



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

FRPH034

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

(ABSTRACT)

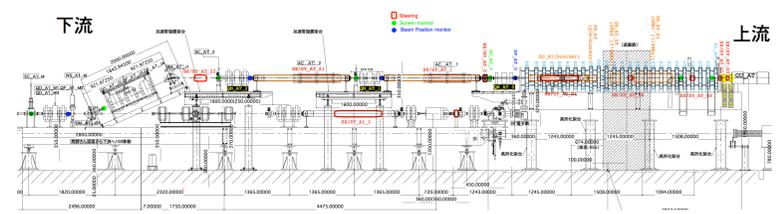
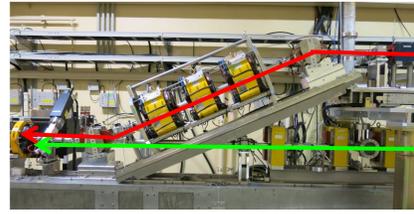
KEK電子陽電子Linacの入射部24度合流ラインに用いるパルス偏向電磁石（改良型）の設計検討を行った。

[1] 磁極の寸法値やコイルのパラメータの最適化の手法、[2] コイルの水冷却設計検討、[3] 磁場一様性の検討、[4] 渦電流による真空チャンバーの発熱の評価に基づく冷却構造の改良検討について解説する。

[1] Introduction

- SuperKEKB(HER, LER), PF, AR の4つの蓄積リングへの入射ビームを最大50 Hzのパルス毎に切り替えるためには24度合流ラインの偏向電磁石のパルス化は必須である。
- しかし現在使用されているパルス電磁石は25 Hz以下のパルス繰り返しでの運転には問題無いが、50 Hzではコイルの温度が高くなりすぎる問題があり、また真空チャンバーでの渦電流による発熱に対して不安がある。
- そこで改良型パルス電磁石について、
 - ◆ コイルの発熱問題の改善
 - ◆ チェンバーの冷却構造の改良
 - ◆ 磁場一様性の改善
 のための設計検討を行った。

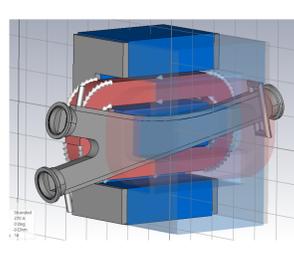
24度ビーム合流部



既存型パルス電磁石



改良型パルス電磁石



#	既存型	改良型
磁極幅 w [mm]	40	65
磁極間距離 g [mm]	20	25
電流値 [A]	216	270
コイル総ターン数	36	32
中心磁場値 [T]	0.47	0.42
磁極長 [mm]	150	162
コイル断面積 [mm ²]	24	22.6
電流密度 [A/mm ²]	2.6 空冷	3.9 水冷

[2] 電磁石のパラメータ最適化

- この電磁石を設計するに当たっては以下のような前提条件がある。
 - ◆ パルス電源としては既存のパルス四極用と同じ仕様とする。最大 300 A、想定負荷インダクタンス 1.0 mH
 - ◆ インダクタンスがこれより低すぎると、電流値の時間勾配が大きくなりチェンバーでの発熱量が高くなるので望ましく無い。
 - ◆ 設置場所の24度ラインのスペースの制約から、磁極長は既存のものよりそれほど大きくできないので 165 mm 以下とする。
 - ◆ 磁極長が短すぎるとチェンバーでの発熱密度が上がり、最高温度が高くなるので望ましく無い。
- 以下の式を用いて、積分磁場値とインダクタンスが電磁石のパラメータの変更に対してどのように変化するかを考察した。また、その結果については CST Studio Magneto-static Solver を用いて評価した。
- 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。ここで μ_0 は真空の透磁率、n はコイルの総ターン数、l は電流値、g は磁極間距離である。

$$B = \mu_0 \frac{nI}{g}$$

- 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。ここで l は磁極長、 l_{eff} は磁場有効長である。

$$\int B dz = \mu_0 \frac{nI}{g} l_{eff} \sim \mu_0 nI \frac{l+g}{g}$$

- 次に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。

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

変遷	w 磁極幅	g 磁極間	l 電流値	n ターン数	B ₀ 磁場値	ℓ 磁極長	ℓ _{eff} 有効長	B ℓ _{eff} 磁場積分	L インダクタンス
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

- 単純に磁極幅を広げるとインダクタンスLが増大する。
A->B, F->G
- 磁場積分値を保ったままインダクタンスを下げる手法 (1)
ターン数nを減らして、電流値lを増やす。
B->C, C->D
- 磁場積分値を保ったままインダクタンスを下げる手法 (2)
ターン数nを減らして、磁極長ℓを増やす。
G->H
- 磁場積分値を保ったままインダクタンスを上げる手法 (3)、(2)の逆
ターン数nを増やして、磁極長ℓを減らす。
D->E
- 磁場積分値もインダクタンスも保ったまま、磁極長を増やす手法 (4)
磁極間距離gを増やして、磁極長も増やす。
E->F
- これらの手法を積み重ねた結果、
磁場積分値もインダクタンスもほぼ同じのまま
磁極幅を1.63倍、磁極間距離を1.25倍、磁極長を1.08倍大きく
することができた。(電流値は1.25倍、ターン数は0.89倍)

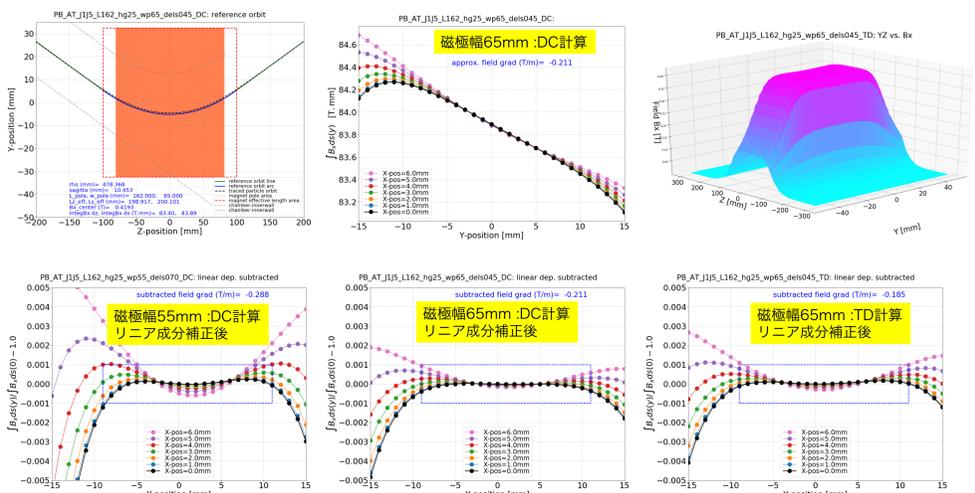
[3] コイル冷却の検討

- コイルの冷却についてはコイル自体の発熱以外にチェンバーの渦電流による発熱、磁極+ヨーク部での鉄損による発熱などもあるので、マグネット全体の冷却も考慮して水冷を選択した。
- 下記にコイルの水冷に関して計算したパラメータを示すが、問題無い値であることが分かる。

	改良型
冷却方式	直接水冷
ホロコン線	6mm角 φ4mm水路
導線断面積	22.6 mm ²
想定ピーク電流値	300 A
平均電流値	86.9 A
平均電流密度	3.9 A/mm ²
1ターン長	0.486 m
ターン数	32
抵抗値	0.0139 ohm
コイル平均発熱量	105 W
水路全長	15.6 m
設定流速	1.2 m/s
コイルでの圧力損失	0.1 MPa
レイノルズ数	5911
流量	0.90 l/min
水の温度上昇	1.7 °C

[4] 磁場一様性の検討

- 想定軌道上での磁場積分値を求め入射位置依存性をプロットして磁場の様性を評価した。
- 生の磁場積分値は下のように磁極幅方向の位置依存性を持つがこのリニアな成分はエミッタンス悪化には寄与しないので以下でこれを差し引いたプロットで評価する。
- x方向に +/-6 mm, y方向に +/-10 mm のアパーチャーを考えると、磁極間距離 25 mm の場合、磁極幅 55 mm では磁場の様性が悪いが、磁極幅 65 mm では +/-0.1% 以内に収まる。
- 真空チャンバー上での渦電流による磁場への影響を評価するために、time domain での計算も行った。磁場の分布としては局所的に歪むものの積分磁場の様性には大きくは影響しないことが分かる。
- なおこれらは CST Studio Magneto-static/Low frequency Solver を用いて評価した。



[5] 真空チャンバーの冷却構造の改良

- パルス電流(270 A)を通電すると、ピーク値0.42 Tのパルス磁場が発生し、SUS316L製のチェンバーに渦電流により50 Hz 繰り返しで 316 W の熱が発生する。
- 両サイドに冷却水路のある既存型チェンバーでは最高温度点で 95°C に達し、最大応力は157 MPa となる。これはSUS316Lの耐力 175 MPa より低いが余裕はあまり無い。
- 一方、横方向水路を追加した改良型チェンバーでは最高温度点でも 80°C、最大応力も 80 MPa となり、かなり緩和されることが分かる。
- なおこれらは CST Studio の Thermal/Mechanical Solver を用いて評価した

