

SAGA-LS 蓄積リング真空ダクトの更新と到達真空度の調査 VACUUM CONDITION OF THE BEAM DUCT AFTER THE REPLACEMENT FOR INSTALLING THE SUPERCONDUCTING WIGGLER AT SAGA-LS

金安達夫*, 高林雄一, 岩崎能尊, 江田茂

Tatsuo Kaneyasu*, Yuichi Takabayashi, Yoshitaka Iwasaki, Shigeru Koda

SAGA Light Source

Abstract

A part of the beam ducts in the SAGA-LS storage ring was replaced in March 2015 for installing the second superconducting wiggler. After the replacement, the beam studies and vacuum commissioning were continued in April 2015 and the user operation was restarted in May 2015. The vacuum pressure of the new duct in the straight section has been one to two orders of magnitude higher than those in the other straight sections. Although the beam lifetime on the storage ring was scarcely affected by the vacuum pressure, we investigated the cause of the pressure rise in the straight section.

1. はじめに

放射光施設 SAGA Light Source (SAGA-LS) ではピーク磁場 4 T のハイブリッド 3 極型超伝導ウィグラー [1, 2] を 2010 年度から運用している。2010 年度以降, 超伝導ウィグラー (LW2W) はビームライン BL07 [3] の光源として安定した稼動を続けており, 中低エネルギー蓄積リングの偏向電磁石放射では利用が困難な 20-40 keV 領域の硬 X 線をユーザー実験に提供している。2015 年の夏期シャットダウン中には住友電工ビームラインの光源として二台目の超伝導ウィグラー (LS5W) が設置された。ウィグラー設置後のビームテストおよび二台のウィグラーの同時運用を目指した技術開発は順調に進み, 2016 年の 7 月からはウィグラー二号機の定常的な運用を開始した [4]。

ウィグラー二号機の設置に先立ち, 2014 年度末に蓄積リングのウィグラー用直線部および下流四極と偏向電磁石部の真空ダクトを更新している [5]。真空ダクトの光焼き出しによるビーム寿命の改善傾向は一号機と二号機で良く一致しており, ダクト製作・設置から真空立ち上げに至るまで大きな問題はなかった。両者ともビームドーズ 1000 mA·h 程度でユーザー運転に必要な 300 mA 蓄積が可能となった。しかしながらビーム寿命への影響は殆どないものの, 光焼き出しが十分に進行した状態でも, 直線部真空ダクトの圧力測定値はウィグラー一号機のケースと比べて一桁高い状態が継続していた。そこで真空ダクトの圧力上昇の原因究明へ向けた調査に取り組んだ。真空ダクトの温度監視, 四重極質量分析器による残留ガス分析, 制動放射ガンマ線の線量測定, 真空計の設置状況の確認を行い, 直線部ダクトで発生した光電子が真空計による圧力測定に影響を及ぼすことが判明した。なお本稿で紹介する調査結果は, ウィグラー二号機を非励磁で行ったものである。ウィグラー励磁中の振る舞いについては最後に簡単に述べる。

2. ダクト更新後の状況

ウィグラー二号機設置へ向けたダクト更新と真空立ち上げの詳細は既に報告されている [5]。ここではダクト更新後の光焼き出しが十分に進行した時点での SAGA-LS 電子蓄積リング (以下, SAGA-LS リング) の圧力分布を Figure 1 に示す。SAGA-LS リングの真空圧力の測定には冷陰極真空計 (CCG) が採用されている。1 セルにつき三箇所 CCG が設置されており, リング全周で 24 個の CCG による圧力測定を行っている。ウィグラー二号機の設置箇所は直線部 “LS5” である。

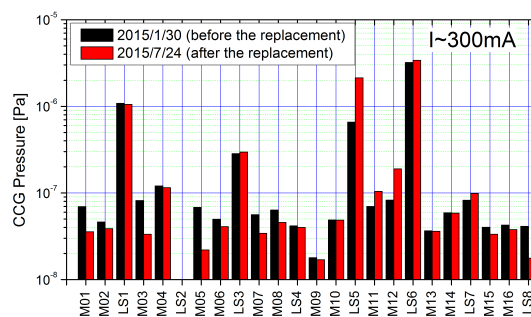


Figure 1: Pressure distribution of the SAGA-LS storage ring during the user operation. The BM and LS indicate the bending magnet and straight sections of the storage ring, respectively.

Figure 1 に示したように, LS5 は他の直線部 (LS6 を除く) に比べて圧力が一桁から二桁高く, ユーザー運転に必要な 300 mA 蓄積における圧力は 10⁻⁷ Pa 台へ到達していない。ただしダクトの更新前後でビーム寿命の変化は殆ど無かった。このことは SAGA-LS リングのビーム寿命はタウシェック効果が支配的なことから, 実際に LS5 の真空が 10⁻⁶ Pa 台であったとしても局所的な圧力増加の影響は非常に小さいと理解された。なおウィグラー一号機が設置されているセクション (LS2) の真空計は動作不調のため Figure 1 には測定値を示していないが, 真空ダクト更新後の立ち上げ運転では 300 mA

*kaneyasu@saga-ls.jp

蓄積時に 10^{-7} Pa 台へ到達している [5].

3. 直線部真空の調査

3.1 ダクト温度

まず最も単純な調査として、加速器運転中に真空ダクトの外部温度を監視することにした。真空ダクトの冷却機能やアブソーバによる受光に何らかの問題があれば、ダクト内面への放射光照射による温度上昇とそれに伴うガス放出が顕著となるためである。真空ダクトの設計上、放射パワー密度が大きいと予想される箇所へ熱電対を取り付け、さらに赤外カメラを用いてダクト全体の温度分布を監視した。赤外カメラによる監視の一例として、直線部ダクトの上流側の状況を Figure 2 に示す。

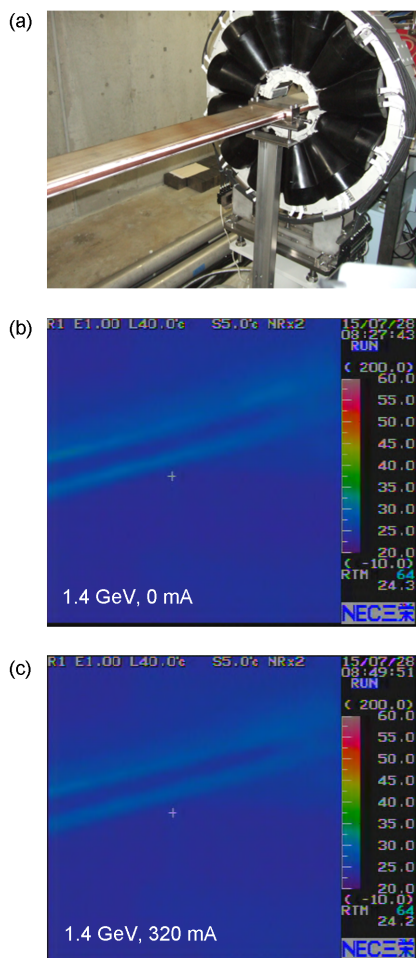


Figure 2: Duct temperature measurement by using the thermographic camera. (a) Photograph of the beam duct. Thermal images of the beam duct (b) without and (c) with the stored beam.

Figure 2(b) と (c) の比較から無負荷時とビーム蓄積時で大きな温度変化はないことがわかる。今回更新された真空ダクトのその他の部分についてもビーム蓄積時の温度は最大で 40 度程度であった。この結果はウィグラー号機のインストール時に更新された真空ダクト

の温度と同等であり、今回更新したダクトについても冷却に関して問題は無いと判断した。

3.2 残留ガス分析

四重極質量分析器を用いて LS5 の残留ガス種を調査した。一般に電子蓄積リングの超高真空の残留ガス種は水素 (H_2) と一酸化炭素 (CO) 分子が主要である。SAGA-LS リングにおいても、以前に直線部 LS1 で行った質量分析では残留ガスは H_2 と CO が主要であり、それらの分圧比はおよそ 7:3 であった [6]。Figure 3 に LS5 で測定した残留ガス分子の質量スペクトルを示す。LS5 においても残留ガス種は H_2 と CO が支配的であり、また分圧比もおおよそ 7:3 である。今回更新された LS5 ダクトにおけるガス放出特性が他のセクションと大きく異なるとは考えづらく、ダクト内面の汚染やリークの可能性は非常に低いと結論した。

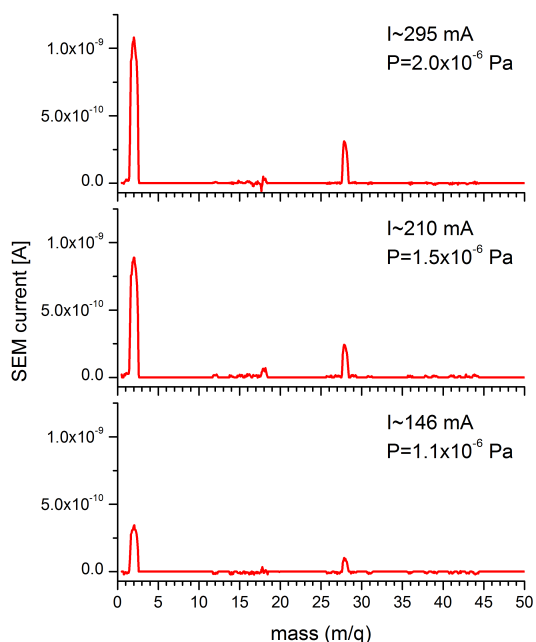


Figure 3: Mass spectra of the residual gas molecules measured in the straight section LS5. The mass spectra were measured by using the quadrupole mass analyzer.

3.3 線量測定

蓄積リングの直線部の延長線上における放射線量は制動放射ガンマ線の寄与が大きいことが知られている。制動放射ガンマ線の強度はビーム軌道上のガス密度に比例するため、線量測定を通じて LS5 と他の直線部の真空を比較することができる。そこで挿入光源が設置されておらず、直線部の延長線上にサーベイメータを設置可能なセクション (LS1, LS5, LS8) を対象として線量測定による到達真空の比較を試みた。

Figure 4 に線量測定の結果を垂直ビームサイズと共に示す。垂直ビームサイズは干渉計モニター [7] による測定値である。横軸はスキュー四極電磁石の励磁電流を示している。垂直ビームサイズが大きい状態であれば残留ガスとの散乱がビーム寿命を制限するため、線量はビーム軌道上の圧力に比例すると考えられる。測定の

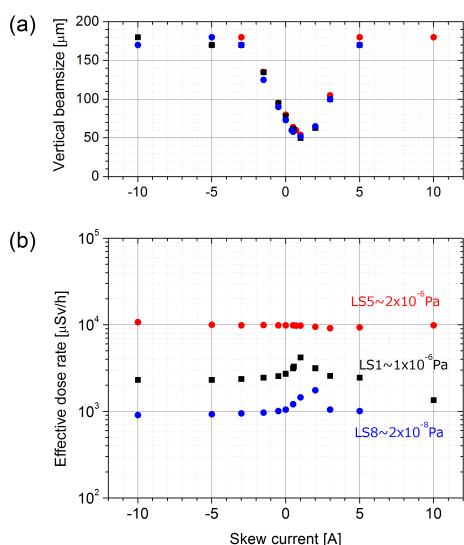


Figure 4: Dose measurement at the downstream of the straight section. The dose rate and vertical beamsize of the electron beam were measured as a function of the skew quadrupole current. The beam current was about 300 mA during the measurement.

結果、真空寿命が支配的と考えられる領域(垂直ビームサイズの測定値が 150 μm 以上)では、各直線部の線量と CCG 測定値の大小関係は一致することがわかった。このことから LS5 はビーム蓄積時の圧力が他の直線部に比べて実際に高い状態であり、CCG による圧力測定値は実態をある程度は反映していると結論した。一方、スキュー四極によって垂直ビームサイズを絞り込めばビーム寿命はタウシエック効果が支配的となる。LS5 以外の直線部 (LS1, LS8) で観測された線量の増加は、制動放射ガンマに加え、タウシエック散乱による電子損失を通じて空間線量が増加したためと考えられる。LS5 ではタウシエック効果による線量増加は非常に小さい。これは LS5 ではガス散乱による電子損失が優位であることを反映していると推定した。

3.4 真空計の設置状況

線量測定によって LS5 の到達圧力は他の直線部に比べて実際に高いことが確かめられた。しかしながら LS5 の CCG による圧力計測値の解釈には、ビームダクトで発生した光電子の影響を無視できないことがわかった。Figure 5(a) に LS5 の真空計の設置箇所の様子を示す。真空計は排気ダクトの上部に取り付けられている。ビームダクト中心から真空計入り口までは 115 mm である。真空計の近くには多極電磁石が設置されており、ビーム蓄積中は多極電磁石の On/Off による漏れ磁場の変化 (20 Gauss 程度) によって、CCG と SIP の放電電流が変化することがわかった。多極電磁石の On/Off によって LS5 ダクト内面からのガス放出量が増加するとは考えにくく、漏れ磁場による放電電流の変動は排気ダクトへ飛びこんだ光電子が CCG へ流入することを示唆している。このため、CCG の計測値は実際の圧力より高めに表示されていると考えられる。

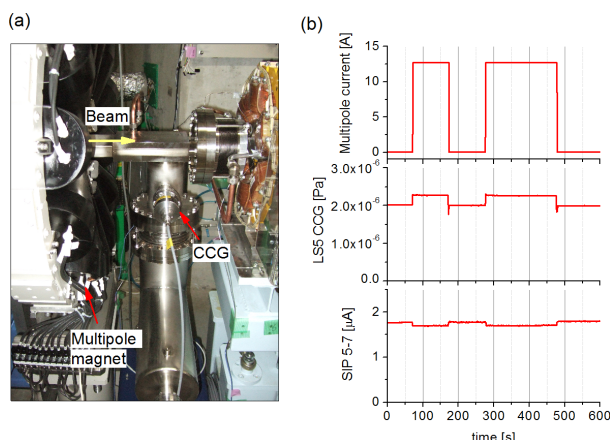


Figure 5: (a) Photograph of the CCG attached to the straight section LS5. (b) Effect of the stray magnetic field by the multipole magnet on the pressure value measured by the CCG and the SIP current. The beam current was about 300 mA during the measurement.

ウィグラー一号機が設置されている直線部の排気ダクトの構造も LS5 と同様である。ただし CCG はエルボーを介して取り付けられているために、光電子の流入効果は比較的小さいと推測した。また SAGA-LS リングの直線部の多くはダクト内面で上流偏向電磁石からの放射光を斜め受けする構造である。そのため直線部ダクト内部での光電子の発生は避けられず、真空計への光電子流入は LS5 以外の直線部でも問題になりうる。例えば挿入光源が設置された直線部 (LS3) の圧力測定値はアンジュレータ磁場の変化に敏感であり、CCG への光電子の流入効果が大いことが判明している。またリング全周で最も圧力測定値が高い直線部 (LS6) についても、真空計がエルボーを介さずに排気ダクトへ取り付けられており、計測値に対する光電子の影響が疑われる。

3.5 ウィグラー励磁中の状況

ウィグラー二号機の励磁中についてもダクト温度の監視と残留ガス分析を行った。ダクト温度の異常上昇は見られず、また残留ガス種も水素と一酸化炭素分子が主要とわかった。多極電磁石による漏れ磁場の真空計への影響はウィグラー二号機の励磁中はより明白であった。ウィグラー二号機の励磁によって、300 mA 蓄積時に CCG 計測値は 2×10^{-5} Pa となるが多極電磁石の Off によって 10^{-6} Pa 台へ減少する。ウィグラー放射によって直線部下流で発生する光電子が増加し、真空計への光電子の流入効果がより顕著になったと考えている。

4. まとめ

ウィグラー二号機の設置に伴い更新された直線部ダクトの到達真空度について調査を行った。調査は表面温度の監視、残留ガス分析、線量測定、真空計の設置状況の確認の順に行った。ダクト温度に異常上昇は見られず、また主要な残留ガス種は他のセクションと一

致したことから、新規ダクトの冷却構造の不備やリーク、ダクト内面の汚染の可能性は無いと判断した。線量測定によってLS5のビーム軌道上の圧力は他の直線部(LS1,LS8)に比べて高いことがわかった。しかしながら排気ダクトへ設置された真空計への光電子の流入効果のため、直線部の圧力測定値は実際よりも高い値が表示されている可能性が高い。対策には真空計への光電子流入の抑制が必要である。最もシンプルな対処としては、ウィグラー号機と同様にエルボーを介して真空計を取り付けることが有効と考えられる。

参考文献

- [1] S. Koda *et al.*, “Design of a Superconducting Wiggler for the Saga Light Source Storage Ring”, IEEE Trans. Appl. Super. 20 (2010) 246.
- [2] 江田他, “SAGA-LSにおける超伝導及び常伝導マグネットから成るハイブリッド型3極ウィグラーの開発と運用状況”, 日本放射光学学会誌, 24 (2011) 141.
- [3] M. Kawamoto *et al.*, “The design of superconducting wiggler beamline BL7 at SAGA-LS”, AIP conference proceedings 1234 (2010) 355.
- [4] Y. Iwasaki *et al.*, “Overview of the project of two superconducting wiggler operation and current status at the SAGA-LS electron storage ring” in these proceedings.
- [5] T. Kaneyasu *et al.*, “Installation of a second superconducting wiggler at SAGA-LS”, Proc. of SRI2015, to be published in AIP conference proceedings.
- [6] T. Kaneyasu *et al.*, “Beam lifetime study based on momentum acceptance restriction by movable beam scraper”, Nucl. Instrum. Methods A 694 (2012) 107.
- [7] Y. Takabayashi *et al.*, “Beam-size measurement system at the SAGA-LS storage ring”, Proc. of ICALEPCS 2009, p.140-142, 2009.