

話 題

放射光リング PF-AR における
ダストトラッピング研究の現状

谷本 育律*1・本田 融*2・坂中 章悟*2・内山 隆司*2・野上 隆史*2

Recent Progress in Dust-Trapping Research at the Photon Factory Advanced Ring

Yasunori TANIMOTO*1, Tohru HONDA*2, Shogo SAKANAKA*2,
Takashi UCHIYAMA*2 and Takashi NOGAMI*2

Abstract

For decades, electron storage rings have been afflicted by irregular phenomena that give rise to a sudden decrease in the beam lifetime. These phenomena are ascribed to the trapping of positively ionized macroparticles (“dust”), and are still problematic to the stable operation at the Photon Factory Advanced Ring (PF-AR). Careful observations for many years led us to a hypothesis that two kinds of electric discharges in vacuum may trigger the dust trapping, and the measures we took on the basis of this hypothesis, namely, switching distributed ion pumps off and conditioning discharge sources with higher current beams, could significantly suppress the occurrence of the phenomena. Experimental demonstration of the hypothesis was also carried out at PF-AR, and proved that the electric discharges surely triggered the dust trapping. A remarkable result was additionally obtained in this experiment; a dust particle trapped by the beam was visually observed with video cameras. Visual observation of trapped dust would play a key role in further investigation of the dust-trapping mechanism.

1. はじめに

電子ビームを貯蔵するリング型加速器では、運転中に突然ビーム寿命が急落することがある。直ちに回復することも多いが、長時間にわたって寿命低下状態が持続することもある。このビーム寿命急落現象には、以下のような特徴がある。

- (1) 寿命急落に同期して、ガンマ線のバーストがビーム進行方向前方で観測される¹⁻⁵⁾
- (2) 正電荷ビーム（陽電子や陽子）を蓄積するリングでは発生しない³⁻⁹⁾
- (3) 加速器建設や改造の直後に比較的多く観測される^{10,11)}

これらの状況証拠から、寿命急落は正に帯電した微小粒子が電子ビームに捕獲される「ダストトラッピング」によって引き起こされると考えられている。(1)は、電子ビームがダストによって散乱される際、制動放射ガンマ線をビーム進行方向前方に放出するため、(2)は、ダストは光子や電子の衝撃により通常正に帯電し、正電荷ビームには安定に捕獲されないためと考え

られる。(3)は、真空ダクトや真空機器の製造時や設置時にダストが多く混入した場合や、表面の“コンディショニング”が不十分な場合にダストが発生しやすいためと考えられる。

ダストトラッピングが発生すれば、通常よりも速くビーム強度が減少するので、加速器を利用する実験が大きく妨げられてしまう。加えて、制動放射ガンマ線が発生することにより、放射光源リングでは実験フロアでの放射線安全に影響し、高エネルギー物理実験用リングでは測定器へのノイズ上昇を招くなどの弊害もある。

加速器におけるダスト問題の歴史は古く、約半世紀前の1960年代初頭に電子陽電子コライダー AdA において、ダストの影響でビームが瞬時に失われる現象が発生していたとのことである¹²⁾。持続型のダストトラッピングが問題視されるようになったのは1980年代に入ってからで、CERNの反陽子リング AA で突然のエミッタンス増大現象が観測されたこと¹³⁾、また第2世代放射光リングの PF-ring¹⁴⁾、NSLS¹⁵⁾ で突然のビーム寿命急落現象が観測されたことが文献に記

*1 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第七研究系(E-mail: yasunori.tanimoto@kek.jp)

*2 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設 加速器第七研究系

されている。その後も、TRINSTAN AR²⁾、DCI³⁾、Super-ACO³⁾、HERA⁷⁾、DORIS⁷⁾、PETRA¹⁶⁾、CESR¹⁷⁾、ESRF¹⁸⁾、KEKB⁴⁾、PEP-II⁵⁾、BEPC⁹⁾などの多くの加速器でダストトラッピングによるとされるビーム寿命急落現象が報告されている。

このようにダストトラッピングは古くから問題視されてきた現象であるが、未だ根本的な解決には至っていない。これまでに行われてきた対策として、ダストの主要な発生要因とされる分布型イオンポンプ (DIP, ビーム路に沿って設置された電磁石磁場を利用するイオンポンプ) を停止^{9,11)}またはゲッターポンプに交換したり¹⁹⁾、あるいは放射光リングでは貯蔵ビームを陽電子へ切り換えるといった運轉變更が行われたり⁶⁾したこともあった。

現象の理解に向けて幾つかの観測や再現実験も行われてきた。ダストトラッピングの特徴である制動放射ガンマ線を観測してダストの運動を調べる実験^{3,20,21)}、および、サンプルダストをビームダクト内に導入したり^{16,20)}、ビームダクトに衝撃を与えてダストを発生させたりして⁵⁾、ダストトラッピングを再現させる実験も行われた。

また、ダストトラッピングの理論的な研究も進められてきた。一般にダストはビームとの相互作用によって高温になり、蒸発や分解によって短時間の内に失われると考えられている。ところが、ビームダクト内に存在するダスト種で、高融点で低蒸気圧のシリカ (SiO₂) やチタンなどの場合には、ビームからのエネルギー付与と熱放射によるエネルギー放出によって熱平衡が成り立ち、長時間のトラッピングが可能になることも理論的に示されている^{22,23)}。

また、ダスト種を仮定すれば、ダストトラッピング時の低下したビーム寿命から、それを与えるダストの質量 (およびサイズ) を推定することもできる^{17,23)}。ただし、ダストトラッピング中のビームロス、電子ビームとダスト原子核との制動放射散乱のみによって引き起こされ、かつ、バンチ通過で生じるダストの横方向振動の振幅がビーム 1σ 以内に収まっているという仮定を用いる。その場合、ビーム寿命 τ とダスト直径 d との関係式は次式で与えられる。

$$\frac{1}{\tau} = \frac{\sigma_b c n}{12 A_{atom} m_n \sigma_x \sigma_y L} d^3 \quad (1)$$

ここで、 σ_b は制動放射散乱断面積、 c は光速、 n はダストの密度、 A_{atom} はダスト原子の質量数、 m_n は統一原子質量、 $\sigma_x \sigma_y$ は横方向 rms ビームサイズ、 L はリング周長である。一般的なダストの場合、直径がサブ

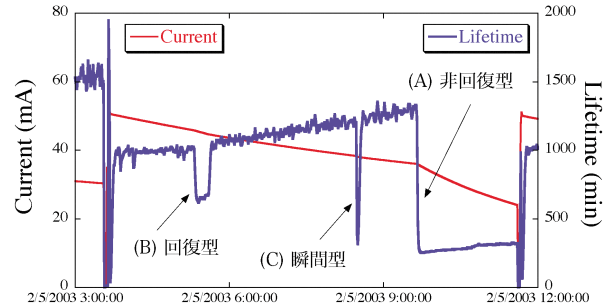


図 1 ビーム寿命急落現象の 3 つのパターン

- (A) 非回復型：急落状態が長時間持続し、回復する兆候を示さないもの。寿命低下の度合いが大きい場合が多い。ビームがなくなるまで続くこともあり、ビームの再入射が必要となる。
- (B) 回復型：急落後しばらくして回復するもの。急落の程度は比較的小さい場合が多い。急落後、緩やかに回復していく場合と、あるとき突然回復する場合がある。
- (C) 瞬間型：急落が瞬間的に終わるもの。急落の程度は小さい場合が多く、ユーザー運転に与える影響も小さい。ただし、まれにビームが大きく削られる場合もある。

ミクロンから数ミクロンのとき、実際に観測されているようなビーム寿命を与える。

本研究では、寿命急落現象を持続時間の違いによって 3 パターンに分類している。図 1 に、それらすべてが偶然 1 フィル内に発生したときの例を示す。

本研究では、“安定な”ダストトラッピングという意味で、(A)と(B)を合わせて持続型急落と呼ぶこともある。

2. PF-AR におけるビーム寿命急落現象

2.1 研究の背景

Photon Factory Advanced Ring (PF-AR) は、元々は TRISTAN Main Ring (MR) への入射用 Accumulation Ring (AR) として 1983 年に運転が開始され、寄生的に貯蔵モードで放射光利用が行われた第 1 世代の放射光リングでもあった。貯蔵モードでは、寿命急落現象が頻繁に観測され、1990 年代にはダストトラッピングの精力的な研究も行われた。ダストトラッピングに同期したガンマ線の観測実験^{2,20)}、サンプルダストを用いたトラッピング実験^{16,20)}、トラップされたダストの挙動に関するモデル計算²⁴⁾などの成果が報告されている。また、陽電子蓄積により寿命急落問題が解消されることの確認や発生統計を用いたダストトラッピングの定量化も行われた⁸⁾。

TRISTAN 実験が終了した 1995 年以降、AR は放射光専用リングとなり、名称も PF-AR と変更された。

2001年には「PF-AR 高度化改造」と称して、より安定で使いやすい放射光源とするための大規模な改造が行われた。具体的には、ビームの長寿命化と軌道の安定化、放射光ビームラインの増強、老朽化機器の更新、などを目的として、リング全周にわたって真空ダクトや真空ポンプ、ビーム位置モニタ、補正電磁石などが更新、追加された²⁵⁾。PF-ARの主要なパラメータを表1に示す。

2002年からの立上げ運転以降、真空ダクトのコンディショニングも順調に進み、定常時のビーム寿命は改造前の約10倍にまで伸びた。ところが、寿命急落

現象はこの改造後さらに頻繁に発生するようになった。そこで、この問題を改善すること、およびダストトラッピング現象そのもののメカニズムを調査すること目的として、本研究が開始された。

2.2 寿命急落現象の統計的手法による解析

まずは寿命急落現象の発生に関する統計データを纏めることから開始した。図2は2002年から2009年のPF-ARの運転において、ビーム寿命が約7割以下に低下したすべての寿命急落現象をパターン毎にカウントし、発生頻度の推移として表したグラフである。寿命急落の基準を7割以下とした理由は、真空封止型挿入光源のギャップ変更やDCCTの測定誤差などによって、運転中の寿命が1~2割変動することがあり、それらと区別するためである。

改造後数年はすべてのパターンにおいて発生頻度が徐々に減少する傾向が見られたが、その後は有意な減少傾向は見られなくなった。2003年秋、2005年秋、2007年春では発生頻度が再び上昇することもあったが、これらの頻度増加と明確な因果関係を持つトラブルや運転条件の変更などはなかった。短期的には比較的安定な運転状態が続いた後でも一旦急落が起こり出すと続けて発生する傾向も見られており、それらが頻度の変動を起こす一因にもなっている。このように、ビーム寿命急落現象は現在でもPF-ARにおける安定な放射光実験を妨げる大きな要因となっている。

PF-ARにおける寿命急落現象の特徴をより詳しく調査するため、2008年10月から2009年6月までの4574時間の運転における寿命急落現象を

- (1) 急落後の寿命から推定されるダストサイズ

表1 PF-ARの主要パラメータ

Beam Energy (GeV)	6.5
Injection Beam Energy (GeV)	3.0
Initial Stored Current (mA)	62
Bunch Number	1
Harmonic Number	640
Circumference (m)	377
Beam Emittance (nm·rad)	293
RMS Beam Size x/y (mm)	1.54/0.15
Beam Lifetime (h)	24@60 mA
Dynamic Pressure (Pa)	3×10^{-7} @60 mA
Main Vacuum Pumps	TSP×184, DIP×56, SIP×111 ^{*1}
Main Beam-duct Material	OFHC Copper
Number of Insertion Devices	6 (including 5 In-vacuum Undulators)

¹ TSP: Titanium Sublimation Pump, DIP: Distributed Ion Pump, SIP: Sputter Ion Pump

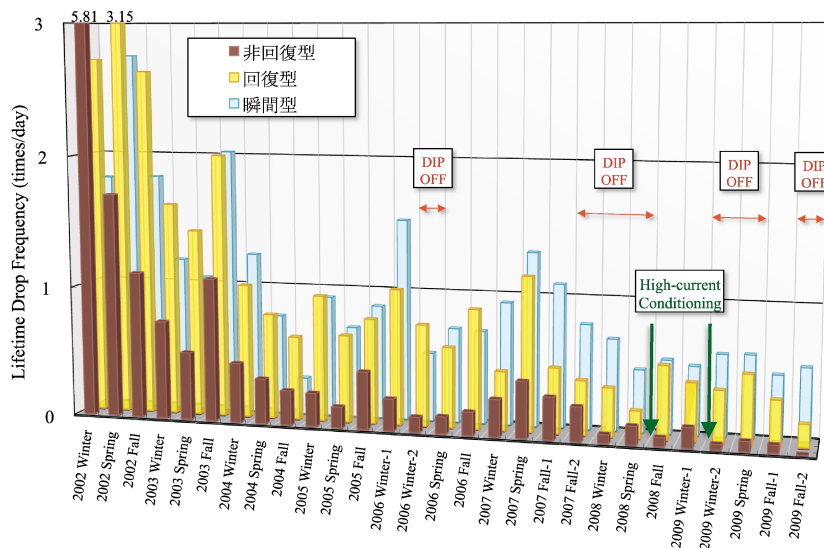


図2 PF-ARにおけるビーム寿命急落現象の発生頻度の推移

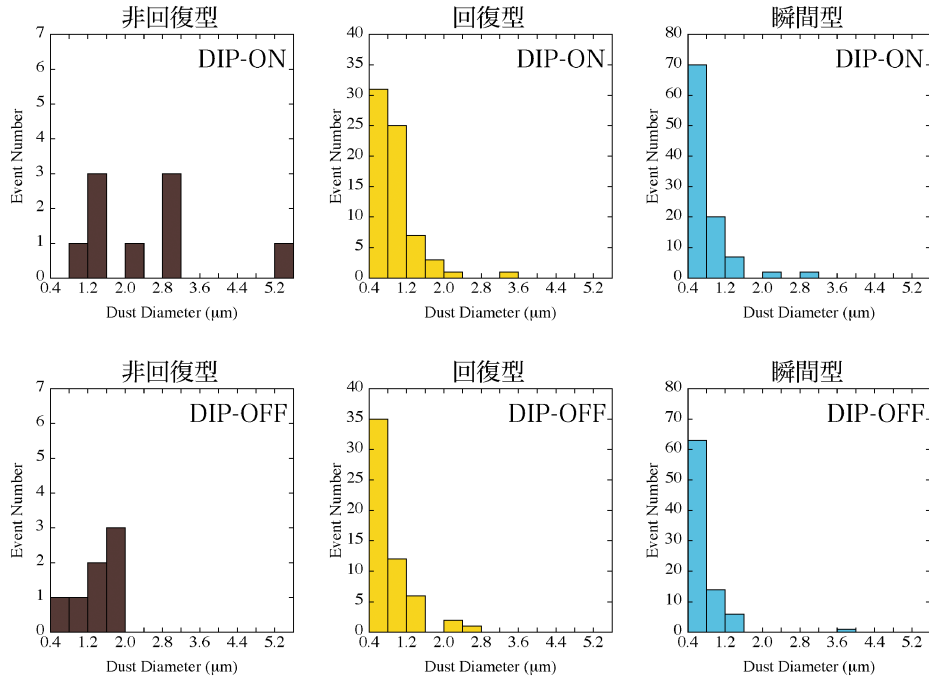


図3 ダストサイズの調査結果 (上段: DIP-ON, 下段: DIP-OFF)

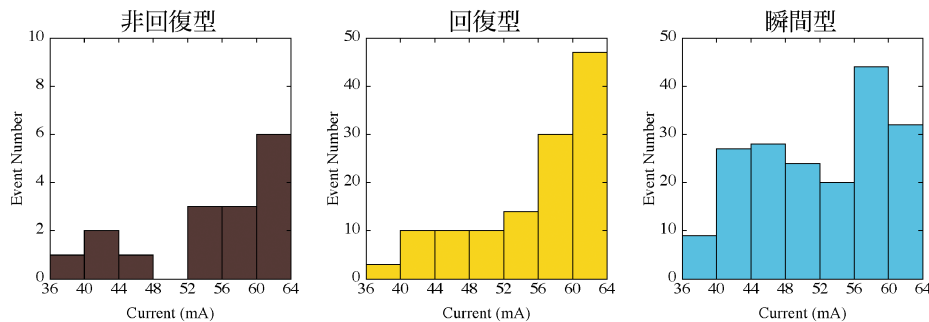


図4 寿命急落発生時のビーム電流値の分布

(2) 寿命急落発生時のビーム電流値の2種類に関する統計として纏めた。

まず、ダストサイズの調査結果を、DIPをONした状態(2185時間)とOFFした状態(2389時間)での運転に分けて図3に示す。ダスト種を一律にチタンと仮定し、急落後の寿命とダストサイズの関係式は式(1)を用いた。

ダストサイズに関する統計での最も顕著な特徴は、瞬間型や回復型ではほとんどの場合が直径 $1.2\mu\text{m}$ 以下(ビーム寿命200分以上)のダストであったのに対し、非回復型の場合は大半が $1.2\mu\text{m}$ 以上の比較的大きいダストであったことである。すなわち、 $1.2\mu\text{m}$ 以下のダストは安定にトラップされないか、あるいはトラップされてもいずれ消滅する場合がほとんどであった。また、非回復型の寿命急落では、DIPを

ONしたときの方が、比較的大きいダストが出やすい傾向も見られた。

次に、寿命急落が発生したときの電流値の分布を図4に示す。すべてのパターンにおいて、電流値の高い方が、寿命急落が発生しやすい傾向が見られた。電流値の高い方が運転時間が短い(ビーム寿命が短い)にも拘わらず発生回数が多かったため、明らかに電流値の高い方が、寿命急落が発生しやすかったといえる。

2.3 なぜPF-ARでは持続型急落が発生しやすいのか

PF-ARは他の加速器と比べても持続型寿命急落(“安定な”ダストトラッピング)が起りやすい加速器である。例えばKEKのもう1つの放射光源PF-ringでは、ここ10年以上、通常ユーザー運転では瞬間型の寿命急落が発生するのみで、持続型の寿命急

落は発生していない。また、1990年代以降に建設された多くの第3世代光源やBファクトリでも、持続型寿命急落はほとんど発生せず、運転上の問題にはなっていないようである。

PF-ARには持続型急落に適した比較的大きめのダスト源が多いことが主な要因かもしれないが、PF-ringもほぼ同様な真空機器構成であり、それだけが理由になるとは考えにくい(ただし、主要なビームダクトの材質は、PF-ARは無酸素銅で、PF-ringはアルミ合金である)。

したがって、PF-ARは、ビーム自身が本質的にダストを安定にトラップするのに適しているのではないかと考えられる。ダストが長時間のトラップに耐えるということは、先に述べた熱平衡が成立していることを意味する。PF-ARのビームでは、ダストに付与する単位時間当たりのエネルギーが小さく、蒸発や分解に至りにくいと考えられる。そこで、PF-ARのビーム(電流値40~60 mA, エミッタンス290 nmrad)の横方向1 σ のフラックス密度を計算してみると、 $3\sim 4 \times 10^4$ A/m²となる。一方、PF-ringのビーム(電流値300~450 mA, エミッタンス36 nmrad)のフラックス密度は、 $2\sim 3 \times 10^6$ A/m²である。このように、ビームフラックス密度に2桁弱の差があることが、安定なダストトラッピング発生の有無を生じていると考えることもできる。ちなみに、低エミッタンスの第3世代光源や大電流のBファクトリのビームフラックス密度も、概ね 10^6 A/m²以上である。

3. ビーム寿命急落現象の抑制¹¹⁾

3.1 DIP-OFF 運転

先に述べたように、ダスト発生要因の1つにDIPがある。PF-ARには56台の偏向電磁石があり、その真空ダクト内にビーム路に沿ってDIPが設置されている。2001年の真空ダクト更新に合わせてDIPもすべて更新され、その際、負の高電圧(-5.5 kV)を印加するinverted-typeのDIPを採用した。正電荷のダストを引きつけることを期待しての採用であったが、期待に反して改造後も寿命急落現象は発生した。

DIPに印加する高電圧は、設計上は安全な値(絶縁破壊基準電圧の1割程度)であるが、スパッタリングによって電極の表面状態が絶えず変化していることもあり、まれにスパークが発生する。その際に、ダストが放出されると考えられる。そこで、スパークの抑制のため印加電圧を-4.5 kVに下げた運転を数年間続けてみたが、有意な効果は得られなかった。すな

わち、確実にDIPの効果を量るにはDIPを完全にOFFする必要があった。ところが、PF-ARのビームは高エネルギーでエミッタンスが大きいいためTouschek寿命が長く、ビーム寿命はガス散乱によるものが支配的である。したがって、DIPをOFFすることは定常時のビーム寿命の低下に繋がる。そこで、2006年からの3年間で計61台のスパッタイオンポンプ(SIP)を増設して、DIP-OFF運転を可能にした²⁶⁾。その結果、非回復型寿命急落の発生頻度が0.25 times/day (76 times in 7177h)から0.14 times/day (23 times in 3831h)に減少した。寿命急落の約4割がDIPからのダストによるものであったことになる。

3.2 大電流による放電源コンディショニング

寿命急落の約6割を占めるDIP以外からのダスト発生要因を探索する目的で、急落発生時の真空データを詳しく調査したところ、多くの場合で寿命急落に同期して瞬間的な圧力上昇が発生していたことが判明した。その場所は同一ではなく、様々であった。一例として図5に真空封止型挿入光源ID-NE3において磁石列ギャップを10 mmまで閉じた直後に瞬間的に圧力が上昇し、ビーム寿命が急落した例を示す。

この現象は、DIPのように高電圧を印加する機器でなくても、ビームからの電磁場による放電(DC的な高電界による放電や高周波によるマルチパクタ)でダストが発生したことを示唆している。図4において蓄積電流値の高い方が発生頻度が高い傾向にあった理由の一つとして、このようなビームからの電磁場による放電でのダスト発生が考えられる。

この種のダスト発生を抑制するには放電源のコンディショニングを行うことが有効であると考え、ユーザー運転に先だって通常よりも約25%高い電流を蓄積する試験を行った。そのときの様子を図6に示す。参考のため、試験中に圧力上昇が頻繁に観測されたストリップライン型フィードバックキッカー一部の真空

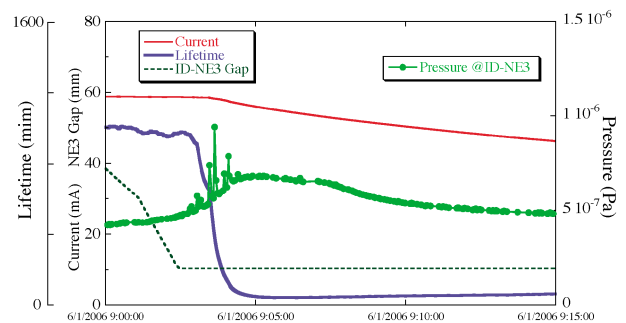


図5 挿入光源内放電による寿命急落発生例

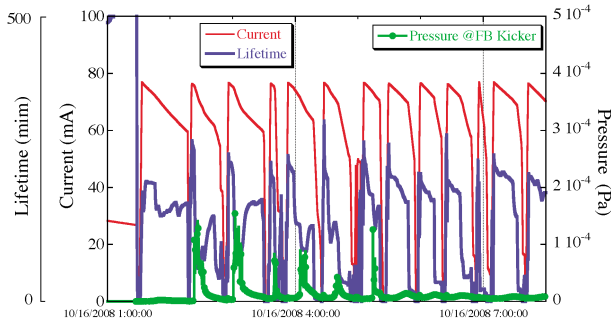


図6 大電流コンディショニング試験

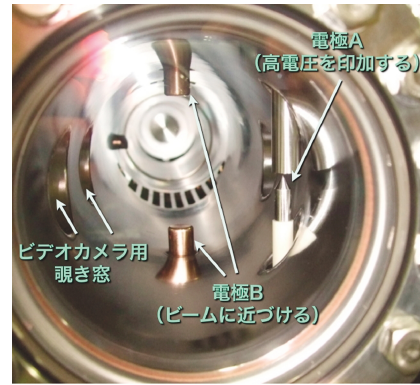


図7 放電発生装置の内部写真

データも合わせて示した。予想通り高電流値では高い頻度で寿命急落が発生した様子が示されている。

このような大電流によるコンディショニング試験を計16時間行い、その後のユーザー運転ではDIP-OFFの条件も合わせて、非回復型の寿命急落発生頻度が0.07 times/day (7 times in 2389h)に減少した。対策前に比べると、約3割にまで減少したことになる。

4. ダストトラッピング実証実験²⁷⁾

4.1 実験目的

PF-ARにおけるダストトラッピング研究のもう一つの目的は、現象のメカニズムを調べることである。そのために、まずはダストの発生要因を掴むことから開始した。

PF-ARやPF-ringでの運転経験から、真空中の放電現象がダストトラッピングを引き起こしている説が有力視された。その放電の形態は

- (1) 高電圧の印加による放電
- (2) ビームからの電磁場による放電

の2種類に大別できる。そこで、これらを実験的に実証するために、PF-ARにおいて人為的な放電発生装置を用いたダストトラッピング再現実験を行った。

4.2 実験装置

2種類の放電を意図的に発生させることのできる装置をPF-ARに設置した。その装置の内部写真を図7に示す。

2種類のダスト源は、それぞれ1対の可動電極である。電極AはDIPでの放電を模擬したもので、上側電極は接地されており、下側電極に±7.5 kVまでのDC高電圧を印加する。材質は、接地電極は表面にチタンがコーティングされたステンレス鋼で、高压電極の尖った先端部はチタンである。電極Bはビームからの電磁場で放電を起こしやすい機器を模擬したもので、1対の可動電極(上:B-1, 下:B-2)をビーム

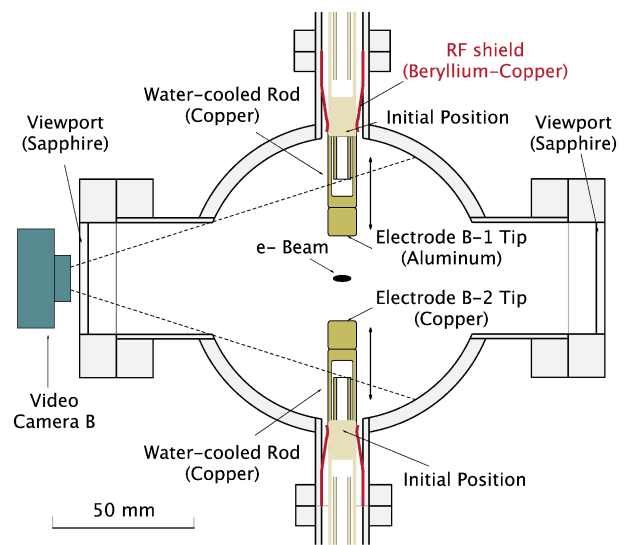


図8 電極B部断面図

軌道鉛直線上に配置した。それらを鉛直方向に動かしてビームに近づけることで放電を発生させる。B-1とB-2のどちらの電極も接地されている。ステム部はどちらも無酸素銅製で、先端部は電極B-1がアルミニウム合金製(写真は無酸素銅製のときのもの)、電極B-2は無酸素銅製である。ビームからの電磁場による発熱を低減するため、ステム部内には水冷パスが設けられており、さらに電極挿入ポートとの隙間にはベリリウム銅製のRFシールドフィンガが挿入されている。図8に電極B部の断面図を示す。

すべての電極は実験中、遠隔操作によって位置調整が行われる。ユーザー運転中はビームに影響を及ぼさないよう、安全な位置まで格納される。また、電極材質によるダストトラッピング発生の違いを調査できるように、すべての電極先端部は交換可能となっている。

発生した放電の観察は、2種類の方法で行う。1つ

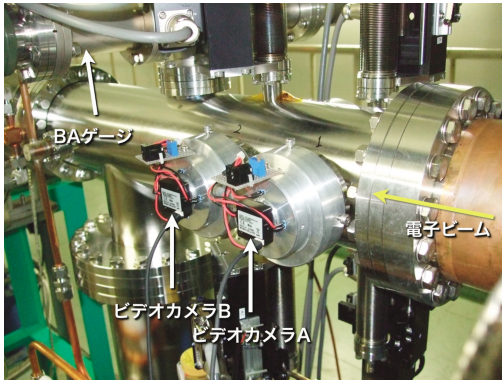


図9 放電発生装置の外部写真

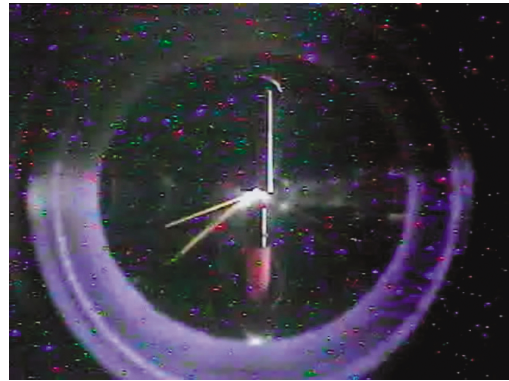


図11 電極 A での放電の例 (文献 27 より転載)

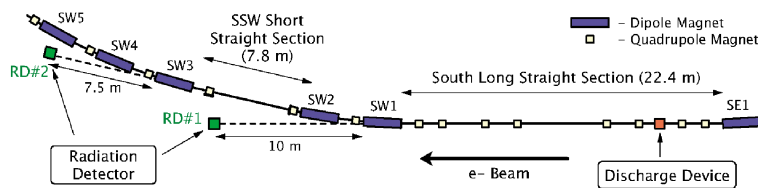


図10 放電装置と放射線検出器の位置関係 (文献 27 より転載)

は視覚的な観察で、サファイア製ビューポートを介して A と B の 2 対の電極を 2 台のビデオカメラ (KPC-S700CHBA with Sony Super HAD CCD) で監視する。カメラ映像と音声はハードディスクに 30 frames/s のデジタル動画として記録される。もう 1 つは、放電時に生じる瞬間的な圧力上昇を、電極の下流側直近に配置した Bayard-Alpert ゲージ (BAG) で観測する。

放電発生装置をリングに設置した状態での写真を図 9 に示す。

ダストトラッピングの証拠として、トラップされたダストからの制動放射ガンマ線を観測する。放電発生装置のある長直線部の延長線上と、偏向電磁石 2 台を越えた次の短直線部の延長線上それぞれに 1 台ずつ放射線検出器 (Radiation Detector; RD) を設置した (図 10)。前者が RD#1, 後者が RD#2 である。使用した放射線検出器はアロカ社製 MAR-782 のシリコン半導体検出器である。ビーム蓄積時の放射光によるバックグラウンド (X 線) を遮蔽するため、検出部を厚さ約 60 mm の鉛で遮蔽した。

4.3 放電によるダスト生成の実証

放電装置によるダスト発生実験を、ユーザー運転中と同様のビーム条件 (ビームエネルギー: 6.5 GeV, ビーム電流値: 最大 62 mA) の下で行った。

まず, DIP を模擬した高電圧印加実験の手順を説

明する。高電圧を印加する前に上下の電極を同時に動かし、その間隔を 1 mm まで閉じる。この場合、ギャップ中心は常にビームレベルに保たれている。そして、下側電極に DC 高電圧を印加し、放電が発生するまで 200 μm 刻みでギャップを閉じていく。

図 11 に、電極 A に -5.0 kV を印加した実験中にビデオカメラで撮影された放電の一例を示す。放電時の発光の大きさにはばらつきがあり、そのとき観測される真空圧力の上昇も、定常時の 10^{-7} Pa 台から 1 桁上昇する場合もあれば、ほとんど上昇が観測されない場合もある。

高電圧印加実験の一例として、電極 A に -5.0 kV の高電圧を印加したときの実験データを図 12 に示す。図中の矢印で示された時刻で放電が発生し、その直後にビーム寿命が 22 時間から 2 時間まで急落して、放射線量率の増加も観測された。

この実験データは以下の事実を示している。

- (1) 寿命急落発生時、真空圧力の上昇は瞬間的であるのに対し、ビーム寿命の低下状態は約 18 分間持続した。すなわち、寿命低下の原因は真空悪化によるものではない。
- (2) ビームロスレートと RD#1 (放電装置のある長直線部の延長上に設置された放射線検出器) での放射線量率が良い比例関係にあった。すなわち、この長直線部に存在していたダストがビームロス

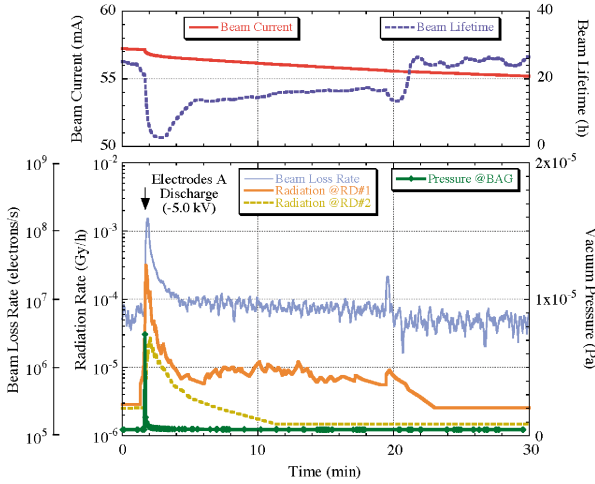


図12 電極 A の放電でダストトラッピングが発生したときの観測データ (文献 27 より転載)

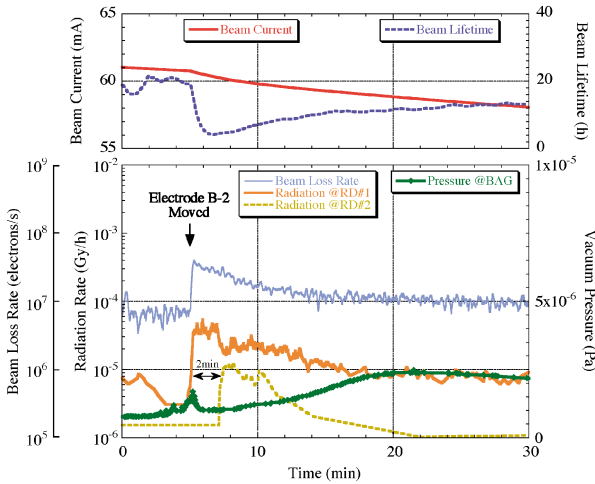


図13 電極 B の放電でダストトラッピングが発生したときの観測データ (文献 27 より転載)

の主要原因である。

これらの理由により、高電圧印加による放電でダストが発生し、それがビームにトラップされて寿命急落現象を引き起こしたと結論づけられる。

また同様な実験結果は、ビームからの電磁場によって放電を発生させる電極 B を用いた実験でも得られた。その一例として、下側電極 B-2 をビームに近づけたときに寿命急落が発生したときのデータを図 13 に示す。

この実験では、電極 B-2 先端部がビームから 22 mm 下の位置まで近づいたとき、ビデオカメラで弱い緑色の発光が数回観測され、直後にビーム寿命の急落と放射線量率の上昇が観測された。RF シールドが取り付けられた電極 B と挿入ポートの隙間 (図 8 参照)

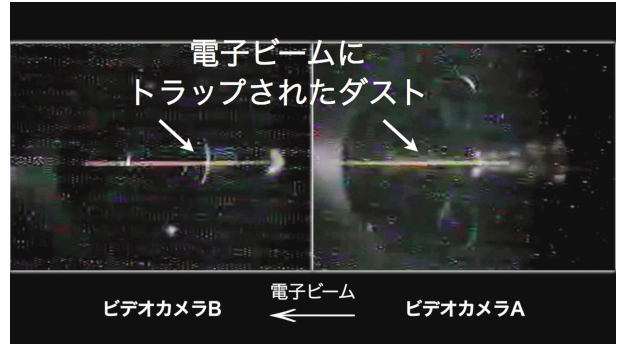


図14 トラップされたダストを初めて捉えた映像 (この動画は web 上 28 で見ることもできる)

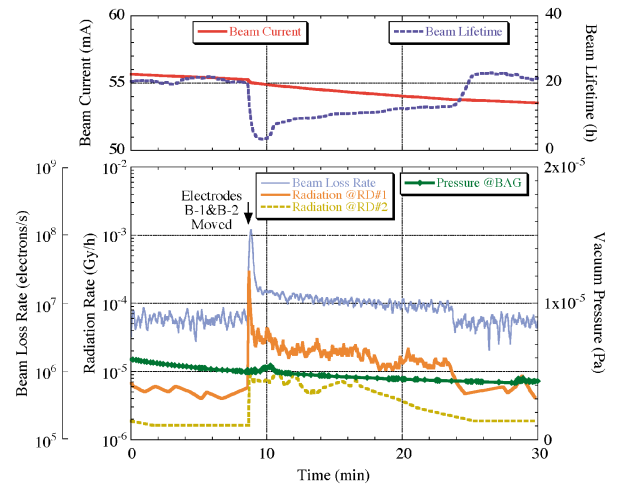


図15 電極 B の駆動でダストトラッピングが発生したときの観測データ (文献 27 より転載)

にビームからの電磁場 (高次モード) が溜まって、マルチパクタ放電を起こしたと考えられる。

この実験データも、前述の高電圧印加実験の場合と同様な理由により、寿命急落現象が放電で発生したダストによるものであることを示している。したがって、想定した 2 種類の放電によってダストトラッピングが発生することが実証された。

図 13 に示された実験で、寿命急落後の放射線量率のデータを詳しく見ると、急落直後は長直線部の RD #1 のみが増加しており、短直線部の RD#2 はバックグラウンドレベルのままであった。ところが、急落開始から約 2 分後に突然 RD#2 での放射線量率が上昇し、逆に RD#1 での放射線量率は減少した。このことは、ビームにトラップされたダストが縦方向 (ビーム進行方向) に移動して偏向電磁石 2 台を越えたことを示唆している。

4.4 ダストの視覚的観測

電極 B を用いた実験中、驚いたことに、2 台の CCD カメラの前を流れ星のように素早く横切る発光物体が寿命急落発生に同期して観測された (図 14)。ビームにトラップされたダストの視覚的観測に初めて成功した瞬間であった。

そのダストは、電極 B-1 と B-2 を同時に初期位置 (ビームとの距離がそれぞれ 50 mm) から 10 mm だけ動かし始めた直後に発生し、合わせて放射線のバーストも RD#1 で検出された (図 15)。

寿命急落時にビデオカメラにおいて放電は観測されておらず、BAG において真空悪化も観測されていなかったため、この寿命急落現象は電極 B の機械的な駆動 (おそらく摺動) によって発生したダストによるものと考えられる。

ビーム軸に沿って移動するダストは、6 秒間に 9 回観測された。そのビデオ映像を解析したところ、縦方向に、速い場合で 10 m/s 程度あるいはそれ以上の速さで移動していたと推定された。ただし、大抵の場合、記録された次のフレームには消え去っていたので、上下流のどちらに向かって移動していたかまでは判別できなかった。観測された 9 回の出現間隔は最短 0.07 秒から最長 2.53 秒とばらつきがあった。推定された速度では周長 377 m のリングを周回してその間隔で出現することはできないので、ダストがカメラの前で振動をしていたと考えられる。その周期が一定でなかったのは、ダストが平衡状態に至る前で、質量や電荷が変化していた可能性が考えられる。しかしながら、振動以外の理由として、複数のダストが同時に発生した可能性や、1 つの大きなダストがトラップ後分裂した可能性も排除することはできない。

縦方向の運動のドライビングフォースとして最も有力なものは、イオントラッピング理論で用いられる「イオンポケット」、すなわちビームサイズと真空ダクト形状に起因する縦方向のポテンシャル井戸である¹⁰⁾。一つの可能性のある例として、このイオンポケットの深さ V を 10 V とし、直径 $1 \mu\text{m}$ のチタン ($m = 2.4 \times 10^{-15} \text{ kg}$) が 10^5 の電荷 ($q = 16 \text{ fC}$) を帯びていたとすると、 $qV = (1/2)mv^2$ によって計算される速度 v は 12 m/s となる。

この実験での急落後のビーム寿命 (280 分) から推定されるダスト直径は、ダスト種として電極構成材の銅を仮定すれば、 $0.8 \mu\text{m}$ である。このサイズの場合、温度が 1500 K であれば黒体放射による発光強度が CCD カメラの感度を超えると計算されるが、銅の融点 (1358 K) を超えており、例えば 1300 K でも蒸

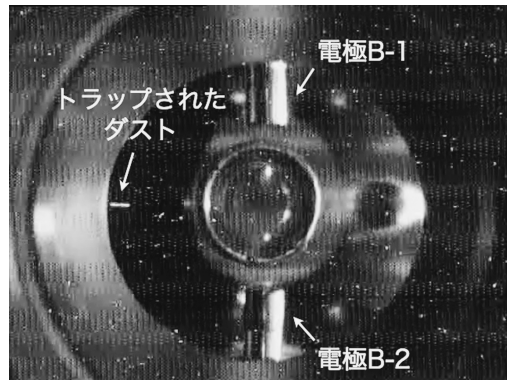


図16 高感度カメラで撮影されたダスト映像

気圧は 10^{-2} Pa 程度と高く、安定には存在しえない。チタンを仮定すると、直径は $1.1 \mu\text{m}$ と計算され、融点は 1941 K と高く、1300 K の蒸気圧も 10^{-7} Pa 台である。シリカの場合は、直径は $1.2 \mu\text{m}$ となり、融点は 1983 K、1300 K の蒸気圧は 10^{-9} Pa 台で、より安定である。この実験でダストが約 15 分間安定にトラップされたのは、このような高融点で低蒸気圧の物質が、RF フィンガや電極の表面から放出されたためと考えられる。

また、これらの考察結果は、ビデオカメラの感度をさらに上げることで、より小さく、あるいは、より低い温度のダストでも視覚的な観測が可能になることを示唆した。そこで、3 桁ほど高感度のモノクロカメラ (KPC-EX500PA/BA with Sony Exview HAD CCD) に交換して、再びダストトラッピング再現実験を行ったところ、電極 B を用いたダスト生成実験では、大抵の場合にビームにトラップされたダストが観測されるようになった (電極 A の実験は今後実施する予定)。その一例を図 16 に示す。

この実験では、電極 B-1, B-2 とともにビームから約 20 mm の位置まで近づけた状態で保持した。その後、電極を抜く方向に動かすまで、30 分以上カメラの前で数 cm 程度ビーム軸方向に前後しながら存在し続けた。このダストの挙動は、最初に観測されたときの高速移動とは明らかに異なっている。その違いを生じた理由については、さらに実験を重ねて追求していく予定である。

5. ま と め

これまでの PF-AR でのダストトラッピング研究において得られた成果をまとめると以下ようになる。

- (1) ユーザー運転中のダスト発生要因を調査し、対策を施した。具体的には、SIP を増強して DIP-

OFF 運転を可能にし、さらに大電流蓄積によるコンディショニングと合わせることで、非回復型の寿命急落発生頻度を約 3 割にまで抑制した。

- (2) 独自のダスト発生装置により、想定された高電圧印加とビームからの電磁場による 2 種類の放電、および電極の機械的な駆動によって、ダストトラッピングが発生することを実証した。
- (3) ビームにトラップされたダストの視覚的な観測に初めて成功し、直接証拠によってダストトラッピング説を実証した。その際、トラップされたダストがビーム軸に沿って移動しうること確認された。また、ダストからの発光原因として、1300~1500 K 程度の高温になったことによる黒体放射が最有力であるという考察結果を得た。

6. 今後の予定

ダストを再現性よく発生させることが可能になったので、トラップ後のダストを取り除く手法の探索も効率的に行えるようになった。例えば、クリアリング電極を設置して DC 電圧印加の効果を調べる^{10,14,29)}、あるいは、キッカーを用いてビームを横方向に大きく振動させたり^{5,30)}、RF の加速電圧を変えたり⁹⁾した場合の効果を詳しく調べる、などの試験を予定している。その結果、良いダスト除去手法が見つければ、ユーザー運転に対する寿命急落の影響をさらに軽減することができる。

また、ダストを視覚的に観測することがダストの様々な情報を得るのに有効な手段であることが示されたので、今後はビデオカメラを増設して広範囲や別角度からダストを観測する実験や、ハイスピードカメラを用いてダスト運動を詳しく調べる実験を予定している。その中でダストトラッピング現象の解明に向けた有益な成果が得られることを期待している。

参考文献

- 1) Photon Factory Activity Report 1987, 66 (1988).
- 2) H. Saeki, T. Momose and H. Ishimaru, "Observations of Dust Trapping Phenomena in the TRISTAN Accumulation Ring and a Study of Dust Removal in a Beam Chamber", *Review of Scientific Instruments*, **62**, 874 (1991).
- 3) P. Marin, "Observation of Bremsstrahlung on Dust Particles Trapped in Electron Beams at DCI and Super-ACO", LURE RT/91-03 (1991).
- 4) K. Kanazawa, S. Kato, Y. Suetsugu, H. Hisamatsu, M. Shimamoto, M. Sato and M. Shirai, "KEKB Vacuum System", *Applied Surface Science*, **169-170**, 715 (2001).
- 5) U. Wienands, "Vacuum Performance and Beam Life Time in the PEP II Storage Rings", in *Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference, Chicago, IL, 2001*, pp. 597-601.
- 6) M. Kobayashi, Y. Hori and Y. Takiyama, "Differences in Quality of PF Ring Vacuum between Positron and Electron Storage Mode", *Review of Scientific Instruments*, **60**, 1728 (1989).
- 7) F. Zimmermann, "Trapped Dust in HERA and DORIS", Technical Report DESY HERA 93-08 (1993).
- 8) K. Kanazawa, "Dust Trapping Phenomena in TRISTAN AR", in *Proceedings of the 9th Meeting on Ultra High Vacuum Techniques for Accelerator and Storage Rings, Tsukuba, 1994*, pp. 105-107.
- 9) Q. Qin and Z. Y. Guo, "Studies on the Dust Effect in the BEPC Storage Ring", in *Proceedings of the 2nd Asian Particle Accelerator Conference, Beijing, 2001*, pp. 451-453.
- 10) F. Pedersen, A. Poncet and L. Soby, "The CERN Antiproton Accumulator Clearing System with Ion Current Measurements as a Residual Neutralization Diagnostic", in *Proceedings of the 1989 Particle Accelerator Conference, Chicago, IL, 1989*, pp. 1786-1788.
- 11) Y. Tanimoto, T. Honda, T. Uchiyama, and T. Nogami, "Sudden Lifetime Drop Phenomena and their Effective Cures in PF-ring and PF-AR", in *Proceedings of the 10th International Conference on Synchrotron Radiation Instrumentation, Melbourne, 2009*, to be published.
- 12) C. Bernardini, "AdA: The First Electron-Positron Collider", *Physics in Perspective*, **6**, 156 (2004).
- 13) E. Jones, F. Pedersen, A. Poncet, S. van der Meer and E. J. N. Wilson, "Transverse Instabilities Due to Beam-Trapped Ions and Charged Matter in the CERN Antiproton Accumulator", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **NS-32**, 2218 (1985).
- 14) K. Huke, N. Kajiura, Y. Kamiya, N. Kanaya, T. Katsura, M. Kihara, H. Kitamura, H. Kobayakawa, M. Kobayashi, T. Koide, C. O. Pak, S. Sato, S. Shibata, T. Yamakawa and Y. Yamazaki, "Photon Factory: Status of Storage Ring", *IEEE Transactions on Nuclear Science*, **NS-30**, 3130 (1983).
- 15) A. W. Maschke, "On Abrupt Lifetime Shortening in Electron Storage Rings", BNL Heavy Ion Fusion Technical Note 84-1 (1984).
- 16) D. R. C. Kelly, "Dust in Accelerator Vacuum Systems", in *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, 1997*, pp. 3547-3551.
- 17) D. Sagan, "Mass and Charge Measurement of Trapped Dust in the CESR Storage Ring", *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A*, **330**, 371 (1993).
- 18) G. Debut, J. M. Lefebvre, R. Morrison, I. Parat, J. Pelle, D. Schmied and R. Souchet, "Vacuum Conditioning of the ESRF Storage Ring", in *Proceedings of the 4th European Particle Accelerator Conference, London, England, 1994*, pp. 2473-2475.

- 19) D. R. C. Kelly, “Comparison of the Frequency of Beam Loss Rate Increases due to Dust Particles in HERA under Ion-Getter Pump and NEG Pump Operation”, Technical Report DESY HERA 98-02 (1998).
- 20) H. Saeki, T. Momose and H. Ishimaru, “Motions of Trapped Dust Particles around the Electron Beam in the TRISTAN Accumulation Ring”, Review of Scientific Instruments, **62**, 2558 (1991).
- 21) D. R. C. Kelly, W. Bialowons and K. Wittenburg, “HERA Electron-Beam Lifetime Disruption Machine Studies and Observations”, in *Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference, Sitges, 1996*, pp. 289-291.
- 22) S. Heifets, Q. Qin and M. Zolotarev, “Life of the Dust Macroparticles in Storage Rings”, Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams, **8**, 061002 (2005).
- 23) F. Zimmermann, “Trapped Dust in HERA and Prospects for PEP-II”, Technical Report PEP-II AP Note No.: 8-94 (1994).
- 24) H. Saeki, T. Momose and H. Ishimaru, “Three-dimensional Analyses for Motions of Trapped Microparticles in the TRISTAN Accumulation Ring”, Review of Scientific Instruments, **67**, 1475 (1996).
- 25) T. Uchiyama, Y. Tanimoto and Y. Hori, “Improvement of Vacuum System for the Synchrotron Light Source PF-AR Upgrading”, Journal of the Vacuum Society of Japan, **46**, 193 (2003).
- 26) Y. Tanimoto, T. Honda, T. Uchiyama and T. Nogami, “Improvement of Beam Lifetime and Vacuum System of the PF-AR”, Vacuum, **84**, 760 (2010).
- 27) Y. Tanimoto, T. Honda, and S. Sakanaka, “Experimental Demonstration and Visual Observation of Dust Trapping in an Electron Storage Ring”, Physical Review Special Topics—Accelerators and Beams, **12**, 110702 (2009).
- 28) <http://focus.aps.org/story/v24/st16>
- 29) H. Saeki and T. Momose, “Removal Conditions for Trapped Microparticles in a Stored Electron Beam Using Electrostatic Electrodes”, Journal of Vacuum Science and Technology A: Vacuum, Surfaces and Films, **18**, 492 (2000).
- 30) D. R. C. Kelly, “The Effect of Beam Excitation on the HERA ElectronBeam Lifetime Disruption”, in *Proceedings of the 5th European Particle Accelerator Conference, Sitges, 1996*, pp. 442-444.