トリスタン電子・陽電子衝突リング真空系*

石丸 肇**・百瀬 丘**・成島 勝也**・水野 元**
金澤 健一**・新竹 積**・末次 祐介**・久松 広美**
嶋本 真幸**・森 健児**・中川 満**・堀越 源一**

(昭和63年1月4日 受理)

Vacuum System for Tristan Electron-Positron Collider

Hajime ISHIMARU, Takashi MOMOSE, Katsuya NARUSHIMA,
Hajime MIZUNO, Ken'ichi KANAZAWA, Tsumoru SHINTAKE,
Yusuke SUETSUGU, Hiromi HISAMATSU, Masayuki SHIMAMOTO,
Kenji MORI, Mitsuru NAKAGAWA and Gen'ichi HORIKOSHI

(National Laboratory for High Energy Physics

1-1 Oho, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken 305 Japan)

(Received January 4, 1988)

1. はじめに

高エネ研では1986年11月に25 GeVの加速エネルギーでの電子・陽電子衝突実験に成功して以来、加速器の性能向上につとめてきた。真空系に関してはアーク部の主ポンプである組み込み型イオンポンプ(DIP)の排気特性が設計値に達せず問題になっていた。本文ではその後のDIP改善の結果、DCセパレータの改善および定常運転の特性などについて現状を報告したい。

2. 真空系で改善した部分

最も大きな問題はDIPのカソード材料であった。1986年12月に先行して8台(約1000 mmLの単位電極を6連結したものを1台と呼びこの1台は偏向マグネット1台に対応する)のAl-DIPのカソードをTiに交換した。1月の運転でTi-DIPの排気特性を検討した結果(Ti-DIPの特性については本連合講演会で発表)、すべてのDIP264台について交換したほうがよいと決断し1987年春のシャットダウンに作業を行った。次の問題はDCセパレータの電極構造であった。16台のDCセパレータはビームのない場合は平行平板電極に±90 kVを

安定に印加保持することができる。ところがビームがある状態では2台が最悪の場合、±20 kVでも異常放電を起こし、DCセパレータとして機能しなかった。これはビームに伴う高周波壁電流の影響で、高電圧導入部と並行平板電極の接続支持部に尖頭値の大きいkAオーダーの高周波電流が流れ、僅かの隙間で異常放電を起こしていることが判明した。2台のDCセパレータについて問題の電極の接続支持部を改造した結果、ビーム運転で良好な動作を確認できたので、残る14台もすべて同様の改造を行った。さらに衝突実験区間の圧力を改善するため、衝突点の両側にTiバックポンプを組み込んだ250 l/sイオンポンプを増強した。そのほかは大きい問題ではないが、イオンポンプの高電圧導入部のコネクターが湿気のため異常放電を起こし、ポリエチレンの絶縁物が劣化した。これはDIP改造に伴って同軸コネクタの型番をSHVからMHVに変更し、またポリエチレンやテフロンをポリスチレンに交換した。

3. 運転特性

1986年11月に始めたMRの初期運転は12月の中旬まで行なわれ、各部が正常に動作しているかどうか、丹念に調べながらの運転(ビームエネルギーが24 GeV、ビーム電流と運転時間の積が600 mA·h)であった。1987

* 昭和62年11月11日 真空連合講演会において講演(11Ap-15)

** 高エネルギー物理学研究所(茨城県つくば市大穂1-1)

Fig. 1 A graphic display for pressure distribution along the ring. Both sides of TSUKUBA, OHO, & FUJI sections are RF cavities.

年1月から2月までの運転は加速器の性能を設計値に近付けるための調整運転（ビームエネルギーが25 GeV, 800 mA·h）であった。5月から7月までの運転は本格的な電子・陽電子衝突実験でいわば加速器としての定常運転（ビームエネルギーが26 GeV, 4700 mA·h）であった。10月から12月までの運転は高周波空洞を増強しての衝突実験の運転（ビームエネルギー27.5 GeV, 7000 mA·h）であった。Fig. 1にMRの圧力分布のグラフィックディスプレイを示す。電子ストレンジリングの真空系にとってはビームに伴う光衝撃脱離現象で起こる動的ガス放出が最大の問題であるがそのビームによる圧力上昇をFig. 2に示す。圧力上昇はビーム電流・運転時間の積とともに徐々に（log-logで-1の勾配で）減少して行く。10³ mA·hを越えた時点でDIPカソードを交換したので圧力上昇はかなり大きく劣化しているが、改善前の延長線よりも下側に向かい効果が認められる。DIP交換時にはアーク部をすべて大気開放したが圧力上昇は初期状態には戻らずビームによるクリーニング効果が残っていることがわかる。合わせてベース圧力がDIP交換に伴って改善されている様子を示す。夏のシャットダウンにビームチェンバーの一部を大気開放して作業を行ったので、圧力上昇は増大したがその後減少している。Fig. 3に電子・陽電子ビームが約9 mAまで入射され、27.5 GeVまで加速され貯蔵される定常運転の場合の約1日間に亘る代表的なビーム電流と寿命の関係を示す。

セパレータは電子・陽電子を加速中に衝突しないように各々の軌道を分離しておくものであるが、ビームの分離距離をある程度の値以上にしなければビームの相互作用で相手のビームを一部失わせるなど悪影響を及ぼすため衝突リングに必要なものである。設計当初、ビームの

Fig. 2 The pressure rise due to beam and the base pressure as a function of time integrated beam current.

パラシティックモード損失による発熱を除去するため高電圧端子の中心導体をヒートパイプとしていた。また発熱で内部電極が延びることを考慮して長い電極を2分割にしたり、電極と高圧端子接続部にスライド機構を設け複雑な設計としていた。これらの複雑な電極や接続部が尖頭値の大きい高周波電流に対して異常放電を引き起こしていた。ところがより詳細な高周波電界の分布計算や内部電極の温度測定からセラミックからの外部への放射が大きく発熱は無視できることが判明した。発熱の問題が消失すると電極の設計は単純になる、ただし外部へもれるノイズ対策が必要となった。2分割の電極を1つにまとめ、接続部を単純にするなどの改善を行ってビーム運転でその効果を調べたところ、ある程度は効果が認められた。すなわち4箇所の衝突点のセパレータの内、大穂と日光は良く機能する。ところが富士と筑波の2組みはそれほど良く機能しない。それほど良く機能しない2組みについても異常放電は起こっていないようである。このことについては何等かのビームの効果が作用しているようであり、現在も調査研究中である。

4. 問題点

定常的な運転で世界最高エネルギーのシンクロトロン放射光（27.5 GeVで186 KeV）を発生するので、予想していたこととは言え考えていた以上にX線損傷が大きい。シンクロトロン放射光を発生するアーク部のX線シールドはほとんどのビームチェンバーに対し10 mm厚の鉛をつけている。偏向マグネットの内部のビー

Fig. 3 A graphic display of beam current, life time & pressure for a typical one-day operation of MR.

ムに対して外側のみ20 mm 厚の鉛をつけている。これらの鉛シールドはビームチェンバーをマグネットへ組み込んだ後に施工したものであり、鉛シールドは完全なものではなく、鉛シールドはチェンバーの形状に合わせ多種類があるので各々鉛シールド部品間に隙間がある。ビームチェンバーの回りの空間のX線線量分布をラドカラーを用いて概略を調べた。またビーム運転のビーム電流と時間の積 $\text{mA} \cdot \text{h}$ とX線の線量の定量的な対応をつけることを行った。結果は鉛シールドの隙間から噴き出すX線が問題になっている。ビームチェンバーの10 mm 厚の鉛シールドの隙間の最強部では $10^7 \text{ Rad}/\text{A} \cdot \text{h}$ 、またX線取り出し窓では $10^9 \text{ Rad}/\text{A} \cdot \text{h}$ 以上に達することがわかった。現状では約10日間の連続運転で $1 \text{ A} \cdot \text{h}$ の積算に達する。一般に有機物材料は耐放射線性が悪い。塩化ビニールやテフロンでは 10^6 Rad 、耐性の高いエポキシやポリイミドでも 10^8 Rad で損傷を受けるので、マグネットのコイル絶縁や各種ケーブルなどにX線シールドをより増強することが急務である。

現在生じているX線損傷は1)イオンポンプに高電圧を供給するケーブルおよびコネクターで、ポリスチレン製コネクターをセラミックに交換する予定である。ケーブルは架橋ポリエチレンを採用しているがこれ以上の耐性は望めないのでケーブル用鉛シールドを増強する。2)ビーム位置モニター電極の信号取り出し同軸ケーブルにテフロンを絶縁物にした銅管のセミリジッドケーブルを

採用している。このテフロンがX線損傷で変質しフッ素ガスを発生させ湿気と結び付き強酸のフッ化水素酸を生成して金属部を腐食させている。アルミニウム合金とセラミックで構成されたSMA同軸真空端子をビーム位置モニターに採用しており、ろう付け部がフッ化水素酸で腐食するのではないかと心配している。現在のところ腐食に起因する真空漏れは起こっていないが、腐食の促進試験中であり対策を検討している。3)ゲートバルブの加圧部の気密シールにエラストマーのOリングを採用していたが変質硬化してOリングとして機能せず、現在鉛およびインジウムシールに交換中である。4)ケーブルの名札に塩化ビニールを採用しているが、すでにX線損傷で変色や変質、炭化を起こしている。X線の損傷は有機物を変質させる問題であるが、この他に5)X線が大気や有機物を分解し、生成した NO_x , SO_x , F, Clなどが湿気と反応して酸に変化し金属などを腐食させる問題も起こっている。これは湿度の制御が重要で結露などを防止することによってある程度抑えることができる。

5. ま と め

加速器の各部の調整が進展し、ビーム電流は設計値のほぼ70%に達した。ビームの寿命（ビーム電流が $1/\text{e}$ に減少するまでの時間）はチェンバーの圧力で決定されており、9 mA を貯蔵して 5 mA で約220分に達している。

今後もビームによるクリーニングで動的ガス放出が減少して、現在のデータからの予測で設計目標の10時間のビーム寿命に達するのは20 A·hを必要としており、多分1988年後半であろうと思われる。しかしビーム運転中に冷却水の冷凍機を制御してシンクロtron放射光によるパワーで約50°Cに加熱保持しながら動的ガス放出を効果的に減少させる試みを行っているので、目標のビーム寿命を得る積算を短縮できる可能性がある。また軟鋼に銅メッキ法で製作された高周波空洞は加熱脱ガス処理を行うことを前提にしており、実行すればこの積算はさらに短縮されると期待される。

世界で初めてのアルミニウム合金の超高真空システムは大型の電子・陽電子衝突リングではほとんどの問題を解決し運転を続けている。動的ガス放出については電子リングの本質的問題として残る。加熱脱ガス処理や放電洗浄は行っていない。7月の5週間、12月の4週間連続運転では真空系としてのトラブルは全くなく信頼性についても現在のところ問題ない。今後加速器の調整や高周波空洞の増強でビームの電流やエネルギーが上昇するので、世界最高エネルギーのシンクロtron放射光(30 GeVで250 keVに及ぶ)によるケーブルなど有機物の放射線損傷や放射線による金属の腐食が一層問題になってくる。最大の関心であるアルミニウム合金系の電子リン

グ超高真空系への適用の可否は可と結論できる。

謝辞

これまでの開発・設計・据え付け・運転まで助言と励ましを戴いた高エネ研西川哲治所長、木村嘉孝主幹に深く感謝したい。加速器の建設運転はチームワークであり、マグネット・高周波・ビームコントロール・トランスポート・衝突実験チーム・施設部・契約課などにご協力を戴いた。また石川島播磨重工株式会社・富士精工株式会社などには維持改善に多大なご協力を戴いた。紙面を借りて関係各位に感謝申し上げる。

〔文 献〕

- 1) H. Ishimaru, T. Momose, K. Narushima, H. Mizuno, K. Kanazawa, T. Shintake, Y. Suetsugu, H. Hisamatsu, M. Shimamoto, K. Mori, M. Nakagawa and G. Horikoshi: The 6-th Symp. on Acc. Sci & Technol., Oct. 27-29, 1987, Tokyo.
- 2) T. Momose, K. Narushima, K. Kanazawa, T. Shintake, Y. Suetsugu, H. Hisamatsu, M. Shimamoto, K. Mori and H. Ishimaru: *ibid.*
- 3) T. Momose, K. Narushima, K. Kanazawa, Y. Suetsugu, H. Hisamatsu, M. Shimamoto and H. Ishimaru: *ibid.*