paper reports on the design study of the pulsed bending magnets for the 24-degree beam merger line of the two pre-injectors in the KEK electron/positron injector linac. These pulsed bending magnets are indispensable for pulse-by-pulse switching of the beams from the pre-injectors. The existing pulsed bending magnets are operated less than or equal to 25 Hz to mitigate excessive heating in the coils. It is lower than the maximum beam repetition 50 Hz and restricts flexible beam switching. We are designing new pulsed bending magnets operable at 50 Hz pulse repetition. Details of the design study are described.

1. はじめに

KEK 電子陽電子入射 Linac は 2 階建構造になった 2 つの前段入射部を持っている。1 階部は低エミッタンス電子ビームを生成する光カソード RF 電子銃を用いたものであり、2 階部は陽電子生成用の大電流 1 次電子ビームや PF 及び AR に入射する低電流電子ビームを生成するために熱電子銃と RF bunching セクションを用いたものである。2 階部からのビームは約 58MeV のエネルギーで Fig. 1 に示す 24 度ビーム合流ラインを通過して 1 階部の Linac メインビームラインに合流する。この 24 度合流ラインは 2 台の 24 度偏向電磁石と 3 台の四極電磁石で構成され、achromatic かつ isochronous な系となっている。KEKB から SuperKEKB へのアップグレードにおいてこのような 2 階建構造に改造した直後には、これらの偏向電磁石としては他の部分に用いられていた既存の DC 偏向電磁石の磁極、ヨークを流用改造したものを取り付けてビームコミッションを開始した。その後、4 つの蓄積リングへのビーム入射をパルス毎に切り替える運転を実現するためにこれらの DC 偏向電磁石をパルス電磁石に置き換えることになった。その設置に先立って、製作したパルス偏向電磁石をテストスタンドにおいてステンレス製の真空チャンバーを組み込んでパルス電源からの通電試験を行ないチャンバー及びコイルでの発熱特性を調べた結果、25Hz 以下のパルス繰返しでの運転には問題無いが、Linac ビームの最大繰返しである 50Hz ではコイルの温度上昇が大きすぎることが判明した [1]。しかし 25Hz 以下の制限付きであってもパルス毎切り替えを実現することは SuperKEKB の運転には急務であったので、2018 年夏の運転停止期間にこのパルス偏向電磁石を 24 度合流ラインに設置してそれ以降の運転で使用している。しかし非常に高いリミノシティを目指す今後の SuperKEKB 運転では最大 50Hz での自由なビーム切り替えは必須であるので、これに耐えられ

る改良型パルス偏向電磁石の設計検討を行った。本論文ではこの設計検討の詳細について述べる。



Figure 1: 24-degree beam merger line.

2. パルス偏向電磁石のパラメータ最適化

2.1 基本的仕様パラメータと制約条件

まずこの 24 度偏向電磁石に必要な積分磁場強度を評価する。そのために DC 偏向電磁石での運転パラメータを用いる。その理由はこの DC 電磁石は想定ビーム軌道上での磁場測定値があり磁場有効長の精度良い推定値が得られるためである。運転電流値 77.6 A での中心磁場値は 0.465 T であり、磁場有効長は 171.7 mm なので、長さ方向磁場積分値 $B_0 L_{eff}$ は 79.8 T·mm となる。これはビームの運動量としては 57.6 MeV/c に相当する。実際の電磁石の磁場では積層鋼板の stacking factor などの影響で実際に得られる磁場強度としては 0.95 程度のファクターでの減少を見込む必要があるため、設計目標値としては 84 T·mm 以上を確保することとする。

次にこの 24 度ラインを通るビームの中で最もビームサイズとエネルギー拡がり大きい陽電子生成用一次電子ビームについて、ビームスタディ及びビームオプティクスシミュレーションによりビームの大きさを推定し、

* takuya.kamitani@kek.jp

この偏向電磁石に磁場一様領域の大きさと真空チェンバー内径がどれだけ必要になるかを検討した。偏向電磁石の形状は *rectangular* とするが、今後の説明を明確にするために座標軸を以下のように定義する。電磁石の中心軸方向（長さ方向）を z 軸、ビームの偏向方向（磁極の幅の方向）を y 軸、磁極間距離方向を x 軸とする。gaussian 分布を仮定したビームの 3-sigma 拡がり大きさの推定値より、 x 方向には ± 6 mm 以内、 y 方向には ± 10 mm 以内をビームアパーチャーとし、この範囲内では磁場一様性が $\pm 0.1\%$ 以下であることを目標とする。また 24 度ラインでのエネルギー拡がりは $\sigma_p/p=1.5\%$ と推定されているが、これによるビームサイズへの影響も考慮している。既存の真空チェンバーの内径は $-7.25 \text{ mm} < x < 7.25 \text{ mm}$ 、 $-17.0 \text{ mm} < y < 17.0 \text{ mm}$ であり、今回はこれを $-y$ 方向には 5 mm 短くして $y_{\min} = -12.0 \text{ mm}$ 、 $y_{\max} = 17.0 \text{ mm}$ と変更するがそれでも上記のアパーチャーを十分に内包している。

次に既存のパルス偏向電磁石の仕様パラメータを Tab.1 に列記する。改良型の設計においてもこれらのパラメータを土台として検討を行った。

Table 1: Parameters of existing bending magnet

Pole gap	20 mm
Pole length	155 mm
Coil wire dimension	2 mm \times 6 mm \times 2-parallel
No. of wire turns (total)	36
Pole width	40 mm
Inductance	1.0 mH

パルス電源としては KEK 電子陽電子 Linac においてパルス四極電磁石のために開発されたシステム [2] があり、これが既に運転に安定して使用されているので、これと同じ仕様のもを用いることを前提として、最大電流値 300 A、負荷インダクタンス 1.0 mH を想定して電磁石の設計を行った。

また 24 度合流ビームラインの配置上、偏向電磁石を設置するスペースには制約があり、既存の電磁石をそれほど逸脱しない磁極長にしておくことが電磁石置き換え作業の容易さの観点から望ましい。そこで磁極長としては 165 mm 以下程度にすることを目指した。

2.2 積分磁場値とインダクタンス値の解析的な評価式

双極電磁石で得られる磁場強度としては、磁極での磁場の飽和の影響を無視すれば以下のような式で評価することができる。

$$B = \mu_0 \frac{nI}{g} \quad (1)$$

ここで μ_0 は真空の透磁率、 n はコイルの総ターン数、 I は電流値、 g は磁極間距離である。これを用いると長さ方向の積分磁場値は次の式で近似的に表すことができる。

$$\int B dz = \mu_0 \frac{nI}{g} l_{\text{eff}} \sim \mu_0 n I \frac{l+g}{g} \quad (2)$$

ここで l_{eff} は磁場有効長である。また H 型双極電磁石のインダクタンスは次のような式で推定することができ

る。[3]。

$$L \sim \mu_0 n^2 (w + 1.2g) \frac{l+g}{g} \quad (3)$$

2.3 寸法の最適化

既存のパルス偏向電磁石の設計値を出発点として、改良型電磁石の最終形状に至るまでに検討した途中段階での各モデルの寸法値（磁極幅 w 、磁極間距離 g 、磁極長 l ）、電流値 I 、ターン数 n 、中心磁場値 B_0 、有効長 l_{eff} 、磁場積分値 Bl_{eff} 、インダクタンス値 L の変遷を Table2 に示し、以下にどのような検討を行ったかについて述べていく。なお、寸法値を変えた際の磁場積分値、インダクタンス値については上記の式 2, 3 を用いて変化の傾向を推定し、CST Studio [4] を用いてシミュレーション計算を行って数値を求めた。

Table 2: Design cases of the magnet dimension

#	w	g	I	n	B_0	l	l_{eff}	$B_0 l_{\text{eff}}$	L
A	40	20	216	36	0.47	150	179	84.1	1.05
B	55	20	216	36	0.47	150	182	85.4	1.27
C	55	20	240	32	0.46	150	182	84.3	1.01
D	55	20	270	28	0.46	150	182	83.0	0.77
E	55	20	270	34	0.56	120	152	84.2	0.95
F	55	25	270	34	0.45	152	188	84.0	0.99
G	65	25	270	34	0.45	152	188	84.4	1.10
H	65	25	270	32	0.42	162	199	83.6	1.02

- Case-A は既存のパルス偏向電磁石 (sector 型) の断面形状、磁極長さ、コイルターン数、電流値などを反映させて *rectangular* 型にモデル化したものである。なお sector 型での磁極長は 155 mm であるが、実際の軌道としては磁極長が少し短いことに相当する位置を通っているため *rectangular* 型では 150 mm と想定した。
- Case-B では既存型では磁極幅が 40 mm であるが *rectangular* 型では軌道のサジッタ約 10 mm 分は磁極幅に余裕を持たせる必要があることから磁極幅を 55 mm とした。それ以外のパラメータは Case-A と共通にしている。このように磁極幅 w を増やすと式 3 から推測されるようにインダクタンスが 1.27 mH と大きくなり、パルス電源が想定している仕様値を大きく上回ってしまう。
- Case-C ではインダクタンスを減らすためにコイルのターン数を 36 から 32 に減らす一方で、磁場値はほぼ同じになるように電流値を 216 A から 240 A まで増やした。こうすると磁場積分値はほとんど変わらないがインダクタンスが 1.01 mH とほぼ仕様値となった。
- Case-D ではさらにコイルのターン数を 32 から 28 に減らす一方で、電流値を 240 A から 270 A まで増やしてみた。これは電源電流値の最大値は 300 A でありまだマージンの余裕があるためである。こうするとインダクタンスが 0.77 mH まで下がる。し

しかしパルス電源の特性上、インダクタンスに反比例して電流の時間変化率 $\frac{dI}{dt}$ は大きくなり、真空チャンバー上での磁場の時間変化率も大きくなるために渦電流による発熱が大きくなってしまいますので不都合である。

- Case-E では電流値は 270 A のままにして、コイルのターン数を 28 から 34 に増やす一方で、磁極長を 150 mm から 120 mm に減らした。こうすると磁場積分値はほとんど変わらないがインダクタンスが 0.95 mH とほぼ仕様値に近い値となった。しかし磁極長が短くなり中心磁場値が 0.56 T と高くなりなおかつ渦電流による発熱が短い領域に集中してしまうため、チャンバーの温度が高くなりすぎて不都合である。
- Case-F ではコイルのターン数は 34 のままにして、磁極間距離を 20 mm から 25 mm に増やし、磁極長を 120 mm から 152 mm に増やした。こうすると磁場積分値もインダクタンスはほとんど変わらないが発熱密度を下げるができる。しかし磁極間距離を長くするが磁極幅が同じままだと磁場の一樣領域幅は狭くなってしまふ。
- Case-G では磁極幅を 55 mm から 65 mm に増やした。こうするとインダクタンスが 1.10 mH と大きくなってしまふ。
- Case-H ではコイルのターン数を 34 から 32 に減らす一方で、磁極長を 152 mm から 162 mm に増やした。こうするとインダクタンスが 1.02 mH とほぼ仕様値となった。また磁極長が長くなったので発熱密度に関してもあり利となった。このパラメータを最終設計値とした。

電磁石及び真空チャンバーの設計形状 3D モデルの図を Fig.2 に示す。なおここでは電磁石の手前半分は半透明として図示している。

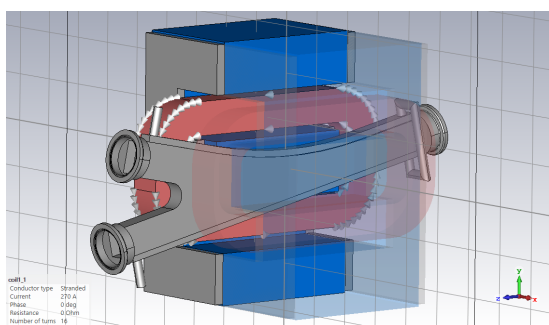


Figure 2: Magnet and Vacuum-Chamber Shape.

2.4 コイルの設計

コイルの冷却については当初は空冷、水冷の両方の可能性を考えた。空冷の場合にはコイル断面積は大きくなりマグネット外径サイズも大きくなるが、インダクタンス的にまたコイル自体の発熱に関する冷却について問題が無いことは確認した。しかしコイル以外にも真空チャンバーでの渦電流による発熱や磁極とヨーク部での鉄損による発熱もあるため、マグネット全体での冷却を考えてホローコンダクタによる直接水冷のコイルにするこ

とにした。以下は水冷のコイルに関する検討のみ記述する。通常運転電流値は 270 A であるが、コイルの冷却設計に関しては最大電流値 300 A を想定して計算している。ホローコンダクタ線としては外径 6 mm×6 mm、水路直径 ϕ 4 mm、断面積 22.6 mm² のものを想定した。コイル 1 ターン分の長さは近似的に磁極長の 3 倍として 0.486 m とするとターン数 32 でコイルの総抵抗値は 0.0139 Ω となる。実際のパルス電源からの電流波形を想定すると 50 Hz 繰り返して平均電流値としては 86.9 A となりコイルでの発熱量は 105 W となる。また導線内の平均電流密度は 3.9 A/mm² となる。冷却水の系統を 1 系統として流速は 1.20 m/s とすると、コイルでの圧損は 0.1 MPa、レイノルズ数は 5911、流量は 0.90 l/min、水の温度上昇は 1.7 $^{\circ}$ C となり問題ないパラメータとなる。こうしてコイルを水冷にして適切なホローコンダクタを用いることでコイルの過剰な温度上昇の問題は解決すると考えられる。

2.5 磁場の一樣性

第 2.1 節に述べたように、x 方向には \pm 6 mm 以内、y 方向には \pm 10 mm 以内をビームアパーチャーとし、この範囲内では磁場一樣性が \pm 0.1% 以下であるように設計を行う。このために CST Studio [4] を用いて電磁場シミュレーションを行い、得られた磁場分布を 1 mm 間隔の三次元格子点上の値のリストとして取り出す。まず磁極間中心を通る z 軸方向の直線上において磁場値の積分を行い z 軸方向磁場有効長を求める。Figure 3 に示すように、ビーム設計軌道としてはこの有効長領域に一樣な磁場があると仮定し丁度 24 度曲がるような円弧軌道を考え、その前後は直線軌道であると仮定する。またサジッタについてはその真ん中が磁極幅の中央を通るように、軌道の位置を決める。次にこの設計軌道に沿って約 1 mm 間隔の代表点を決め、その点での磁場の値を上記の格子点上の値からトライリニア補間法（3 変数 x,y,z での線形補間）により求めて、これを積分することにより軌道上積分磁場を求めた。同様にこの設計軌道を x 或いは y 方向に平行移動させて軌道上積分磁場を求めることによりその位置依存性を調べた。

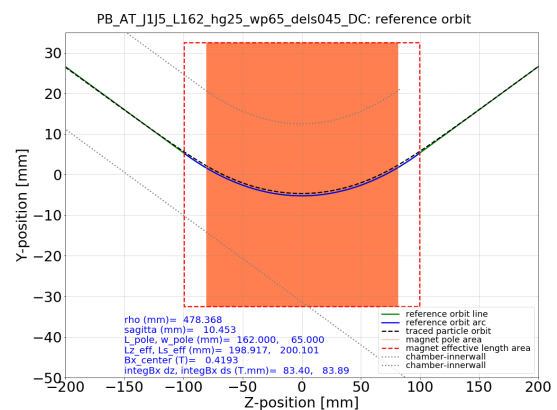


Figure 3: Reference Orbit Path.

Figure 4 にこのデータを示すが、まず全体的に直線的な y 方向位置依存の傾きを持っていることがわかる。これは磁極面内の領域では磁場は y 方向にほぼ一樣な形

であるのに対して、磁極端より外側の磁場分布の裾野では y 方向については中心から外れるほど下がるような形を持っているために起きる。つまりサジッタにより中心軌道でさえ裾野では y のプラス方向にずれているため、Fig.4 のマイナス方向にある場合の軌道になるほど裾野では $y=0$ 付近を通り、より大きな積分磁場値を与えるのである。この直線的な y 方向位置依存性は四極成分と同じ働きをするが、この寄与については 24 度ラインにある四極電磁石の強さの調整によりオプティクス的には補正できるし、エミッタンス増大のような問題を起こすことはないので、以下の磁場一様性の議論においてはこの直線的傾きの分を差し引いた量で考えていくことにする。

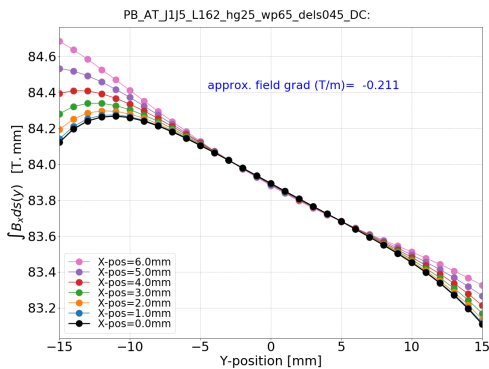


Figure 4: Position dependence of integrated field BL.

Figure 5 に磁極間距離 25 mm の場合の、磁極幅 55 mm、65 mm についての磁場一様性を示す。縦軸は積分磁場値を中心での値で規格化して 1 を引いたものである。横軸は y 方向の位置であり、色の異なる線はそれぞれ異なる x 位置についてのプロットである。黒線は磁極間中央面 ($x=0$) 内での y 位置依存性を表している。四角い点線の枠は磁場一様性が $\pm 0.1\%$ 以下、 $-9 \text{ mm} < y < 11 \text{ mm}$ の範囲を表している。 y 方向アパーチャーは $\pm 10 \text{ mm}$ 以内としているが磁場分布の裾野広がり方が $y=0$ に対して非対称なのでアパーチャー枠も $+1 \text{ mm}$ オフセットしている。この 2 つのプロットの比較から分かるように磁極幅 55 mm では磁場の一様性が十分ではなかったので 65 mm とすることにした。またこれに合わせて、第 2.3 節で議論したようにそれ以外のパラメータも最適化した。なお磁場の一様性を改善するために、磁極間距離を y の位置によって変化させるシム形状としてコサイン関数的に中心部でもっとも高くなるような形を採用しており、磁極幅 65 mm の場合にこのシム高さは 0.45 mm が最適値である。

なお、この節までの電磁石形状の最適化においては時間の節約のために CST Studio でのシミュレーションでは静的な磁場として計算しているが、次の節で詳しく述べるように時間的に変化する電流と磁場を取り扱う計算をすると、真空チェンバー上に渦電流が流れるために磁場分布も影響を受けるが磁場一様性の悪化は問題のない量であることは確認している。

2.6 渦電流の影響

このパルス電磁石にはパルス電源 [2] からほぼ台形に近い形状のパルス電流を流し、Fig.6 のような時間的に変

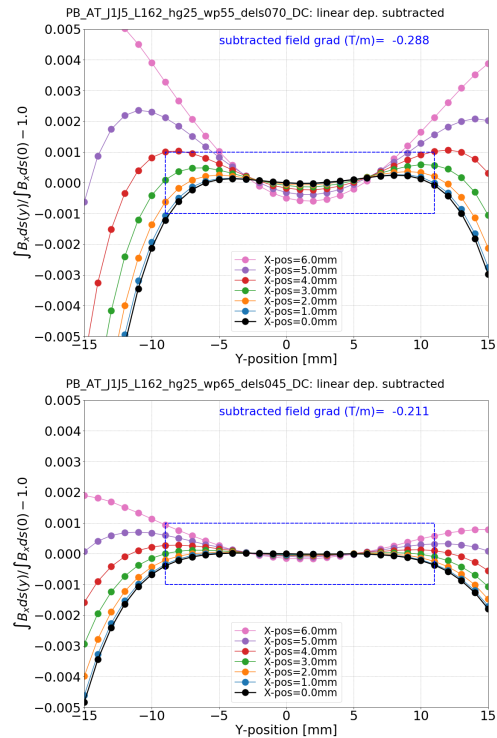


Figure 5: BL vs Position after linear-term subtraction.

化する磁場が得られる。なお真空チェンバーは必要なアパーチャー内径の確保及び納期と費用の観点からステンレス製とする方針としている。このためチェンバー上に渦電流が流れる。第 2.5 節で述べたようにこれによる磁場への影響は小さいが、チェンバーの発熱は問題になる。

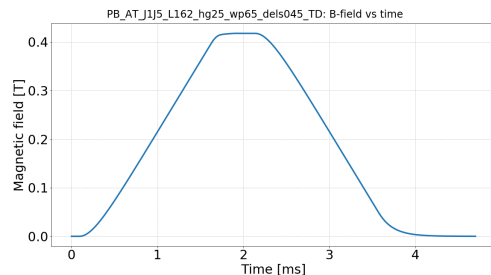


Figure 6: Pulse Field Shape.

チェンバーでの発熱量の時間変化を Fig.7 に示すが、磁場変化の上り坂、下り坂の時間帯に発熱することが分かる。50 Hz パルス繰り返しの場合の時間平均発熱量は 317 W となる。

チェンバーでの発熱量の分布を Fig.8 に示すが、チェンバーの外側の部分での発熱が最も大きいことがわかる。なおこの発熱量を低減させるためチェンバーの $-y$ 方向の直線部分の幅を既存品の設計寸法より 5 mm 短くしている。これはビームに必要とされるアパーチャーの外側なのでビームへの影響は無いと考えている。

このチェンバーの両脇の部分には冷却水配管（内側断面径：10 mm×5 mm）を取り付け、冷却水を流して冷却する。冷却水路内壁での熱伝達係数を $2700 \text{ W/m}^2/\text{K}$

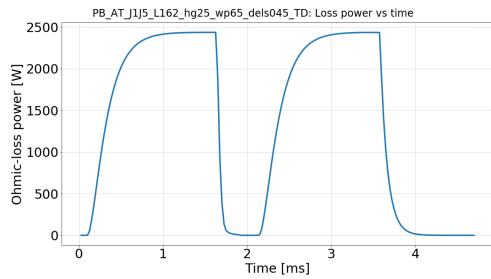


Figure 7: Pulse Field Shape.

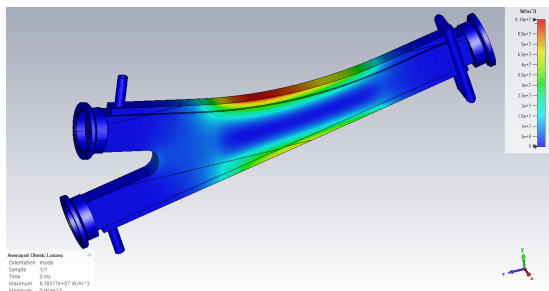


Figure 8: Eddy Current PowerLoss Distribution.

と仮定した場合の温度分布のシミュレーション結果を Fig.9 に示す。なおこれは発熱と冷却が釣り合った定常状態になっていることを仮定している。最高温度点では 95℃になっている。

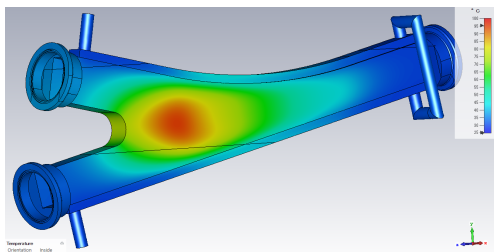


Figure 9: Temperature Distribution.

このような温度分布になった際にチェンバー上に発生する応力分布のシミュレーション結果を Fig.10 に示す。チェンバーの枝分かれした股の部分で最大応力 157 MPa になるが、これはステンレス SUS316L 材の耐力 175 MPa より低いもののほとんど余裕が無い。

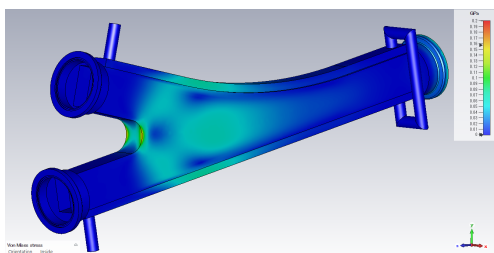


Figure 10: Stress Distribution.

そこで状況を改善するために、チェンバー上下の最高

温度点に近い部分に横方向に冷却水路を追加して最高温度と最大応力を下げるための検討を行った。

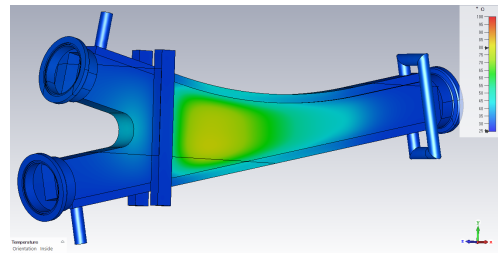


Figure 11: reduced highest Temperature.

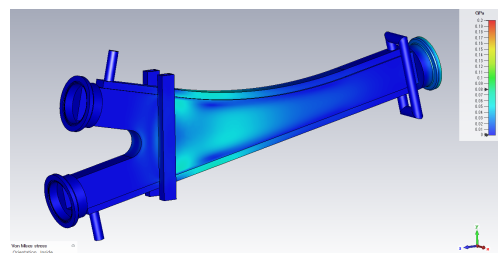


Figure 12: reduced highest Stress.

Figure 11, 12 に示すように横方向水路があると最高温度は 80℃に、最大応力も 80 MPa に下がる。特に股の部分は応力が非常に下がっている。なお、より耐力の高いステンレス材を使うことや熱伝導度の高い絶縁体の薄板をチェンバー上下に付けることについても検討を行う予定である。

3. まとめ

KEK 電子陽電子 Linac の 24 度合流ラインのパルス偏向電磁石に関して、マグネットの寸法（磁極長、磁極間距離、磁極幅）、電流値、コイルターン数の最適化設計、コイルの水冷却設計を行った。またステンレス製真空チェンバーでの渦電流の影響評価を行い最高温度、最大応力が問題無い範囲に収まることを確認した。こうしてパルス繰り返し最大 50 Hz の運転に耐えられる改良型電磁石の設計パラメータを決めることができた。

参考文献

- [1] K. Kakihara *et al.*, “KEK 電子陽電子入射器パルス偏向電磁石用ステンレスチェンバーの検討”, Proceedings of the 15th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan, August 7-10, 2018, Nagaoka, Japan, THP118
- [2] Y. Enomoto *et al.*, “ Pulse-to-pulse beam modulation for 4 storage rings with 64 pulsed magnets”, 29th Linear Accelerator Conf., Beijing, China, September 2018, WE1A06
- [3] D. Tommasini, “Practical Definitions and Formulae for Normal Conducting Magnets”, CERN Internal Note 2011-18.
- [4] https://www.aetjapan.com/software/CST_Overview.php