

電子貯蔵リングでのダスト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

谷本 育律

博士（理学）

総合研究大学院大学
高エネルギー加速器科学研究科
加速器科学専攻

平成 21 年度
(2009)

目次

第1章 緒論.....	1
第2章 ダストトラッピング理論.....	8
2.1 熱平衡による安定条件	8
2.2 ダスト運動の安定条件	12
2.3 ダストサイズの見積	15
第3章 PF-ring におけるダストトラッピング現象	19
3.1 シングルバンチ運転での特徴と抑制対策.....	20
3.2 マルチバンチ運転での特徴と抑制対策.....	24
3.3 PF-ring での寿命急落現象に関する考察.....	28
第4章 PF-AR におけるダストトラッピング現象	35
4.1 寿命急落現象の特徴と発生統計	36
4.2 抑制対策とその効果	39
4.3 PF-AR での寿命急落現象に関する考察	46
第5章 ダストトラッピング実証実験	50
5.1 実験目的	50
5.2 装置概要	50
5.3 ダスト生成実験結果	56
5.3.1 高電圧印加による放電実験.....	56
5.3.2 ビームからの電磁場による放電実験	60
5.4 発光体の観測	62
5.5 実証実験結果に関する考察	65
第6章 結論.....	73
Appendix 光子強度計算	75
謝辞	81
参考文献.....	82

第 1 章

緒 論

電子ビームを貯蔵するリング型加速器では、運転中にビーム寿命が急落する現象が時折観測される。これまでの多くの加速器施設での観察結果により、寿命急落現象は以下に示すような特徴を示すことが判明している。

- (1) あるとき突然ビーム寿命が急落し、低下したビーム寿命と真空の圧力には相関がない
- (2) ビーム寿命の急落に同期して、 γ 線のバーストが観測される^[1-5]
- (3) 陽電子を蓄積するリングでは、持続型の寿命急落は発生しない^[3-9]
- (4) 加速器の建設や改造の直後に比較的多く観測される^[10-12]

これらの状況証拠から、寿命急落現象は、真空ダクト内で正に帯電した微小粒子（ダスト）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るようになった。

(1)は、急落したビーム寿命が残留ガス分子との散乱によるビームロス率では説明できないことを示している。(2)は、電子ビームがダストによって散乱される際、制動放射 γ 線をビーム進行方向前方に放出するためと考えられ、(3)は、ダストは電子や光子の衝撃により通常正に帯電し、陽電子ビームには安定に捕獲されないためと考えられる。(4)は真空ダクトの表面にダストが多く存在している場合にダストトラッピングが発生しやすいことを示唆している。

寿命急落現象は、高エネルギー加速器研究機構の 2 つの放射光源リング PF-ring (Photon Factory storage ring) と PF-AR (Photon Factory Advanced Ring) でも運転初期の 1980 年代から観測されていた^[2,13]。そして、発生頻度の低減に向けて、幾つかの対策や実験的研究も行われた。

2000 年代に入り、PF-ring、PF-AR とともに、リング真空ダクトを広範囲にわたって更新する大規模な改造が行われた。PF-ring では 2005 年にリングの半周以上に及ぶ改造が行われ^[14]、PF-AR では 2001 年にリングのほぼ全周にわたる改造が行われた^[15]。そして、その直後の運転で寿命急落現象の発生頻度が再び上

昇した。特に PF-AR では長期にわたって発生し続ける状態が続き^[16]、2010 年時点でもこの寿命急落問題が安定な放射光ユーザー実験を妨げる最大の要因となっている。表 1-1 に 2010 年 3 月時点での PF-ring と PF-AR の主要なパラメータを示す。

表 1-1 PF-ring と PF-AR の主要パラメータ

	PF-ring		PF-AR
	Multi-bunch	Single-bunch	Single-bunch
Beam Energy (GeV)		2.5	6.5
Injection Beam Energy (GeV)		2.5	3.0
Initial Stored Current (mA)	450 (top-up)	50 (top-up)	60
Number of Bunches	250-300	1	1
Circumference (m)		187	377
Natural Beam Emittance (nm·rad)		36	293
Horizontal RMS Beam Size (mm)	0.42	0.42	1.54
Vertical RMS Beam Size (mm)	0.06	0.20	0.15
Bunch Length (mm)		10	19
Harmonic Number		312	640
RF Frequency (MHz)		500.1	508.6
Energy Acceptance	0.012	0.014	0.0082
Bunch Charge (nC/bunch)	1.0 @450mA	31 @50mA	76 @60mA
Beam Lifetime (h)	30 @450mA	1.5 @50mA	22 @60mA
Averaged Dynamic Pressure (Pa)	2×10^{-8} @450mA	6×10^{-8} @50mA	3×10^{-7} @60mA
Averaged Static Pressure (Pa)		1×10^{-8}	3×10^{-8}
Main Vacuum Pumps	TSP×92, DIP×28, SIP×66 ^{*1}		TSP×184, DIP×56, SIP×111
Main Beam-duct Material	Aluminum Alloy		OFHC Copper
Number of Insertion Devices	10 (including 3 in-vac. undulators)		6 (including 5 in-vac. undulators)

^{*1} TSP: Titanium sublimation pump, DIP: Distributed ion pump, SIP: Sputter ion pump

ダストトラッピングは他の多くの加速器でも観測されており、文献に記されているものだけでも、AA (CERN) ^[17]、NSLS (BNL) ^[18]、DCI と Super-ACO (LURE) ^[3]、HERA と DORIS と PETRA (DESY) ^[7, 19]、CESR (Cornell Univ.)

^[20]、ESRF^[21]、KEKB (KEK) ^[4]、PEP-II (SLAC) ^[5]、BEPC (IHEP) ^[9]がある。このようにダストトラッピングは普遍的な現象ではあるが、ダストの発生やトラッピングのメカニズムは未だ十分に解明されておらず、長年にわたり解決が困難な問題の一つに挙げられてきた。

ダストトラッピングは、加速器を利用した実験に対して様々な悪影響を及ぼす。寿命急落が発生してその状態が持続すれば、電子ビーム強度が短時間のうちに減少する。多くの場合、ビームの再入射が必要となる。また、実験エリアにおいてγ線量が増加する場合もある。放射光リングの場合では、放射光強度の急激な低下と入射による実験の中断を余儀なくされ、実験ホールでの放射線安全にも影響を及ぼす。高エネルギー物理実験用リングの場合では、ルミノシティの低下に加え、測定器でのバックグラウンドノイズの上昇を招くことになる。

図 1-1 に寿命急落現象の実例を示す。ビーム寿命の急落形態は様々であるが、本研究では現象の持続時間の違いによって、非回復型、回復型、瞬間型の 3 パターンに分類する手法を新たに導入した。ダストトラッピングの持続時間はダスト自身の寿命や安定トラップ条件に深く関係していると考えられるため、ダストの特徴を推測するための良い指針となる。さらに、この分類法に従って統計データを纏めることで、寿命急落現象のユーザー運転に与える影響がより明確に定量化されるようになった。

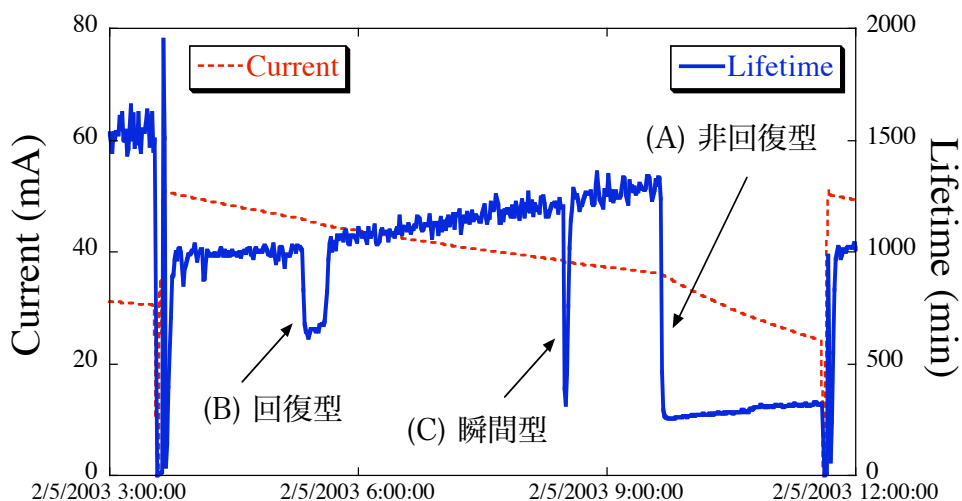


図 1-1 持続時間の違いによって分類した 3 種類の寿命急落現象の発生例

- (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、多くの場合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。

本論文では、(A)の非回復型と(B)の回復型を合わせて「持続型」と呼び、(C)の瞬間型と区別する場合もある。

寿命急落問題を改善するためには、ダストの発生要因を突き止めて、それを低減させることが重要である。第一に考えられる要因は、真空ダクト内に散在しているダストである。ビームチェンバなどの真空コンポーネントの製造や設置の過程では、当然ダストの混入を防ぐ努力がなされるが、それでもチェンバ内にはダストが少なからず存在している。それらが散乱放射光の衝撃などで多価の正電荷を帯びれば、電子ビームにトラップされる可能性がある。ところが、ビームチェンバ内表面で多価に正帯電したダストに働く力を計算すると、チェンバが導体の場合、ダスト自身の鏡像電荷によるチェンバからの引力がビームからの引力に勝り、ダストトラッピングに至らないという結果が得られる^[20, 22]。ただし、実際にはダストがチェンバ表面に存在することでビームからの電場によって放電が起きやすくなり、ダストが表面から飛び出すのに十分なエネルギーを持つことも可能になる。このような過程が、加速器の建設や大規模な改造直後の運転において、寿命急落現象が頻繁に観測される理由の一つになっていると考えられる。その顕著な場合では、真空作業時の事故^[23]や真空機器製造時の不具合^[21]によって数多く発生した微粒子が寿命急落を繰り返し引き起こした事例も報告されている。

このダスト混入問題を根本的に解決するのは容易ではないが、真空機器製造時の徹底した品質管理に加え、機器設置やメンテナンス等での真空作業を極力クリーンな環境で行うことで改善が期待できる。真空ダクト内のダストの飛散

を防ぐ目的で、大気解放時や真空排気開始時に圧力を緩やかに変化させることも有効であろう。散在ダストが充分少なければ、その影響は運転時間とともに比較的早期に解消されると考えられる。

散在ダスト以外のダスト発生源として最も有力視されてきたのが、ビーム路に沿って配置されている分布型イオンポンプ (DIP) である^[9, 24-26]。これまで幾つかの加速器施設において、DIP への高電圧印加を停止することによって寿命急落が改善したことが報告されている。高電圧印加に起因して DIP 内部でダストが発生し、それがビームにトラップされると考えられている。この問題を解決するためには DIP の使用を停止する必要があるが、多くの場合、総排気速度の減少によって、運転中の定常ビーム寿命自体が低下する。したがって、他のポンプの増設によって排気速度の増強を図る^[16]か、DIP を例えば分布型 Non-Evaporable Getter (NEG) ポンプに置き換える^[26]等の比較的面倒な改造が必要となる。

その他のダスト源として、静電セパレータでの放電^[20]、およびビームスクレーパ^[20]やビームシャッタ^[17]の駆動によってダストトラッピングが発生したという報告もある。

これまでにダストトラッピングの観測実験も数多く行われてきた。PF-AR の前身である TRISTAN Accumulation Ring (AR) では、Saeki らがダストトラッピングに特有の制動放射 γ 線のバーストを観測し、トラップされたダストが longitudinal (ビーム進行) 方向に移動した兆候を示すデータを得ている^[2]。 γ 線の測定は、鉛ガラスに入射した γ 線が電子陽電子対生成を起こし、それらの発するチェレンコフ光を光電子増倍管で検出することで行われた。また、同じく TRISTAN AR において、ビームダクト内から採取された TiC やアルミ粒子 (サイズ: 0.05~1mm) を集めてダクト底面に導入した実験も行われたが、ダストトラッピングをうまく再現するまでには至らなかった^[27]。しかしながら、その後 Kato らが行った、0.1~1 μ m 程度の金属やその酸化物、および NEG 材 (Zr-V-Fe) や C (diamond) をノズルからビームダクト内に投下した実験では、TiO₂、Zr-V-Fe、diamond といった比較的高融点の物質によってダストトラッピングが再現可能であることが示された^[28]。

また、DCI と Super-ACO においても Marin がダストトラッピング観測実験

を行い、複数の γ 線検出器の信号から、トラップされたダストが偏向電磁石を超えて longitudinal 方向に移動した例を示した^[3, 29]。

PEP-II では、Wienands がソレノイド磁石を励磁して真空ダクトへ衝撃を与え、それによって発生したダストが電子ビームにトラップされた例を報告している^[5]。さらに、BEPC では、Qin らが加速器運転中に DIP を OFF することで寿命急落発生頻度が減少したこと、および、寿命急落時に transverse 方向 (ビーム進行に垂直な方向) にビームを振動させたり RF 加速電圧を変更したりすることで急落したビーム寿命が回復する場合があることも報告している^[9]。

また、加速器運転中の寿命急落現象を長期的に観察する研究も行われた。Kanazawa は TRISTAN AR の 1993 年の 1 年間の寿命急落現象を統計的に纏め、急落後の寿命から推定されるダストサイズの大部分が直径 0.5~2 μm の範囲にあったこと (ダストを Al_2O_3 と仮定) や、急落後の寿命と発生したときの電流値には相関が見られなかったことなどを報告している^[8]。一方、Kelly は、HERA における 1993 年と 1994 年の 2 年間の統計データから、電流値が高い方が急落後の寿命が短く、また発生頻度が高くなる傾向にあったと報告している^[30]。さらに、1995 年から 1996 年には、214 台のビームロスモニタの信号を分析することで、常時多数のダストがビーム軌道を横切るが実際にトラップされるのはそのわずかであること、トラップされたダストがリング内を移動すること、DIP を NEG に置き換えると発生頻度が有意に改善すること、などを明らかにした^[31]。

ダストトラッピングの理論的な研究としては、Maschke、Pedersen、Sagan、Zimmermann らがトラップされたダストの熱的安定性の観点からダストの温度や材質、サイズなどに関する理論的仮説を示している^[18, 20, 22, 32]。また、Pedersen、Saeki、Heifets、Kling らによって、トラップ後のダストの運動に関する理論計算やモデルも幾つか提唱されてきた^[7, 32-34]。しかしながら、現時点でも実験的な裏付けは得られておらず、様々な可能性を模索している状況である。実験による検証を困難にしている最大の要因は、ダスト発生の制御が容易ではなく、再現性が得難いことである。

以上が本研究を開始する 2000 年代後半までに一般的に知られていたダストトラッピング現象の概要である。本研究における第一の目的は、PF-ring と PF-AR における寿命急落現象の観察の結果と抑制対策の効果を定量化して、発生要因を明らかにすることである。第二の目的は、実際のビームを用いた実験によってその発生仮説を実証するとともに、その再現実験でダストトラッピン

グの特性を観察し、メカニズムの解明に向けた知見を得ることである。本研究では、ダストトラッピングの発生要因として真空内の放電に着目し、実験装置において意図的に放電を発生させるというこれまでに行われていない手法によってダストトラッピングの再現実験を行った。

本論文では、まず第 2 章においてこれまでに提唱されているダストトラッピング理論についてのレビューを行い、第 3 章と第 4 章でそれぞれ PF-ring と PF-AR において実際に観測された寿命急落現象の特徴と対策の効果について述べる。第 5 章では、運転経験で得られた知見を基に人為的な放電によるダスト発生装置を製作し、それを PF-AR に設置して行った実験の結果について述べる。最後に第 6 章で以上のすべてを結論として纏める。

第 2 章

ダストトラッピング理論

2.1 熱平衡による安定条件

ダストはビームにトラップされると、ビームからのエネルギー付与によって急激に温度が上昇する。そして、蒸発や分解によって瞬時にダストトラッピングが解消されると、瞬間型の寿命急落現象として観測される。一方、高融点かつ低飽和蒸気圧という熱的安定性を有するダストがトラップされた場合は、高温になるに従って熱輻射によるエネルギー放出（冷却効果）が増えるため、熱平衡状態、あるいは準熱平衡状態に達する。その場合、持続型の寿命急落現象として観測される。

あるときダストが融点を超えて液状になれば、高電荷による斥力のため複数のダストに分裂する^[34]。ダストサイズが小さくなると、そのサイズよりも長い波長の輻射が抑えられる効果で冷却が抑制される^[22]。その結果、さらに温度上昇が進み、蒸発が促進されることになる^{*}。あるいは、熱平衡状態にあるダストでも、飽和蒸気圧で決まる蒸発速度で表面から原子が蒸発していく。この蒸発速度がトラップされたダストの存在時間（ダストの寿命）を決める要因となる。

ここでは、まず始めにダストが熱平衡状態に達する条件の考察、すなわち、単位時間当たりのビームからのエネルギー付与（入熱パワー）と単位時間当たりの熱輻射によるエネルギー放出（輻射パワー）の比較を行う。

ダストの温度を上昇させる最大の要因は、電離作用によってビームから付与されるエネルギーである^[35]。すなわち、この過程によりビームにトラップされたダストは多価の正電荷を帯びることになる。ビームがダスト原子を電離する過程でのエネルギー損失は Bethe-Bloch の式によって計算されるが、ダストに対するエネルギー付与は、ダストからの 2 次電子放出によるエネルギー放出のた

^{*}分裂によって体積に対する表面積の比が増えるので、ビームからのエネルギー付与（体積に比例）に対する熱輻射（表面積に比例）の割合も増えるが、例えば n 個に分裂した場合でも、その効果は $n^{1/3}$ 倍にしかない。

め、ビームの電離損失の 5 分の 1 程度となる。したがって、電離作用による球状ダストへの入熱パワーは、簡単のためビーム中の電子を最小電離粒子 (Minimum Ionizing Particle) とすると、近似的に次式で与えられる^[35]。

$$\left. \frac{\Delta E}{\Delta t} \right|_{ion} = \frac{1}{5} \frac{d^3 N_e f_{rev} \rho}{12 \sigma_x \sigma_y} \left. \frac{dE}{d(\rho x)} \right|_{min} \quad (2-1)$$

ここで、 d はダストの直径、 N_e はビームの総電子数、 f_{rev} はビームの周回周波数、 ρ はダストの密度、 σ_x と σ_y はそれぞれ x (水平) と y (鉛直) 方向の rms ビームサイズである。 $dE/d(\rho x)|_{min}$ は最小電離損失 (Minimum Ionization Loss) で、ダストの種類にあまり依存せず、 $2.4 \times 10^{-14} \text{ J m}^2/\text{kg}$ 程度である。

あるいは、式 2-1 はビームフラックス (電流密度)

$$F = \frac{N_e f_{rev} e}{2\pi \sigma_x \sigma_y} \quad (2-2)$$

を用いれば、

$$\left. \frac{\Delta E}{\Delta t} \right|_{ion} = F \frac{\pi d^3 \rho}{30e} \left. \frac{dE}{d(\rho x)} \right|_{min} \quad (2-3)$$

と表すことができる。ここで、 e は電気素量である。この式から、フラックスの高いビーム、すなわち大電流ビームや低エミッタンスビームを蓄積する加速器では、ダストへの入熱パワーが大きくなり、熱平衡に至る前に蒸発や分裂を起こしやすいことが分かる。

一方、ダストからのエネルギー放出過程として最も主要なものは熱輻射である。直径 d 、温度 T の球状ダストからの輻射パワーは次式で与えられる。

$$\left. \frac{\Delta E}{\Delta t} \right|_{rad} = \pi d^2 \sigma_{SB} T^4 \quad (2-4)$$

ここで、 σ_{SB} はステファン-ボルツマン定数である。また、簡単のためダストサイズに依存する放射強度の変化や材質に依存する輻射率は考慮に入れていない。

式 2-4 で計算される輻射パワーが、式 2-3 で計算されるビームからの入熱パワーと等しくなるまでダストが高温に耐えうる場合に、熱平衡が成立する。ここでは、熱平衡の成立しやすいダスト種として、実際に真空ダクト内に多く存在するダスト種の中で最も熱的安定性を有するとされるシリカ (SiO_2) を考える。ダストへの入熱パワーはダスト直径の 3 乗に比例し、輻射パワーは直径の 2

乗に比例するため、ダスト直径を比較的小さめの $0.5\mu\text{m}$ とする。そして、ダスト温度を融点 (1983K) 未満の値として 1950K とすると、式 2-4 で計算される熱輻射パワーは $6.4\times 10^7\text{W}$ となる。

式 2-3 で計算されるビームからの入熱パワーを輻射パワー $6.4\times 10^7\text{W}$ と比較することで、理論上、熱平衡成立の可否を判断することができる。PF-AR と PF-ring、および国内の代表的な大電流電子貯蔵リング KEKB-HER と低エミッタンスリング SPring-8 に関して、それぞれのビームパラメータを用いて熱平衡成立の可否を計算した結果を、実際の運転経験における持続型寿命急落現象の発生の有無とともに表 2-1 に纏めた。

表 2-1 代表的な電子貯蔵リングのビームパラメータ、および理論上のダストの熱平衡成立の可否と運転経験上での持続型寿命急落発生の有無

	PF-AR	PF-ring	SPring-8	KEKB-HER
Beam Current (mA)	60	20	450	1300
Beam Emittance (nm·rad)	290	36	3.4	24
Beam Flux (A/m^2)	4.1×10^4	1.3×10^5	2.8×10^6	7.2×10^6
Deposition Power to $0.5\text{-}\mu\text{m}$ Silica (W)	1.9×10^{-7}	5.9×10^{-7}	1.3×10^{-5}	2.5×10^{-5}
Thermal Equilibrium Condition (calculated)*	Yes	Yes	No	No
Occurrence of Lasting Lifetime Drops (empirically observed)	Yes	Yes	No	No

* by comparison between the deposition power and the radiation power ($6.4\times 10^7\text{W}$) from a silica sphere of $0.5\mu\text{m}$ in diameter and 1950K in temperature.

運転経験上の持続型寿命急落の発生有無について、PF-ring に着目すると、1997年にビームエミッタンスがそれまでの $130\text{nm}\cdot\text{rad}$ から現在の $36\text{nm}\cdot\text{rad}$ に改良されてからは 150mA 以上の運転での持続型急落の発生は皆無である。しかし、マシン立上げ時などで 20mA 程度の低電流を蓄積した時やビームを skew

電磁石で丸めてシングルバンチ (SB) で 70mA 以下のビームを蓄積した時には観測されることはあった。このことは、ビームフラックスに、持続型寿命急落の発生に関するしきい値が存在することを示唆しており、その値は表 2-1 から 10^5 A/m^2 付近にあると推定される。しかも、このしきい値は、熱平衡成立の可否の判断基準である、最も安定な部類にあるシリカ ($d=0.5\mu\text{m}$ 、 $T=1950\text{K}$ 、 $\rho=2400\text{kg/m}^3$) からの輻射パワー $6.4 \times 10^{-7} \text{ W}$ を上回るために必要なビームフラックス $1.4 \times 10^5 \text{ A/m}^2$ (式 2-3 が $6.4 \times 10^{-7} \text{ W}$ となる条件で計算される) と 1 桁以内で一致している。実際に、ビームフラックスがそのしきい値を 1 桁程度上回る通常のマルチバンチ (MB) 運転時の PF-ring、および KEK-HER や SPring-8 では持続型急落は発生しておらず、逆にそのしきい値よりも 1 桁程度低い PF-AR では頻繁に観測されている。

次に、熱平衡状態にあるダストの蒸発による寿命について考える。 N 個の同一原子で構成される球状ダストが温度 T で熱平衡に達している場合、ダスト原子の蒸発速度は、蒸発フラックス Γ_{out} と表面積 S の積、すなわち、

$$\begin{aligned} \frac{dN}{dt} &= \Gamma_{out} \cdot S \\ &= - \frac{P(T)}{\sqrt{2\pi m k_B T}} \cdot 4\pi \left(\frac{3}{4\pi} \frac{M}{\rho} \right)^{2/3} \end{aligned} \quad (2-5)$$

で与えられる。ここで、 $P(T)$ はダストの温度 T における飽和蒸気圧、 m はダスト構成原子の質量、 k_B はボルツマン定数、 M はダストの質量である。したがって、ダストの寿命 τ_d は

$$\begin{aligned} \tau_d &\equiv - \frac{N}{\left(\frac{dN}{dt} \right)} \\ &= \frac{1}{P(T)} \sqrt{\frac{2\pi k_B T}{m}} \left(\frac{\rho^2 M}{36\pi} \right)^{1/3} \end{aligned} \quad (2-6)$$

により見積ることができる。

図 2-1 に、実際に加速器のビームチェンバ内に存在しうるダスト種のうち、シリカ、チタン、銅に関して、直径 $1\mu\text{m}$ のダストの寿命を温度の関数としてプロットした。例えば 1500K の場合、シリカの寿命は 2.4×10^5 秒 (67 時間)、チ

タンの寿命は 9.2×10^3 秒 (2.6 時間) と充分長いのに対し、銅の場合は 1.8 秒と短い。しかも、銅は融点を超えることによる分裂の効果でさらに短くなると考えられる。以上の考察から、熱的安定性の高いダストが長時間のダストトラッピングを引き起こしていることが分かる。

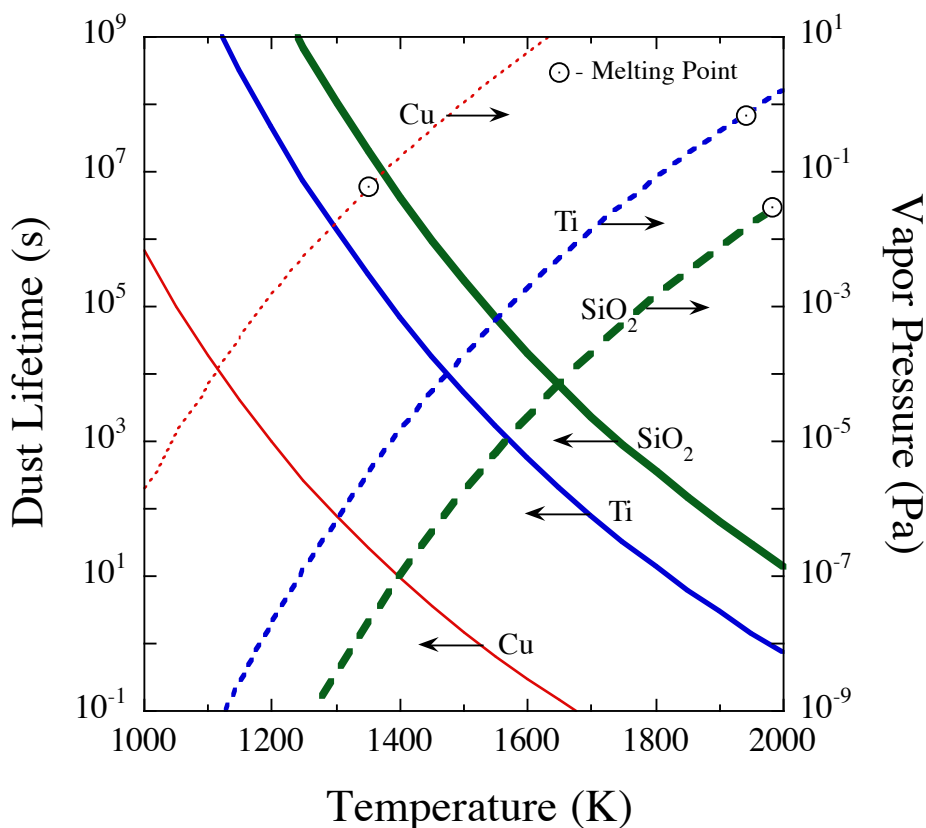


図 2-1 直径 $1\mu\text{m}$ のダストの飽和蒸気圧とそれによって決まる寿命の温度依存性

2.2 ダスト運動の安定条件

ダストの運動に関する安定なトラッピング条件は、ダストの質量と電荷が一定と見なせる場合、臨界質量電荷比によって与えられる^[7,20]。イオントラッピング理論における臨界質量計算^[36]を多電荷のダストに応用したもので、ダストの transverse 方向における 1 次元運動の安定条件から求められる。

transverse 方向のうち、x 方向のダストの運動は偏向電磁石磁場のある場所

では longitudinal 方向の運動と結合するため、ここではより単純な y 方向の運動について考える。y と \dot{y} をそれぞれダストの位置と速度とすれば、ほぼ光速 c で通過するバンチからの収束力によるダストの運動は近似的に次式で記述される。

$$\begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_1 = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -a & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_0 \quad (2-7)$$

ここで、

$$a = \frac{N_e}{n_b} \frac{2r_p c}{\sigma_y (\sigma_x + \sigma_y)} \frac{Q}{A} \quad (2-8)$$

はキックパラメータと呼ばれる量であり、 n_b はバンチ数、 r_p は古典陽子半径 ($1.54 \times 10^{-18} \text{m}$)、 A はダストの総質量数 (総核子数)、 Q はダストの電荷数である。

さらに、バンチ通過後の時間的間隔 τ_b でのダストのドリフト運動は次の式で記述される。

$$\begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_2 = \begin{pmatrix} 1 & \tau_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} y \\ \dot{y} \end{pmatrix}_1 \quad (2-9)$$

バンチの間隔と強度がともに一定であるとすれば、バンチが m 回通過にすることによるダストの運動は、行列

$$M = \begin{pmatrix} 1 & \tau_b \\ 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ -a & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \tau_b a & \tau_b \\ -a & 1 \end{pmatrix} \quad (2-10)$$

を m 回かけることで求められる。そして、その場合でも (y, \dot{y}) が発散しない条件は、行列 M の固有値の絶対値が 1 以下であることである。そこで、行列 M の固有値を λ_1, λ_2 ($\lambda_1 \neq \lambda_2$) とすると、固有方程式

$$|M - \lambda I| = \lambda^2 - (2 - \tau_b a)\lambda + 1 = 0 \quad (2-11)$$

から

$$\lambda_1 \cdot \lambda_2 = \det(M) = 1 \quad (2-12)$$

$$\lambda_1 + \lambda_2 = \text{Tr}(M) = 2 - \tau_b a \quad (2-13)$$

という 2 つの関係式が得られる。重解でない固有値それぞれの絶対値が 1 以下で、かつ互いの積が 1 であるという条件 (式 2-12) を満たすものは

$$\lambda_{1,2} = e^{\pm i\mu} \quad (2-14)$$

で表される共役複素数である。すなわち μ が実数であればともに絶対値は 1 となり、固有値を何回かけても有界となる。このとき、式 2-13 から

$$2\cos\mu = 2 - \tau_b a \quad (2-15)$$

すなわち、

$$|2 - \tau_b a| \leq 2 \quad (2-16)$$

という条件式を得る。これをさらに変形すれば、ダストの運動に関する安定条件

$$\frac{A}{Q} \geq \left(\frac{A}{Q}\right)_c \quad (2-17)$$

が得られる。ここで、

$$\left(\frac{A}{Q}\right)_c = \frac{N_e}{n_b} \frac{r_p c \tau_b}{2\sigma_y(\sigma_x + \sigma_y)} \quad (2-18)$$

は臨界質量電荷比 (Critical Mass-to-charge Ratio) と呼ばれる量であり、その値以上のものが安定にトラップされることになる。また、ダストの質量を仮定すれば、臨界電荷数 (Critical Charge Number) Q_c が求まり、その電荷数以下のものが安定にトラップされることになる。例えば、PF-AR の運転パラメータでは、ダストを直径 $1\mu\text{m}$ のチタン球 ($A=1.4 \times 10^{12}$) とすれば、電荷数 Q が 2.7×10^9 という非常に多価のものまで安定にトラップされると計算される。

また、 A の小さい極限はガス分子 1 個の場合であり、1 価または 2 価のイオンが式 2-17 の安定トラッピング条件を満たせば、イオントラッピングが発生する。ダストトラッピングほど大きなビーム寿命の低下は引き起こさないが、特に圧力が高いとイオンの影響が大きくなり、強いビーム不安定性が発生する。その結果、蓄積可能なビーム電流値が制限される。放射光リングでは、弱いビーム不安定性でも放射光ビームの振動を招き、輝度の低下や揺らぎとして観測される。多数のバンチを貯蔵する MB モードでの運転ではイオントラッピングが発生しやすいが、バンチの時間間隔 τ_b を 1 箇所だけ大きく開けるフィルパターンを採用して安定トラッピング条件から外したり、フィードバックを用いてビームの安定化を図ったりすることで、運転上完全に解決されている。また、PF-AR のように常時 SB モードで運転するストレージリングではイオントラッ

ピングは問題とならない。

ダストの話に戻るが、電荷数 Q がビームによるイオン化で増え続けると、やがてトラッピング条件から外れることになる。しかしながら、ビームチェンバ内に飛び交っている光電子の捕獲、あるいは、高電荷で高温状態になると蒸発する中性原子からの電子捕獲^[11, 34]や電界蒸発によるイオン放出^[22, 32]がイオン化との競合過程となり、電荷平衡に近づいていくと考えられている。

さらに、2次元^[11, 34]や3次元^[33]でのダスト運動のシミュレーションによって、ダストの位置に関するより詳細な考察も行われている。ある条件ではダストの横方向の振動が電子ビームの拡がり (1σ) に比べて十分大きくなり、ビームとの衝突頻度が下がるために、長時間のダストトラッピングが可能になるという説も報告されている^[34]。ところが、別の条件では、振動の振幅がトラップ直後に 1σ 以内に減衰するという計算結果も得られている^[11, 35]。

このように、ダストトラッピング現象は、ダストの種類やビームパラメータなどの条件の違いによって異なる振る舞いを示す複雑な現象である。

2.3 ダストサイズの見積

ダストトラッピングが発生すると、バンチ内の電子はダスト内原子核の電場によって散乱され、制動放射 γ 線を発する。この放射ロスによってリングのエネルギーアクセプタンスから外れた電子は失われ、ビーム寿命の急激な低下を引き起こす。この機構を数値化すれば、ダストトラッピングによるビーム寿命の値からダスト質量の概算見積が可能であり、さらにダスト種を仮定すればサイズに関する情報も得ることができる^[20, 22]。ただし、その場合、ダストは1個の塊であり、それが常時ビームを散乱しているという仮定が必要である。

まず、制動放射による散乱断面積 σ_b は近似的に次式で与えられる^[37]。

$$\sigma_b = \frac{16r_e^2}{3 \cdot 137} Z^2 \ln\left(\frac{E}{\Delta E}\right) \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) \quad (2-20)$$

ここで、 r_e は古典電子半径 (2.82×10^{-15} m)、 Z はダスト構成原子の原子番号、 $\Delta E/E$ はエネルギーアクセプタンスである。

ほぼ光速 c で進む電子数 N_e のビームが数密度 (単位体積当たりの原子数) n_d

のダストに衝突する場合、単位時間当たりの電子数の変化は

$$\frac{dN_e}{dt} = -N_e \sigma_b c n_d \quad (2-21)$$

で与えられ、さらにビーム寿命 τ を用いて表すと

$$\frac{1}{\tau} \equiv -\frac{1}{N_e} \frac{dN_e}{dt} = \sigma_b c n_d \quad (2-22)$$

となる。ダストの数密度 n_d は、前節の統一原子質量単位での質量 A とダスト構成原子の質量数 A_{atom} を用いて表すと

$$n_d = \frac{A}{A_{atom} 2\pi\sigma_x\sigma_y L} \quad (2-23)$$

である。ここで、前節での計算からダストはバンチ通過の影響で transverse 方向に振動していると考えられており、その振幅がビーム 1σ 以内に収まっているとした。

以上を纏めると、制動放射によるビーム寿命とダスト質量の関係式

$$\frac{1}{\tau} = \frac{16r_e^2}{3 \cdot 137} Z^2 \ln\left(\frac{E}{\Delta E}\right) \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) c \frac{A}{A_{atom} 2\pi\sigma_x\sigma_y L} \quad (2-24)$$

が得られる。さらに、ダストを球体と仮定し、その直径を d とすると、ダストの質量は

$$A = \frac{\pi n d^3}{6m_u} \quad (2-25)$$

で表される。ここで、 n はダストの密度（単位体積当たりの質量）、 m_u は統一原子質量 (1.66×10^{-27} kg) である。したがって、式 2-24 のビーム寿命はダストサイズを用いて

$$\frac{1}{\tau} = \frac{16r_e^2}{3 \cdot 137} Z^2 \ln\left(\frac{E}{\Delta E}\right) \ln\left(\frac{183}{Z^{1/3}}\right) c \frac{n d^3}{12A_{atom} m_u \sigma_x \sigma_y L} \quad (2-26)$$

と表すことができる。あるいは、それを変形した

$$d = \left(\frac{12A_{atom} m_u \sigma_x \sigma_y L}{\sigma_b c n \tau} \right)^{1/3} \quad (2-27)$$

により、ビーム寿命からダストサイズを見積ることもできる。

ダストトラッピング理論により導かれるビーム寿命の式 (2-24 または 2-26) において特徴的なことは、ビーム寿命がビーム電流値に依存していないことである。通常運転時はビーム電流の低下とともにビーム寿命が延び、電流と寿命の積 $I\tau$ がほぼ一定であるのに対し、ダストトラッピングによるビーム寿命の式はビーム電流が低下しても変化しないことを示している。これは実際の運転においても、例えば図 1-1 に示されてあるように、特に非回復型寿命急落の場合に頻繁に観測されている。

図 2-2、図 2-3、および図 2-4 はそれぞれ、式 2-27 で計算されるビーム寿命とダストサイズの関係を示す PF-ring の MB モードと SB モード、および PF-AR の運転条件においてプロットしたものである。ダスト種として、シリカ、チタン、銅の 3 種類を仮定した。

それぞれのプロットにおいて、縦軸（ビーム寿命）は実際の運転時において観測される値に概ね合わせてある。PF-ring の SB モードと PF-AR では、直径 $0.5\sim 2\mu\text{m}$ のダストがトラップされたときに、実際に観測される程度のビーム寿命を与えるという計算結果となった。一方、PF-ring の MB モードでは元々の寿命が長いということもあり、 $0.2\mu\text{m}$ 程度のより小さいダストでもビーム寿命に影響を及ぼすという結果となった。

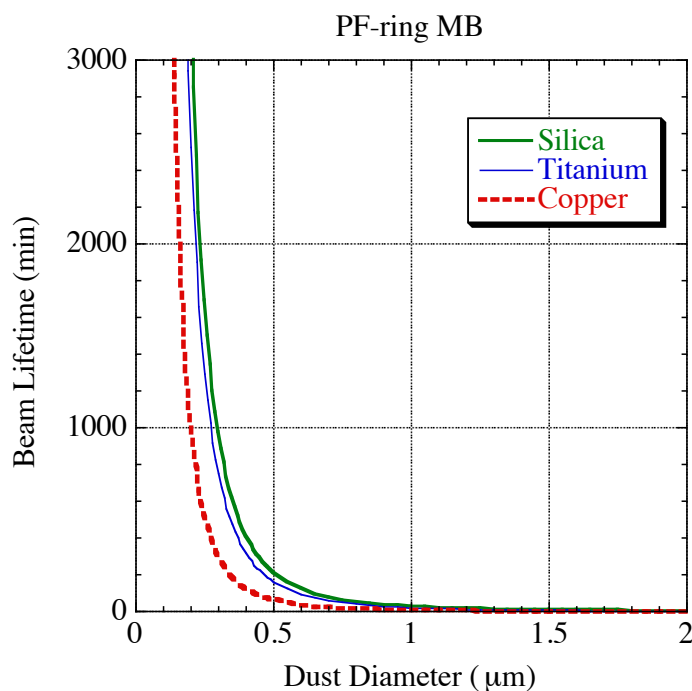


図 2-2 PF-ring MB モードでのダスト直径とビーム寿命との関係の計算結果

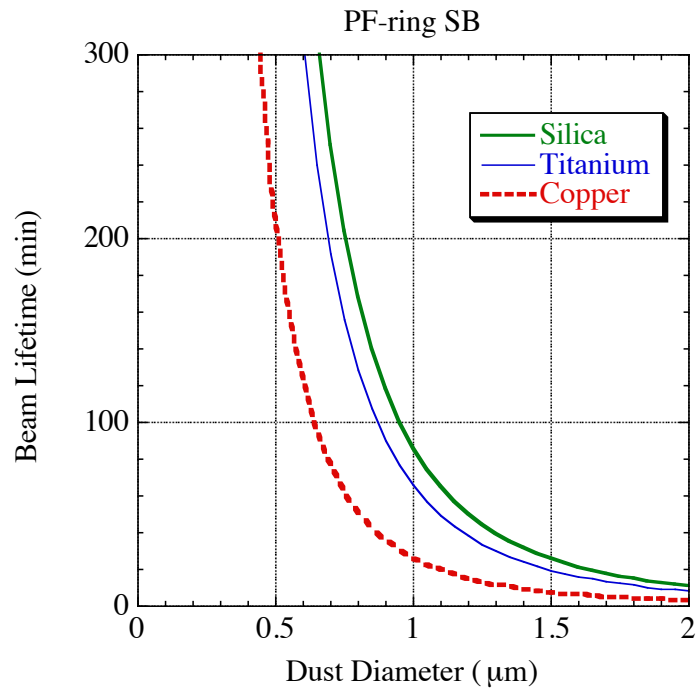


図 2-3 PF-ring SB モードでのダスト直径とビーム寿命との関係の計算結果

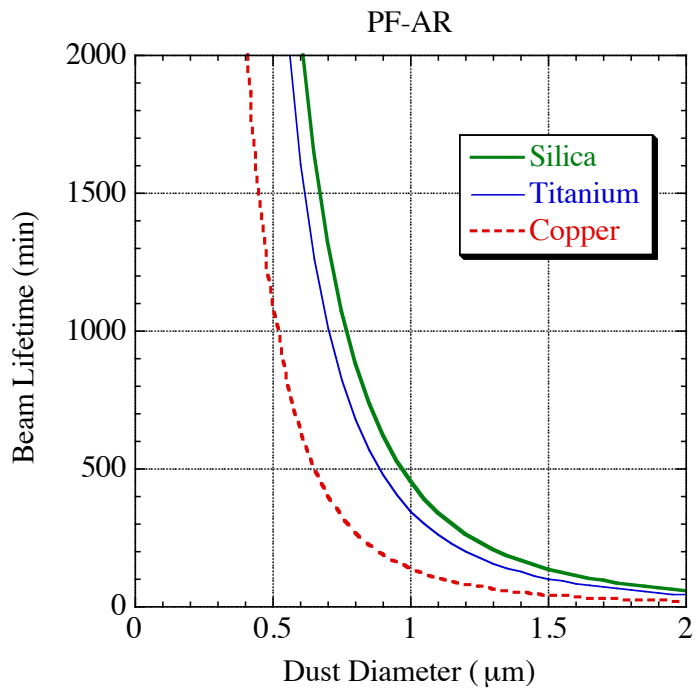


図 2-4 PF-AR でのダスト直径とビーム寿命との関係の計算結果

第 3 章

PF-ring におけるダストトラッピング現象

PF-ring では 1982 年の運転開始直後より寿命急落現象が観測されていた。当時はまだダストトラッピング説が一般的でなかったが、DIP 内でのスパークによってダストが発生し、それが正に帯電してビームにトラップされてビーム寿命の急落を引き起こしている可能性が報告されていた^[24]。DIP 動作中により高い頻度で発生したことに加え、アルゴン放電洗浄用電極に負の電圧を印加することで緩和されたという実験結果^[13]に基づいている。

1986 年、リング改造のための真空作業中に誤ってポリエチレン製 ICF203 フランジキャップをビームダクトに吸い込んでしまい、その後の運転で頻繁に寿命急落現象が発生した^[23]。さらに、イオントラッピングの実験で使用していた γ 線検出器で寿命急落に同期した放射線量率増加が観測されていたこと^[38]に加え、1988 年には陽電子ビーム蓄積によって寿命急落が見られなくなったことも報告されている^[6]。

その後、蓄積ビームを再び電子に戻した後も、PF-ring では瞬間型のものを除き、寿命急落現象はほとんど観測されなかった。1997 年に高輝度化（低エミッタンス化）のために、東西ノーマルセル部の真空ダクトを更新した大規模なリング改造^[39]でも再発することはなかった。

ところが、2005 年に直線部増強計画のためにリングの半周以上にわたる真空ダクトを更新した後、再び寿命急落現象が頻発するようになった^[12]。本章では、そのときの寿命急落現象の詳細な観察結果に基づき、PF-ring の 2 種類のバンチフィルモードである SB モードと MB モードの 2 種類の運転形態に分けて、ダストトラッピングの特性を議論する。

3.1 シングルバンチ運転での特徴と抑制対策

PF-ring は通常 280 バンチのビームを蓄積する MB モードで運転されているが、年に 2、3 回、それぞれ 6 日間ずつ 1 バンチのみを蓄積する SB モードでの運転が行われる。SB モードでは、2007 年にトップアップ（連続入射）運転が行われるまで、入射電流値は通常 70mA、入射間隔は 3 時間または 4 時間であった。

2005 年に行われた直線部改造後の初めての SB 運転において、すべての種類の寿命急落現象が頻繁に観測された（図 3-1）。6 日間の運転で、非回復型寿命急落が 10 回（1.67times/day）、回復型が 12 回（2.00times/day）、瞬間型が 8 回（1.33times/day）発生した。特に持続型の寿命急落現象は、1997 年の高輝度化改造後でも見られなかった現象である。

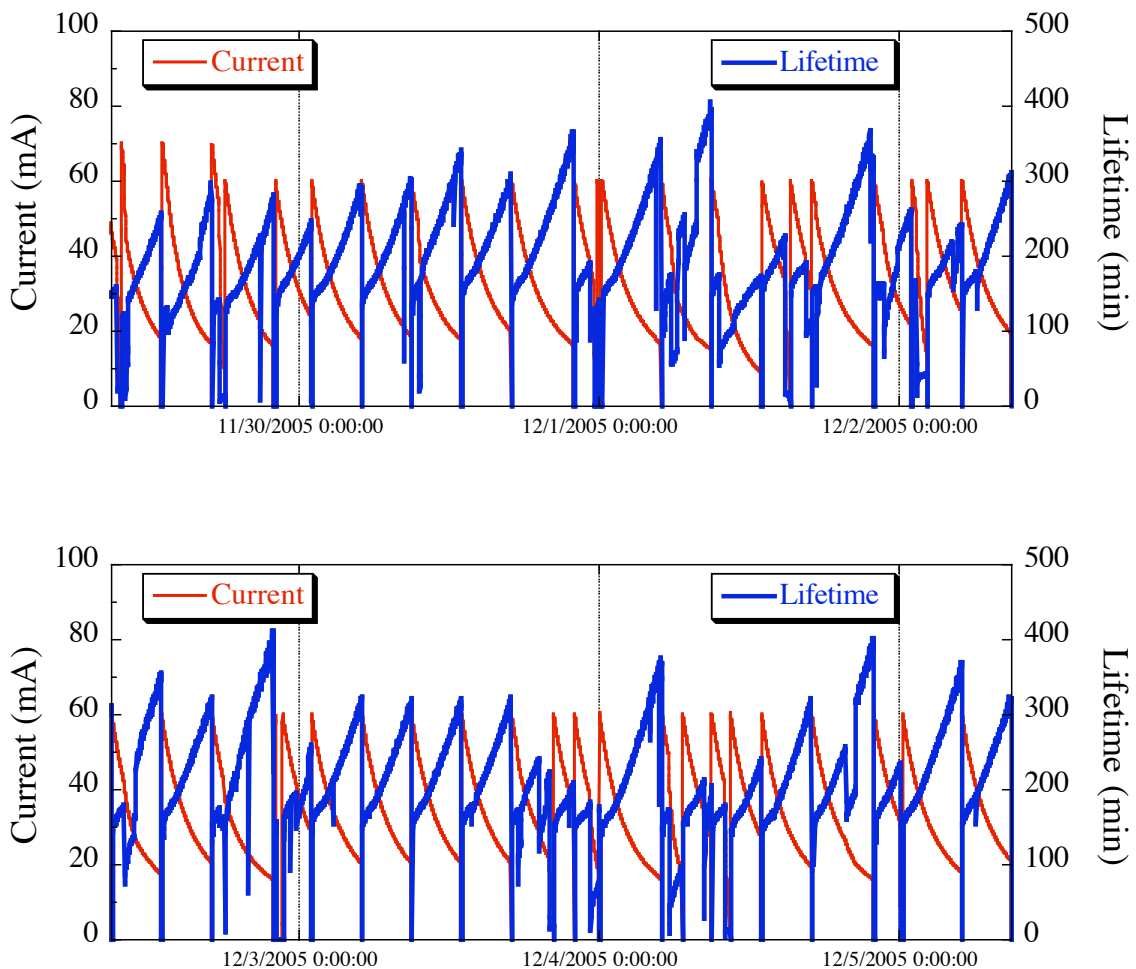


図 3-1 PF-ring における 2005 年改造直後の SB モードでのビーム電流と寿命の様子。計 6 日間の運転結果を 3 日間ずつに分けて表示した。

その原因について検討した結果、1997 年の改造では DIP をすべて再利用したのに対し、2005 年の改造では直線部区間の 12 台の DIP を更新したことから、新規の DIP がダスト発生源として疑われた。

そこで、次の SB 運転前のマシンスタディにおいて、SB モードで新規 DIP を ON した場合と OFF した場合で寿命急落発生の様子を比較したところ、予想どおり DIP を ON した場合のみ寿命急落現象が発生した (図 3-2)。さらに、DIP を OFF しても定常のビーム寿命に有意な変化は見られないことも確認された。これは、SB 運転時のビーム寿命がほとんど Touschek 効果によって決まっているためである。

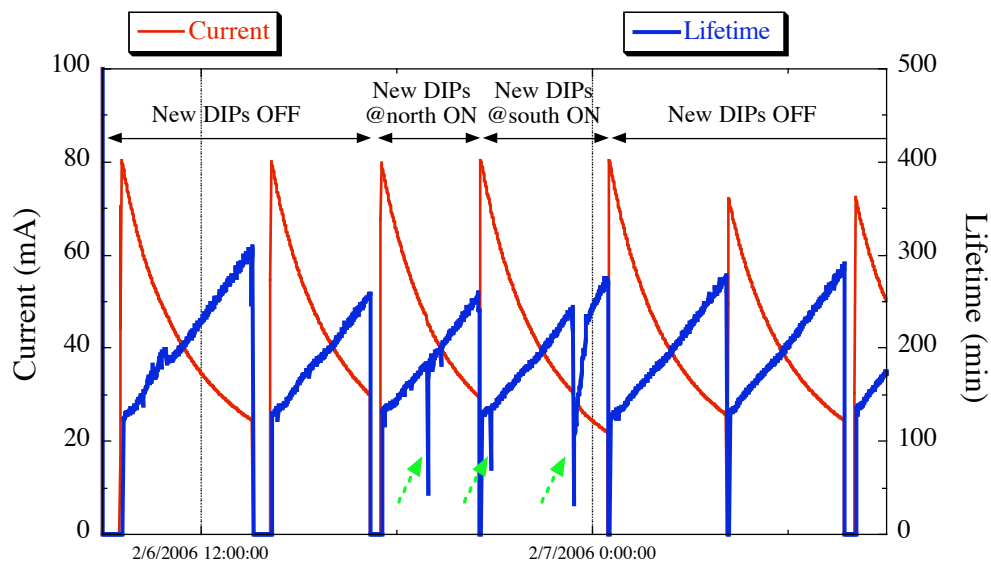


図 3-2 PF-ring における SB モードでの寿命急落現象に対する DIP の影響の調査結果。破線矢印で示されたように、DIP を ON した場合のみ寿命急落現象が発生した。DIP の ON 状態は南北それぞれ 6 台ずつに分けて試験した。

この結果を踏まえて、その後の SB ユーザー運転では新規 12 台の DIP を OFF した状態で運転を行った。その様子を図 3-3 に示す。瞬間型、持続型ともに寿命急落の発生がほぼ完全に抑制された。2007 年までに計 4 回（計 24 日間）の SB ユーザー運転が行われ、その間、持続型の寿命急落現象が発生したのは 1 回のみであった。数年後には DIP を ON して運転してもほとんど発生しなくなったことから、DIP からのダスト発生に関するコンディショニング効果も見られた。

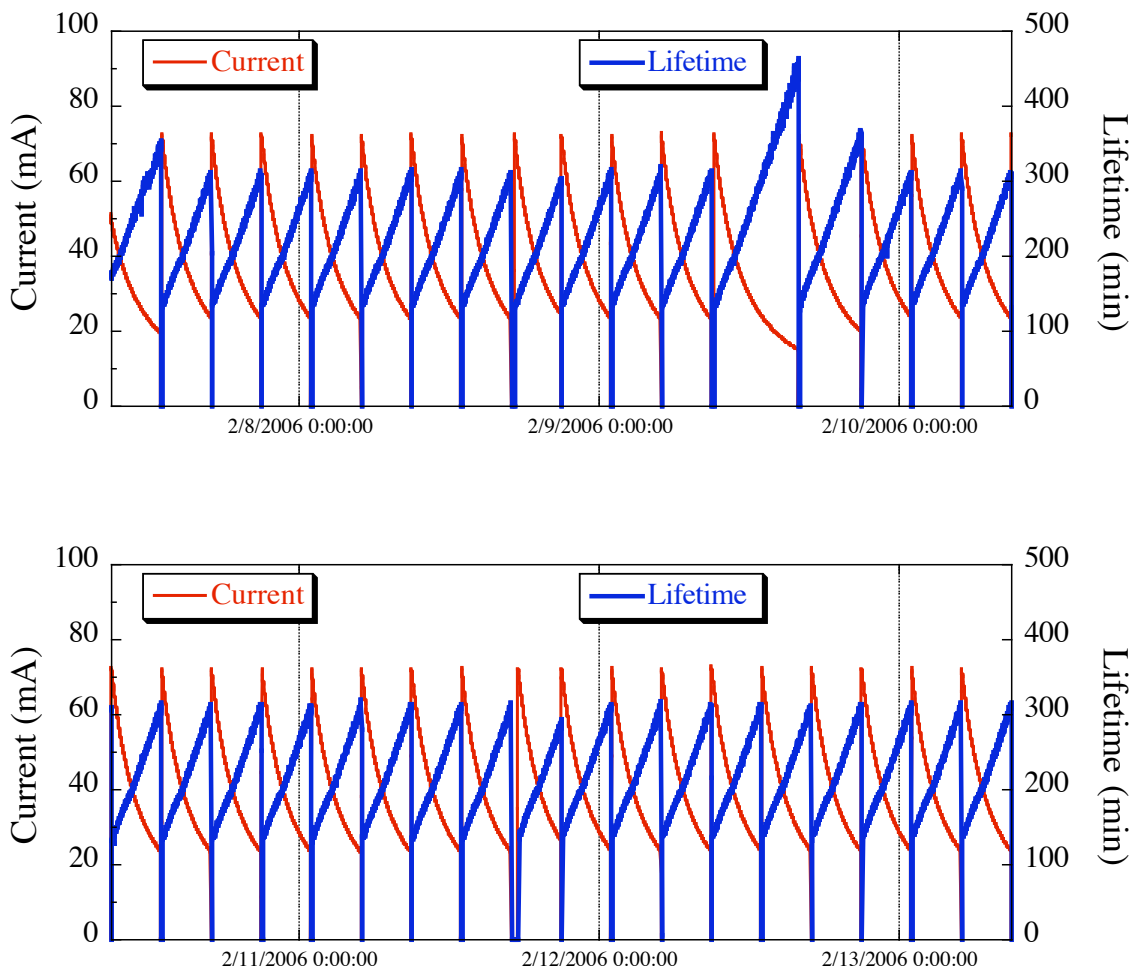


図 3-3 PF-ring における SB モードで新規 DIP を OFF して運転した場合での
 ビーム電流と寿命の様子。計 6 日間の運転結果を 3 日間ずつに分けて
 表示した。すべての種類の寿命急落現象が解消された。

3.2 マルチバンチ運転での特徴と抑制対策

PF-ring は通常 280 バンチで 450mA のビームを蓄積する MB モードで運転されている。2009 年にトップアップ運転が開始されるまでは、1 日 1 回もしくは 2 回の入射頻度でユーザー運転が行われていた。

2005 年の改造の後では、SB モードと同様に寿命急落発生頻度の上昇が見られた。図 3-4 に、(a) 改造直前、(b) 改造直後、および (c) 改造後 2 年のそれぞれの段階における典型的な 2 日間の運転の様子を示す。改造前では寿命急落はほとんど観測されていなかったが、改造直後では 1 日に 10~20 回程度の頻度で発生した。その後、発生頻度は徐々に減少していく傾向が見られ、2 年後には明らかに減少しているのが分かる。

MB 運転時の寿命急落現象における最も顕著な特徴は、持続型の寿命急落が全く発生していないことである。ただし、1986 年の真空トラブル後では発生していたという報告もある^[23]。その当時との主な違いは、ビームダクト内のダスト汚染の改善、およびビームエミッタンスの減少 (130 → 36nm·rad) と蓄積電流値の増加 (300 → 450mA Max) によるビームフラックスの増加であり、それらが持続型急落を起こさなくした原因であると推察される。

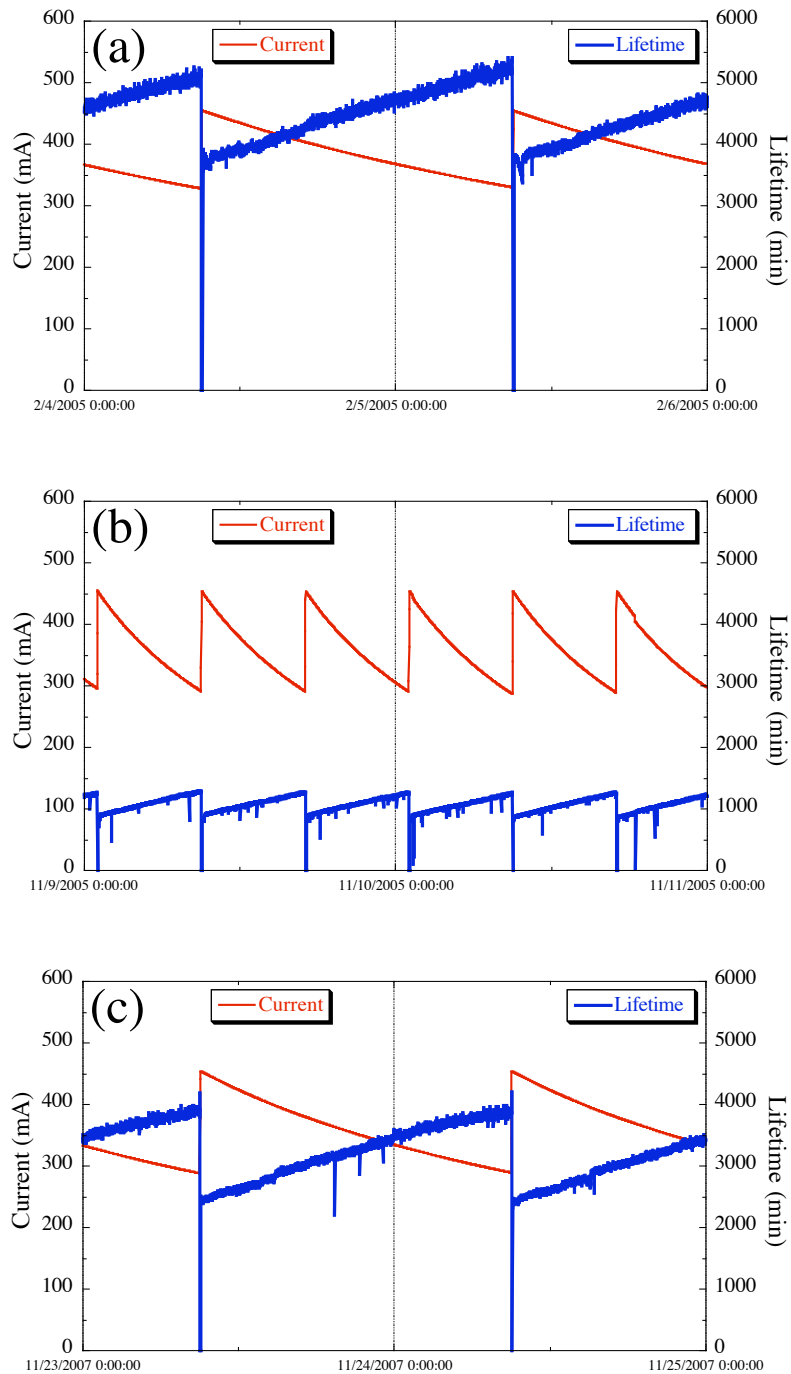


図 3-4 PF-ring MB モードでの典型的な 2 日間の運転状態の推移。(a) 改造直前、(b) 改造直後、および (c) 改造後 2 年の段階における例を示す。瞬間型の寿命急落現象が改造直後に増加し、その後減少する傾向が見られた。改造直後に定常寿命自体が短い理由は、真空ダクトの光脱離に対するコンディショニングが不十分な段階であったためである。

瞬間型急落のみが発生する場合、ユーザー運転に対する影響は小さい。しかしながら、瞬間的な γ 線発生やビーム強度変動を起こす可能性もあり、発生要因がSBモードの場合のように明確で、かつ抑制可能なものである場合には対策を講じた方が良い。第一に発生要因として考えられたのはDIPであり、MBモードでもSBモードと同様、新規のDIPをOFFした運転を行い、発生頻度の比較を行った。その結果を図3-5に示す。

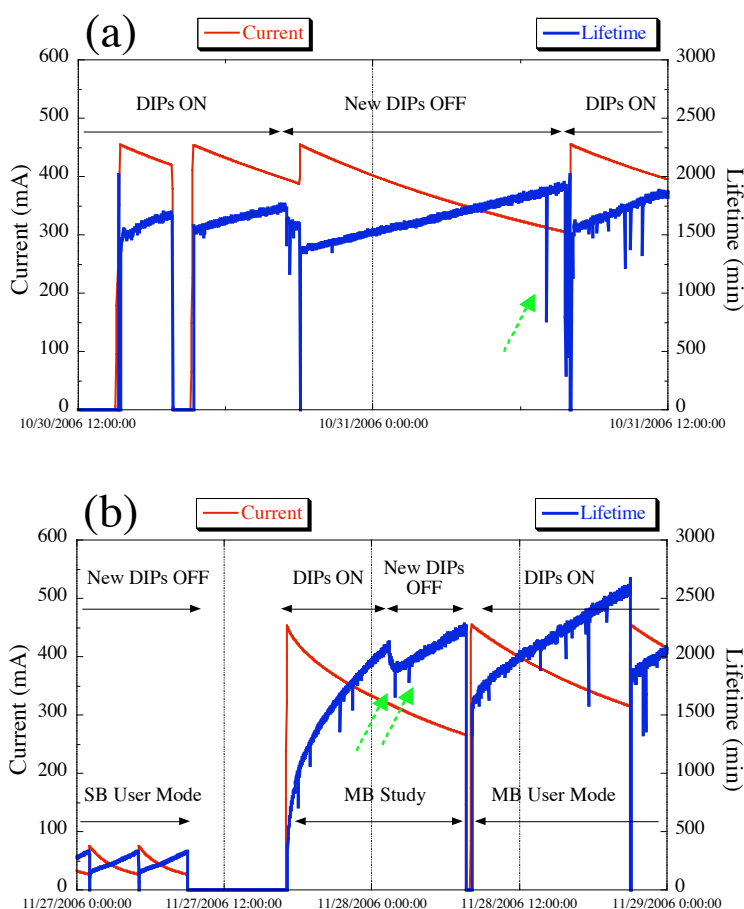


図 3-5 PF-ring における MB モードでの寿命急落現象に対する DIP の影響の調査結果。(a) 2006 年 10 月 30~31 日、(b) 2006 年 11 月 28~29 日の 2 回のマシンスタディでの結果を示す。図中の破線矢印で示されたように、新規 DIP を OFF した場合でも寿命急落現象が発生した。

DIP を OFF した状態でも依然として寿命急落現象が発生することが分かった。すなわち、MB モードにおける寿命急落抑制の対策として DIP を OFF すること

は効果がなく、DIP を ON した状態でユーザー運転を続けることとした。図 3-5 にも示されているように新規 DIP を OFF すると定常寿命自体の低下に繋がることに加え、DIP のコンディショニングを進めておきたかったことも DIP を ON しつづけた理由である。

MB モードにおける DIP の OFF/ON 比較試験の結果は、ダスト発生源が DIP 以外にもあることを示唆している。そこで、寿命急落現象が発生した際の真空データを丹念に調べたところ、特に急落の程度が大きいときに同期して圧力が瞬間的に上昇していることがあった。また、その場所は設置直後の真空封止型挿入光源であることが多かった。図 3-6 に寿命急落と圧力上昇の同時発生の様子を示す。

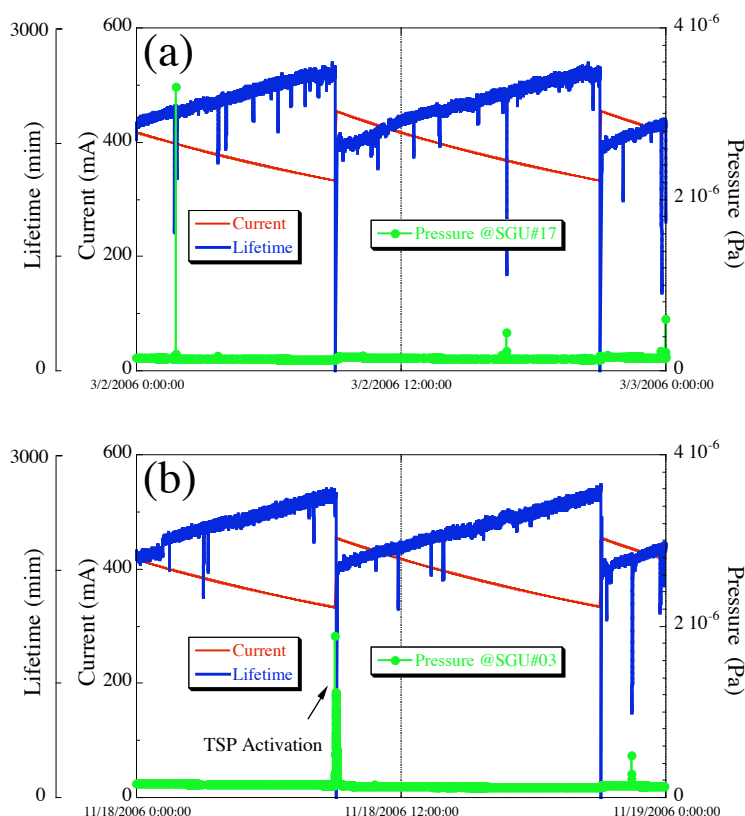


図 3-6 PF-ring における MB モードでの瞬間型寿命急落に同期して、真空封止型挿入光源で圧力上昇が観測された例。(a)は 2005 年の改造時に設置した SGU (Short Gap Undulator) #17 での例で、(b)は 2006 年夏に設置した SGU#03 での例である。比較的大きな急落が発生した場合、SGU 内で圧力上昇が観測される傾向にあった。

瞬間的な圧力上昇の原因として第一に考えられるのは真空内での放電である。真空封止型挿入光源のように複雑な構造をビームに近づけて使用する場合、ビームからの電磁場によって放電が発生しやすいと考えられる。すなわち、DIPのように高電圧が印可されている場合だけでなく、真空封止型挿入光源のようにビームからの電磁場によって放電が発生した場合でも、ダストが発生しうると考えられる。ただし、圧力上昇との同期性が確認されたもの以外の寿命急落現象に関しては、その発生要因を特定することは困難である。

放電により発生するダストは、運転時間とともにその発生源のコンディショニングが進むことが期待される。図 3-4 において、改造から 2 年後には発生頻度が減少しているのも、このコンディショニング効果によるものと考えられる。

さらに、2009 年以降 PF-ring は加速が必要な 3GeV 運転モードの場合を除き、トップアップ運転に移行した。このため、SB モード、MB モードともに寿命急落現象が目に見える形では現れ難い加速器となった。

3.3 PF-ring での寿命急落現象に関する考察

PF-ring での運転中に発生した寿命急落現象の特徴とその対策に関して、以下の項目が明らかになった。

(1) 発生頻度について

- ・2005 年の直線部改造により、SB モードと MB モードともに、寿命急落現象の発生頻度が増加した。
- ・すべての寿命急落現象に対して運転時間の経過によるコンディショニングの効果が見られた。改造から数年後には発生頻度が減少した。

(2) 寿命急落現象の種類（持続時間）について

- ・SB モードでは、非回復型、回復型、瞬間型のすべての種類の寿命急落現象が発生した。
- ・MB モードでは、瞬間型の寿命急落現象のみが発生した。

(3) ダストの発生要因について

- ・SB モードでのダスト発生要因は、そのほとんどすべてが 2005 年の改造時に更新した DIP であった。新しい DIP を OFF して運転することで

寿命急落現象をほぼ完全に抑制できたためである。

- ・MB モードでは DIP を OFF しても寿命急落現象は解消されなかった。瞬間的な寿命急落に同期して、真空封止型挿入光源で圧力のハネが観測される場合もあった。

以上の PF-ring での運転経験で特徴的であったのは、SB モードと MB モードで、(2) の寿命急落現象の種類が明らかに異なっていたことと、(3) の DIP を OFF した運転に対する効果が明らかに異なっていたことである。

(2) の寿命急落種類の相違点に関しては、以下のように考察される。SB モードと MB モードで明らかに異なる運転パラメータは、バンチ数(SB: 1、MB: 280)、すなわちバンチ間隔 (SB: 624ns、MB: 主に 2ns)、および蓄積電流値 (SB: 最大 70mA、MB: 最大 450mA) である。ここではバンチ間隔と蓄積電流値のどちらか一方がダストの長時間安定トラップを可能にするどうかを左右すると仮定して、そのどちらがより本質的であるかを考える。

その考察の参考になる例として、MB モードで低電流 (約 24mA) を蓄積した場合に持続型の寿命急落現象が発生した事例を図 3-7 に示す。この結果は、低電流であればバンチ間隔によらず、持続型寿命急落が発生しうることを示している。

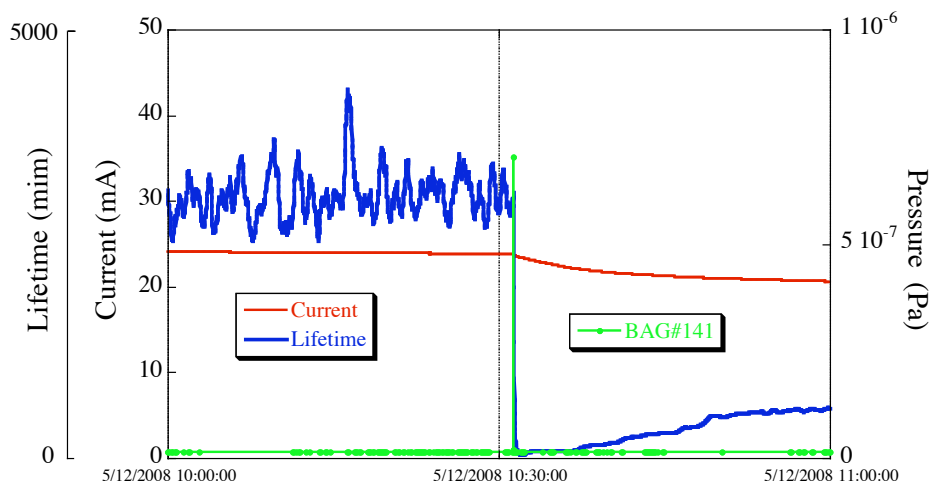


図 3-7 PF-ring における低電流の MB モードで持続型の寿命急落が発生した例。偏向電磁石 B14 直下流部の真空ゲージ BAG#141 で瞬間的な圧力上昇が観測されていた。軽度の圧力上昇が周辺のゲージでも観測されており、DIP#14 (新 DIP12 台のうちの 1 台) がダスト源であった可能性が高い。

さらに別の例として、1986 年頃には 300mA 以下の蓄積電流値において比較的頻繁に持続型の寿命急落現象が発生していた^[23]。ただし、これはポリエチレンのフランジキャップを誤ってビームダクトに吸い込んだ後の運転中の事例であり、ダストの条件が通常とは異なっていたために現れた現象と推察される。

以上の結果から、PF-ring の場合、「蓄積電流が低ければバンチ間隔に関係なくダストが安定にトラップされる」という説が導かれる。これは、2.1 節で議論したビームフラックスが高い方がダストの蒸発や分解を起こしやすいという理論計算結果を支持するものである。また、2.2 節で議論したダスト運動の安定条件 (式 2-17 と式 2-18) は、イオントラッピングの場合はバンチフィルによってトラップ条件から外れることがあるが、桁違いに重いダストの場合は電荷に対して幅広い安定条件を持ち、通常「バンチ間隔に関係なく」ダストの運動が安定になる (ダストが安定にトラップされる) ことを示している。

この仮説を実験的に立証するためには、SB モードで蓄積電流値を 300mA 以上、すなわち持続型急落の発生しない MB モードでの運転条件に合わせて試験し、SB モードでも 300mA 以上なら発生しないことを確認すればよい。しかしながら、高いバンチチャージによる真空機器の発熱やビーム不安定性のため、

SBモードで100mA以上蓄積することはできない。さらに、発生しないということを実証するには非常に多くの統計を要する。したがって、(2)のSBモードとMBモードでの持続時間の相違に関しては、現段階では上記仮説が最も確からしいと考えられるが、確証は得られていない状況である。

(3)のダスト発生要因に関するSBモードとMBモードでの相違点では、SBモードではそのほとんどが新しいDIPであったのに対し、MBモードではそれ以外の発生要因、例えばビームからの電磁場による放電も大きな割合を占めていたことを示している。当時SBモードでは真空封止型挿入光源SGU#17やSGU#3は使用されておらず(磁石列ギャップを全開状態で保持)、図3-6に示されたような放電によるダスト発生は、真空封止型挿入光源を使用するMBモードで起きやすい現象であったことも一因と考えられる。

ただし、そのような場合、急落後のビーム寿命は短いものでも500分程度であり、これはSBモードでのビーム寿命である100~300分よりも長い。すなわち、発生要因自体に相違がなくても、定常寿命の違いによって寿命急落現象が観測されるか否かが異なることになる。DIPからのダストの方がより短寿命をもたらす傾向にあったため、もともと短寿命のSBモードではDIPが主な発生要因となり、通常2000~3000分という長寿命のMBモードではDIP以外の例えばビームに起因した放電でも寿命急落現象として観測されることになる。

問題となった新DIPの特徴について説明する。更新前のDIPと最も大きく異なる点は印加電圧である。更新前は+5.0kVであったのに対し、新DIPは-7.5kVで使用する。絶対値を大きくした理由は、排気速度を改善(100→180 l/s/m)させた新しいセル用に最適化したためである。極性を正から負へ変えた理由は、DIPで発生したダストが正電荷を帯びてビームに引き寄せられるのを防ぐ効果を期待してのことであった。しかしながら、実際の運転における結果は、DIPの極性反転は寿命急落現象の抑制に効果がないことを示した。

続いてDIPからのダストの発生機構について考察する。まず、図3-8に示されたように、DIPはアルミ合金製の偏向電磁石用ビームダクト(Bダクト)内にビーム路に沿って設置されている。また、DIPを含む偏向部ビームダクトの断面図(図3-8中のA-A矢視図)を図3-9に示す。

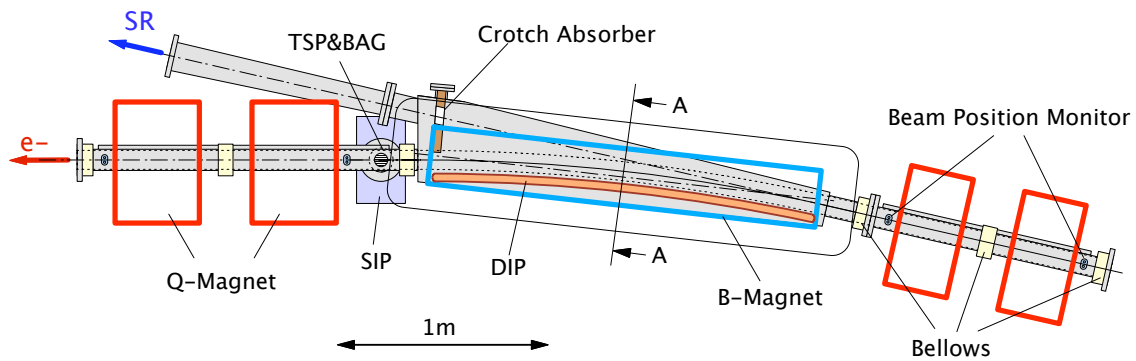


図 3-8 PF-ring 直線部改造後の典型的なビームダクトおよび真空機器配置図

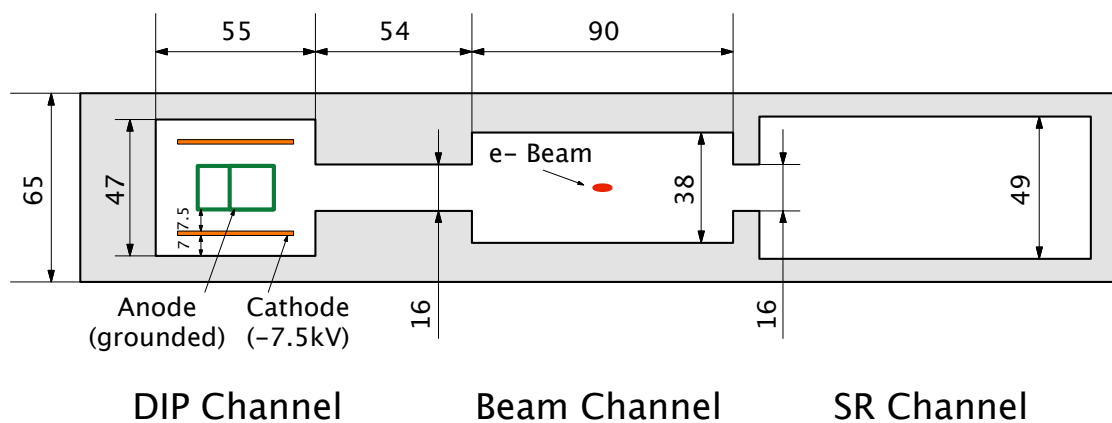


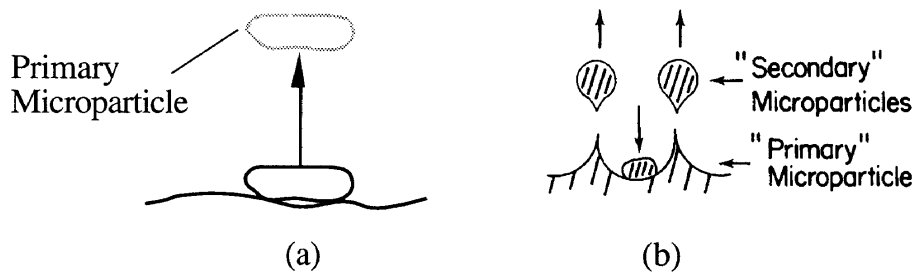
図 3-9 PF-ring 直線部改造時に設置された B ダクトの断面図

図 3-9 に図示されているように、B ダクト内は DIP チャンネルとビームチャンネル間の高さ 16mm、幅 54mm の隙間を通して、DIP がビームから直接見える構造となっている。DIP 運転時はチタン (TP270) 製カソードに -7.5kV の電圧が印加され、ステンレス (SUS304L) 製アノードとの間で定常的なペニング放電を起こしている。ところが、あるとき高電圧印加に起因してダストが電極表面から放出され、それが上述の隙間を通過してビームにトラップされると考えられる。寿命急落発生時の DIP 放電電流のデータを調査すると、ある 1 台の DIP で寿命急落と同期した瞬間的な跳ねが観測されていた事例も多い。その場合、瞬間的な絶縁破壊が生じたと考えられる。ただし、通常電源トリップ (最大電流: 1mA) までには至っていない。

真空中における電極間ギャップ 7.5mm での絶縁破壊基準電圧は 80kV であり

^[40]、DIP の印加電圧絶対値の 7.5kV はその 10 分の 1 程度でしかない。しかし、DIP の場合は、アノードが厚さ 1.5mm のステンレス板を丸めた円筒であり、その縁がカソードに対向している。さらに、常時カソードからスパッタされたチタンが堆積するため、不均一な部分では電界がより集中すると考えられる。それらが DIP 内部で絶縁破壊を起こす要因になっていると推察される。

真空中電極間における絶縁破壊機構の有力な説の一つに「クランプ説」^[41, 42]がある。クランプとは電極表面にゆるく付着したダストのことであり、その付着力（ファンデルワールス力）を電界による斥力が上回ると表面から離脱する（図 3-10(a)）。その後、電極間で加速され、対向電極に衝突してダストシャワーを起こしながら（図 3-10(b)）、対向電極に与える単位面積当たりのエネルギーがある臨界値を超えると絶縁破壊に至ると考えられている。



A schematic representation of the creation of (a) a "primary" microparticle by the field-stripping of a protruding microfeature, and (b) the "coronet" effect in which a shower of "secondary" microparticles result from a high-velocity impact of a primary microparticle.

図 3-10 ダストシャワーの生成機構（文献^[42]より転載）

このように真空中の絶縁破壊ではダストが介在する場合があります、これが DIP におけるダスト生成の有力な原因と考えられる。絶縁破壊にダストが関与していることの証拠として、電極間にレーザー光を通し、その散乱光を観測することで推定半径 0.1~0.2 μm のダストが絶縁破壊の数 μs 前に検出されたこと（図 3-11）^[43]、および、電極の一方をグリッドにし、通過したダストを集めて SEM 観察を行い、平均半径 4 μm 程度のダストが確認されたこと（図 3-12）^[44]、なども報告されている。以上の考察によると、DIP から発生する最も有力なダスト材質は、カソード材であり、かつアノードの表面にも堆積しているチタンである。

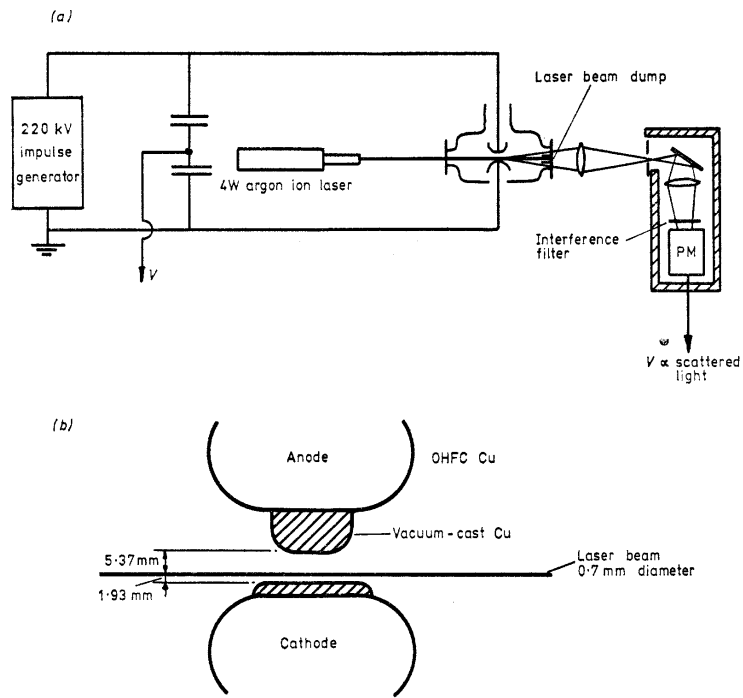


Figure 1. Experimental system: (a) high-voltage and optical system (schematic); (b) electrode arrangement and location of laser beam.

図 3-11 レーザー光によるダスト検出システム (文献^[43]より転載)

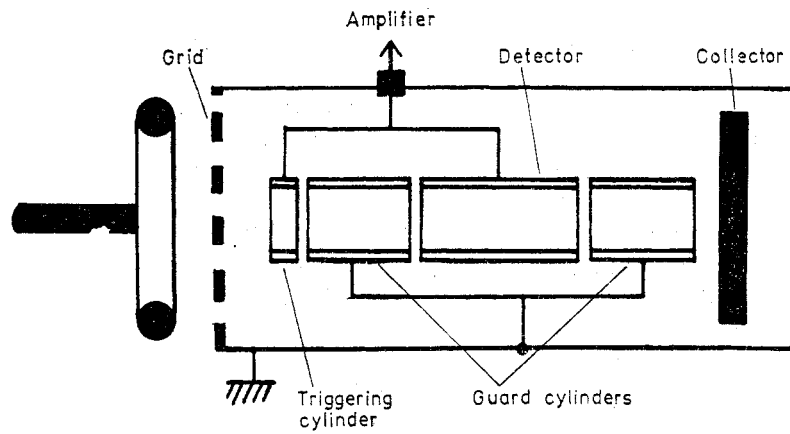


図 3-12 グリッド電極を用いたダスト分析システム (文献^[44]より転載)

第 4 章

PF-AR におけるダストトラッピング現象

PF-AR は 1983 年に TRISTAN Main Ring (MR) への入射用 Accumulation Ring (AR) として運転が開始された。一方で、放射光実験用の貯蔵リングとしても利用されてきた。貯蔵モードでの運転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現象の精力的な研究も行われた。ダストイベントに同期したγ線の観測実験^[2]、サンプルダストを用いたトラッピング実験^[27]、^[28]、トラップされたダストの挙動に関するモデル計算^[33]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イベントの定量化も行われている^[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、その名も PF-AR と変更された。そして、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。

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^[45]、定常時のビーム寿命は改造前の約 10 倍にまで改善された。ところが、寿命急落現象は改造後も高い頻度で観測された^[12]。本章では、2001 年の高度化改造以降の PF-AR における寿命急落現象の特徴とその抑制対策の効果について報告する。

4.1 寿命急落現象の特徴と発生統計

2002 年の運転再開後の PF-AR では、図 1-1 で示される 3 種類のパターンすべての寿命急落現象が頻繁に観測された。それぞれのパターンについて、2009 年 6 月までの運転における発生頻度を数ヶ月毎の運転期間に分けて纏めた統計データを図 4-1 に示す。寿命低下率が約 30%以上であったものをすべてカウントした。

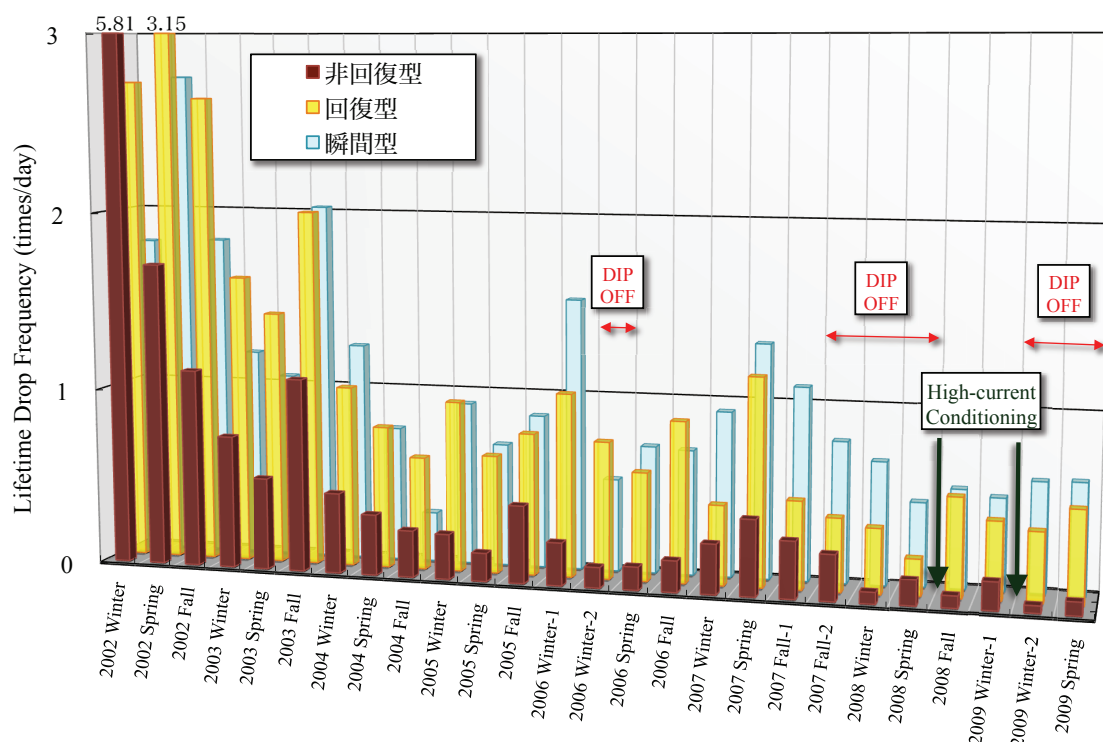


図 4-1 2001 年の PF-AR 高度化改造以降に発生した寿命急落現象の統計。持続時間の違いによる 3 種類の寿命急落現象について、数ヶ月の季節毎に 1 日当たりの平均発生回数として纏めた。

2002 年の運転再開後の約 1 年半は発生頻度が徐々に減少する傾向が見られた。しかしながら、その後は有意な減少傾向は見られず、しかも、2003 年秋、2005 年秋、2007 年春などでは発生頻度が上昇する傾向も見られた。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。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。

また、PF-AR における寿命急落現象の特徴の一つとして、メンテナンスなどで数時間運転を停止した後の運転で寿命急落現象が起りやすい傾向が見られている。ビームダクトや電磁石、あるいは RF 空洞の温度変化が影響している可能性が疑われ、急落発生と温度との相関を調べる実験も行われたが、結局有意義な結論は得られなかった。原因は特定できていないが、1 シフト (8 時間) 程度のメンテナンスでは電磁石への通電をなるべく保持し、温度の安定化を図るようにしている。

寿命急落現象と同期して、放射光実験フロアでの放射線レベルの上昇もしばしば観測されている。実験者に対する安全インターロックとして、放射線量率が閾値 ($4\mu\text{Sv/h}$) を 3 分間連続して超えれば自動でメインビームシャッタを閉じ、放射線を遮蔽する措置も取られている。また、持続型の急落が発生する度に、運転当番員による実験フロアの安全確認パトロールも行われる。

PF-AR の通常のビーム寿命は、60mA 蓄積時で約 20 時間である。一旦寿命急落現象が起こると数時間以下まで減少することが多く、その状態が数 10 分以上持続した場合は、大抵ビームの再入射が必要となる。この再入射のために通常 15~20 分程度、放射光実験を中断しなければならない。このように、PF-AR では寿命急落現象が長期にわたり、安定な放射光実験を妨げる最も厄介な問題となっている。

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に、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) 寿命急落発生時のビーム電流値
- (2) 急落後のビーム寿命から推定されるダストサイズ

の 2 種類に関する統計として纏めた。寿命急落イベント数のカウントでは、運転に与える影響を考慮して寿命の低下率が 30%以上という基準を設けていたが、ここではダストサイズをより小さいものまで調査するため、寿命低下率が 15%以上であったものまでカウントした。この値を採用した理由は、真空封止型挿入光源のギャップ変更によってビーム寿命が 10%程度変化する場合があり、その事象と区別するためである。また、DIP に関しては、前半の 2185 時間は ON、後半の 2389 時間は OFF であった。

まず、(1) の寿命急落発生時のビーム電流値に関する統計データを図 4-2 に

示す。

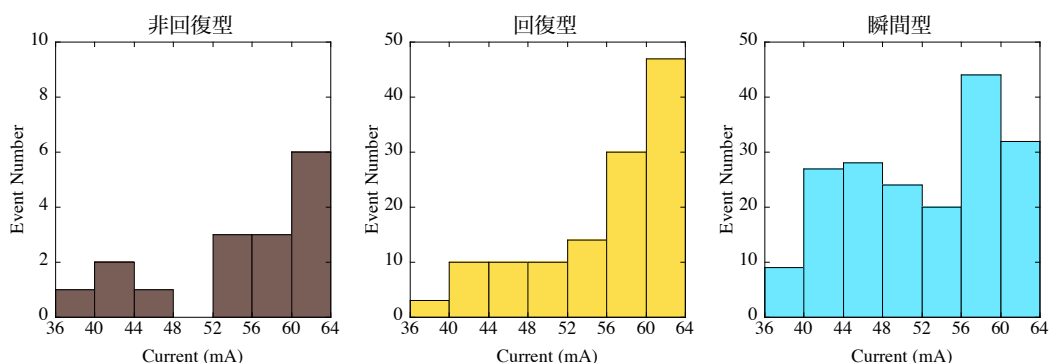


図 4-2 寿命急落発生時のビーム電流値に関する統計

すべてのパターンにおいて、電流値の高いときの方が、寿命急落が発生しやすい傾向にあった。実際の運転時間を考えても、高電流値の方が短時間であるにも拘わらず発生イベント数が多いため、寿命急落発生に関して有意な電流値依存性があったと結論づけることができる。入射時の最大電流値は 62mA 程度である場合が多い。また、寿命が長い場合 12 時間おきの入射では 40mA を下回らないこともあるため 36~40mA のデータは参考値である。

次に、(2) の急落後寿命から推定されるダストサイズに関する統計データを図 4-3 に示す。急落後の寿命からダストサイズを推定する際、ダスト種をチタンと仮定し、変換式は式 2-27 を用いた。

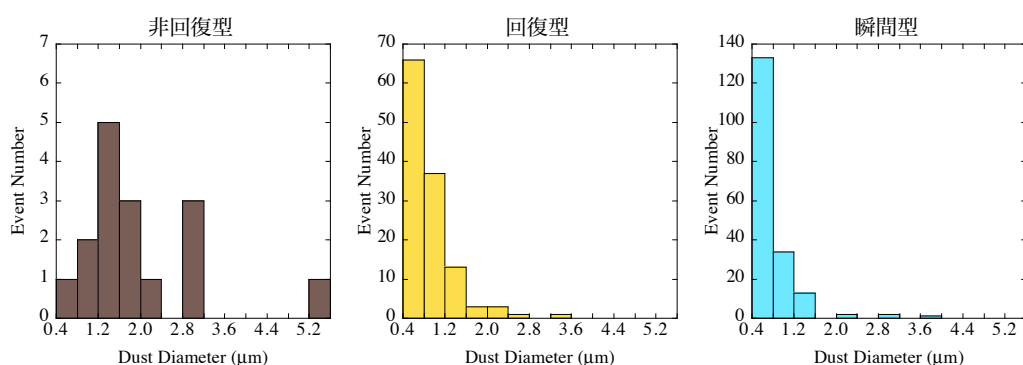


図 4-3 急落後のビーム寿命から推定されるダストサイズに関する統計

ダストサイズに関する統計では、急落パターンによってダストサイズ分布が異なる結果となった。最も顕著な特徴は、直径が 1.2μm 以下の小さなダストは

瞬間的にしか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点である。逆に非回復型の寿命急落の場合は、大部分が $1.2\mu\text{m}$ 以上の比較的大きいダストであったことも判明した。

4.2 抑制対策とその効果

寿命急落現象の抑制対策として、まず効果が期待できるのは DIP を OFF した運転である。しかしながら、PF-AR は比較的ビームエネルギーが高く (6.5GeV)、エミッタンスも大きい ($290\text{nm}\cdot\text{rad}$) ので Touschek 寿命が長く、主なビームロス過程は残留ガスとの散乱（特に制動放射）である¹¹⁶⁾。このため、全 56 台の DIP を OFF すればリング真空が悪化し、定常ビーム寿命自体の低下に繋がる。

そこでまず始めに実施したことは、DIP への印加電圧を低下させることであった。これにより、DIP 内での絶縁破壊頻度の低減が期待された。2002 年の運転再開から半年が経過したところで、すべての DIP への印加電圧を -5.5kV から -4.5kV へ低下させた。この電圧低下による有意な圧力上昇やビーム寿命の減少は見られなかった。この運転は 2006 年 1 月まで続けられたが、期待に反して寿命急落現象を抑制させる効果は得られなかった。その後、DIP への印加電圧を -5.5kV に戻した。

2001 年の改造時に更新した PF-AR 用 DIP への印加電圧は負極性であり、正電荷を帯びたダストを引き寄せさせる効果が期待された。しかしながら、その極性反転による寿命急落抑制効果は見られなかった。

2006 年以降、幾つかの寿命急落抑制対策を実施した。その効果の定量的な評価においては、ユーザー運転への影響の最も大きい非回復型寿命急落の発生頻度の統計データを使用した。まず、対策前の発生頻度として、2006 年 1 月から 2007 年 11 月の運転で得られた 0.25times/day ($76\text{times in } 7177\text{h}$) を採用する。

2006 年以降、まず始めに実施した対策は DIP を完全に停止した運転である。それを可能にするために、2006 年からの 3 年間で計 61 台の SIP の増設を行った。3 年計画の途中ではあったが、2006 年 2 月の試験的な約 1 ヶ月間と 2007 年 11 月から 2008 年 6 月まで、DIP をすべて OFF した運転を行った。その間の寿命急落発生頻度は、 0.14times/day ($23\text{times in } 3831\text{h}$) であった。すなわ

ち、発生頻度を対策前の 57%まで減少させる効果は得られたことになる。しかしながら、寿命急落現象が完全に解消されることはなかった。

この結果から、ダストの発生源は DIP 以外にもあることが判明した。その発生要因を調べる目的で、PF-ring と同様、寿命急落現象発生時のリング真空データの異常の有無を詳しく調査した。その結果、幾つかの寿命急落発生と同期して、真空封止型挿入光源やストリップライン型 Feedback (FB) キッカー部において、瞬間的な真空圧力上昇が観測されていたことが判明した。

PF-AR には 5 台の真空封止型挿入光源が設置されており、そのすべてにおいてギャップ変更と同期した寿命急落現象が観測された。大抵の場合、瞬間的な真空の悪化も観測されていた。特に 1991 年に設置された最も古い ID-NE3 では、ギャップを 11mm まで閉じると非常に高い確率で寿命急落現象が発生することが判明し、最小ギャップを 13mm に制限して運転を行っている。図 4-4 に ID-NE3 のギャップを 12mm まで閉じた直後に発生した、瞬間的な真空の悪化を伴う寿命急落現象の例を示す。

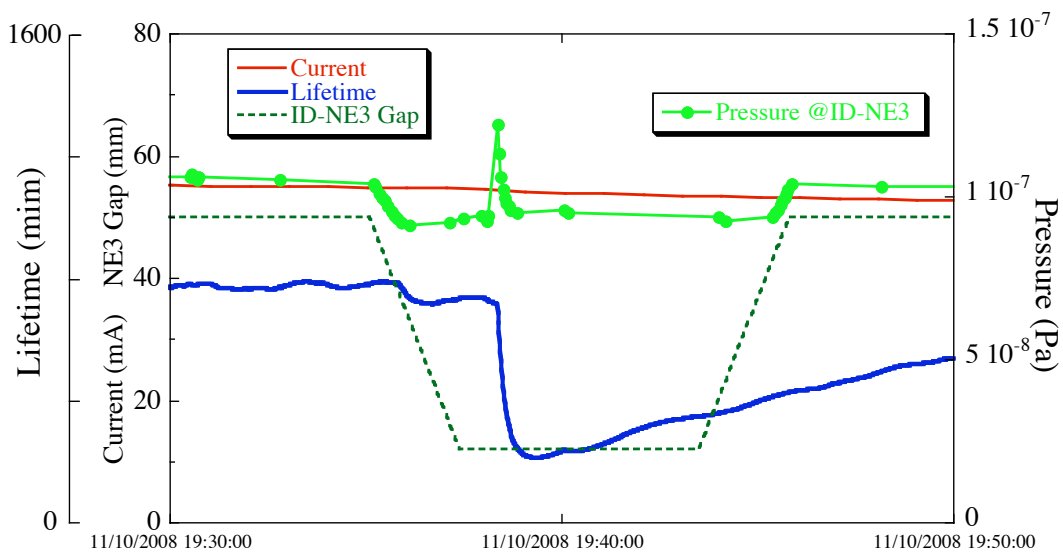


図 4-4 PF-AR の ID-NE3 においてギャップを 12mm まで閉じた直後に発生した寿命急落現象の例。真空悪化に同期してビーム寿命が急落した。このとき実験フロアにおいて約 5 秒間の放射線量率の増加 ($3\mu\text{Sv/h}$ 以上) も観測された。

このように、高電圧を印加しない装置で寿命急落現象と同期して瞬間的な真

空悪化が観測されている場合は、PF-ring での観測結果と同様、ビームからの電磁場によって放電が発生し、その結果ビームにトラップされうるダストが発生したと推察される。この発生要因を減少させる有効な手段の一つは、放電源のコンディショニングである。そこで、2008 年 10 月、秋期のユーザー運転再開に先だって、3GeV、2 バンチで 76mA というユーザー運転時(6.5GeV で 60mA)よりも約 25%高い電流値を蓄積する試験を行った。その結果、この大電流試験の間は通常運転時よりも高い頻度で寿命急落現象が発生し、その後の運転では、DIP を ON した状態でも 0.10times/day (9times in 2185h)、すなわち対策前の 39%まで頻度が減少した。

さらに 2009 年 2 月にも同様な試験を行い、その後は DIP-OFF 運転による対策と合わせて、発生頻度は 0.07times/day (7times in 2389h) となり、対策前の頻度の 28%まで減少した。

その 2 回の大電流コンディショニングの様子を図 4-5 に示す。特に圧力変化の大きかったストリップライン型 FB キッカー部の真空も合わせて表示した。(a) は 2008 年 10 月のときのものであり、前半の数時間は放電によると考えられる圧力上昇が観測されたが、後半は落ち着く傾向が見られた。(b) は 2009 年 2 月のものであり、再び FB キッカー部で圧力上昇が観測され、それに伴う寿命急落現象も頻繁に発生した。

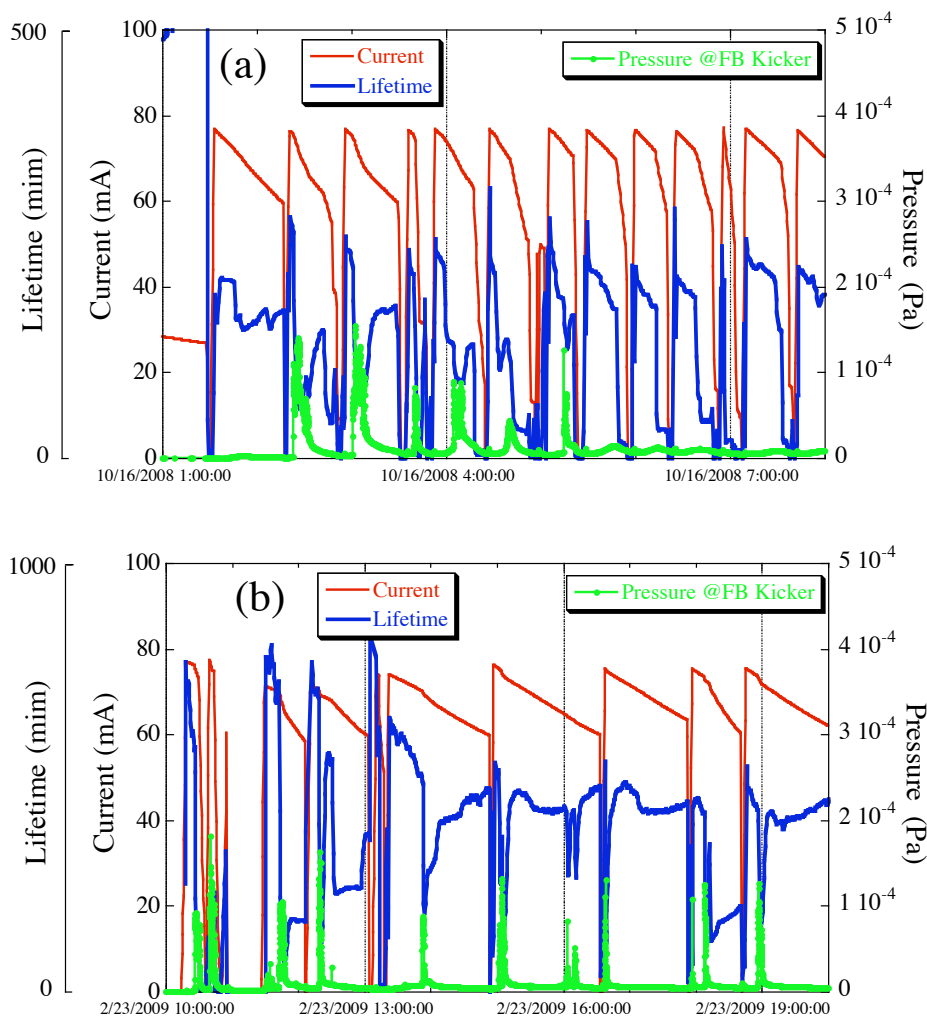


図 4-5 PF-AR での大電流コンディショニングの際のビーム電流と寿命、および FB キッカー部の圧力の様子。3GeV、2 バンチで最大 76mA のビームを繰り返し蓄積した。(a)は 2008 年 10 月に、(b)は 2009 年 2 月に行われた。

以上の PF-AR における寿命急落抑制対策の結果を、その対策毎に分類した非回復型寿命急落の発生統計として表 4-1 に纏める。また、これらの対策によって運転状態にも明らかな変化が見られており、対策前と対策後のそれぞれ 9 日間の典型的な運転状態を図 4-6 と図 4-7 に示す。

表 4-1 抑制対策に関して分類した非回復型寿命急落の発生統計

	DIP-ON			DIP-OFF			DIP-ON & 大電流試験			DIP-OFF & 大電流試験		
	運転時間 (h)	発生回数	発生頻度 (times/day)	運転時間 (h)	発生回数	発生頻度 (times/day)	運転時間 (h)	発生回数	発生頻度 (times/day)	運転時間 (h)	発生回数	発生頻度 (times/day)
2006 冬 1	580	6	0.25									
2006 冬 2				773	4	0.12						
2006 春	1560	9	0.14									
2006 秋	1823	14	0.18									
2007 冬	1001	12	0.29									
2007 春	1110	20	0.43									
2007 秋 1	1103	15	0.33									
2007 秋 2				632	7	0.27						
2008 冬				966	3	0.07						
2008 春				1460	9	0.15						
大電流												
2008 秋							1588	5	0.08			
2009 冬 1							597	4	0.16			
大電流												
2009 冬 2										967	2	0.05
2009 春										1422	5	0.08
計	7177	76	0.25	3831	23	0.14	2185	9	0.10	2389	7	0.07

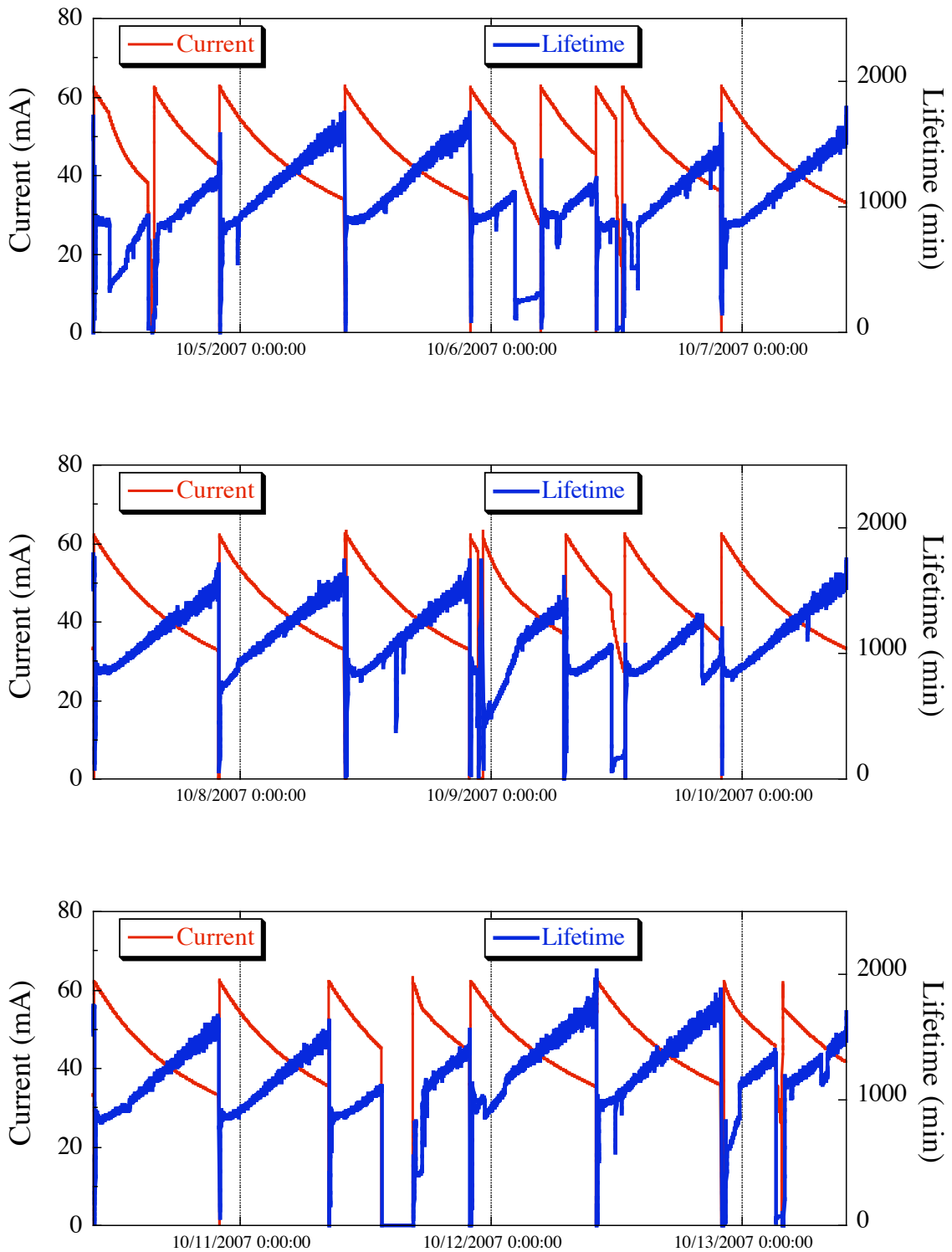


図 4-6 PF-AR での寿命急落抑制対策を施す前の運転状態 (2007 年 10 月)。連続 9 日間の運転の様子を 3 日毎に分けて表示した。

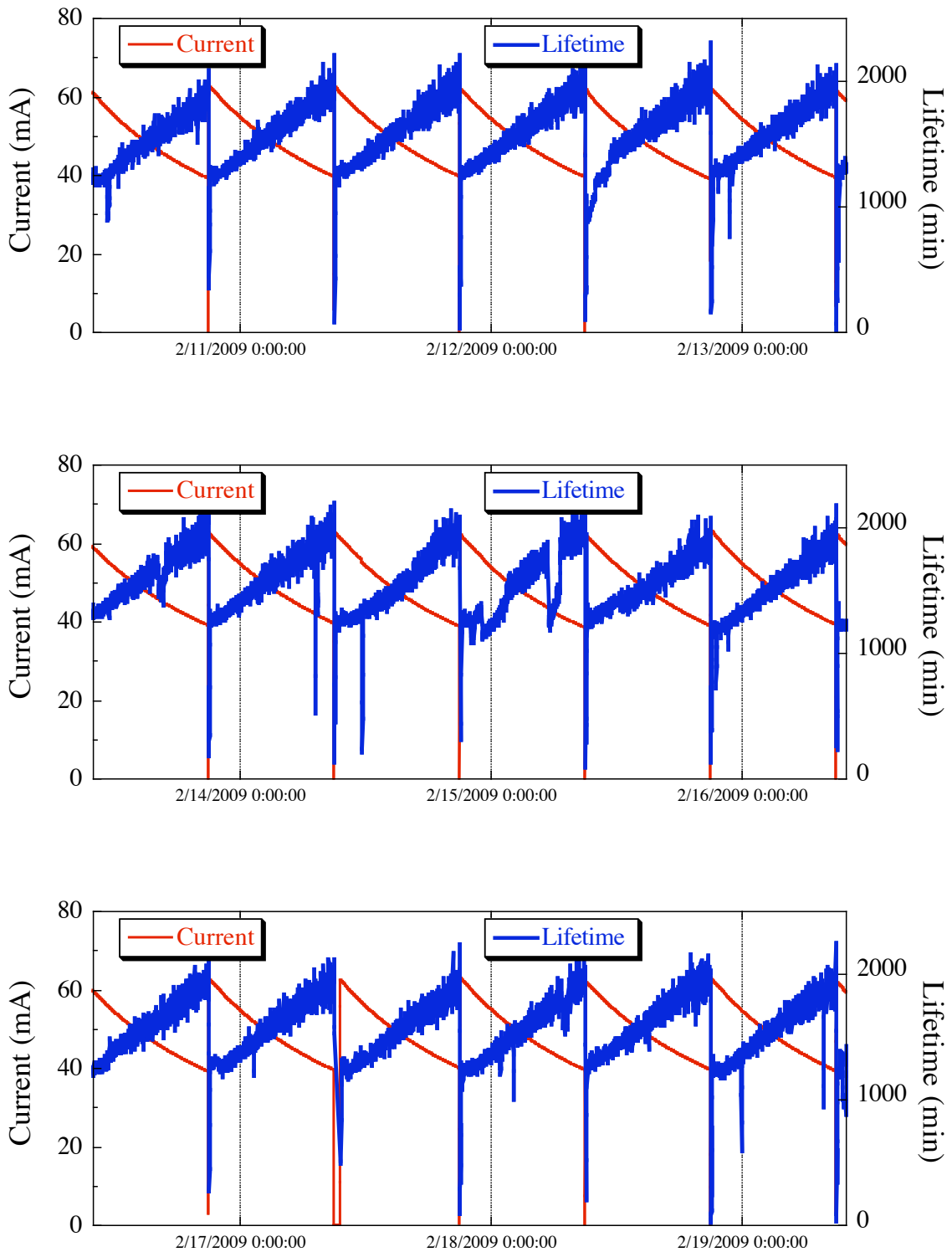


図 4-7 PF-AR で寿命急落抑制対策を施した後の運転状態 (2009 年 2 月)。連続 9 日間の運転の様子を 3 日毎に分けて表示した。

4.3 PF-AR での寿命急落現象に関する考察

PF-AR での運転中に発生した寿命急落現象の特徴とその対策に関して、以下の項目が明らかになった。

(1) 発生頻度について

- ・2001年の高度化改造により、寿命急落現象が頻繁に発生するようになった。
- ・改造後1～2年は、すべての寿命急落現象に対して運転時間の経過によるコンディショニングの効果が見られた。しかし、その後5～6年は明らかなコンディショニング効果は見られず、平均1日1回未満であるが発生する状態が続いた。

(2) 寿命急落現象の種類（持続時間）について

- ・非回復型、回復型、瞬間型のすべての種類の寿命急落現象が発生している。
- ・改造後の運転再開直後は非回復型の頻度が最も高かったが、数ヶ月後からは逆に非回復型の頻度が最も低くなった。

(3) ダストの発生要因について

- ・DIPをOFFして運転することで、非回復型の寿命急落の発生頻度はそれまでの頻度の57%まで減少した。しかしながら、このことはDIP以外にも発生要因があることを示している。
- ・寿命急落に同期して、真空封止型挿入光源やストリップライン型FBキッカー部などで瞬間的な圧力上昇が観測される場合もあった。ビームからの電磁場による放電でダストが発生したと推察される。
- ・ユーザー運転中よりも約25%高い電流を蓄積して放電源のコンディショニングを行った結果、DIP-OFF運転と合わせて、非回復型の寿命急落発生頻度は対策前の28%まで減少した。

(1) の寿命急落発生頻度に関しては、2001年の高度化改造において、a) 56台すべてのDIPが更新されたこと、b) ほとんど全周にわたってビームダクトが更新されたため、排気スリットなどで加工時の鋭いエッジが残っており、

放電を起こしやすい箇所が多かったこと、などが運転再開直後に高い頻度で寿命急落現象を発生させた要因であると考えられる。また、2009年時点でも十分なコンディショニング効果が得られていない理由としては、PF-ringよりも低電流で運転していることが第一に考えられる。大電流蓄積によるコンディショニング試験が効果的であったことは、それを裏付ける証拠の一つである。

(2) の寿命急落現象のパターンに関しては、図 4-1 の PF-AR での発生頻度統計を見ると、運転開始直後（2002年冬）は3パターン中、非回復型の寿命急落現象が最も多く観測されていたのに対し、2002年の春の運転以降は非回復型が最も少なくなっている。この事実は、運転開始直後のコンディショニングが不十分な段階では、DIP も含め比較的大きな放電を起こしやすい箇所が多く存在していたと考えられるので、それらが元で発生するより大きなダストの方が非回復型急落の要因になりやすいことを示唆している。図 4-3 のダストサイズに関する統計データにも、その傾向が見られている。

(3) のダストの発生要因に関しては、2006年から2008年までのDIP-OFF運転の結果から、当時の寿命急落現象の4割程度がDIPによるものがあったことが判明した。PF-AR の DIP の設置位置や形状は図 3-8 や図 3-9 に示された PF-ring のものと同様であり、ビームから DIP が見える構造となっている。したがって、PF-ring の場合と同様な機構で DIP からダストが発生すると考えられる。

DIP 以外の主な発生要因は、真空封止型挿入光源やストリップライン型電極部など、ビームからの電磁場によって放電を起こしやすい機器であった。通常の運転ではコンディショニング効果は簡単に得られないので、ユーザー運転に先だって、適度な大電流によるコンディショニング試験や挿入光源のギャップ変更試験を行い、予め放電を繰り返しておくことが安定な放射光実験に役に立つことも判明した。

放電しやすい箇所を極力減らしていくことも重要である。例えば RF 空洞周辺部に設置したビームダクトの排気スリットは高周波の影響で損傷を受けやすく（図 4-8）、このような損傷部分も放電源の一つであったと考えられる。同様な条件の排気スリットもすべて損傷していたため改良型に更新した。更新の効果が明らかに現れた訳ではないが、このように比較的低コストで改良できる場合はできるだけ対策を施すようにしている。

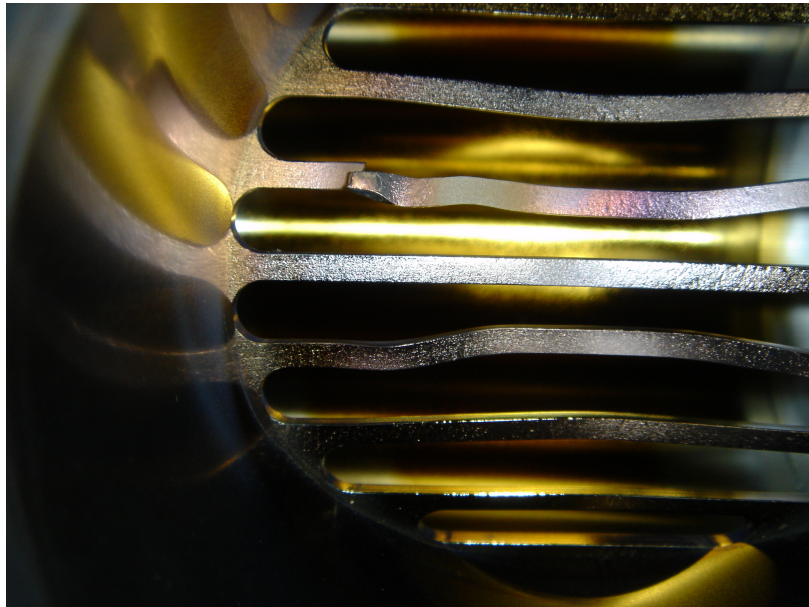


図 4-8 PF-AR の RF 空胴周辺に設置されていたビームダクトの排気スリットの变形。上の写真ではすぐ手前に RF 空胴があった。下の写真はそのスリット部をポンプ側から撮影したものである。

その他の発生要因としては、例えば PF-AR の RF 空胴は APS (Alternating Periodic Structure) 型のマルチセル空胴であり、多くの可動チューナーが設置されている。それらの機械的な駆動 (または摺動) によってダストが発生する

可能性も考えられる。ただし、この場合はダスト発生に同期した圧力上昇は観測されないので、影響を調べるためには RF 空洞下流部に γ 線検出器を設置してダストを観察する必要がある。それ以外の場所でも γ 線検出器を数多く設置しておくことは、ダスト発生場所の特定に役立つと考えられる。

第 5 章

ダストトラッピング実証実験

5.1 実験目的

PF-ring と PF-AR での運転経験により、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。そして、その放電の形態は

- (1) DIP などでの高電圧の印加による放電
- (2) 真空封止型挿入光源などでの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^[46]。これまでに放電によるダストトラッピング現象の再現実験が行われたことはなく、現象が繰り返し再現できれば上記仮説を初めて実証することができる。さらに、これまで困難とされてきたダストの生成をある程度自由にコントロールできるようになれば、長時間必要であったダストトラッピングに関する様々な実験を非常に効率的に進めることが可能となる。

5.2 装置概要

上記 2 種類の放電を人為的に発生させることのできる装置を PF-AR に設置した。ダスト源として、2 種類の電極対をビーム路近傍に配置した。その装置の内部写真を図 5-1 に示す。

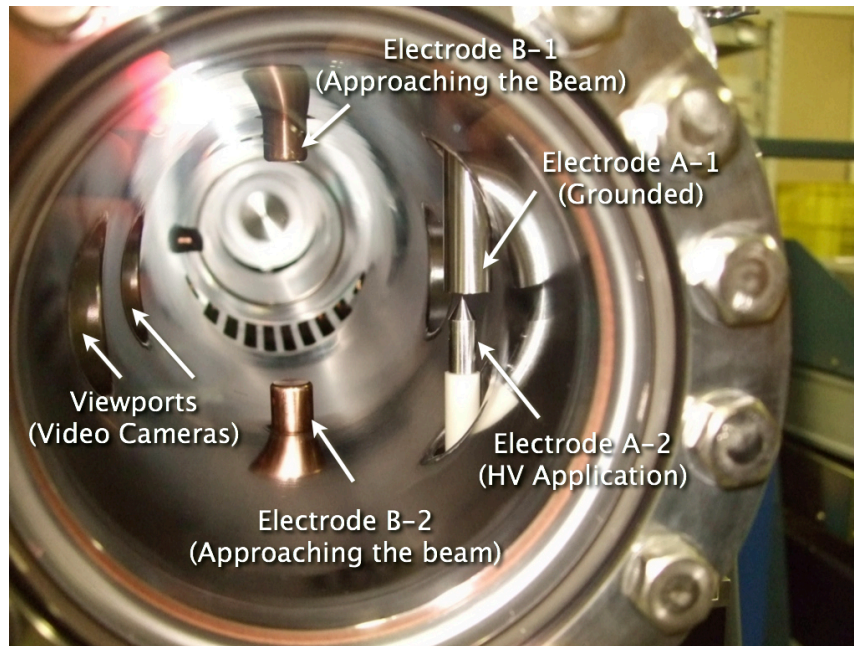


図 5-1 放電発生装置内部の写真。電子ビームは手前から奥に向かって進む。

電極 A - DIP などでの高電圧印加による放電現象を模擬するため、1 対の可動電極をビーム軌道の真横（リング内側）に設置した。上側電極 A-1 は接地されており、下側電極 A-2 には ± 7.5 kV までの DC 高電圧が印加される。材質は、電極 A-1 が表面にチタンがコーティングされたステンレス鋼（SUS304）で、電極 A-2 は尖った先端部がチタン、ステム部はアルミナセラミックススリーブで覆われたコバルト（Fe-Ni-Co 合金）棒である。高電圧電源として、負極性（最大 5 mA）と正極性（最大 25 mA）の 2 種類の電源を使用した。

電極 B - 電子ビームからの電磁場で放電を起こしやすい機器を模擬するために、1 対の可動電極をビーム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た際に放電を発生させることが目的である。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（C1020）製で、先端部は上側電極 B-1 がアルミニウム合金（A5056）製、下側電極 B-2 は無酸素銅（C1020）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に、ステム部内には水冷パスが設けられており、さらに挿入ポートとの隙間にはベリリウム銅製の RF コンタクトフィンガが挿入されている。

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、初期位置に格納される。また、電極材質によるダストトラッピング発生率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。一つは視覚的な観察で、サファイア製ビューポートを介してAとBそれぞれの電極を撮影するために、2台のCCDカメラ(KPC-S700CHBA with Sony Super HAD CCD)を設置した。カメラ映像と音声はハードディスクに30frames/sのデジタル動画として記録される。もう一つは真空的な観察で、Bayard-Alpertゲージ(BAG)を電極の下流側直近に配置した。放電発生装置の外部写真を図5-2に示す。また、装置全体図を図5-3に、電極部詳細図を図5-4に示す。

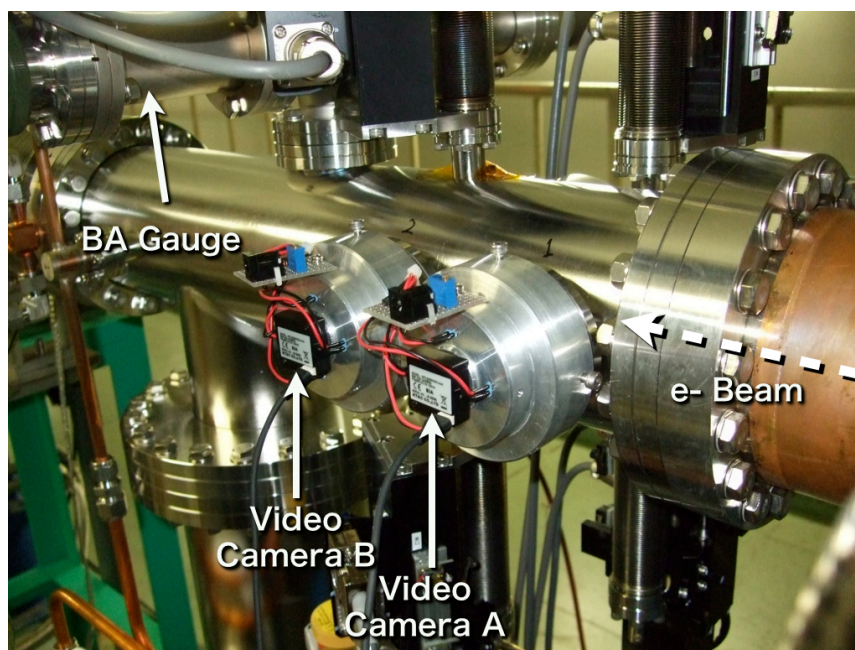


図5-2 放電発生装置をリングに設置した状態での写真。電極Aと電極Bでの放電の様子をそれぞれビデオカメラAとビデオカメラBで撮影し、放電時の真空圧力の変化をBAゲージで観測する。

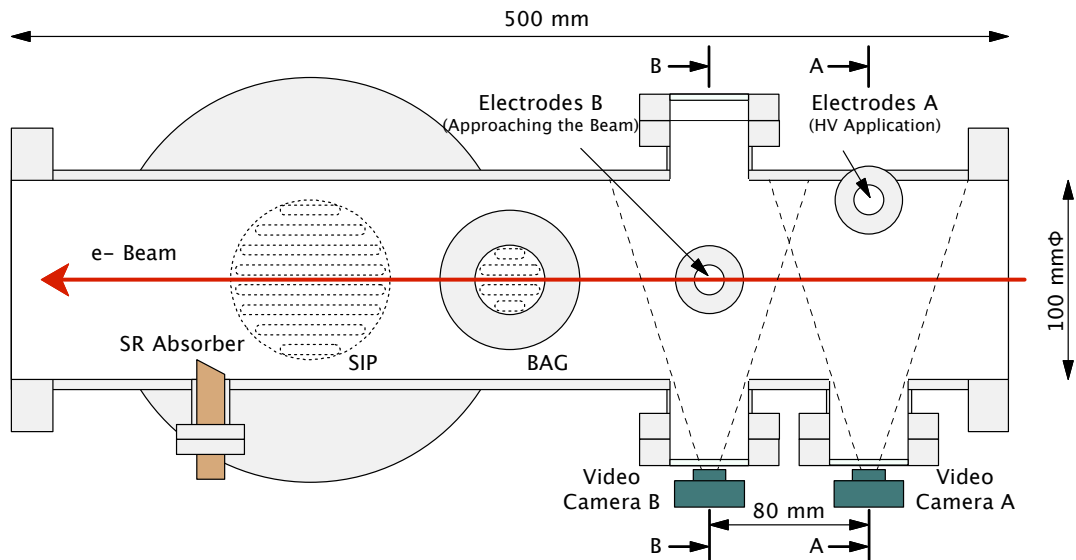


図 5-3 放電発生装置全体図

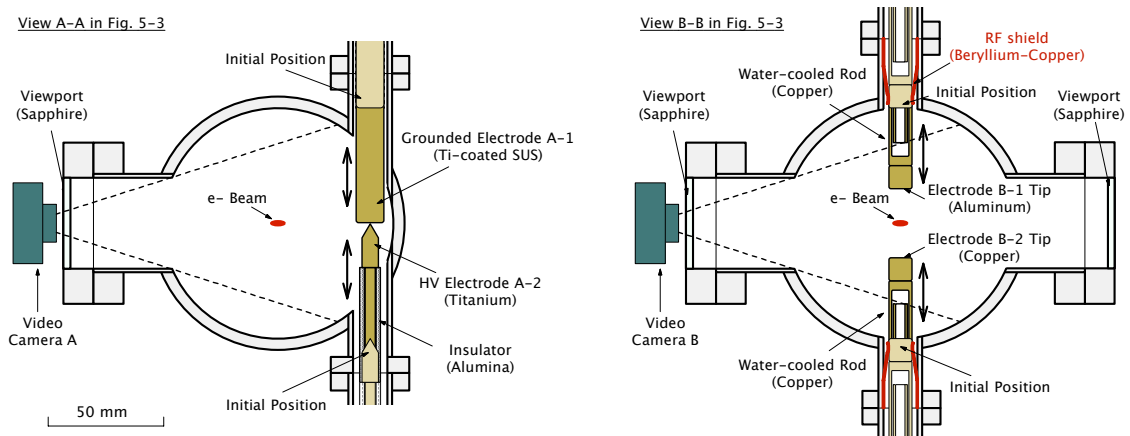


図 5-4 放電発生装置の電極部詳細図。左図では下側電極に高電圧を印加して放電を発生させ、右図では電極をビームに近づけてビームからの電磁場で放電を発生させる。

さらに、トラップされたダストからの制動放射 γ 線を観測するため、放電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。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。前者が RD#1、後者が RD#2 である。直線部ビーム軌道の延長線上に検出部が置かれるように、レーザーを用いてアライメントを行った。それらの検出器お

よび放電発生装置の設置場所を図 5-5 に示す。また、2 台の放射線検出器の設置場所を撮影した加速器トンネル内写真を図 5-6 に示す。

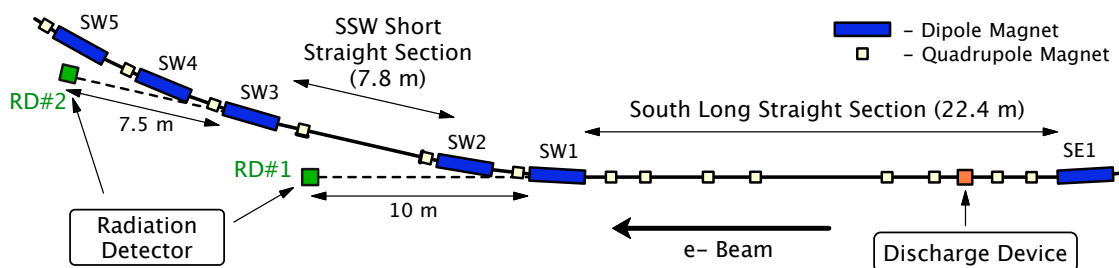


図 5-5 放電発生装置および放射線検出器の設置位置

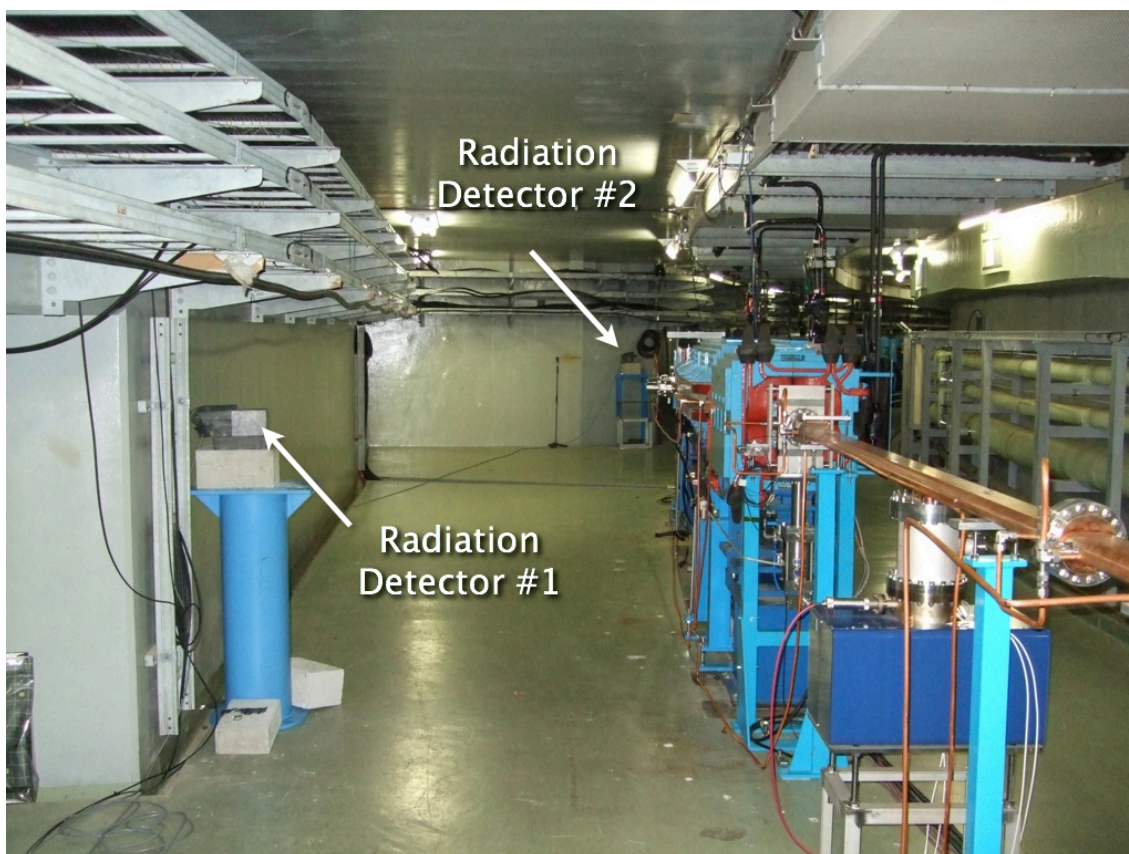


図 5-6 2 台の放射線検出器の設置位置を示すトンネル内写真

PF-AR のトンネル内で放射線検出器を使用する場合、放射光によるバックグラウンドを取り除くために十分な遮蔽が必要であった。直径 28mm、長さ

150mm の円筒状検出部を、4mm 程度の鉛シートのみで遮蔽した場合、6.5GeV - 60mA のビームを蓄積しただけで測定限界 (100mSv/h) を越えた。鉛遮蔽厚の最適化を行った結果、鉛ブロック (50mm × 100mm × 200mm) の中に埋め込み、さらに上流側に同ブロックを 1 個追加すると、上記バックグラウンドが 5 μ Sv/h まで低下した。この場合、制動放射 γ 線が検出器に入るまで鉛を通過する距離は 60.5 mm となる (図 5-7)。

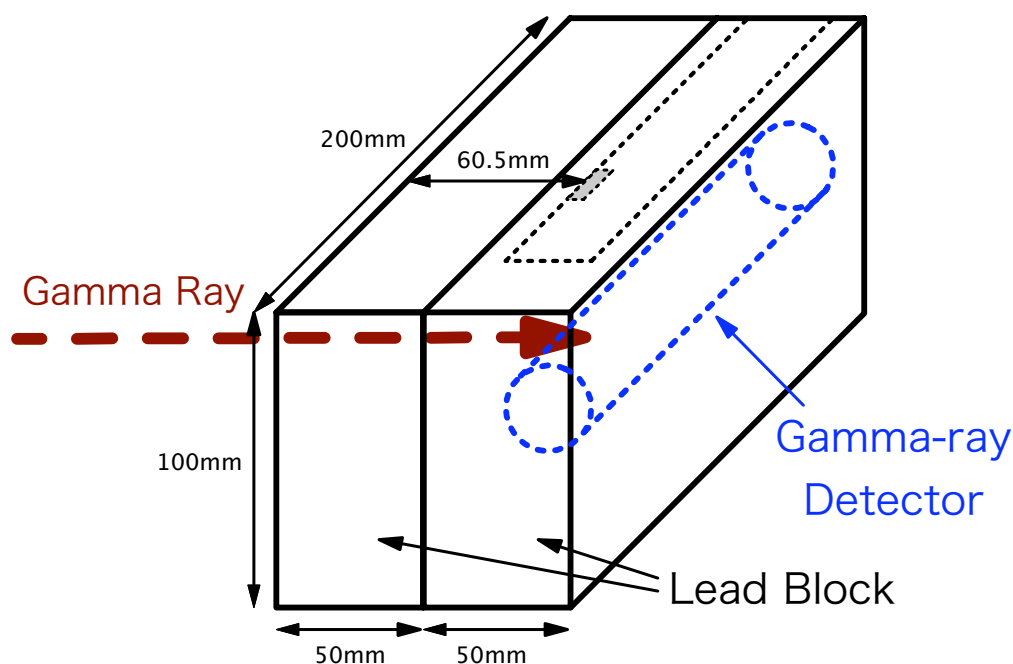


図 5-7 放射線検出器に対する鉛遮蔽

上記以外の測定データとして、DCCT (DC Current Transformer) によって計測されるビーム電流とその変化から計算されるビーム寿命を実験中常に監視した。ビーム電流は 0.6 秒間隔でデータサーバにも記録されている。測定電流値の標準偏差は約 4 μ A である。実験データ解析のため、その記録された電流値の変化を用いてビーム寿命は再計算され、ビームロス率は新たに計算された。

ビーム寿命は、ビーム電流が時間に対して指数関数で減少するとした場合の時定数の逆数として定義される。したがって、その計算では電流を対数軸、時間を線形軸でプロットしたデータを直線とみなして、最小 2 乗フィッティングを適用した。ビーム寿命計算値のばらつきを抑えることを優先し、電流値は 180 個、すなわち過去 108 秒間のデータを用いた。

一方、ビームロス率は、単位時間あたりに減少した電子数を知るために計算された。電流、時間とも線形軸でプロットしたデータを直線と見なし、最小 2 乗フィッティングを適用した。ただし、ビームロス率に対しては応答の速さを優先し、電流値は 30 個、すなわち過去 18 秒間のデータを用いた。そして、電流変化から電子数変化を得るために、 7.85×10^9 electrons/mA の換算係数を用いた。

5.3 ダスト生成実験結果

5.3.1 高電圧印加による放電実験

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：6.5GeV、ビーム電流値：最大 62mA）の下で行った。

まず、DIP を模擬した高電圧印加実験の手法から説明する。高電圧を印加する前に電極 A-1 と A-2 を同時に動かし、その間隔を 1mm 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、電極 A-2 に DC 高電圧を印加し、放電が発生するまで 200 μ m 刻みでギャップを閉じていく。放電が発生した瞬間の正確なギャップ値を得ることは困難であるが、電極位置カウンタの読み取り値から、通常数 100 μ m 以下であったと推測される。+7.5kV 印加の場合と -5.0kV 印加の場合の絶縁破壊基準はそれぞれ 330 μ m（電界強度 23MV/m）、190 μ m（同 26MV/m）であるため^[40]、ギャップ値はそれらを下回っていたと考えられる。放電が発生すると常に高圧電源が過電流保護機能によってトリップした。すなわち、+7.5kV 印加の場合は最大 25mA、-5.0kV の場合は最大 5mA である。実際の DIP に対しても同様な電源を使用しているが、放電によってダストトラッピングが発生した場合でもトリップまでは至っていない。

図 5-8 にビデオカメラで撮影された放電の 1 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。

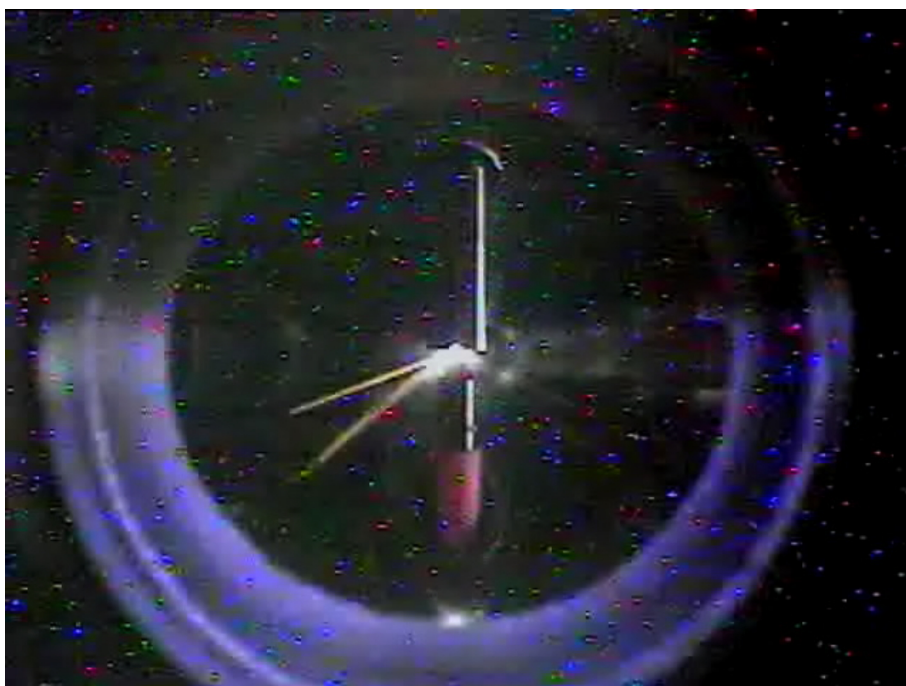


図 5-8 ビデオカメラで撮影された電極 A での放電発生例。このときは電極 A-2 に-5.0kV を印加した。電子ビームが写真中央を右から左に通過しているがカメラには写らない。

次に、高電圧印加実験の 1 例として、電極 A-2 に-5.0kV の高電圧を印加した実験の結果について述べる。そのときに観測された実験データを図 5-9 に示す。図中の矢印で示された時刻に放電を発生させ、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。

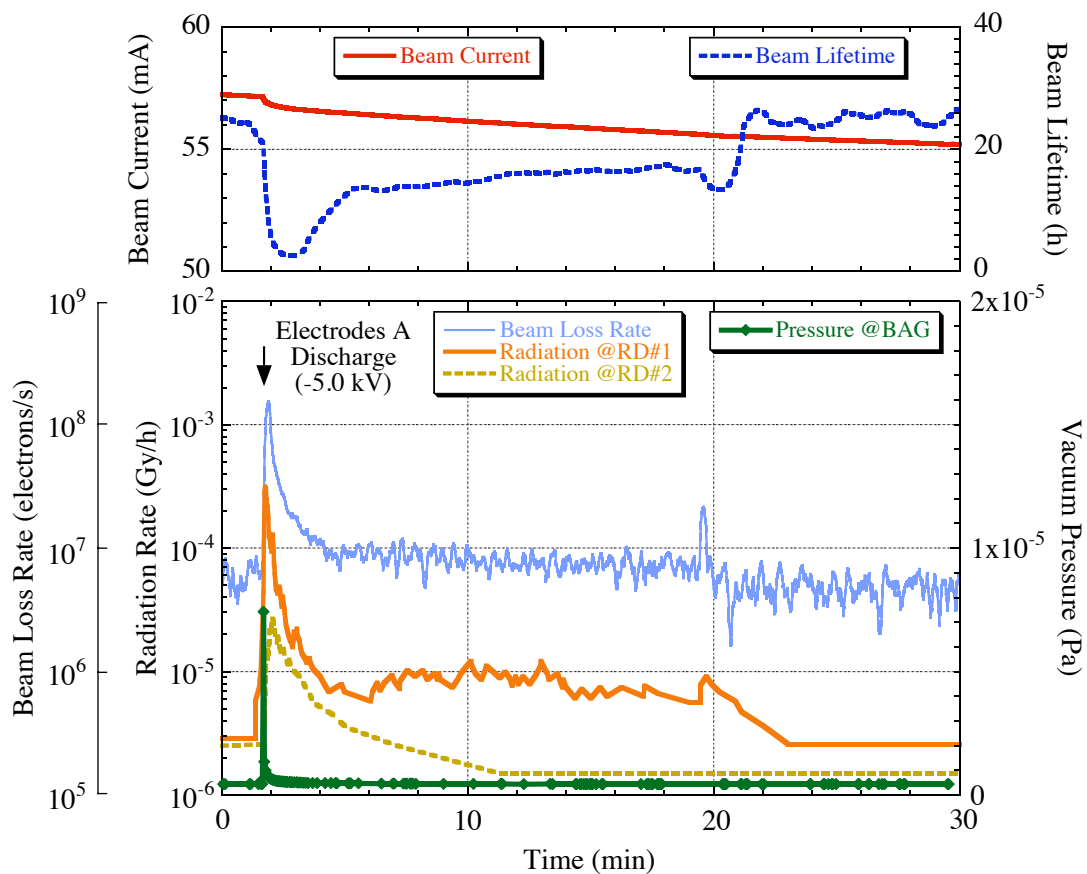


図 5-9 -5.0kV の高電圧印加による放電で寿命急落現象が発生したときの実験データ。上のグラフはビーム電流と寿命、下のグラフはビームロス率、放射線量率、放電装置内の真空の変化を表示している。図中、矢印で示されたところで放電を発生させた。

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) ビームロス率と 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（図 5-10）を示していた。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の主原因である。

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ることができる。

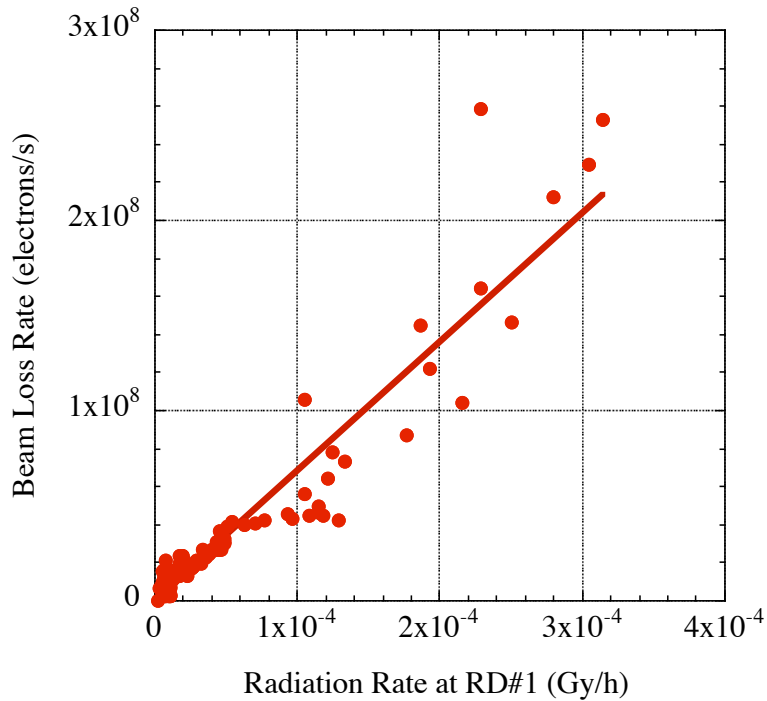


図 5-10 RD#1 で観測された放射線量率とビームロス率との比例関係。寿命急落直後の速いビームロス率の変動をより正確に求めるため、その計算に使用するデータ点数を 12 点とした。

印加する高電圧の極性を入れ替えた実験でも、同様な現象が再現された。図 5-11 に、+7.5kV の高電圧を印加した実験での結果の例を示す。図中の矢印で示された 3 回の放電において、いずれも寿命急落とそれに同期した放射線量率の上昇が観測された。負電圧印加実験の場合と同様な理由により、これらの寿命急落も放電により発生したダストによるものと結論づけられる。

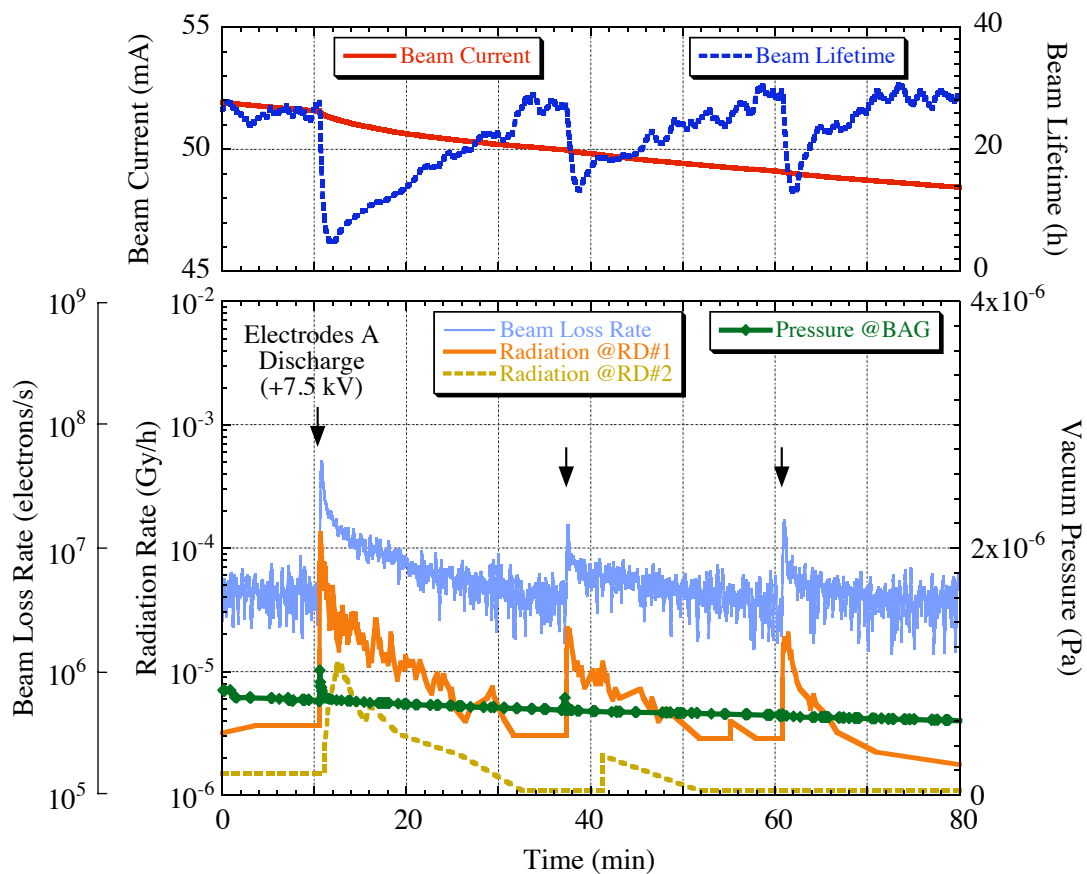


図 5-11 +7.5 kV の高電圧印加による放電で寿命急落現象が発生したときの実験データ。図中、矢印で示された 3 箇所放電が発生させた。

5.3.2 ビームからの電磁場による放電実験

次に、電極 B を用いたビームからの電磁場による放電実験について説明する。ビーム軌道軸の上下にそれぞれ設置された電極 B-1 と B-2 を独立に、あるいは両方同時にビームへ近づけていき、放電が発生させる。真空封止型挿入光源内で磁石列のギャップを閉じたときに寿命急落現象が発生した状況を想定した実験である。

実験結果の 1 例として、下側電極 B-2 をビームに近づけたときに発生した寿命急落現象について説明する。この実験では、電極 B-2 先端部がビームから

22mm 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。そのときの実験データを図 5-12 に示す。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によって発生したダストによるものであることを示している。

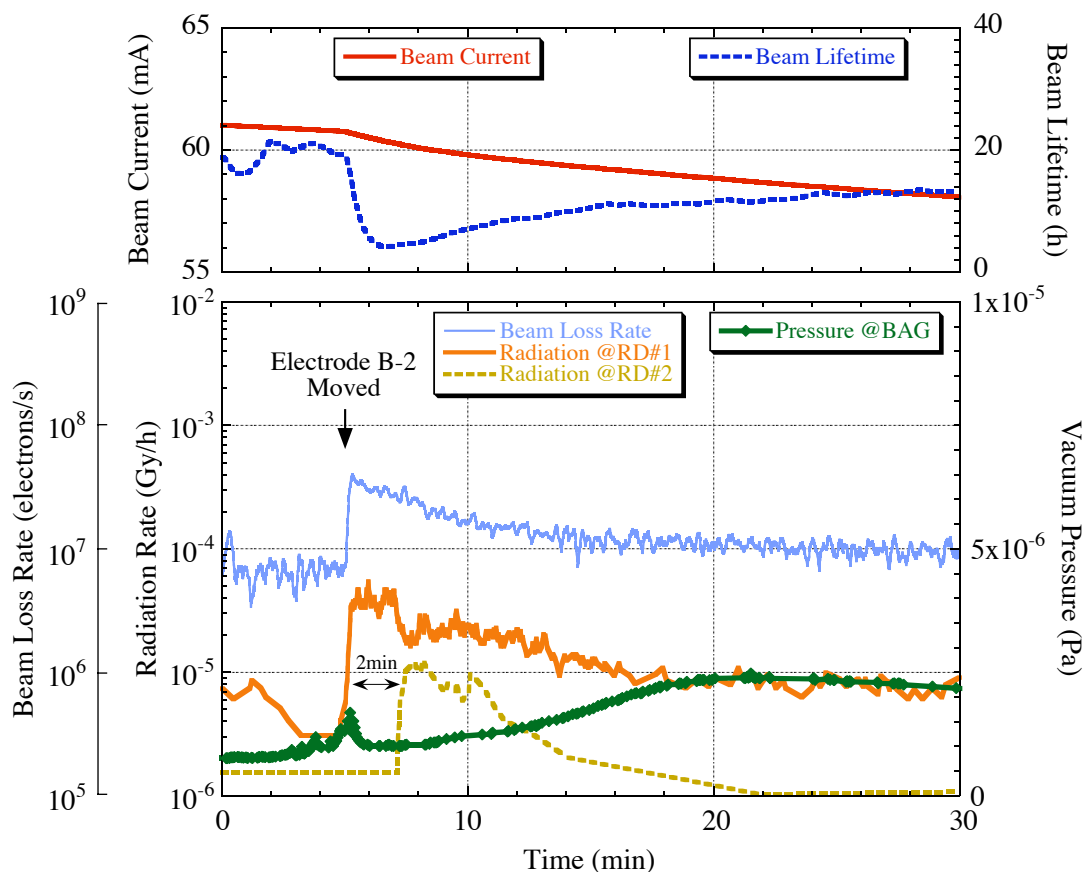


図 5-12 ビームからの電磁場による放電で寿命急落現象が発生したときの実験データ。図中、矢印で示されたところで放電が発生させた。寿命急落の持続時間は 98 分間であった。

この実験では、ダストが longitudinal 方向に移動して、長直線部下流の偏向電磁石 2 台を越え、次の短直線部に移動した兆候も観測された。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 のみが上昇しており、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 longitudinal 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。このような現象は常に観測される訳でないが、図 5-11 に示された 3 回連続した +7.5kV 印加実験の 2 回目でも小規模で観測されていた。また、他の研究者による実験でもこのような longitudinal 方向のダストの移動を示す兆候が報告されている^[1, 27, 29, 31]。

この実験において注意すべき点は、電極をビームに近づけた際の温度上昇である。電極をビームから 20mm の位置まで近づけると、電極挿入ポートの外表面部で 100°C を越える温度上昇が観測された。このため、電極とビーム間の距離を 20mm に制限して実験を行った。また、この温度上昇による真空悪化も観測され、例えば図 5-12 に示されているように、電極 B-2 の位置をビームから 22mm に保持していると BAG で測定する圧力が徐々に上昇した。一方、ビーム軌道の内側の電極 A を用いた実験では、このような温度上昇は観測されなかった。

5.4 発光体の観測

電極 B を用いた実験中に、偶然にもビーム寿命の急落に同期して 2 台の CCD カメラの前を素早く横切る発光物体が観測された。そのときの寿命急落は、電極 B-1 と B-2 を初期位置(ビームとの距離がそれぞれ 50mm)から同時に 10mm だけ動かした直後に発生し、同時に放射線のバーストも RD#1 で検出された。そのときの実験データを図 5-13 に示す。

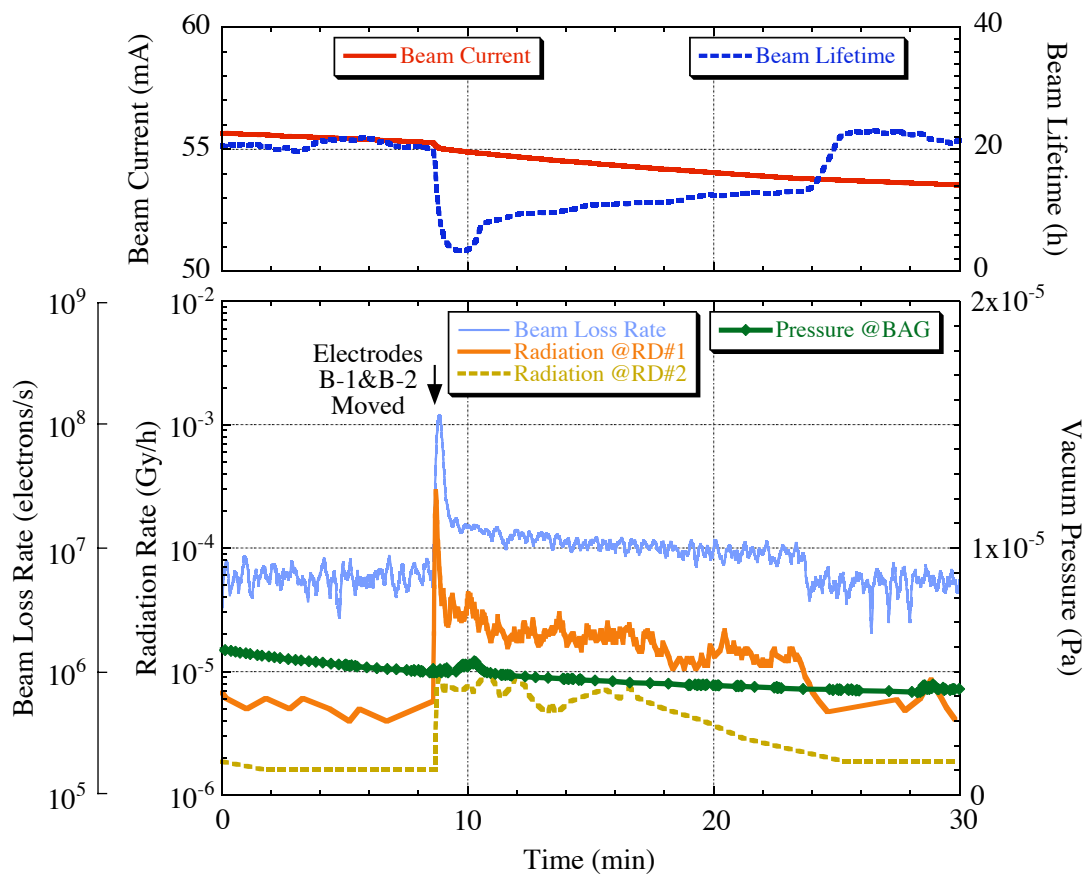


図 5-13 電極 B を動かした直後に寿命急落現象が発生したときの実験データ。
 図中、矢印で示されたところで電極 B を動かし、移動する発光体が CCD
 カメラで観測された。

ビーム寿命の低下と放射線量率の上昇が約 15 分間持続した。寿命急落時に CCD 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発光体は、6 秒間に 9 回観測された。図 5-14 は記録されたビデオカメラ映像から、発光体が認識できるフレームを抽出して纏めたものである。フレームレートは 30frames/s であるため、各フレームの映像は 33ms 以内の現象を記録している。

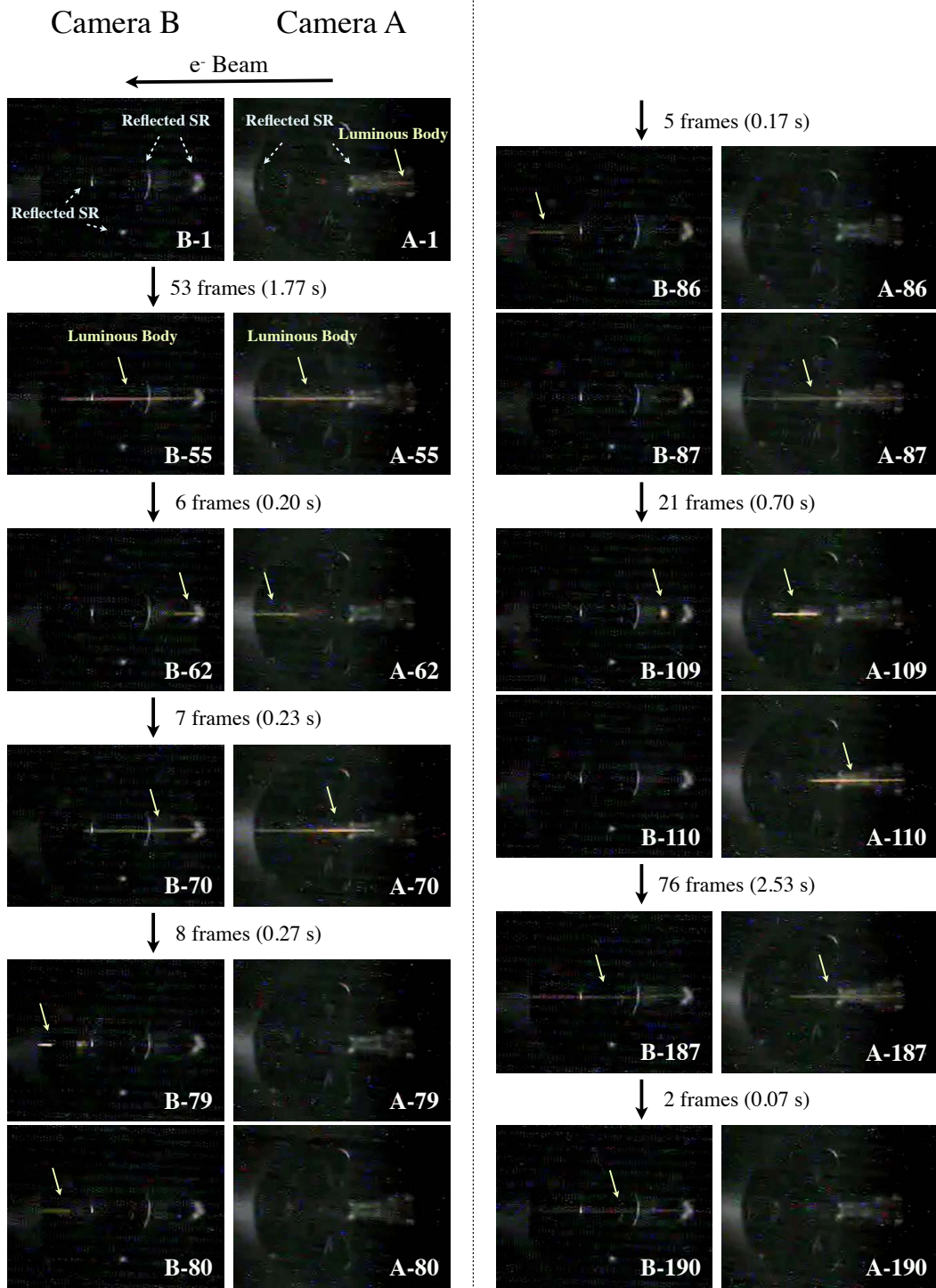


図 5-14 2 台のビデオカメラで撮影された移動する発光体。矢印で示された発光体がどちらかのカメラ映像で認識できる場合のフレームをすべて抽出した。

2 台の CCD カメラからの信号はそれぞれ独立して記録されるので、この現象を解析するためにはそれらの同期をとる必要があった。まず、2 台のカメラでそれぞれ最初に明確な軌跡が記録されたフレーム（図 5-14 での A-55 と B-55）に着目し、それらがフレーム間隔の 33ms 以内で同期していると仮定した。そして、それ以降の発光体の出現を調べると、1~2 フレーム以内で同期して記録されていることが分かった。したがって、この同期が最も確からしいものであると判断した。その結果、発光体の出現間隔を調べると間隔は一定ではなく、0.07~2.53 秒の範囲でばらついていたことが判明した。発光体の出現記録についての纏めを表 5-1 に示す。

表 5-1 発光体の出現記録の纏め。合計 9 回観測された発光体のそれぞれについて、観測したカメラ（“obs.”と表記）と出現間隔を纏めた。

Appearance number	Observed position		Interval from previous appearance (s)
	Camera B	Camera A	
1		obs.	-
2	obs.	obs.	1.77
3	obs.	obs.	0.20
4	obs.	obs.	0.23
5	obs.		0.27
6	obs.	obs.	0.17
7	obs.	obs.	0.70
8	obs.	obs.	2.53
9	obs.		0.07

5.5 実証実験結果に関する考察

PF-AR で行った一連のダストトラッピング実験の結果から、以下の 2 項目がダストの発生要因になりうることが実証された。

- (1) 高電圧印加およびビームからの電磁場によって発生する放電
- (2) 電極の機械的な駆動

放電によるダスト生成に関しては、印加された高電圧の極性や放電を引き起こす原因（高電圧印加、ビームからの電磁場）は本質的ではなかった。このことは、PF-ring や PF-AR で運転中に実際に観測されてきた結果と一致する。

この実証実験において発生したダストの候補としては、電極を構成する物質、

すなわち、銅、アルミ、チタン、ステンレス、ベリリウム銅、アルミナのいずれかの微小破片と装置にそもそも付着していた微小粒子が考えられる。しかしながら、本実験の結果だけではそれを特定することはできない。今後、電極を交換して、ダストトラッピングの起こしやすさに明確な違いが現れれば、ダスト材質に関する有益な情報が得られると考えられる。

また、本実験ではダストトラッピングの間接的な証拠として 2 台の放射線検出器 (RD#1 と RD#2) の測定データを挙げているが、これらの検出器がビームロス率の上昇による空間線量率の増加を測定しているのではなく、当該直線部を通過する蓄積ビームから制動放射 γ 線を測定していることを示しておく必要がある。ここでは、その根拠を示す 1 例として、ユーザー運転中に発生した寿命急落前後において、RD#1 と RD#2 がともにバックグラウンドレベル ($<5 \times 10^{-6}$ Gy/h) に留まっていたデータを図 5-15 に示す。寿命急落後にビームロス率が増加しても、それによる放射線量率の増加は測定されていないことが分かる。このときは、放射線検出器の位置からリングを 4 分の 1 周ほど回った位置にある偏向電磁石 SW14 の DIP において、寿命急落に同期した微小な真空悪化が観測されており、その DIP がダスト源であったと考えられる。

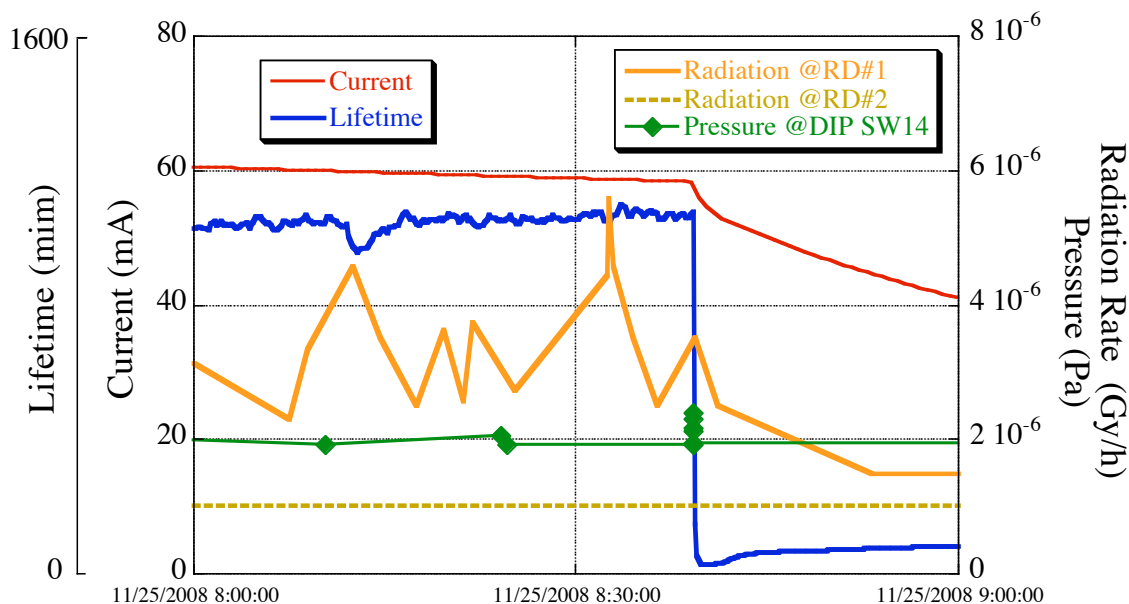


図 5-15 ユーザー運転中の寿命急落発生前後での放射線測定データの 1 例

次に、発光体の正体に関する考察を行う。発光体が観測された実験では、図 5-13 でも見られるように、RD#1 における放射線量率がビームロス率と良い比例関係を示していた。その比例関係を示す詳細なグラフを図 5-16 に示す。また、BAG で測定された圧力はビーム寿命の変化に対して全く相関がなかった。この 2 つの事実は、ビームロスが主として長直線部にあるダストによって引き起こされていたことを示す証拠である。

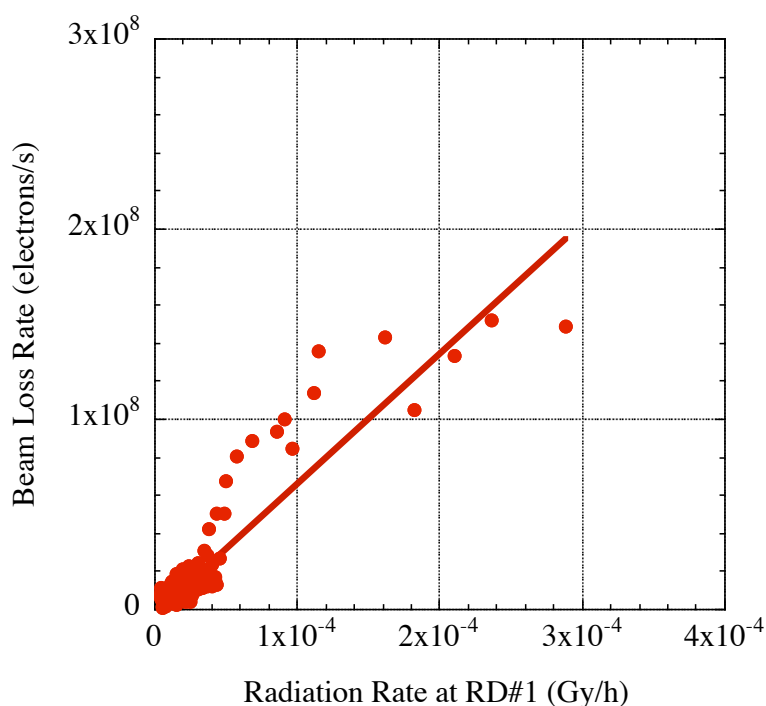


図 5-16 発光体が観測された実験における、RD#1 で観測された放射線量率とビームロス率との比例関係。寿命急落直後の速いビームロス率の変動をより正確に求めるため、その計算に使用するデータ点数を 12 点とした。

そして、寿命急落直後の RD#1 での放射線量率の上昇を詳しく見ると、半値幅が約 7 秒のバーストであった。ビームロス率との比例関係はまた、この時間にビームロスがピークを持っていたことも示している。さらに、この時間は発光体が観測されていた時間 (6 秒間) とほぼ一致していた。以上の事実から、この発光体こそがビームにトラップされたダストであると結論づけられる。よって、この映像がダストトラッピング現象を視覚的に捉えた初めての観測となる。

図 5-14 や表 5-1 に示されているように、トラップされたダストはほとんど場合、80mm 離れた 2 台のカメラで同時に観測されていた。このことは、ダストが longitudinal 方向に移動していたことを示す。そこで、ビデオ映像を解析して、その速度の概算見積を行った。

本実験で使用したカメラは NTSC (National Television System Committee) 規格であり、30frames/s のフレームレートでビデオ信号を出力するが、1 フレームはインターレース方式によって 2 枚のフィールドで構成されている (図 5-17)。1 フィールドの露光時間 (Shutter Speed) は $1/60 \sim 1/100000$ 秒の自動可変であるため正確には分からないが、暗所の撮影であったことから最長の $1/60$ 秒に近かったと考えられる。この場合、不感時間 (Dead Time) は露光時間よりもかなり短い。

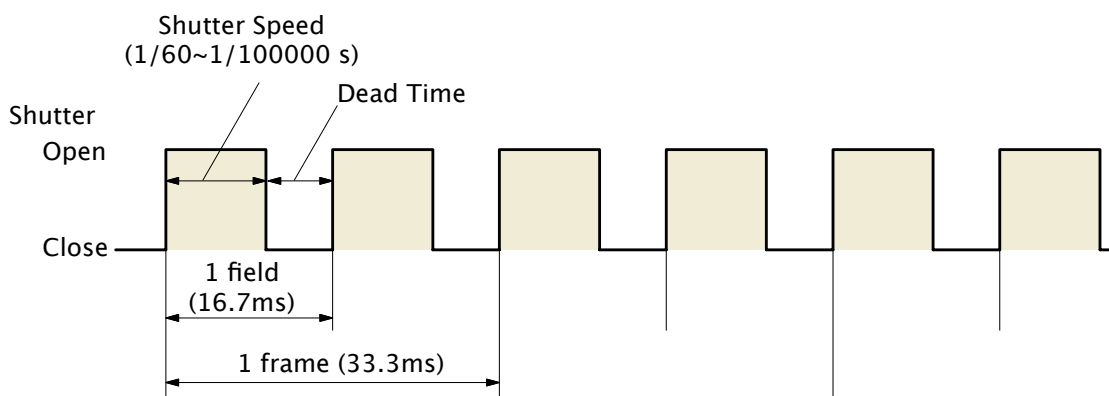


図 5-17 インターレース方式による動画の時間構造

まず、最も速く移動した場合について、図 5-14 での A-55 と B-55 のフレーム映像に着目すると、それぞれの CCD カメラに写る longitudinal 方向の距離は約 100mm であるので、トラップされたダストは 1 フレーム以内に 200mm 以上を移動していたように観測されていた。しかしながら、1 フレームに記録されているダストは、実はそのうちのどちらか 1 フィールド (16.7ms) のみに記録されているものであった可能性もある。この場合、推定速度は 12m/s 以上となる。次に、最も遅く移動した場合に対しては、図 5-14 の B-79 と B-80 のフレームに着目した。ダストは 2 フレーム (66ms) の間に約 20mm 進んだように観測されていたので、この場合の推定速度は約 0.3m/s となる。あるいは、B-109 のフレームに着目すると、ダストは一旦停止しているようにも観測されている。

ダストはほとんどの場合、次のフレームでは見えなくなっているため、移動の向きに関する情報は得られなかった。

トラップされたダストは、0.07～2.53 秒の時間間隔で再び CCD カメラの前を通過した。このような時間間隔では、見積もられた速度を持つダストが周長 377m のリングを 1 周することはできない。RD#2 には放射線バーストが観測されていなかったことから、ダストが発生場所付近で longitudinal 方向に振動していたと考えられる。振動を引き起こす要因としては、longitudinal 方向のビームサイズとビームダクト断面形状の変化に起因したポテンシャル井戸（イオントラッピング理論では「イオンポケット」と呼ばれている）があり^[47]、ビームにトラップされたダストもこのポテンシャルの中で longitudinal に振動している^[10]。概算であるが、このイオンポケットの深さ V を仮に 10V 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 12m/s となる。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と、1 個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。

ダストの発光原因に関しては、以下の 3 種類の過程が考えられる。

- (1) 高温になったダストからの自発的な発光（黒体放射）
- (2) 放射光の散乱
- (3) 電子ビーム衝撃による蛍光発光（カソードルミネッセンス）

発光原因を特定する目的で、各過程において CCD カメラに入る光子強度を計算し、それらの比較を行った。さらに、その計算結果を CCD 素子の感度と比較することで、十分な強度で視覚的に観測されるためのダスト条件の推定も行った。ただし、今回の発光体が観測された実験は、電極 B の使用中に発生したため、ダストはその電極 B を構成する金属の破片と推定される。したがって、半導体や絶縁体に特有の (3) のカソードルミネッセンスは今回の光子強度計算には含まなかった。

黒体放射と放射光散乱の 2 過程による発光強度の概算見積結果を図 5-18 に示す。計算の詳細は Appendix に記載した。

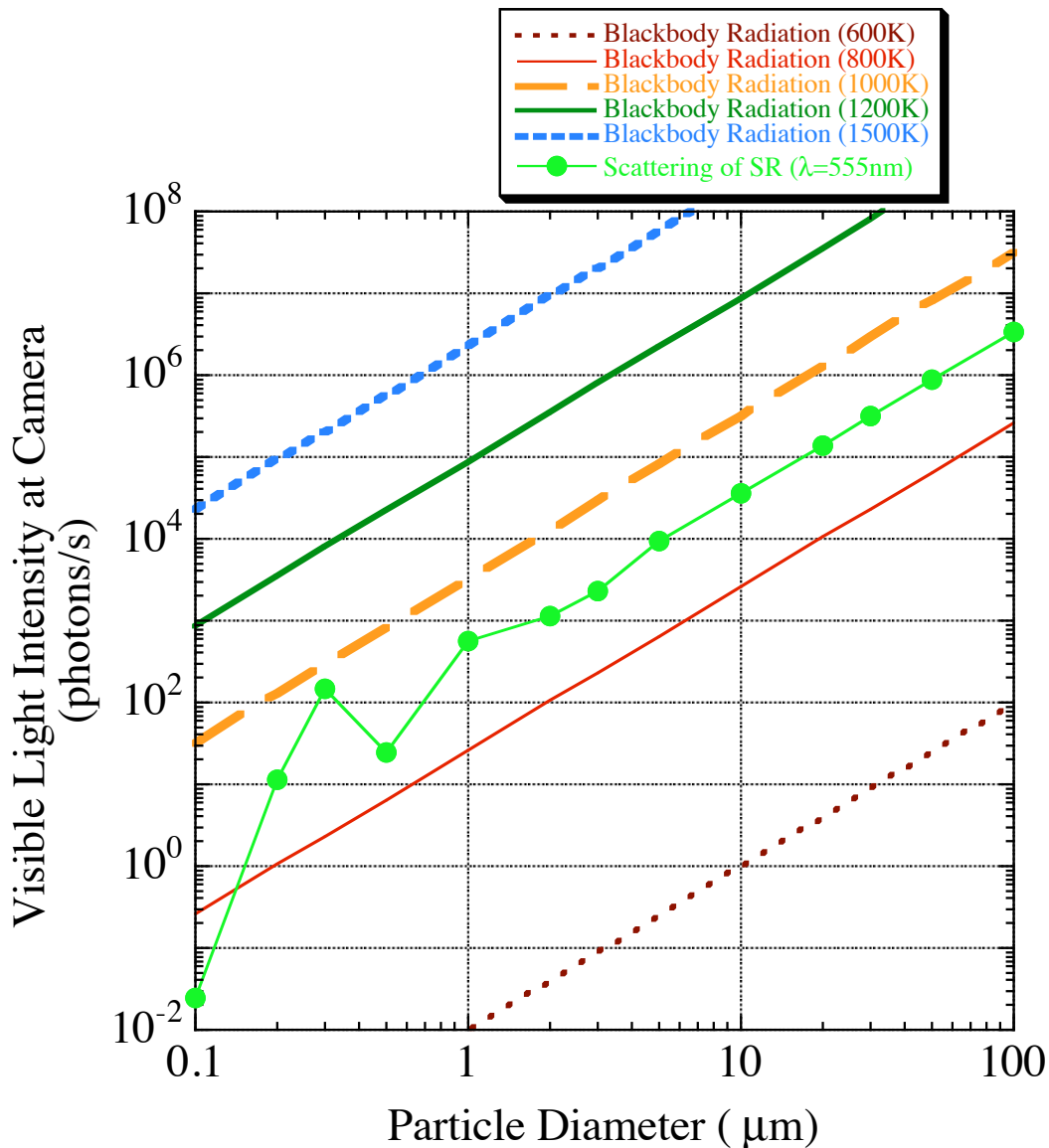


図 5-18 黒体輻射と放射光散乱の 2 過程による発光強度の概算見積結果

ダスト直径が 0.1~100 μm の範囲において、温度が 600、800、1000、1200、1500K の場合での黒体輻射、および放射光の散乱による発光強度を、CCD カメラに単位時間当たりに入射する光子数 (photons/s) でプロットした。この結果から、ダストの温度が 1000K 以上になると、ダストの直径によらず、黒体輻射による発光強度が放射光の散乱強度を上回ることが示された。また、黒体輻射の場合、および放射光の散乱でダスト直径が数 μm 以上の場合は、その光子強度はダスト直径の 2 乗に比例していることが分かる。

次に、CCD カメラに十分な明るさで撮影されるためのダストの条件について考察する。今回の実験で使用した CCD カメラは最低被写体照度が 1lx(ルクス) であり、CCD 面 1 画素当たりの光子強度として $10^4 \sim 10^5$ photons/s が必要である (Appendix 参照)。CCD カメラで十分に明るく観測される光子強度を仮に 10^6 photons/s とすると、ダストの温度が 1000K の場合は直径が $20\mu\text{m}$ 以上である必要があり、1500K の場合は $1\mu\text{m}$ 以上で観測可能となると見積られる。また、ダスト直径が $50\mu\text{m}$ 以上になると、温度が 800K 以下であっても放射光の散乱によって観測されうることを示している。しかしながら、直径が $20\mu\text{m}$ を超えるとビーム寿命は 3 秒以下となり、ビームダンプに近い現象を引き起こすことになる。

2.1 節で述べたダストトラッピング理論によると、トラップされたダストは電子ビームからのエネルギー付与により高温になっている。ある条件では 1500K 程度まで上昇するという理論計算結果も報告されている^{[11], [34]}。これらの結果も考慮すると、今回ダストが視覚的に観測されたのは、黒体輻射によるものであったと考えられる。ただし、この発光原因に対する確証を得るためには、更なる実験が必要である。例えば、発光スペクトルが測定できれば、ダストの温度に関する情報を得ることができる。

この実験での急落後のビーム寿命 ($-N_e/\dot{N}_e = 4.3 \times 10^{11} / 1.2 \times 10^8 = 3600$ 秒) 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である銅を仮定すれば、 $0.8\mu\text{m}$ である。このサイズの場合、温度が 1500K 以上であればカメラで観測されると考えられるが、銅の融点 (1358K) を超えており、1300K でも蒸気圧は 10^2 Pa 程度と高く、蒸発によるダストの寿命を式 2-6 で計算すると約 60 秒と短い。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 1941K と高く、例えば 1500K での蒸気圧は 10^4 Pa 台である。その場合、蒸発によるダストの寿命は約 1.6 時間と計算される。シリカ (SiO_2) の場合は、直径は $1.2\mu\text{m}$ となり、融点は 1983K、1500K の蒸気圧は 10^6 Pa 台で、蒸発によるダストの寿命は約 80 時間となる。

ダストの視覚的な観測に成功したのは、電極 B の機械的な移動によって寿命急落が発生したときの 1 回のみであり、後の数 10 回に及ぶ放電によるダスト生成実験では 1 度も観測されなかった。発光の光子強度はダスト直径の 2 乗に比例するので、比較的大きいダストが観測に適しており、また、高温状態でもそのサイズを維持できる低蒸気圧物質であることが、視覚的に観測可能な条件と

なる。今回の再現実験中の放電によって発生するダストでは、その条件を満たしていなかったと考えられる。

今後、より確実な視覚的観測手法が確立されれば、ダストの挙動やトラップ条件に関する詳細な研究が可能になる。例えば、高感度カメラやハイスピードカメラによる撮影、あるいは、離れた 2 箇所の光電子増倍管による飛行時間 (Time of Flight) 測定を行うことで、トラップされたダストの詳細な運動が観測できるようになると期待される。

第 6 章

結 論

PF-ring と PF-AR において、長期にわたり寿命急落現象の観察を続けてきた。その観察によって得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 寿命急落現象に対して、持続時間の違いによる分類法を新たに導入した。それにより、PF-ring ではある電流値以上では持続型の寿命急落は発生しないこと、また、PF-AR では持続時間（トラップされたダストの寿命）がダストサイズと相関を持つことが判明した。すなわち、ビーム強度やダストサイズがダストの寿命（または安定トラップ条件）に強く関係していることが判明した。さらに、この分類法により、発生頻度の統計データとして寿命急落現象がユーザー運転に与える影響をより明確に定量化できるようになった。
- (2) DIP がダストの主な発生要因の一つであることが確かめられ、DIP を OFF した運転を行うことで寿命急落発生を大幅に抑制することができた。さらに、寿命急落発生時の真空データを詳しく調査した結果、ビームからの電磁場によって発生する放電もダストの発生要因であることが明らかとなった。PF-AR では、放電を起こしやすい比較的高い電流値の方が寿命急落が発生しやすいことも判明し、また、通常よりも 25% 高い電流値で放電源のコンディショニングを行うことが発生頻度の低下に効果的であったことも示された。放電によるダスト発生のみ候はこれまでにも他の研究者によって報告されていたが、実際の加速器運転における抑制対策の効果を十分な統計データとして示したのは本研究が初めてである。これらの知見は、他の電子貯蔵リングにおける寿命急落現象の抑制対策においても有益であると考えられる。

上記の運転経験からダスト発生源として有力視された 2 種類の放電、すなわち DIP での高電圧印加による放電とビームからの電磁場による放電によってダ

ストトラッピングが引き起こされることを実験的に実証するために、人為的な放電発生装置を PF-AR に設置してダストトラッピング再現実験を行った。その実験で得られた成果は以下のとおりである。

- (1) 想定した 2 種類の放電のどちらの場合でもビームにトラップされるダストが発生することが初めて実験的に実証された。さらに、電極の機械的な駆動によってもダストトラッピングが発生することが確認された。これまで再現実験が困難とされてきたダストトラッピングの研究において、効果的な実験手段が示されたことになる。
- (2) ビームにトラップされたダストのビデオカメラによる視覚的な観測に初めて成功した。そして、ダストからの発光原因は、ダストが 1200K 以上の高温になったことによる黒体輻射である可能性が最も高いという考察結果を得た。
- (3) そのカメラ映像から、トラップされたダストが longitudinal 方向に移動していたことも明らかとなった。動画を解析した結果、推定速度は 0.3m/s 程度であった場合もあるが、速い場合では 12m/s 以上であった。その視覚的な観測では、ダストがカメラの前を短時間のうちに繰り返し横切る映像も捉えることができたため、その付近でダストが longitudinal 方向に振動していた可能性が有力視された。さらに別の実験では、離れた位置にある 2 台の γ 線検出器によって、ダストが偏向電磁石を超えて longitudinal 方向に移動した兆候も観測された。

特に、ビームにトラップされたダストがビデオカメラによって視覚的に観測可能であることを発見できたことは、今後のダストトラッピング研究を発展させる上で重要な成果になると考えられる。例えば発光スペクトルを観測してダストの温度を測定したり、高感度カメラやハイスピードカメラを用いてダストの運動を詳しく調べたりすることで、長年未解決の課題であったダストの安定トラップ条件やトラップされたダストの運動などに関する有益な情報が得られると期待される。

Appendix 光子強度計算

視覚的に観測されたダストの発光原因を調べるため、黒体輻射と放射光散乱の2過程において、それぞれCCDカメラに入射する光子強度を計算した。また、CCDカメラの感度に関する計算も合わせて行った。

計算に用いた主な条件は以下のとおりである。

- (1) ダストを直径 d (m)の球体とし、その範囲を $0.1\sim 100\mu\text{m}$ とする。
- (2) ダストから CCD カメラまでの距離 L を 0.1m とする。すなわち、ダストはカメラからは点光源とみなせる。
- (3) CCD カメラのレンズ直径 D を $8\times 10^{-3}\text{m}$ とする。すなわち、カメラレンズの面積 S は $\pi(D/2)^2=5\times 10^{-5}\text{m}^2$ 、ダストからカメラへの立体角 Ω は $S/L^2=5\times 10^{-3}\text{sr}$ となる。

黒体輻射による光子強度計算

ダストを直径 d (m)の球体で温度 T (K)の完全黒体と仮定した場合、単位時間、単位立体角あたりに放射する可視光強度 $I_0(d, T)$ (photons/s/sr)は、プランクの輻射式を可視光領域 (波長 λ : $380\sim 780\text{nm}$) で積分して

$$I_0(d, T) = \int_{3.8\times 10^{-7}}^{7.8\times 10^{-7}} \frac{\pi c d^2}{2\lambda^4} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} d\lambda \quad (\text{A-1})$$

によって計算される。ここで、 c は光速、 h はプランク定数、 k_B はボルツマン定数である。簡単のため、ダストサイズに依存する放射強度の変化や材質に依存する輻射率は考慮に入れていない。この黒体輻射により、単位時間当たり CCD カメラに入射する光子強度 $I_{black}(d, T)$ (photons/s) は、式 A-1 にカメラの立体角 Ω をかけて

$$I_{black}(d, T) = \int_{3.8\times 10^{-7}}^{7.8\times 10^{-7}} \frac{\pi c d^2}{2\lambda^4} \frac{1}{e^{hc/\lambda k_B T} - 1} d\lambda \times \Omega \quad (\text{A-2})$$

で与えられる。例えばダスト直径 $d=1\mu\text{m}$ の場合に、温度 $T=600, 800, 1000, 1200, 1500\text{K}$ に対して計算すると

$$I_{black}(1\times 10^{-6}, 600) = 9.21\times 10^{-3} \text{ photons/s}$$

$$I_{black}(1\times 10^{-6}, 800) = 2.61\times 10^1 \text{ photons/s}$$

$$I_{black}(1\times 10^{-6}, 1000) = 3.26\times 10^3 \text{ photons/s}$$

$$I_{black}(1\times 10^{-6}, 1200) = 8.49\times 10^4 \text{ photons/s}$$

$$I_{black}(1\times 10^{-6}, 1500) = 2.33\times 10^6 \text{ photons/s}$$

となる。それぞれの温度に対して、異なるダスト直径での光子強度は $I_p \propto d^2$ の関係からすぐに求めることができる。

放射光散乱による光子強度計算

散乱の 1 次光としてダストに入射する光を、6.5GeV-60mA 蓄積時における上流偏向電磁石からの放射光の可視光成分とする。そして、それらがミー散乱によってダストで散乱され、CCD カメラに入る光子強度を計算する。

まず、放射光フラックス (photons/s/mrad/0.1%BW) のスペクトル (図 A-1) を可視光領域で積分して、単位時間当たりにリング全周にわたって放射される可視光光子数を求めると、 4.02×10^{18} photons/s となる。ちなみに、これは $8.08 \times 10^{17} \times E_{beam}(\text{GeV}) \times I_{beam}(\text{mA})$ で計算される全波長の光子数 3.15×10^{20} photons/s の約 1.3% に当たる。ただし、厳密に言えば、ダストは直線部のビーム軌道上にあるため、そこを通過する放射光は上流円弧軌道端、すなわち偏向電磁石磁場の弱まった地点 (フリンジの先端) から放射される光である。しかしながら、厳密な計算はかなり複雑なものになるため、ここでは通常の放射光のスペクトルを用いて計算することとする。

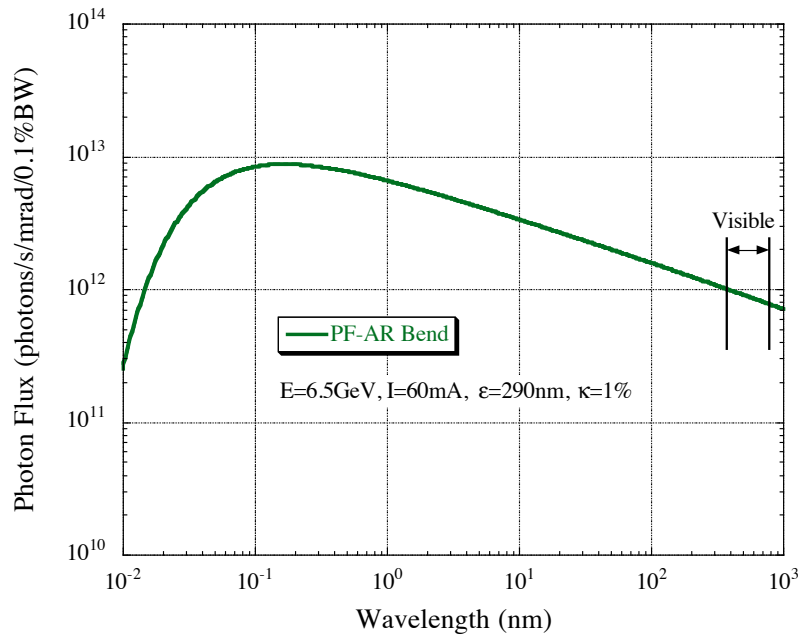


図 A-1 PF-AR 偏向電磁石からの放射光スペクトル

また、今回の計算では、簡単のため、すべての可視光を中心波長付近の 555nm で代用させる。555nm としたのは、後述の CCD カメラの感度を光子数で表す際に必要となる光度 1cd (カンデラ) の定義が

「周波数 540×10^{12} Hz (波長 555nm) の単色放射を放出し、所定の方向におけるその放射強度が $1/683$ W/sr である光源の、その方向における光度」
 で与えられているためである。

次に、可視光の鉛直方向拡がり σ_p (rad) を Green の近似式^[48]

$$\sigma_p \approx 0.565 \frac{(\lambda/\lambda_c)^{0.425}}{\gamma} \quad (\text{A-3})$$

によって求める。ここで、 λ_c は放射光の臨界波長、 γ はローレンツ因子を表し、PF-AR の場合はそれぞれ 0.0483nm と 12720 である。したがって、 $\lambda=555$ nm の場合、鉛直方向に $\sigma_p=2.36$ mrad の拡がり放射される。ちなみに、この値は通常放射光の拡がりとして用いられる $1/\gamma=0.0786$ mrad の約 30 倍である。

次に、この可視光のダスト位置における単位時間、単位面積当たりの光子数を計算する。これがすなわち散乱計算での入射光強度 I_0 となる。

発光点からダストまでの距離は 5.6m であるので、鉛直方向については、先

に計算した $\sigma_p=2.36\text{mrad}$ を用いて、 $5.6\times(2.36\times 10^{-3})\times 2=0.026(\text{m})$ の高さの光束となる。ここで、ファクタ 2 をかけたのは、 $\pm\sigma_p$ を取ったためである。水平方向については、リングを半径 23.708m (PF-AR の偏向軌道半径) の円とすると、発光点から 5.6m の距離を通る同心円の半径は $(23.708^2+5.6^2)^{0.5}=24.4(\text{m})$ 、その円周は 153m となる。

したがって、入射光強度 I_0 は、 $4.02\times 10^{18}\times 2/(0.026\times 153)=2.02\times 10^{18}$ (photons/s/m²)となる。ここで、ファクタ 2 をかけたのは、ダストは鉛直方向に関して光子強度分布のピーク位置にあり、強度分布を単純に線形 (三角形) で近似した (中心部分の強度を平均の 2 倍とした) ためである。

90 度方向のミー散乱係数 $k_s(\pi/2, d)$ を MiePlot と呼ばれるソフトウェア^[49]を用いて計算した。計算条件として、ダストを材質が銅の球体と仮定し、媒質は真空、入射波長は 555nm、入射光は水平直線偏光とした。計算結果の 1 例として、ダストの直径が 1 μm のときの散乱係数 $k_s(\theta, 1\times 10^{-6})$ の散乱角 θ 依存性を図 A-2 に示す。これにより、水平直線偏向光の 90 度方向への散乱係数 $k_s(\pi/2, 1\times 10^{-6})=5.70\times 10^{-12}$ を得る。

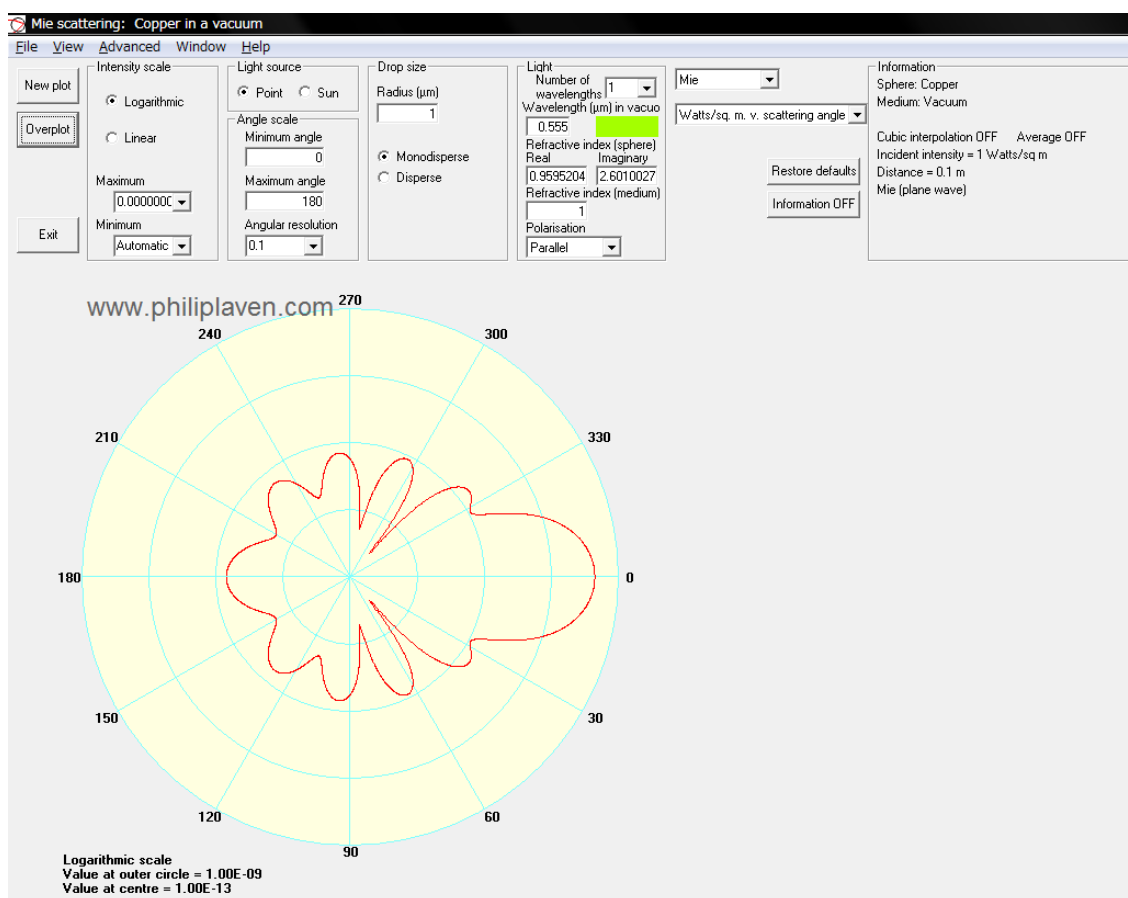


図 A-2 MiePlot ソフトウェアでの散乱強度計算結果の 1 例。入射光を波長 555nm の水平直線偏波とし、ダストを直径 1 μ m の銅とした場合の、散乱光強度の角度依存性が表示されている。

最終的に求めたい CCD カメラに入射する光子強度 I_s は

$$I_s = k_s(\pi/2, d) S I_0 \quad (A-4)$$

で与えられる。ここで、 S はカメラレンズの面積 ($5 \times 10^{-5} \text{ m}^2$) である。例えば、ダストの直径 d が 1 μ m のとき、 I_s は 573 photons/s と計算される。

CCD カメラの感度計算

本実験で使用した CCD カメラは、最低被写体照度として 1 lx (ルクス) の感度を持つ。これを光子強度と比較するためには、照度を光子数に換算する必要がある。前述の光度の定義によると、波長 555nm の光に対して、1cd = 1/683

W/sr である。これを 555nm の光子数で表せば、 $1\text{cd}=4.09\times 10^{15}\text{ photons/s/sr}$ となる。光度は単位立体角当たりの光束であるので、光束の換算式は 1lm (ルーメン) $=4.09\times 10^{15}\text{ photons/s}$ となり、照度は単位面積当たりの光束であるので、照度の換算式は $1\text{ lx}=4.09\times 10^{15}\text{ photons/s/m}^2$ となる。

さて、カメラの感度として与えられているのは被写体側の照度であり、CCD 面での照度ではない。そこで、被写体照度を CCD 面での像面強度に換算する必要がある。

一般に、像面強度 E_c と被写体照度 E の関係式は

$$E_c = \frac{QR}{4F^2} E \quad (\text{A-5})$$

で与えられる。ここで、 Q は結像係数と呼ばれるカメラレンズでの光の透過率に関係する量で、 R は被写体の反射係数、 F はレンズの F 値を表す。今回の計算では、 Q と R に対しては、一般的な値として、 $Q=0.83$ 、 $R=0.18$ を採用し、 F は使用したレンズの F 値 2.0 を用いる。したがって、式 A-5 は、 $E_c=9.3\times 10^{-3}E$ となる。この関係式により、被写体照度 E が 1 lx の場合、CCD 面での単位面積当たりの光子強度 E_c は $3.8\times 10^{13}\text{ photons/s/m}^2$ に相当することになる。

次に、本実験で使用した CCD は、1/3 インチ (4.8mm×3.6mm) CCD なので、その面積は $1.73\times 10^{-5}\text{ m}^2$ である。CCD の画素数は $768\times 494=3.79\times 10^5$ (pixels) である。よって、1 画素当たり面積は $4.55\times 10^{-11}\text{ m}^2/\text{pixel}$ となる。

以上の計算結果から、CCD の感度である最低被写体照度 1 lx は、CCD の 1 画素に対して光子強度 $3.8\times 10^{13}\times 4.55\times 10^{-11}=1.7\times 10^3$ (photons/s) に相当する。ただし、この値は理想的なレンズを使用して、点光源から発せられる全光子が 1 画素内に結像すると仮定した場合の値である。本実験ではレンズをパンフォーカスモードで使用したため、点光源からの光束は必ずしも 1 画素には結像していないと考えられる。したがって、1 画素に対して必要な光子強度は $10^4\sim 10^5$ photons/s 以上であると見積もられる。

謝 辞

本研究は、多くの方々のご指導、ご協力の下で行われてきました。この度、その成果を学位論文として纏めることができ、心より感謝いたします。

グループリーダーである本田融准教授には、第一に良い研究環境を与えていただき、そして実験の方針やデータの考察、論文執筆など研究活動全般にわたってご指導いただきました。同じ PF-ring と PF-AR の真空系担当者である内山隆司氏と野上隆史氏には、日々のメンテナンスや改造作業、特にイオンポンプの増強において、多大なご協力をいただきました。

堀洋一郎教授には、長期にわたる寿命急落現象の観察を通して、ダストトラッピングの基礎知識をご教授いただき、また、実験装置の基本設計の段階で様々なアイデアを紹介していただきました。

ダストトラッピングの実験データの考察では、坂中章悟准教授に多くのことを教えていただきました。また、投稿論文の作成ではそれらが大変役に立ちました。ダストからの発光の機構につきましては、齊藤芳男教授、金澤健一教授にご指導いただきました。

研究方針の決定や修正では、春日俊夫教授、小林幸則教授、前澤秀樹教授、伊澤正陽教授、山本樹教授、三橋利行教授にご指導いただくとともに、日々暖かい激励をいただきました。

実験装置の準備や設置作業では、三菱電機システムサービスの飯島寛昭氏、藤川雄次氏、川野壽美氏、大和田光晴氏、廣藤直也氏、黒田祐介氏にご協力いただきました。また、実験装置の製作、とりわけ電極やカメラ固定治具、鉛遮蔽の製作では清和製作所の清野英晃氏にお世話になりました。

また、PF-ring と PF-AR での運転中における実験データは、加速器第七研究系スタッフ皆様の日々のご尽力により取得することができました。

この場をお借りして、皆様にお礼申し上げます。

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] A. Kling, "Dust Macroparticles in HERA and DORIS", in *Proceedings of the 10th European Particle Accelerator Conference, Edinburgh, 2006*, pp. 1486-1488.
- [12] Y. Tanimoto, T. Honda, T. Uchiyama, and T. Nogami, "Sudden Lifetime Drop Phenomena and their Effective Cures in PF-ring and PF-AR", *AIP Conference Proceedings* **1234**, 595 (2010).
- [13] 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).

- [14] T. Honda, S. Asaoka, W. X. Cheng, K. Haga, K. Harada, Y. Hori, M. Izawa, T. Kasuga, Y. Kobayashi, H. Maezawa, A. Mishina, T. Mitsunashi, T. Miyajima, H. Miyauchi, S. Nagahashi, T. Nogami, T. Obina, C. O. Pak, S. Sakanaka, Y. Sato, T. Shioya, M. Tadano, T. Takahashi, Y. Tanimoto, K. Tsuchiya, T. Uchiyama, A. Ueda, K. Umemori, and S. Yamamoto, "Reconstruction of Photon Factory Storage Ring for the Straight-Sections Upgrade Project", in *Proceedings of the 2005 Particle Accelerator Conference, Knoxville, TN, 2005*, pp. 2678-2680.
- [15] Y. Tanimoto, T. Uchiyama, T. Nogami, and Y. Hori, "Vacuum Systems Renewal for the PF-AR Upgrade", in *Proceedings of the 2003 Particle Accelerator Conference, Portland, OR, 2003*, pp. 809-811.
- [16] Y. Tanimoto, T. Honda, T. Uchiyama, and T. Nogami, "Improvement of Beam Lifetime and Vacuum System of the PF-AR", *Vacuum* **84**, 760 (2010).
- [17] E. Jones, F. Pedersen, A. Poncet, S. v. d. 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).
- [18] A. W. Maschke, "On Abrupt Lifetime Shortening in Electron Storage Rings", BNL Heavy Ion Fusion Technical Note 84-1 (1984).
- [19] D. R. C. Kelly, "Dust in Accelerator Vacuum Systems", in *Proceedings of the 1997 Particle Accelerator Conference, Vancouver, 1997*, pp. 3547-3551.
- [20] 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).
- [21] 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.
- [22] F. Zimmermann, "Trapped Dust in HERA and Prospects for PEP-II", Technical Report PEP-II AP Note No.: 8-94 (1994).
- [23] M. Kobayashi, H. Kitamura, and Y. Takiyama, "Status of the Vacuum System of the Photon Factory", in *Proceedings of the 1987 Particle Accelerator Conference, Washington, D.C., 1987*, pp. 1614-1616.
- [24] Photon Factory Activity Report 1983/84, IV (1984).
- [25] H. Saeki, T. Momose, and H. Ishimaru, "Analyses for a Charged Microparticle from an Ion Pump to Trap at Low Electric Field with High Enhancement Factor", *Review of Scientific Instruments* **65**, 3479 (1994).
- [26] 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).

- [27] 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).
- [28] S. Kato, K. Kanazawa, S. Uno, and T. Tsukamoto, "Dust Trapping Experiments at TRISTAN AR", in *Proceedings of the 10th Symposium on Accelerator Science and Technology, Hitachinaka, 1995*, pp. 200.
- [29] P. Marin, "Longitudinal Motion of a Dust Particle along a Beam of Electrons in a Storage Ring", LURE RT/90-06 (1990).
- [30] D. R. C. Kelly, "Many-Event Lifetime Disruption in HERA and DORIS", Technical Report DESY HERA 95-02 (1995).
- [31] 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.
- [32] F. Pedersen, "Effects of Highly Charged, Solid Microparticles Captured in Negatively Charged Circulating Beams", in *Proceedings of the 1987 Particle Accelerator Conference, Washington, D.C., 1987*, pp. 1246-1248.
- [33] 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).
- [34] 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).
- [35] F. Zimmermann, J. T. Seeman, and M. Zolotarev, "Trapped Macroparticles in Electron Storage Rings", in *Proceedings of the 1995 Particle Accelerator Conference, Dallas, TX, 1995*, pp. 517-519.
- [36] Y. Baconnier and G. Brianti, "The Stability of Ions in Bunched Beam Machines", CERN/SPS/80-2 (DI) (1980).
- [37] A. Piwinski, "Beam Losses and Lifetime", CERN Accelerator School, Gif-sur-Yvette, 1984, CERN 85-19 (1985).
- [38] S. Sakanaka, private communication (2009).
- [39] M. Katoh, Y. Hori, Y. Kobayashi, S. Sakanaka, M. Izawa, K. Haga, T. Honda, T. Mitsuhashi, T. Obina, C. O. Pak, K. Ohmi, K. Tsuchiya, N. Kanaya, A. Ueda, M. Tadano, Y. Takiyama, S. Asaoka, T. Nogami, T. Shioya, A. Mishina, Y. Sato, S. Tokumoto, T. Takahashi, T. Kasuga, H. Maezawa, M. Kobayashi, and H. Kobayakawa, "Reconstruction for the Brilliance-upgrading Project of the Photon Factory Storage Ring", *Journal of Synchrotron Radiation* **5**, 366 (1998).

- [40] W. D. Kilpatrick, "Criterion for Vacuum Sparking Designed to Include Both rf and dc", *Review of Scientific Instruments* **28**, 824 (1957).
- [41] L. Cranberg, "The Initiation of Electrical Breakdown in Vacuum", *Journal of Applied Physics* **23**, 518 (1952).
- [42] R. V. Latham, *High Voltage Vacuum Insulation: Basic Concepts and Technological Practice*, Academic Press (1995).
- [43] J. E. Jenkins and P. A. Chatterton, "The Detection of Microparticles prior to Vacuum Breakdown Using a Laser Scattering Technique", *Journal of Physics D: Applied Physics* **10**, L17 (1977).
- [44] C. Texier, "Breakdown Initiation in Vacuum: Electrical Charge of Microparticles Emitted in a Vacuum Gap", *Journal of Physics D: Applied Physics* **10**, 1693 (1977).
- [45] Y. Tanimoto, T. Uchiyama, T. Nogami, and Y. Hori, "Vacuum Control System of the Synchrotron Light Source PF-AR and Progress of the Accelerator Commissioning", *Journal of the Vacuum Society of Japan* **46**, 441 (2003).
- [46] 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).
- [47] O. Gröbner and K. Hübner, "Computation of the Electrostatic Beam Potential in Vacuum Chambers of Rectangular Cross-section", CERN/ISR-TH-VA/75-27 (1975).
- [48] G. K. Green, "Spectra and Optics of Synchrotron Radiation", BNL Report 50552 (1976).
- [49] P. Laven, "Simulation of Rainbows, Coronas, and Glories by use of Mie Theory", *Appl. Opt.* **42**, 436 (2003).