トリスタン真空系の定常運転と放射線損傷*

百瀬 丘**・金澤 健一**・末次 祐介**・久松 広美**

嶋本 真幸**・中川 満**・石丸 肇**

(受付1988年11月30日, 掲載決定1989年2月4日)

Operational Characteristics and Radiation
Damages in TRISTAN Vacuum SystemTakashi MOMOSE**, Ken'ichi KANAZAWA**, Yusuke SUETSUGU**,
Hiromi HISAMATSU**, Masayuki SHIMAMOTO**, Mitsuru NAKAGAWA**
and Hajime ISHIMARU**

(National Laboratory for High Energy Physics, Tsukuba-shi, Ibaraki-ken)

(Received November 30, 1988, Accepted February 2, 1989)

1. は し が き

高エネルギー物理学研究所のトリスタン電子陽電子衝突リングでは1986年10月の運転開始以来, 組み込み型イオンポンプの改善や高周波加速空洞の増設などで性能向上が図られてきた. すなわち, ビームエネルギーは1986年10月, 23 GeV から出発したが同年11月には25 GeV, 1987年には26 GeV から27.5 GeV へ, さらに1988年2月には28.5 GeV となり, 同年11月には夏に設置した超伝導高周波加速空洞の運転により30 GeV になった. ビーム電流も1986年11月にはピーク値で1~3 mA であったが, 1987年2月には約5 mA, 同年後半には約9 mA, 1988年には12~14 mA と増加した. ルミノシティ(ビーム衝突の際どの様な割合で反応が起きるかを与える量で近似的にビーム電流の二乗とビームの周回周波数の積で与えられ, $\text{cm}^{-2} \text{sec}^{-1}$ で表わす) も1986年11月には 2.6×10^{29} , 1987年2月に 2.0×10^{30} , 同年6月に 8.0×10^{30} , 1988年2月に 1.3×10^{31} となり, この時点で設計値 1.0×10^{31} を超えた.

一方, 電流時間積(ビーム電流とビーム運転時間の積の和)の合計は1987年2月まで $1.3 \text{ A} \cdot \text{h}$, 同年7月まで $5.7 \text{ A} \cdot \text{h}$, 同じく12月まで $8.4 \text{ A} \cdot \text{h}$, 1988年2月まで $14.2 \text{ A} \cdot \text{h}$, そして1988年7月までで $20.1 \text{ A} \cdot \text{h}$ に達した.

この報告では1987年12月から1988年11月までの間の, 特にルミノシティ設計値達成に代表されるビーム電流増加による問題と放射線損傷による問題を述べる.

2. トリスタン真空系のビーム電流増加による影響と特性

2.1 ビーム電流による励起電磁界の影響

トリスタンリングでは通常電子2バンチ, 陽電子2バンチで運転される. このバンチビームによりビームチェンバー内に高周波電磁界が励起される(~数100 A, ~数10 GHz). このような電磁界による放電などの問題を避けるため偏向部のベローズにはrfインサート¹⁾を設置し, 電磁界漏洩対策としてイオンポンプ用ポートなどの入口にはスリット(~4 mm 幅, ~50 mm 長)を施し, また異径チェンバー間はテーパーでつなぐなどの処置をしている. しかしビームスクレーパー, スクリーンモニター, ビームストッパーのポート(ICF 114フランジ, 64φ)などは直線導入機が出入りする構造上スリットはつけられない. 従って高周波電磁界の導入機側への侵入が避けられず, その結果, 導入機の中心導体のブレを抑えるポリイミド部品(一般に誘電体に高周波が加わると誘電体損失を生じ熱となる. 印加電圧Eと流れる電流の間に生ずる位相差を損失角, δ とし損失係数, $\tan \delta$ を用いると誘電体損失は周波数と $\tan \delta$ と E^2 に比例する. ポリイミドの $\tan \delta$ は室温で $\sim 10^{-4}$, 200°C で

* 1988年11月9日 第29回真空に関する連合講演会で講演(9Aa-15)

** 高エネルギー物理学研究所(つくば市大穂1-1)

～ 10^{-3} である)の加熱を起し、さらに脱ガス、圧力劣化を起した。Fig. 1はビームスクレーパーを設置している区間とそうでない区間でのビーム電流に対する圧力変動を示している。ポリイミド部品の中には導入機中心導体(アルミニウム)に接する部分で軟化を起こしたものがあり、温度はその融点(～ 300°C)近くまで上昇したものと考えられる。これらの装置で不要なものは撤去し、必要なものはポリイミド部品を除去して再設置し、以後同様の問題はなくなった。

ICF70フランジのポート(37φ)につけられているピラニゲージで同様の原因によると考えられる機能劣化や断線がみられた。そこで、10 mm厚の円板に6 mmφの穴を7ヶあけたICF 70フランジ用特殊ガスケットを製作、設置して高周波電磁界の遮断を行った。これにより問題はなくなった。

DCセパレーター(旧型)においても同様な圧力上昇が起った。いくつかの改善策が施されたが構造上の複雑さに加えて放電による印加電圧劣化などで顕著な効果が上がらず新型セパレーターの製作が決定された。新型セパレーターは1988年夏までにテストおよび製作が終了し、夏期シャットダウン中に全データ付けが完了し秋期運転に備えている。

2.2 圧力上昇、ベース圧力、ビーム寿命

1988年7月までの圧力上昇、ベース圧力を電流時間積の関数として表わしたものがFig. 2である、圧力上昇

Fig. 1 Pressure for two regions as a function of beam current. One includes a scraper and the other one does not include scrapers etc.

のデータに見られるいくつかのピークはシャットダウン中の大気にさらされた区間の圧力劣化の影響を意味している。そのような劣化はあるものの、次第に圧力上昇もベース圧力も低下しているのが分かる。この経緯をビーム寿命とビーム電流の関係からみるとFig. 3となる。点線は1987年度夏、実線は1988年度夏のものである。いずれの年度においても当初は2～6 mAのビーム電流でビーム寿命は1～2時間であるが運転末期(7月下旬)には6 mAで3時間(1987年度)、6～11 mAで3～4時間(1988年度)と明らかに改善されていることが分かる。

Fig. 2 Pressure rise and base pressure as a function of a time integrated beam current, where years and seasons show the long shutdowns of TRISTAN.

Fig. 3 Beam lifetime as a function of beam current.

3. 放射線損傷の例

3.1 電磁石コイルの絶縁材料への影響

トリスタンリングのシンクロトロン放射光のエネルギースペクトルはビームエネルギーが25~30 GeVで臨界エネルギーは200 keVである²⁾。従ってこのような光を遮蔽するにはFig. 4に示したように通常減衰長の小さな鉛を用いる。200 keVでは e^{-1} に減衰するのに1 mm程必要だから10 mmあれば数桁は減衰し充分の筈であった³⁾。しかし200 keVより高いエネルギーを持つ光も含まれていることの他に、電磁石磁極にチェンバーが接する部分、水配管継手のついた部分、ゲートバルブ本体部分など鉛のついていない部分があること、鉛のつきあわせ部に隙間があることなどのために放射線漏れがあることが分かった。そこでビームエネルギー27.5 GeV時にチェンバー周辺の放射線分布を調べた結果、リングの内側と上側のチェンバー表面で $10^7 \text{ rad/A}\cdot\text{h}$ 、リングの外側のチェンバー表面では $10^8 \text{ rad/A}\cdot\text{h}$ を超えること、電磁石コイル表面もこれに準じた値であることが分かった。これらの値から電磁石コイル用絶縁材料の耐用年数

Fig. 4 Attenuation length for Al, Cu, and Pb as a function of photon energy.

は360~60日、場所によっては数日と見積られ⁴⁾、鉛遮蔽の工事では従来のような遮蔽の隙間や未着部はなくすように鉛板の重複部を作り、さらに隙間を溶接するなど配慮がなされている。

3.2 アルミベローズとチェンバーの腐蝕

偏向部のゲートバルブの劣化Oリングの取替え作業中にチェンバー表面を見る機会があり、その時チェンバーとベローズ表面に点在する腐蝕を見つけた。腐蝕発生時期は1987年3月の組込型イオンポンプ改修時にはなかったものでそれ以後と考えられる。表面の腐蝕物のイオンクロマトグラフによる分析で NO_3^- が20%含まれることが分かったので、反応過程の詳細は不明だが大気中の窒素が酸素または水蒸気と分解や再結合を起こして硝酸が生成され腐蝕を起こしたと考えている。ところでベローズの表面にはこのような腐蝕を予想して耐蝕用陽極酸化皮膜処理が施されていたが、調査の結果この皮膜にピンホールが存在したことが、チェンバーの冷却水温度設定不良(15~20°C)で結露があったことなどが腐蝕を許した要因と考える。ベローズ腐蝕部の追調査では約50 μm の深さのクレーター状の腐蝕となっていることが分かったので0.3 mm厚のベローズには緊急に腐蝕対策を施すことが必要と考えられた。そこで結露の問題が起きて以後、冷却水温度を27°Cに設定したこと他に、ベローズをアルミ箔(80 μm 厚)で覆い、液体窒素から蒸発させた窒素ガスをベローズに供給し(~30 cc/分)、硝酸発生の要因と考える酸素、水分を隔離するようにした。

この方法の検証などのため、放射線によるガスの分解結合をチェックするためのテスト系を別に製作した。すなわち地上から地下の光照射部までの1/4インチステンレス管系、光照射部とガス蓄積チェンバー(500 $\phi \times 500 \text{ L}$)、光照射後のガスを地上分析系まで送るアルミ配管(40 ϕ)、および分析後のガスをトンネルに戻す管系から成っている。ただし光照射部はアルミチェンバー厚4 mmと配管系アルミ管厚2 mmとから成るので、放射光の内可視光を含む20 keV位までの光は遮断されている。Fig. 5ではポンペの窒素ガスまたはコンプレサーで大気を供給した各場合の硝酸と NO_x の生成量を比較している。硝酸については大気の場合で~15 ppb、窒素ガス場合は2~3 ppbで大気の5~6分の1と低い。このことは我々がとったベローズ腐蝕対策が有効であることの傍証である。Fig. 5の窒素ガスに対する生成量の変化の途中で増加がある範囲はガス導入系用の液体窒素トラップの液体がなくなった期間である。この増加は窒素ガスの水分(露点、°Cで表示)が影響していることを意味し、大気の場合はその影響がより大きいことを示

Fig. 5 Concentrations of NO_x and HNO_3 in flowing N_2 gas and air exposed to x-irradiation by 28.5 GeV beam in TRISTAN.

唆する。実際のベローズ用供給ガスは液体窒素から蒸発させたもので、タンク出口近傍で測った露点は -68°C 〜 -70°C であるがベローズ近傍では -40°C 位で劣化している。従って大気の場合より硝酸生成は低いのでベローズ腐蝕対策として有用であることは間違いないが、両者の間の定量的関係や露点改善法などは今後の課題としてある。当然定期的にベローズ表面の監視も必要である。

この他ベローズ腐蝕対策としてセラミック皮覆 (SiO_2) のベローズを製作し適宜これに取替えることにした。従来の陽極酸化皮膜はピンホールがなくなったとしても耐酸性に問題がある。そこで SiO_2 皮膜を $10\ \mu\text{m}$ 施したベローズをテストした。その結果100回の伸縮テスト (伸び2 mm, 縮み8 mm) でもピンホール, クラックは生ぜず耐酸テストも合格した。但し弗酸の長期浸漬には耐えられないので別方法の併用など検討する必要がある。

3.3 テフロン分解

組込型イオンポンプやビーム位置モニター用のケーブル, またケーブル用コネクタの絶縁体にはテフロンを用いていた。しかし1987年夏期の運転 (ビーム電流時間積 $3.6\ \text{A}\cdot\text{h}$, 推定線量 $7.2 \times 10^7\ \text{rad}$) 後には非常にもろくなり, 表面の黒化, 絶縁不良も起こった。これに接するしんちゅう表面には緑青が発生してコネクタが抜けな

くなった例も現われた。腐蝕生成物のイオンクロマトグラフによる分析では共通して弗素イオンが大量に検出され, また同生成物の加熱 (170°C) 脱ガスによる質量分析でも弗化水素とみられるピークが検出された。従ってテフロン中の弗素が光照射により解離し, 直接または水蒸気と結合して弗化水素となって腐蝕を起こしたと考えられる。テフロンのもう一つの問題は照射により収縮を起こすことである。ビーム位置モニター用のセミリジッドケーブル内のテフロン ($\sim 3\ \phi$) は $1\sim 2\ \text{mm}$ 間隔で割れを起こしており, これが電気信号の反射など悪影響をもたらした。これらテフロンを用いたケーブル, コネクタはポリスチレン製のものに取替えた。これまでの期間 (ビーム電流時間積, $11.7\ \text{A}\cdot\text{h}$, 推定線量, $2.4 \times 10^8\ \text{rad}$), コネクタ270ヶ中の不良は10ヶ程度である。しかしいずれは劣化を起こすものと考えられるのでセラミックス製のコネクタ, ケーブルを開発中である。すなわち, コネクタは絶縁体として SiO_2 を用い, 特性インピーダンスはほぼ $50\ \Omega$ のものができるようになり, また高圧用ケーブルには絶縁体を MgO としたもので直流7 kV まで, 曲げの半径150 mm のものが可能となった。

3.4 オイル, ゴムなどの損傷

ターボ分子ポンプ用のフォンブリンとロータリーポンプ用のパラフィン系およびナフテン系炭化水素の混合物の2種について照射テスト ($\geq 2.1 \times 10^9\ \text{rad}$) を行った。フォンブリンは未使用のものは無臭であるが照射後のものは異臭をもち, pH 試験紙で酸性を示し, アンモニア水を近づけると白煙を生じた。このことは構成元素を考慮すると弗化水素の生成を示している。また照射後のものは Fig. 6 に示したように炭素間の不飽和結合の存在によるものと考えられる波数 $1780\ \text{cm}^{-1}$ の吸収を示す赤外吸収スペクトルが得られた。ロータリーポンプ用オイ

Fig. 6 Infrared spectra of irradiated and non-irradiated Fomblin.

ルについては、低沸点物質が大量に生成していること、と同時に高分子化合物の生成が認められた。すなわち炭化水素の一部の分解と重合とが起きていることが分かった。これらのテスト例にみられる分解、重合は元試料の特性、例えば粘度や蒸気圧など（我々は調査してないが）の変化を必ず起こすと考えられ、よって当該機器の性能劣化をもたらすと考えられる。特にフォンブリンから分解した弗素は微量でも腐蝕の影響は大きいと考えられるので、潤滑油を用いる方式でないポンプに切換えたい。

バイトン製のOリングをレーストラック型鏡面シールアルミニウム合金製ゲートバルブの圧空系のシールに使用していたが硬化しシール不良を起こした（推定照射線量 4×10^6 rad）。そこで全数をニトリルゴム製のものに取替えたがこれも位置による程度の差はあるが硬化し、シール不良を起こした（同上 2×10^7 rad）。結局、鉛線またはインジウム線を用いたシールに全数取替えた。この経験から粗排気系のKF 25のOリング（ニトリルゴム）もインジウムシールに取替えるのを試みている。シール法、性能などを改善すべき点があるので偏向部の1/8を対象として行ったが結果を比較する予定である。

硬化によるトラブルはシンプレクス（ナイロン）管にもみられた。冷却水管の可動部に用いていたが破碎して水漏れを起こした一例がある。これも金属化が望ましい。

4. ま と め

トリスタンリングにおけるトラブルの内、真空系によ

る運転停止時間は運転開始時に比べると格段に減少した。しかし本文で述べたようにトリスタンリングの性能向上による特有の問題が現われてきた。すなわちビーム電流の増加によるものと放射線損傷である。ここでは1988年11月末までにおける問題と対処法を記した。1988年11月18日には超伝導加速空洞の運転で、ビームエネルギーを30 GeVに上昇することに成功したことで今後もこれらの問題により注意を払うことが必要と考えている。

謝辞

イオンクロマトグラフなどの化学分析を高エネルギー物理学研究所、神田征夫助教授、平雅文氏にお願いした。また種々の御助言を頂いた。ここに深謝します。さらに国立公害資源研究所大気環境部、畠山史郎研究員にはベローズに対する窒素ガス置換についての御助言を受けた。ここに感謝の意を表します。多くの試料分析に富士精工(株)、幡磨化成(株)、日立マテリアルズエンジニアリング(株)、および日本真空超材料研究所（筑波）の御協力を頂いた。深く感謝します。

〔文 献〕

- 1) H. Ishimaru, T. Momose, K. Narushima, H. Mizuno, K. Kanazawa, H. Watanabe and K. Shimamoto: J. Vac. Sci. Technol. A4(3), May/Jun, 1(1986) 1762.
- 2) 百瀬 丘, 石丸 肇: 真空, 31, No. 1, (1988) 18.
- 3) 水野 元: TN-82-022, KEK.
- 4) TRISTAN memo, No. 029, (1987) KEK.