

話 題

J-PARC における電子雲と e-p 不安定性

外山 毅*1・大見 和史*2

Electron-cloud and e-p Instability in J-PARC

Takeshi TOYAMA*1 and Kazuhito OHMI*2

Abstract

Electron cloud effect has been studied for J-PARC RCS (Rapid Cycling Synchrotron) and MR (Main Ring). Numerical simulation shows electron cloud may build-up to the neutralization level of a few %. With a linear theory and numerical simulation, electron-proton (e-p) instability is examined. Electron cloud observation at the KEK-PS is also discussed for comparison. The present investigation shows that e-p instability in the J-PARC rings will be manageable, assuming some remedies such as local solenoid magnets.

1. はじめに

J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex)¹⁾は、JAEA と KEK との共同プロジェクトである。現在建設が急ピッチで進んでおり、ビームコミッションは、2006 年末～2008 年に LINAC から順次始まる予定である。J-PARC 加速器は、LINAC, 3 GeV RCS (Rapid Cycling Synchrotron) と 50 GeV MR (Main Ring) からなる。RCS は中性子・中間子源として物質・生命の実験に、また MR の入射器と

して、180 MeV (将来 400 MeV) から 3 GeV まで 20 ms 間で加速を行なう (減速期間も 20 ms)。従って繰返し周期は 25 Hz である。MR は素粒子原子核実験、ニュートリノ実験に使われるビームを 30～50 GeV の範囲で、速い取出し、遅い取出しのモードで供給する。繰返し周期は 0.3 Hz 程度で可変である。電子雲評価に使用した主なパラメータを表 1 に掲載する。

バンチ当たり陽子数 4.15×10^{13} 個 ($6.6 \mu\text{C}$) が、長さ 16-110 m に分布する。このような大強度ビーム

表 1 J-PARC RCS と MR のパラメータ

	RCS		MR	
	入射	取出	入射	取出
周長 (m)		348.3		1567.5
γ		1.43		4.20
バンチ内粒子数		4.15×10^{13}		$4.15\text{E} + 13$
バンチ数		2		8
ハーモニック・ナンバー		2		9
ビーム・サイズ σ_r (cm)	1.9	1.2	1.1	0.35
バンチ長 (m)	110	82	82	16
運動量の広がり σ_E/E (%)	0.6	0.7	0.7	0.25
スリッページ・ファクター	-0.48	-0.047	-0.058	-0.0013
シンクロトロン・チューン	0.0058	0.0005	0.0026	0.0001
ビーム・パイプ半径 (cm)		12.5		6.5

*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK (E-mail: takeshi.toyama@kek.jp)

*2 高エネルギー加速器研究機構 KEK (E-mail: ohmi@post.kek.jp)

は、これまでe-p不安定性がビーム強度増強の大きな障害となってきた、ロスアラモスのPSRのビームに匹敵するものである²⁾。パラメータ領域で似たようなJ-PARCでもe-p不安定性が起きるかどうかが、起きないための対策、起きた場合の対策は重要な問題であり、検討が行なわれている。

2. シミュレーションによる検討

e-p不安定性は、以下の2つの過程に分けて考えるとわかりやすい。まず、最初の過程は電子雲の蓄積である。1次電子発生種は、J-PARCなどの放射光の無視出来る陽子リングでは、

- ① 陽子ビームと残留ガスとの衝突
- ② 陽子と壁(ビーム・ダクト, セプタム, キッカー, ビーム・コリメータの散乱/吸収体)との衝突(ビームロス)
- ③ 荷電変換フォイルとの衝突

である。

これらの電子が、ビームの時間変化するポテンシャルで加速され、壁に激突し2次電子を発生させる。この過程が繰り返し起こり(マルチパクティング), ある定常状態に達する。この過程は、壁の寸法・2次電子放出係数, ビーム電荷密度・形状, 磁場分布, などに依存する。

次の過程は、定常状態に達した電子雲と陽子との電氣的引力によるビームの不安定性(e-p不安定性)である。不安定性は、電子雲の密度のみならず、ビームの運動量の広がり, スリッページ・ファクターなどの加速器のパラメータに依存する。

実際の現象は上記2つの過程が自己無撞着に起きる。バンチしたビームとコースティング・ビームではビーム・ポテンシャルの時間構造が異なるので、以下で分けて議論する。

2.1 RCSとMRにおけるバンチしたビームの不安定性³⁾

1次電子の種としては、計算の結果ビームロスによるものが支配的である。計算条件は以下の通りである:

ビームロスが 4×10^{-10} , 4×10^{-9} , $4 \times 10^{-8}/\text{m}$ の割合で起きる, 1個の陽子がロスすると100個の電子が発生する, 2次電子放出効率は、入射電子エネルギー E に対して

$$\delta_2(E) = \delta_0 e^{-5E/E_{\max}} + \delta_{\max} \frac{E}{E_{\max}} \frac{1.44}{0.44 + (E/E_{\max})^{1.44}} \quad (1)$$

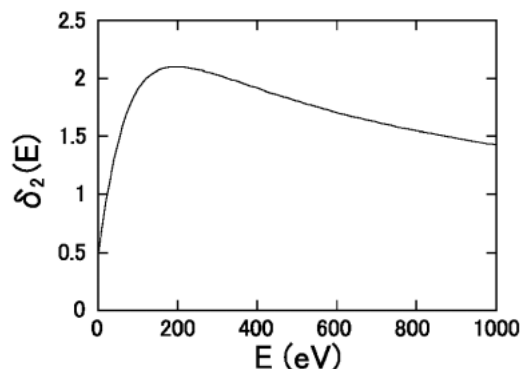


図1 シミュレーションで使った2次電子放出効率

の依存性を持ち(図1), $E_{\max} = 200 \text{ MeV}$, $\delta_0 = 0.5, 0.8$, $\delta_{\max} = 1.5 \sim 2.1$ (ビーム・ダクト), $2.8 \sim 5$ (キッカー)を仮定, 電子雲の空間電荷を考慮。

これらを用いて、ビームについては表1のパラメータを使って、マルチパクティングによる電子増殖のシミュレーションを行なった。例としてRCS 400 MeV, 3 GeV, MR 3 GeV, 50 GeVでの電子雲密度の計算結果を図2に示す。縦軸には、電子雲の線電荷密度を、陽子バンチの平均線電荷密度で割ったもの=中性度を取ってある。2次電子放出係数は、壁の物性を反映し、弾性散乱効率 δ_0 , 最大電子放出係数 δ_{\max} とそのエネルギー E_{\max} , などの表面状態に依存する。表面状態については、例えば、運転開始から数時間~数日間した後で、電子雲のマルチパクティングにより表面が変化し、2次電子放出係数が減少するという現象があり、LHC, SNSなどでは、その効果も期待している。ここでは、弾性散乱効率 $\delta_0 = 0.5, 0.8$ の2種類の場合についてシミュレーションした結果を示す。中性度は、バンチの後方で最大になり0.01~数%である(図2)。

この電子雲が不安定性を引き起こすかどうかは、前号⁴⁾で議論された単バンチ不安定性の線形理論から予想される閾値と比較することで見当がつけられる。そこでのポイントは、運動量の広がりにより発生する位相スリッページがLandau減衰を起こして、不安定性を抑制するということである。そのため、図2(d)MR 50 GeVが最も電子雲密度が小さいが、即ビームが安定であることを意味しない。そこではスリッページ・ファクターが非常に小さい値をとるためLandau減衰の効果が弱まるからである。比較を表2に示す。

中性度がピークのところで閾値を越えているが、実は、このタイミングでビームは無いので、今回のシミュレーション条件の範囲ではビームは安定である。

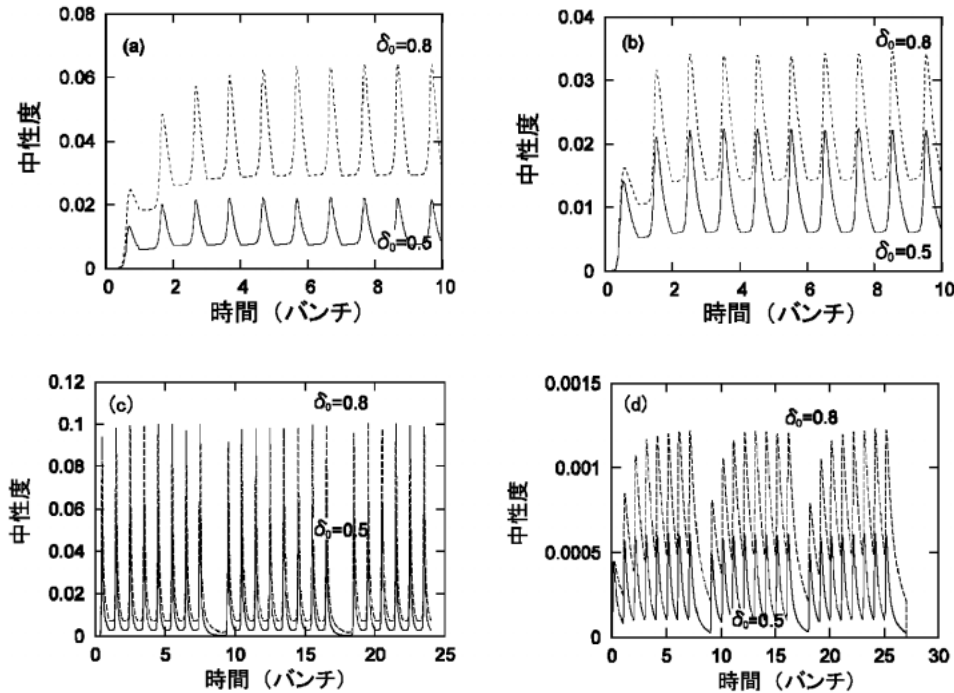


図2 電子雲の蓄積のシミュレーション結果. (a) RCS 入射 400 MeV, (b) RCS 取出し 3 GeV, (c) MR 入射 3 GeV, (d) MR 取出し 50 GeV

表2 電子雲の増幅度と中性感度

	RCS 入射	RCS 取出	MR 入射	MR 取出
電子雲の増幅度 (ボトム)	17	18	5.1	1.7
電子雲の増幅度 (ピーク)	50	68	115	9.5
中性感度(ボトム)	0.01	0.0067	0.0019	0.0001
中性感度(ピーク)	0.024	0.025	0.042	0.0007
中性感度(閾値)	0.28	0.03	0.03	0.00043

入射・取出しキッカーは、真空容器中にフェライトがビームに対してむき出しで設置されるので、これについても検討した。現在、2次電子放出係数が不明なので、2.8~5の範囲でサーチした。中性感度100%まで到達してしまうが、キッカーが全周の数%であること、Landau減衰が働くことにより、安定化することがわかった⁵⁾。

このほかにパラメータ・サーチを行なった結果は次の通りであった。ビームロス小さくした方が電子雲の中性感度は小さくなる。これは、SPSやLHCで、一度2次電子が発生すると、残留ガス、光脱離などの起源によらず、飽和するまで電子蓄積が起こってしまうのとは異なった特徴である。また、2次電子放出率を2.1から1.5まで低減すると、中性化率は一桁以上

小さくなる。

シミュレーションの精度は、上記の通り、種々の入力パラメータによるので、不安定性に限りなく近いと判断した方が良いかもしれない。従って、対策を講じることになるが、それについては第4節で述べる。

2.2 MRにおけるコースティング・ビームの不安定性⁶⁾

J-PARCでは、MRフラットトップで遅いビーム取出しが予定されている。50 GeVでは表1のとおりスリッページ・ファクターが小さいため、不安定性の閾値が非常に小さい。そのため、もしも残留ガスのイオン化により発生する電子が、コースティング・ビームの作る静的な電氣的ポテンシャルにトラップされると、たちまち電子雲密度は閾値に達してしまう。真空の圧力が 2×10^{-7} Paで $Y_1 = 8 \times 10^{-9}/m \cdot p$ とすると、その所要時間は1 msを下回る。

しかしながら、陽子ビームの僅かな振動が発生すると、トラップされた電子は軽いので拡散によって振り払われてしまう。図3が陽子にトラップされた電子の軌跡をプロットしたものである。電子の振動振幅は増大し壁にぶつかり、(1)式に従って、一部は吸収され、一部は2次電子を放出する。

マクロ粒子を用いて、陽子ビームと電子雲の運動のシミュレーションを行なった。簡単のため、Landauダンピングの効果は、 $x_{i+1} = (1 - \alpha)x_i$ 、すなわち単純

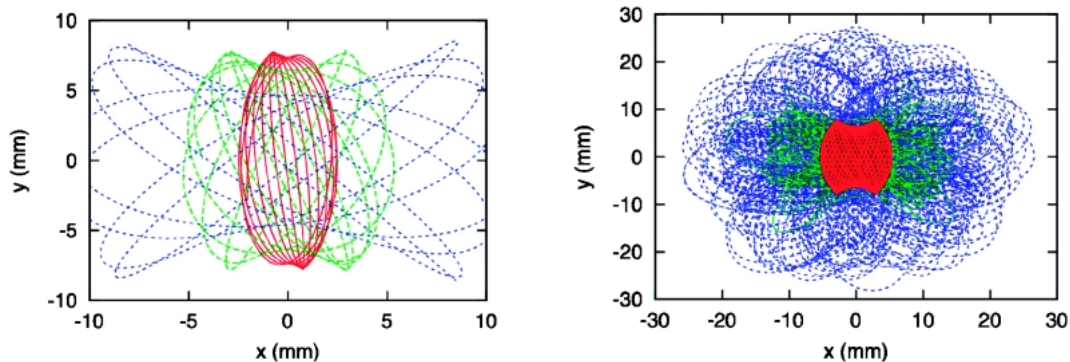


図3 コースティング・陽子ビームによる電子の軌道.
 (左) 静止した陽子ビーム. (右) 1 mm の位置変動がある場合. 赤: 比較のため(a)の緑の軌跡をプロット, 緑: 電子振動の 10 ターン, 青: 100 ターンまでの軌跡.

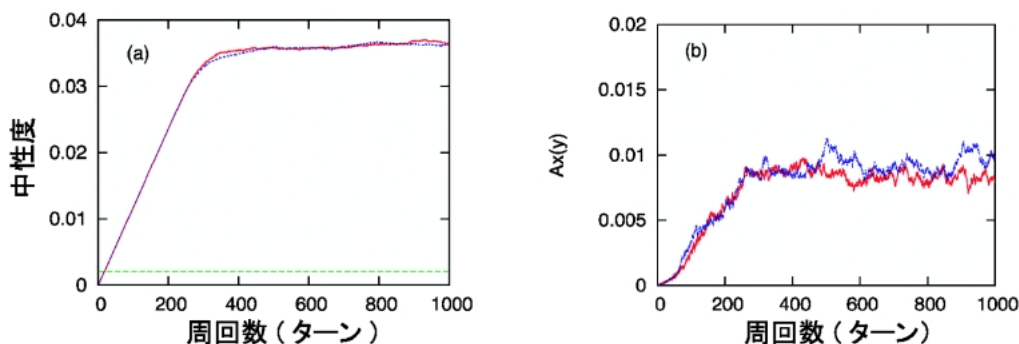


図4 コースティング・ビーム, 残留ガスのイオン化による電子雲の場合. 中性度 (左) と, ビームの振動振幅 (右).
 1 次電子の発生率 $Y_1 = 7.7 \times 10^{-8} / \text{m} \cdot \text{p}$ を仮定.

な減衰項として取り入れた. 壁での 2 次電子放出も含めた. 計算結果の 1 例を図 4 に示す. 緑線が線形理論から予測される不安定性の閾値に対応する中性度である. 線形理論の閾値より大幅に安定であることがわかる.

一方で, PSR²⁾や SNS⁷⁾での, コースティング・ビーム, バンチ・ビームの実験から, コースティング・ビームが最も不安定であることがわかっている. この現象と矛盾しないかを確認するため, 今回のシミュレーションの枠組みで, 残留ガスによるイオン化, およびビームロスによる壁からの電子放出の効率を変えて計算を行なった. その結果, 電子の発生起源によらず, J-PARC MR 50 GeV のパラメータでは, 1 次電子発生率 Y_1 が $10^{-6} / \text{m} \cdot \text{p}$ を越えると振動振幅がビーム・サイズに近いレベルになり, $Y_1 \sim 10^{-5} / \text{m} \cdot \text{p}$ を越えると爆発的な不安定性が起こることがわかった. オーダー的には実験結果と矛盾しないと思われる.

3. KEK-PS での電子雲の観測⁸⁾

3.1 バンチ・ビーム

KEK-PS の 12 GeV PS では, e-p 不安定性は観測されていない. しかし, ビーム位置モニタの電極のチャージアップが, 高抵抗負荷を接続すると観測されたため (通常は低抵抗の負荷), 電子雲の蓄積が起きていると予想し, ロスアラモスで開発された電子雲モニターを設置し, 電子雲の観測を行った. モニターの構成を図 5 に示す. 壁に衝突してくる電子をスリットから通過させ, コレクターで収集するのみならず, チェンバー内に漂っている電子をも, HV 電極にパルス電圧を加えることにより, 強制的に収集することができる.

12 GeV PS では, コレクタ信号は, バンチ長が最も小さくなるトランジション・エネルギー付近で観測された. HV 電極に電圧を印加しない場合を図 6 に示す. コレクタ電圧は, バンチ数が少ないと小さく, また連続するバンチの後ろに行くほど信号が大きくな

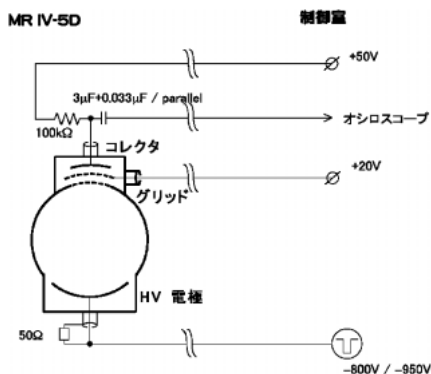


図5 KEK-PS に設置した電子雲モニターのブロック図



図7 電子雲モニター出力波形とバンチ信号. HV パルス電圧を印加した場合.

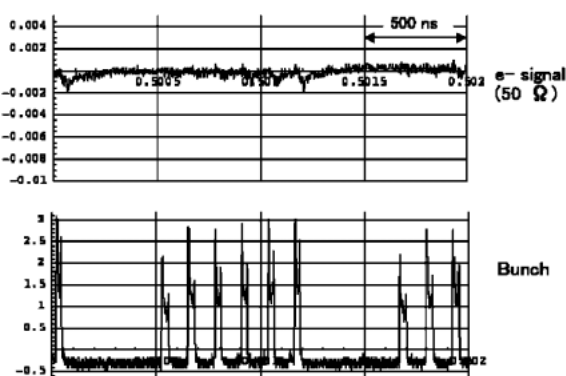


図6 電子雲モニター出力波形とバンチ信号. HV パルス電圧を印加しない場合. (a) 6バンチ. (b) 9バンチ.

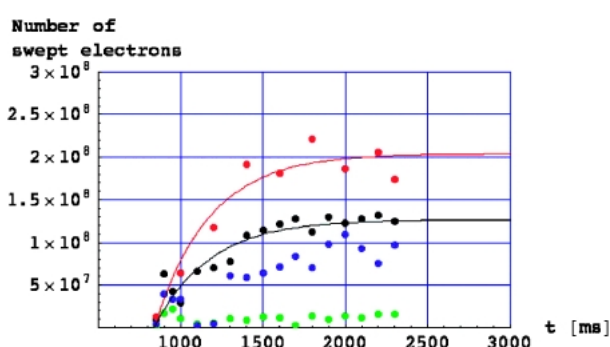
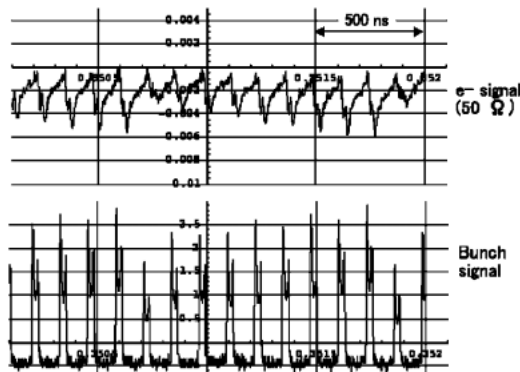


図8 コースティング・ビームによる電子雲の蓄積.

3.2 コースティング・ビーム

12 GeV PSは、遅い取出しモード（コースティング・ビーム）でも運転したので、その期間で、電子の蓄積を観測した。デバンチした直後から、電子雲モニターにHVパルス電圧を印加して電子雲を測定した。結果を図8に示す。ビーム強度を1.9（緑）、3.0（青）、 3.6×10^{12} （黒）に変えた場合、および 3.6×10^{12} で作為的にビームロスを作った場合（赤）をプロットした。

電子雲の蓄積を、 μ = 電子の生成率、 τ = 電子数の減衰率として、

$$n_e(t) = \mu\tau(1 - e^{-t/\tau}) \quad (2)$$

る。バンチ波形が不揃いなのは、PS入射期間のロスの違いによる。5バンチ以下では、有意のコレクタ信号は得られなかった。これらの特性は、電子雲の蓄積と矛盾しない。図7は、HVパルス電圧を印加した結果、ビームパイプ内で浮遊している電子が一掃され、その後、数バンチ通過の間に再び電子雲が蓄積していると理解できる。

と表し、 $N_B = 3.6 \times 10^{12}$ pppの測定結果をフィットすると、 $\mu = 10^{10}$ e/m·s、 $\tau = 0.3$ sを得た。これは中性化率 $\sim 30\%$ に対応する。もしリング全周がこの程度であると、明らかに線形理論による不安定性閾値を越えているが、不安定性は観測されていない。前節での非線形現象としての理解を定性的に支持している。また、ビームロスにより電子雲密度が $\sim 60\%$ 増加している。この時のビームロスは、AIC式（空気詰めケー

表 3 ビームロスによる電子発生の見積り

		陽子ロス	発生電子数	Y_1 (/m·p)	対策
RCS	荷電変換カーボン膜	—	$1.7 \times 10^{14}/500 \mu\text{s}$	1.1×10^{-5}	電子 キャッチャー
	第 2 荷電変換膜	H ⁰	$5 \times 10^{11}/500 \mu\text{s}$		—
		H ⁻	—	—	
	ハロー・コリメーター <4 kW	181 MeV	$<5.5 \times 10^{12}$	$5.5 \times 10^{14}/500 \mu\text{s}$	8.2×10^{-5}
400 MeV		$<2.5 \times 10^{12}$	$2.5 \times 10^{14}/500 \mu\text{s}$	2.8×10^{-5}	ソレノイド
制御不能ロス	181 MeV	$<1.1 \times 10^{11}$	1.1×10^{13}	1.6×10^{-6}	—
	400 MeV	$<5 \times 10^{10}$	5×10^{12}	5.6×10^{-7}	—
MR	ハロー・コリメーター 制御ロス (450 W)	$<6.6 \times 10^{11} \times 5$	$6.6 \times 10^{13} \times 5$		ソレノイド
	制御不能ロス 速い取出し (1.37 kW)	$1.65 \times 10^{13}/0.6 \text{ s}$	$1.65 \times 10^{15}/0.6 \text{ s}$	2.8×10^{-8}	
	制御不能ロス 遅い取出し (7.5 kW)	$5.2 \times 10^{12}/\text{s}$	$5.2 \times 10^{14}/\text{s}$	5.4×10^{-9}	

ブル式) ロスモニターの検出感度以下で、直近に設置したシンチレーション・カウンタでのみロス増加が確認された程度のものである。この結果は、ビームロスの重要性を示唆していると考えられる。KEK-PS は、2006 年 3 月をもってシャットダウンしたので、次のビーム測定は J-PARC で、ということになる。

4. J-PARC での電子雲低減策

理論的考察からも、測定からも、ビームロスを低減して最初の電子の発生を抑制することが重要であることがわかった。しかし、加速器の構成上、H⁻ 荷電変換フォイル、ビーム・コリメータなど、どうしても電子発生が避けられない機器がある。全体の戦略を考えるために、リング内での 1 次電子発生の見積りを行った。表 3 がその結果である。

前節までの議論から、e-p 不安定性の閾値に対応する 1 次電子発生率を $Y_1 \sim 4 \times 10^{-6}/\text{m} \cdot \text{p}$ と考えると、H⁻ 荷電変換フォイル、ビーム・コリメータについては、対策を施さないと、全体で閾値を越える。現在考えているのは、右欄に記したように、H⁻ 荷電変換フォイルに対しては電子キャッチャー、ビーム・コリメータに対してはソレノイド電磁石である。シミュレーションにより、30 G あれば電子雲密度を十分に低減出来ることが示されている (図 9)。

ロス対策以外に、RCS の偏向電磁石、4 極電磁石の真空ダクトの内面には 2 次電子放出係数の小さい TiN コーティングを施してあるので⁹⁾、電子雲の蓄積は緩和されると期待される。

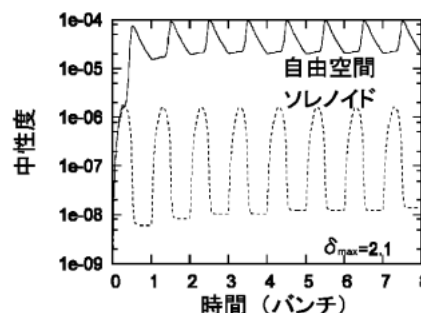
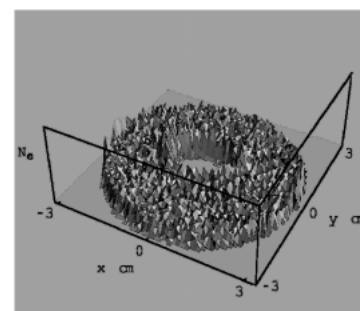


図 9 ソレノイドによる電子雲の抑制。30 G の軸方向磁場をかけた場合。(a)ビーム軸に垂直な面内の電子密度分布。(b)自由空間、およびソレノイド磁場中の電子雲の蓄積。

5. ま と め

J-PARC での電子雲蓄積と e-p 不安定性について、これまでの検討状況をまとめた。

世界的に電子雲の問題を眺めると、最近の大強度化に伴って、ほとんどのマシンで問題が発生したか予測されている。BNL の RHIC では、電子雲起源の真空圧力の悪化が問題となっている¹⁰⁾。LHC の運転開始

が間近の CERN では、その入射器である PS, SPS で電子雲の影響が観測されている。LHC 向けのビーム・パラメータにすると顕著になるとのことである¹¹⁾。電子雲対策に万全を期して動きだした SNS では、通常運転では支障がないが、コースティング・ビームにすると強烈な不安定性が発生したという報告がなされている。結合インピーダンスに換算して $\sim 1.9 \text{ M}\Omega/\text{m}$ (@ビーム電荷 $16 \mu\text{C}$)、真空機器のインピーダンスの数 10 倍という大きな値であったとのことである⁷⁾。これらの状況は電子雲ワークショップでも、精力的に情報交換、議論がされている¹²⁾。

現在、世界的に議論されている対策のメニューは、

- ① 一次電子の低減
 - (a) ビームロスの低減, 真空の向上
 - (b) H^- 荷電変換フォイルにより脱離される電子の捕獲
 - (c) クリアリング電極
- ② 2 次電子の蓄積の抑制
 - (a) ビーム・ダクト内面の低 2 次電子放出物質 (TiN など) によるコーティング
 - (b) ビーム・スクラビング (エージング)
 - (c) ソレノイド磁場
- ③ 不安定性の抑制
 - (a) 高速のフィードバック・ダンパー¹³⁾
 - (b) 非線形磁場による Landau 減衰

である。J-PARC では、①(a), (b), ②(a)(RCS のみ), (b), (c)を採用するべく実施あるいは検討中である。それでも発生した場合は、③を施す必要がある。

電子雲の問題としては、不安定性以外に、装置に対する悪影響がある。本文でも触れたように、ビーム・モニター信号にチャージアップなどの現象でノイズとして混入する。また、真空悪化の引金にもなりうる。これらについての確認も急務である。

最後に、多くの議論、サポートをしてくださった KEK および J-PARC 加速器、海外の研究者の方々に感謝します。

参考文献

- 1) Y. Yamazaki, "The JAERI/KEK Joint Project for High-Intensity Proton Accelerators", Proc. 2002 European Part. Acceler. Conf., TUZGB003, p. 163 (2002).

- 2) R. J. Macek et al., Proc. of ELOUD '02 work shop, CERN Yellow Report, CERN-2002-001, p. 259.
- 3) K. Ohmi, T. Toyama and C. Ohmori, "Electron Cloud Instability in High Intensity Proton Rings", Phys. Rev. ST-Accel. Beams Vol. 5, 114402 (2002), Vol. 6, 029901 (2003).
- 4) 大見和史, "加速器におけるプラズマ型不安定性—電子雲とイオン—", 日本加速器学会誌 3 巻 1 号 31-43 頁, 2006年.
- 5) K. Ohmi et al., "Electron cloud effect in J-PARC", presented in the 39th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, "High Intensity High Brightness Hadron Beams, HB2006".
- 6) K. Ohmi, T. Toyama and G. Rumolo, "Electron Cloud Instability for Coasting Proton Beam in Circular Accelerators", Proc. ELOUD '04, CERN Yellow Report, CERN-2005-001, 351.
- 7) V. Danilov and S. Cousineau, "Accumulation of High Intensity Beam and First Observations of Instabilities in the SNS Accumulator Ring", presented in the 39th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, "High Intensity High Brightness Hadron Beams, HB2006".
- 8) T. Toyama et al., "Electron cloud effects in the J-PARC Rings and Related Topics", Proc. ELOUD'04, CERN Yellow Report, CERN-2005-001, 77.
- 9) M. Kinoshita et al., "Alumina Ceramics Vacuum Duct for the 3 GeV-RCS of the J-PARC", Proc. PAC2005, 2604.
- 10) S. Y. Zhang et al., "RHIC Pressure Rise and Electron Cloud", Proc. PAC2003, 54.
- 11) G. Arduini et al., "Electron Cloud: Observations with LHC-type Beams in the SPS", Proc. EPAC2000, 939. R. Cappi et al., "Electron Cloud Effects in the CERN PS", Proc. PAC2001, 682.
- 12) 電子雲に関する workshop:
<http://www.aps.anl.gov/News/Conferences/2000/icfa/two-stream.html>,
<http://conference.kek.jp/two-stream/>,
<http://wwwslap.cern.ch/collective/ecloud02/>,
<http://icfa-ecloud04.web.cern.ch/icfa-ecloud04/>.
- 13) R. J. Macek et al., "Test of a prototype active damping system for the e-p instability at the LANL PSR", presented in the 39th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop, "High Intensity High Brightness Hadron Beams, HB2006".