放射線等による圧力測定異常とその対策*

大石 真也^{*1}・依田 哲彦^{*1}・谷内友希子^{*1}小路 正純^{*1}・米原 博人^{*1}・大熊 春夫^{*1}

Misreading of Pressure Measurement by Radiation, and Its Measures

Masaya OISHI^{*1}, Tetsuhiko YORITA^{*1}, Yukiko TANIUCHI^{*1},
Masazumi SHOJI^{*1}, Hiroto YONEHARA^{*1} and Haruo OHKUMA^{*1}^{*1}Japan Synchrotron Radiation Research Institute (JASRI) 1-1-1, Kouto, Sayo-cho, Sayo-gun, Hyogo 679-5198

(Received November 9, 2005, Accepted February 11, 2006)

In the SPring-8 Storage Ring, the pressure measured by Bayard-Alpert gauge near photon-absorber were not observed aging effects by a beam self-cleaning. As the result of investigations of this phenomenon, three causes of misreading of pressure measurement were found; (1) irradiation of the scattered X-ray to gauge head, (2) a large amount of electronic inflow to gauge head, (3) irradiation of the scattered X-ray to gauge cable. We took measures to the misreading, for example shielding of gauge heads and cables etc, and came to be able to measure pressure within tens of percent errors.

1. はじめに

大型放射光施設 SPring-8 の蓄積リングは放射光専用施設として1997年に運転が開始された。運転の進行とともに蓄積ビームの積分電流が増加し、ビーム寿命の伸びが観測された¹⁾。SPring-8 蓄積リングの場合、バケット当たりの電子数が少ない、いわゆるマルチバンチ運転では、残留ガス散乱によるビーム寿命が支配的である。従って、ビーム寿命の伸びはビーム蓄積中の残留ガスの減少を意味する。一般的に電子蓄積リングでは光脱離によるガス放出量は積分電流に対し減少する²⁾。いわゆる“枯れ”である。しかしながら SPring-8 蓄積リングの一部のスード型 B-A 真空計は、一年も経たないうちに正しい値を示さず、この“枯れ”を正しく反映した圧力減少が見られなくなった。真空計の異常動作の原因として蓄積リングに設置されている放射光受光体（アブソーバ）による散乱 X 線（放射線）が照射されて影響を受けていることがわかった。SPring-8 の蓄積リングは 4 カ所の長直線セルを含む 48 のセルからなる。Fig. 1 に標準的な 1 セルの構成を示す。真空系³⁾はアルミ製のアンテチェンバーで構成されている。偏向電磁石 (BM1, 2) で発生する放射光の大部分は、局所的に配置されたアブソーバ (AB1~4, CR1, 2)

により遮られるため、これらでは散乱による放射線が強く発生する。

本報告では、SPring-8 の蓄積リングで観測された真空計の異常動作とその対策等について述べる。現在では、真空計およびそのケーブルに遮蔽等を施すことにより誤差数十%以内での圧力計測が可能となっている。

2. 蓄積リングの圧力

Fig. 2 に運転開始以来の蓄積リングの圧力推移の一例とビーム寿命を示す。左側縦軸は、ビーム無しの圧力に対する電子蓄積による圧力増加分を蓄積電流値で規格化したもの $\Delta P/I$ 、右側縦軸は、蓄積電流値とビーム寿命の積 $I \times \tau$ 、横軸は蓄積リングの積分電流である。ビーム寿命は、マルチバンチ運転時で、挿入光源の磁場がビーム寿命に与える影響を最少にするため、全ての挿入光源のギャップが全開の時のみのデータを示している。SC1 (●) は直線部の圧力で、アブソーバより離れており放射線がほとんど照射しない場所である。AB3 (▲), CR1 (▼) はアブソーバのすぐ近傍にあり、強い放射線が照射される場所である。SC1 の $\Delta P/I$ は運転開始以来、積分電流の増加とともに -0.8 の減少勾配 (積分電流 dose を D としたとき $\Delta P/I \propto D^{-x}$ の $-x$ を減少勾配と呼ぶ

Fig. 1 Layout of normal cell.

* 平成17年11月9日 第46回真空に関する連合講演会で発表

^{*1} 財高輝度光科学研究センター (〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都 1-1-1)

Fig. 2 The normalized pressure rise ($\Delta P/I$), and the product of the beam current and the beam lifetime ($I \cdot \tau$) as a function of integrated beam dose.

ことにする)で減少を続けていることがわかる。ビーム寿命も、積分電流に対してほぼ一定の勾配での伸びが観測されている。一方、AB3の $\Delta P/I$ は運転開始から3 A·hrぐらいいまで、CR1は10 A·hrぐらいいまで減少していたが、それ以降はほとんど減少していないように見え、これらの箇所では“枯れ”が進行していないように見えた。このように、放射線の強く照射する真空計で見かけ上の高い圧力を示す現象はElettra⁴⁾でも報告されている。アプソバ近傍では正しく圧力計測できていないのではないかと考え原因を調査した。

なお、積分電流11 A·hr (1997年8月)と66 A·hr (1998年8月)で $\Delta P/I$ のステップ的な減少とビーム寿命のステップ的な伸びが観測されているが、これは蓄積リングの主排気ポンプであるNEGポンプの再活性化を行ったためである。また、ビーム寿命の一時的悪化が例えば積分電流626 A·hr等で見られるが、これは、大気開放を伴った蓄積リングの改造の影響である。

3. 圧力測定異常の調査

調査の結果を先に述べると、3種類の圧力測定異常が観測された。①測定子への放射線照射による異常、②測定子への電子流入による異常、③ケーブルへの放射線照射による異常である。②の測定子への電子流入による異常は加速器では良く指摘される問題である。③はRadiation Induced Current (放射線誘導電流)⁵⁾によるもので、見かけの圧力値を低くする異常である。以下に詳細を説明する。

調査の方法は真空計のグリッド電圧、フィラメント電圧、エミッション電流を独立に変化させ、コレクタ電流を微小電流計で直接測定した。まず、正常な例としてFig. 3に1998年11月に測定したSC1の例を示す。真空計はキャノンアネルバテクニクス社製のヌード型B-A真空計(NIG-2F)である。左側の縦軸は真空計のコレクタ電流、右側縦軸は窒素の感度係数0.19 Pa⁻¹で圧力値に換算した目盛り、横軸は蓄積リングの蓄積電流を示す。通常の圧力測定状態であるグリッドに180 V、フィラメントに45 Vをかけ、フィラメントにエミッション電流4 mAを流した状態でのコレクタに流れる

Fig. 3 The collector current of normal gauge head as a function of beam current.

電流を●で示す。蓄積電流60 mAでコレクタ電流は 1.7×10^{-11} A、圧力に換算して 2.3×10^{-8} Paである。これに対し、グリッドとフィラメントにかかる電圧はそのまま、エミッション電流だけを0 mAにしたときのコレクタ電流を△で示す。コレクタ電流は本来0 Aであると考えられるが、わずかな電流 1×10^{-12} A以下が観測された。この電流の影響により、実際の圧力に対して10%以下の誤差を生じさせているが、測定精度として許容できる範囲と考えられる。更にエミッション電流0 mAで、グリッドとフィラメントの電圧を0 Vにした条件でのコレクタ電流を▽で示す。この場合は、 -2×10^{-12} A (-2.7×10^{-9} Pa相当)程度のコレクタ電流が計測されており、コレクタに飛び込む荷電粒子、あるいはケーブルのノイズが原因である。

3.1 測定子に放射線が照射することによる異常

Fig. 4に1999年3月から4月頃(積分電流200 A·hr前後)のCR2の測定例を示す。エミッション電流4 mAの圧力測定状態でのコレクタ電流(●)は蓄積電流約70 mAで 4.5×10^{-10} A、圧力に換算すると 6×10^{-7} Paであり、蓄積電流値に比例している。それに対し、エミッション電流を0 mAとした場合(△)でも、エミッション電流4 mA(●)と同程度の電流となっており、この計測値(●)は正しい圧力では無いことを示している。Fig. 4の測定子は、1.65 mm厚さのSUS304ケーシングの中に格納されている。Fig. 5にFig. 4の計測を行った真空計の測定子ケーシングと電流コネクタ部分に厚さ2 mmの鉛で遮蔽を行った場合の結果を示す。エミッション電流4 mAの圧力測定状態(●)とエミッション電流を0 mAにした場合(△)は、マイナスの電流に変わった。これは鉛遮蔽によって、真空計に見かけの圧力が高く見える誤差を与えていると考えられる放射線が遮られたことを示している。しかしながら、コレクタ電流がマイナスとなる異常は残っている。これについては以下に述べる。

3.2 電子流入による異常

Fig. 4, Fig. 5ともグリッドとフィラメントの電圧を0 V、エミッション電流も0 mAの条件でのコレクタ電流(▽)はマイナスの大きな値である。これは、加速器で良く指摘される光電子、あるいは二次電子がコレクタ電極に流入するためではないかと考えた。これを確認するため測定子のケーシ

Fig. 4 The collector current of abnormal gauge head as a function of beam current.

Fig. 5 The collector current of abnormal gauge head with Pb shield as a function of beam current.

Fig. 6 The collector current of abnormal gauge head with Pb shield as a function of strength of magnetic field.

Fig. 7 The pressure profile of abnormal gauge head, when the beam was aborted.

ングの上流側に磁極長さ50 mmの荷電粒子抑制電磁石を置き、流入する荷電粒子の磁場による排除を試みた。結果をFig. 6に示す。縦軸はFig. 3, 4, 5と同じコレクタ電流および圧力値であり、横軸は電磁石の磁場強度である。測定時の蓄積電流は70から65 mAである。測定子ケーシングと電流コネクタ部には厚さ2 mmの鉛で遮蔽を施した。グリッドとフィラメントの電圧を0 V、エミッション電流も0 mAの結果(▽)と、グリッドとフィラメントに電圧をかけた場合(△)ともに、20 mTの強度の磁場をかけることにより、コレクタ電流が -2×10^{-11} Aと減少した。このことから、コレクタに流れる大きなマイナス電流の原因は、電子の流入であったと言える。通常の圧力測定状態の場合(●)でも電磁石に磁場をかけるとコレクタに流れる電流は減少した。流入電子の排除の結果と言える。

3.3 ケーブルに放射線が照射することによる異常

Fig. 6でグリッドとフィラメントに電圧をかけ、エミッション電流も0 mAの場合(△)で、荷電粒子抑制電磁石の磁場を強くしても、コレクタ電流は完全に0 Aにはならず、 -2×10^{-11} A、圧力に換算して -2.6×10^{-8} Pa相当の影響が残った。これは、真空計の測定子ヘッドを切り離し、ケーブルのみにしても測定される電流であることが分かり、ケーブル内で誘起されるRadiation Induced Current(放射線誘

導電流)と考えた。Fig. 7に蓄積電子が廃棄された時の圧力変化の例を示す。左側縦軸は圧力、右側縦軸は蓄積電流、横軸は時刻である。4:00頃に蓄積電子の廃棄が起こると、放射線による圧力計測異常が無くなり、かつ光脱離によるガス放出も低下するため、急激に圧力測定値は低い値を示す。更に電子流入も無くなるため、チェンバ内の熱脱離によるガス放出によって決まる圧力値に収束していくはずである。しかし、Fig. 7の圧力は44_ab3(△)、44_cr2(▽)とも一旦 1×10^{-11} Paという異常に低い圧力を示した。SPRING-8蓄積リングのデータベースではマイナスの圧力値を想定していないため、真空計がマイナスの値を示した場合全て 1×10^{-11} Paという値が記録されるようになっている。この時、実際に真空計はマイナスを示していた。44_ab3は5分程度この状態を示した後、熱脱離によって決まる圧力値に収束していった。44_cr2では1時間40分後に正常な圧力を示す状態に回復し始めている。Radiation Induced Current、すなわち誘起されたチャージが長い時定数を持って減衰しケーブルからなくなっていくためと考える。44_cr2のビーム廃棄後にマイナスの圧力を示す異常は、この1年前は見られなかったことから、ケーブルの放射線損傷の程度の違いによって、誘起される電流とその減衰時間が異なっていると考えられる。

4. 対 策

測定子への放射線照射対策として、測定子のケーシングを厚さ 3 mm の鉛で遮蔽した。ケーブルへの放射線照射に対しては、既に放射線により劣化した部分を新品に交換し、厚さ 3 mm の鉛管内にケーブルを通した。電子流入に関しては、リング本体部への真空計取付けポートに U 字型の配管を追加することにより防ぐ方法と、荷電粒子抑制永久磁石を真空計ケーシング上流に配置し電子を排除する方法を実行した。永久磁石が、電子ビームの軌道に影響を与えることを懸念し、U 字型の配管の追加を積極的に進めたが、施工セル全体の大気開放を行わなければならないため、約 240 台全ての測定子に対策を行うには 10 年近くを要する。そのため漏洩磁場の少ない、すなわち電子ビーム軌道への影響が小さい永久磁石を導入することで、リングの全真空計の対策は 2004 年に一段落した。ただし、永久磁石で電子流入を防いだアブソーバ (AB3, 4) の真空計は、真空ポートを通して放射線の流入があり、計測値には数十%大きな値を示す誤差が残っている。

2001 年夏 (dose = 1014 A·hr) に上記対策を施した 9 セル分の結果を Fig. 2 に示す。これ以降は AB3 (▲) と CR1 (▼) の真空計の測定異常は著しく改善され、真空計の設置位置の関係から放射線の影響をほとんど受けていない SC1 (●) とほぼ同じ $\Delta P/I$ を示している。これらの値は運転開

始初期の $\Delta P/I$ 減少勾配の延長線上にあり、SPring-8 蓄積リングの“枯れ”は一定の減少勾配で進行していたことが明らかになった。

5. ま と め

SPring-8 蓄積リングで観測された圧力の測定異常について、実験的な調査分析を行い、原因が①測定子への放射線照射による異常、②測定子への電子流入による異常、③ケーブルへの放射線照射による異常、の 3 種であることが突き止められた。遮蔽等の対策を施すことにより、現在では誤差数十%以内での圧力測定が可能となった。

謝辞

本研究で放射線誘起電流に関し有益なご助言を頂いた馬込保博士に感謝します。

〔文 献〕

- 1) H. Ohkuma, N. Kumagai, T. Noda, M. Oishi, H. Saeki, K. Soutome, Y. Suzuki, M. Takao, H. Tanaka, Y. Taniuchi and K. Watanabe: *Proc. PAC '99*, New York, 1999, p. 2352.
- 2) 堀越, 小林, 堀, 坂本: 真空排気とガス放出 (共立出版, 1995).
- 3) 渡邊, 佐伯, 正木, 鈴木, 谷内, 野田, 前野, BE, 大熊: 真空, **42** (1999) 535.
- 4) J. Miertusova: *Vacuum*, **51** (1998) 61-68.
- 5) R. L. Fitzwilson, M. J. Bernstein and T. E. Alston: *IEEE Trans. Nucl. Sci.* **ns-21** (1974) 276.