

KEK電子陽電子入射器パルス偏向電磁石用ステンレスチャンバーの検討

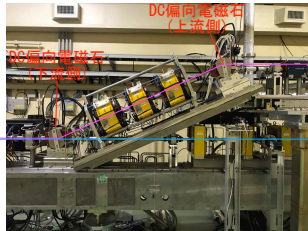
柿原和久*、紙谷琢哉、恵郷博文、横山和枝、田中窓香、夏井拓也、榎本嘉範、清宮裕史
 佐藤政則、飯田直子、吉田光宏、肥後寿康、峠暢一、古川和朗 (KEK)
 鈴木和彦、木村康一 (三菱電機システムサービス (株))

1. 概要

KEK電子陽電子入射器 (LINAC) ではSuperKEKBのPhase-III運転に向けて、4つの蓄積リング (HER, LER, PF, PF-AR) へパルス毎にビーム入射を切り替えることを実現するために改造を行っている。LINACでは熱電子銃とRF電子銃を2階建てで併用しており、2階部からのビームは24°斜めラインを通して1階部に合流する。ここに用いられている24°偏向電磁石及びその電源は現在はDC運転用のものでありゆくりした切り替えしかできないので、パルス切り替えを実現するために電磁石と電源をパルス化することを進めている。その際にステンレスチャンバーでの発熱が問題となり、電磁場発生、発熱、冷却のシミュレーションによる検討、及びテストスタンドでのパルス偏向電磁石とチャンバーの通電試験による発熱測定、ガス放出測定を行い、使用可能な条件の評価を行ったので報告する。

2. 24° 斜め合流ライン

2台の24°垂直偏向電磁石と3台の四極電磁石で構成されている偏向電磁石は他のビームラインで使用されていた30°セクター型DC電磁石を転用 (コイルのみ新作)
 DC偏向電磁石のため熱電子銃からのビームとRF電子銃からのビームは最速でも数秒かけて切り替えている

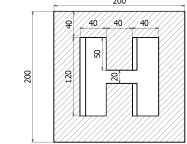


熱電子銃

RF電子銃

3. 偏向電磁石とチャンバー

<パルス偏向電磁石>



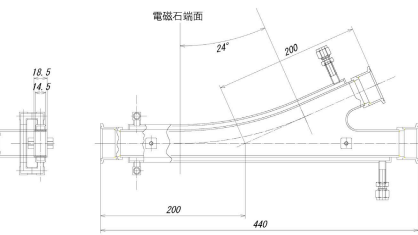
現在使用しているDC電磁石と同様の形状を持つ積層鋼板の打ち抜き型を転用して製作した24°セクター型偏向電磁石 (50Hzパルス繰り返しを想定していない設計)

2018年10月からこのパルス電磁石を運転に使用する

表1 偏向電磁石の仕様

電磁石タイプ	DC/空冷	パルス/空冷
運転電流値 [A]	77.6	218
運転磁場 [T]	0.469	0.463
磁極間距離 [mm]	20	20
磁極幅 [mm]	40	40
磁極有効長 [mm]	173.16	175.28
コイル導線巻き数	DC 489- $\pi/34$	$\pi/34$ 189- $\pi/34$

<パルス偏向電磁石用チャンバー>



セラミックチャンバーではアパーチャが不足する心配あり

ステンレス製は渦電流による発熱があるがアパーチャを重視してシミュレーションと実機測定により使用可能な条件の評価をして使用することにした

材質: SUS316L
 板厚: 2mm
 内表面積: 62.4E-3m²
 処理: 電解研磨 (内面)
 冷却: 水冷式 (3L/min)

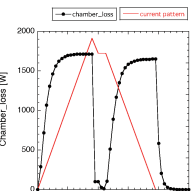
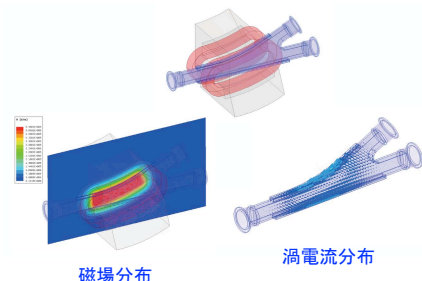
4. シミュレーション

<電磁場解析>

パルス偏向電磁石の磁場測定結果から得たコイルの電流値や電磁石駆動電流波形を電磁場解析ソフトウェア (ANSYS) に取り込み、ステンレスチャンバーに発生する渦電流分布と渦電流損を求めた

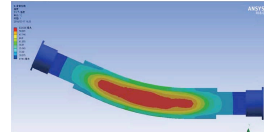
50Hz繰り返し時の平均発熱量
 (上流側) 254 W
 (下流側) 316 W

渦電流は冷却水管付近に多く分布

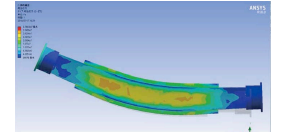


パルス波形と渦電流損

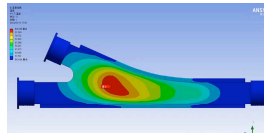
<熱構造解析>



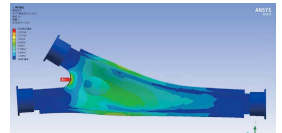
温度分布 (上流側) 最高温度 54°C



相当応力分布 (上流側) 最大値 38MPa



温度分布 (下流側) 最高温度 89°C



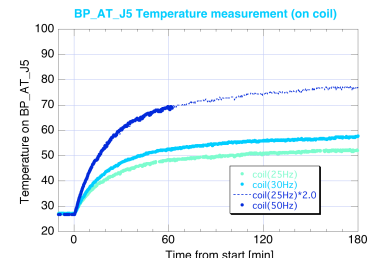
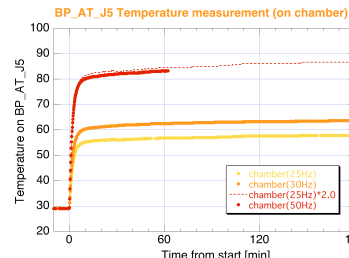
相当応力分布 (下流側) 最大値 153MPa

【結果】上流側チャンバーはステンレス鋼 (SUS316L) の0.2%耐力は200MPaより十分低く問題なし、下流側も50Hz運転での使用は可能と判断できる

5. 実機モデル評価試験

<温度特性評価試験>

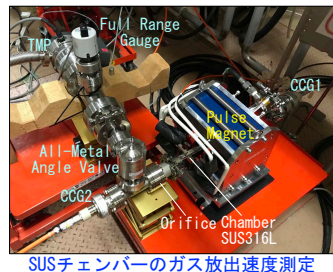
- 温度センサー チノー測温抵抗体 (R60-39) 測定範囲: 0~200°C
 - 100°C水に2分間入れて評価 【結果】平均99.96°C、 $\sigma=0.19$
 - センサーとアルコール温度計を磁場中に入れて調査 【結果】発熱は無視できる
 - シミュレーションで特に高温になる箇所に6個、コイルを含む計10箇所に取付け
 - チャンバーへの取り付けはガラステープ+耐熱ラバーで圧迫、場所によってはPEEKネジ、束線バンドも使用
- 運転磁場中にステンレスチャンバー (下流側) を設置し、パルス繰り返しを25Hz、30Hz、50Hzの順に変えてチャンバーとコイルの温度を測定した



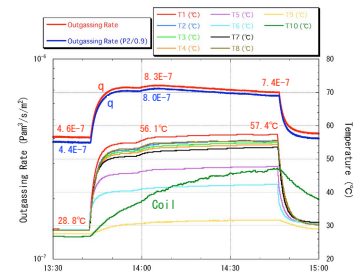
【結果】
 ・上昇温度は周波数比と良く合っている
 ・50Hzパルス繰り返しを1時間連続するとコイルの温度がリミット (70°C) に達する
 ・チャンバーは25Hzの2倍で86°Cの予想 = 問題なし、解析結果と良く一致

<真空特性評価試験>

- ガス放出速度測定 (スルーブット法) $q = C(P_1 - P_2)/A$
 - ゲージ校正 2個のゲージが同じ圧力を示す係数を求めた $P_1 = P_2/0.9$
 - ベークング 150°C×24hr、ステンレスチャンバー以外のガス放出量を減らす
 - 使用機器
 - ゲージ (Cold Cathode Gauge, IKR070、PFEIFFER)
 - オリフィス ($\phi 5$ 、コンダクタンス: $C = 2L/s = 2E-3m^3/s$)
 - バルブ (All-Metal Angle Valve, DN40、VAT)
 - ターボ分子ポンプ (ATP80、adixen)
 - チャンバーへの取り付けはガラステープ+耐熱ラバーで圧迫、場所によってはPEEKネジ、束線バンドも使用
- 運転磁場中 (216A、25Hz) にステンレスチャンバー (下流側) を設置し、パルス繰り返しを25Hz、30Hz、50Hzの順に変えてチャンバーとコイルの温度を測定した



SUSチャンバーのガス放出速度測定



【結果】
 ・ q は常温時に $4.6E-7$ Pam³/s/m²、 $\Delta T=28.6^\circ C$ のとき $\Delta q=3.7E-7$ Pam³/s/m²
 ・50Hzパルス繰り返し時は $\Delta T=60^\circ C$ が予想される
 そのときの q は $1.2E-6$ Pam³/s/m²程度
 これは電解研磨したステンレス材を5hr程度排気したときに近い値である
 また Δq の最大が2倍程度であることから採用に問題はないと考える
 ・チャンバー温度がわずかに上昇する状態でも q は下がりはじめて
 ビームライン設置前のベークングが有効 ただし温度の上限に注意

まとめ

- パルス偏向電磁石の25Hz、30Hz、50Hzパルス繰り返し、磁場0.463Tにステンレスチャンバーを設置してチャンバーとコイルの温度上昇、更にチャンバーのガス放出速度を測定した。
- 30Hzまでは連続運転可能であるが、50Hzではコイルの温度が1時間以上上限に達する。50Hz運転には電磁石の新規製作等が必要。
- ANSYSによる解析結果は実測値と良く一致した。