

あいち SR 電子蓄積リングにおけるビーム急落時の放射線測定

RADIATION MEASUREMENT AT SUDDEN DECREASE OF BEAM CURRENT IN AICHI SR STORAGE RING

木村信之介^{#, A)}, 保坂将人^{B), C)}, 石田孝司^{B), C)}, 真野篤志^{C)}, 高嶋圭史^{A), B), C)}, 大熊春夫^{C), D)}
Shinnosuke Kimura^{#, A)}, Masahito Hosaka^{B), C)}, Takashi Ishida^{B), C)}, Atsushi Mano^{B), C)}, Yoshihumi Takashima^{A), B), C)},
Haruo Ohkuma^{C), D)}

^{A)} Graduate School of Engineering, Nagoya University

^{B)} Synchrotron Radiation Research Center, Nagoya University

^{C)} Aichi Synchrotron Radiation Center

^{D)} Japan Synchrotron Radiation Research Institute

Abstract

In Aichi SR, the electron storage ring has been susceptible to persistent beam lifetime reduction since the open for public use in 2013. Currently this incidence has decreased to about 3 times per month, but this phenomenon is still one of the operational issues to be solved, because it reduces the performance for synchrotron radiation users. As is already reported in many synchrotron radiation facilities, the cause of the phenomenon of this lifetime reduction is considered to be "dust trapping". Dust trapping is a phenomenon in which positively charged dust (considered as fine particles of 0.5 to 2 μm) generated in the storage ring is captured on the electron beam orbit. Collision of nuclei and electrons of this dust causes bremsstrahlung, and electrons that lost energy quickly reduce the life span. In this article, we report on the characteristics of beam lifetime reduction in Aichi SR and some results of analysis of data from fiscal year 2013-2017.

1. はじめに

あいち SR では 2013 年の電子蓄積リング立ち上げ当初から蓄積電子ビームの電子寿命が急落する「ビーム急落現象」が生じていた。現在はこの頻度は 1 か月に約 3 回程度までおさまっているものの、この現象が生じるとシンクロtron光ユーザーに様々な負担をかけることになるため、解決すべき課題のひとつである。

ビーム急落現象の要因は「ダストトラッピング」であると考えられている。ダストトラッピングとは蓄積リング内に発生した正に帯電したダスト(0.5~2 μm の微粒子と考えられている)が電子ビーム軌道上に捕らわれる事象のことである。このダスト内の原子核と電子が衝突することにより電子の寿命は急速に低下する。

本研究ではあいち SR におけるビーム急落現象の特徴について述べ、次にこの現象の主要因であると考えられるダストトラッピングについてこれまでの研究について述べ、最後に 2013 年のあいち SR の運転開始時から現在までのビーム急落現象のデータ解析で得られた結果について述べる。

2. あいち SR のビーム急落現象

2.1 ビーム急落現象の特徴

あいち SR では 300mA トップアップ運転を行っている。図 1 に示すように、ビーム電流値が 300mA を下回ると自動的に電子を補給する。

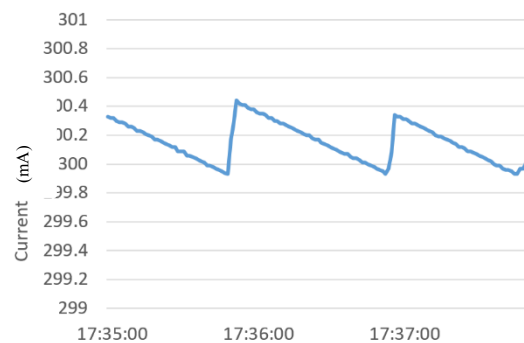


Figure 1: Beam current in top-up operation.

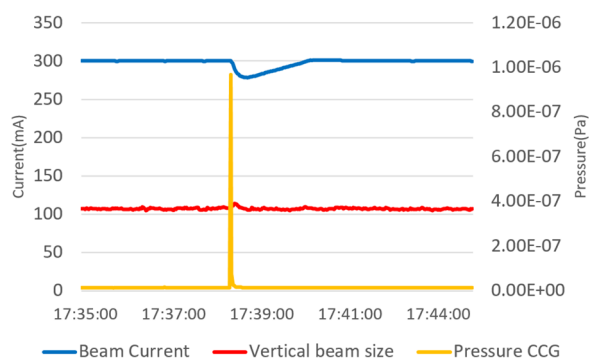


Figure 2: Beam current, vertical beam size and pressure of CCG at decrease of beam current.

#kimura.shinnosuke@i.mbox.nagoya-u.ac.jp

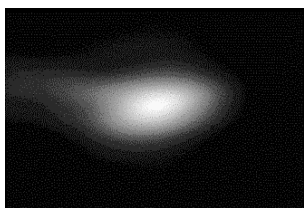


Figure 3: Beam image from SR monitor in normal condition.

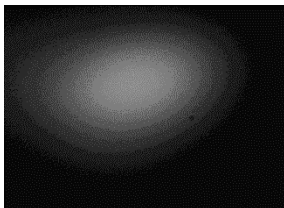


Figure 4: Beam image during beam lifetime reduction.

しかし以下の図 2 に示すようにビーム急落現象が発生したときは、電子寿命の低下に対してビームの補給が間に合わず、蓄積電流値は低下する。

また、ビーム急落現象が発生する直前(約 1 秒前)にダクト内の圧力上昇が瞬間的に観測されるケースが多い。図 2 と 4 に示すようにビーム急落現象が生じたと同時にビームサイズが増大するケースも多い。

2.2 ビーム急落現象の原因

あいち SR でみられたビーム急落現象はすでに多くの放射光施設、電子蓄積リングで観測されている。これらの先行研究ではこのビーム急落現象の原因は「ダストトラッピング」であると結論されている。ダストトラッピングとは蓄積リング内に発生した正に帯電したダスト(0.5~2 μm の微粒子と考えられている)が電子ビーム軌道上に捕らわれる事象のことである。このダスト内の原子核と電子が衝突することによって蓄積電子はエネルギーを失い電流値は急低下してしまうと考えられている。我々はあいち SR におけるビーム急落現象もダストトラッピングが原因であると考えている。

このダストは構成元素やダストサイズに依存して、電子ビームから受ける入熱パワーに対して熱平衡状態になる場合と、その前に蒸発・分解してしまう場合が考えられる。電子ビームからの入熱パワーとダストの熱輻射が熱平衡状態になり、長く電子ビームに捉えられるとき、電子ビームのエネルギー損失も大きく、ビーム急落現象は大きな電流値急落を示す。逆に、ダストが熱平衡状態になる前に蒸発・分解してしまうとき、ビーム急落現象は小規模な電流値低下を示す。

ダストトラッピングを引き起こすダストの発生過程は先行研究から以下の 3 通りが推察されている。

- 施設建設時に真空ダクト内に混入していた
- 高電荷を印加して運転するイオンポンプ内部で発生した
- 真空ダクト内部の真空封止型挿入光源のような複雑な構造物と電子ビームが作る電磁場の相互作用による放電に起因して発生した

特に真空内での放電は、瞬間的な圧力上昇を起す。この圧力上昇は上述の図 2 のように、あいち SR でも確認されており、放電によるダスト発生の有効な根拠であると考えられる。

3. 先行研究からわかったこと

ダストの 3 つの発生過程は、いずれにしてもコンディショニング効果によってダストの発生頻度を減少させることができることもわかっている。

4. あいち SR での過去データ解析

4.1 ビーム急落現象

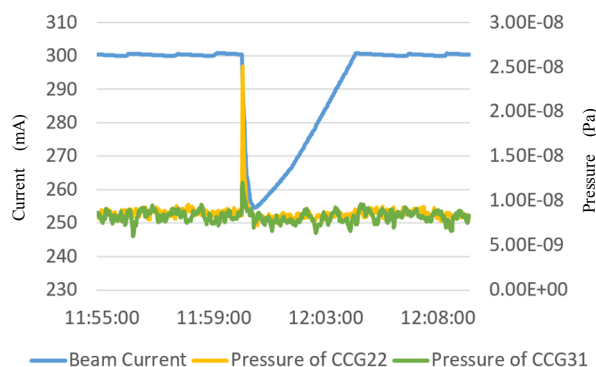


Figure 5: Beam Current and CCG pressure in 4 July 2018.

図 5 では、2 台の CCG で瞬間的に圧力上昇した。この場合、ビーム急落現象が発生するちょうど 1 秒前に CCG が反応していた。

あいち SR では真空圧力の測定はコールドカソーゲージ(CCG)を用いている。

4.2 ビーム急落現象の発生頻度

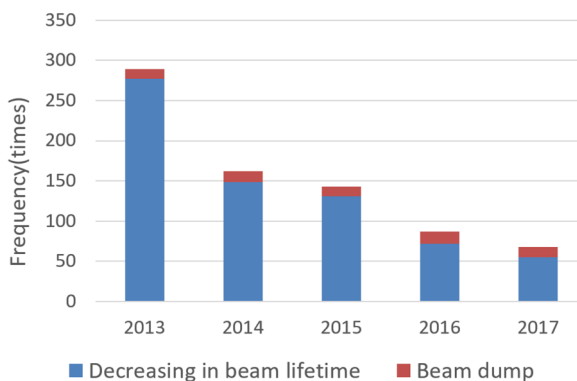


Figure 6: Incidence of beam current and beam dump.

ビーム急落現象の回数は毎年減少しており、コンディショニングの効果が確認できる。

ビームダンプの回数はそれほど変化なく、毎年約 10 件確認されている。これはコンディショニング効果がほとんどないことを意味しており、ダストトラッピング以外の原因で発生している可能性が高いと考えられるが、詳しいことはわかっていない。

4.3 圧力上昇の発生頻度

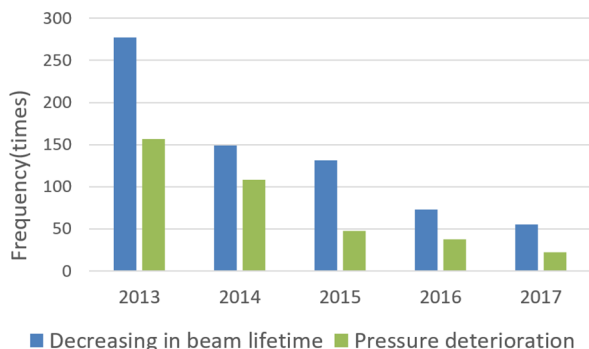


Figure 7: Incidence of pressure rise.

圧力上昇はすべてビーム急落現象に伴って生じた回数である。2017年であれば、55回のビーム急落現象の内、40%にあたる22回の圧力上昇があった。

先行研究では圧力上昇の原因である真空内放電はコンディショニングにより減少すると説明されていた。このグラフからも同様に、あいちSRでの真空内放電のコンディショニング効果が確認できる。

2013年(3月以降)は運転している24か所のCCGすべての合計で157回の圧力上昇が観測されている。そのうち87回が特定の箇所を設置されたCCGで観測された。その箇所においてイオンポンプあるいはCCGに放電原因があったことが予想される。

2013年以降は特定の場所だけ圧力上昇が観測されるといったことは見られなかった。

4.4 低下した際の電流値ごとの圧力上昇の頻度

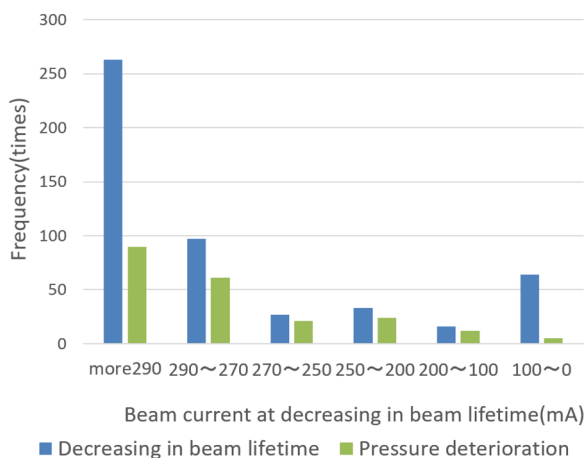


Figure 8: Incidence of pressure rise.

Figure 8は2013年から2017年までのビーム急落現象発生時に到達した最低電流値のごとの回数の合計である。

ビーム急落現象が起きた際の最低電流値が290mAまで、つまり、小さな電流値低下の際は圧力上昇が併発した割合が全体に比べかなり低い。

また、ビーム急落現象が起きた際の最低電流値が100mA以下、つまり、ビームダンプかそれに近い電流

値が低下している場合も同様にして圧力上昇が併発した割合が全体に比べかなり低い。ことがわかった。

逆に、蓄積電流値が100mA以上、270mA以下の場合、圧力上昇が併発する割合は70%以上となり、多くの場合圧力も増大していることがわかった。

これらのことから、一つ目に、電流値低下が小さいときは、その原因であるダストトラッピングを引き起こしたダストの発生原因が真空内放電ではない可能性が推察される。イオンポンプなどの高電圧印加時に発生したものか、真空ダクト内部にもともと存在していたダストである可能性が考えられる。二つ目に、ビームダンプのように電流値の低下が大きいときは、ダスト以外の原因によって電流値低下が起きたと考えられる。RFキャビティの反射により強制的に電流値を低下させたケースも考えられるが、はっきりとしたことはわかっていない。

5. 結果と考察

2013年3月のあいちSR通常運転開始以来、ビーム急落現象の発生頻度は年々減少している。ビーム急落現象に伴う圧力上昇の頻度も減少している。これらのことから、ダストトラッピングを引き起こすダストの発生頻度がコンディショニング効果により減少していると考えられる。しかしビームダンプは毎年一定数発生しており、かつ、ビームダンプが生じた際に圧力上昇はほとんど併発していなかったことから、ビームダンプはダストトラッピング以外の原因で発生していることが推察される。

また、ビーム急落の際、電流値低下が290mAまでの小規模な急落の場合、圧力上昇が併発しないケースが多く確認された。このことからダストの発生原因が真空内の放電ではないと考えられるが、もともとダクト内に付着していたダストによるものか、イオンポンプの高電荷印加に起因して発生したものはわかっていない。

圧力上昇の観測地点ごとの測定結果については、2013年は特定の箇所のCCGで多く確認されたが、2014年以降観測箇所によって圧力上昇の回数が大きく異なるということはなかった。2013年のみ圧力上昇が特定箇所に偏在した原因は現時点では不明であるが、今後も解析を進めたい。

6. 今後の展望

ビーム急落現象とダストトラッピングに因果関係があること、ダストが発生する際には頻繁に圧力上昇が観測されており、真空内放電が生じている可能性が高いことが判明したが、ダストの発生箇所は特定できていない。

今後はダストトラッピングが生じた際に制動放射によって生じるγ線が真空ダクトと衝突してダクト外部に放射される2次放射線を観測することで、逆算的にダストの発生箇所を特定できると推察される。よって、2次放射線の測定装置であるBergoz社製のロスモニタをリング周上に複数台設置し、データ解析を続ける予定である。

謝辞

本研究は、多くの方々のご指導、ご協力の下で行われました。その成果を加速器学会で発表することができ、心より感謝いたします。

参考文献

- [1] Y. Tanimoto *et al.*, “電子貯蔵リングでのダストラッピング現象の観察と発生要因に関する実験的研究”, 2009, pp. 1-87.
- [2] Y. Tanimoto *et al.*, “Direct observation of the dust-trapping phenomenon ”, Proceedings of IBIC2012, Tsukuba, Japan ,2012, pp. 1-9.
- [3] Darren R.C. Kelly *et al.*, “Dust In Accelerator Vacuum Systems”, DESY, Notkestr.85, 22603 Hamburg, Germany, pp. 1-5.