

ELECTRON CLOUD BUILD-UP AND BEAM INSTABILITIES IN THE KEK-PS AND J-PARC

Takeshi Toyama, Kazuhito Ohmi, Susumu Igarashi, Takako Miura, Masahito Tomizawa,
KEK, Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki 305-0801, JAPAN

Abstract

High intensity positive particle accelerators and storage rings suffer from electron cloud. It causes fast transverse beam instabilities, false signals on beam monitors and pressure rise due to electron stimulated gas desorption and ion desorption. The on-going project, J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) may have a similar situation. The electron cloud build-up was observed at the KEK-PS. Experimental results are reported. Beam stabilities concerning with the electron cloud is predicted for the J-PARC 3 GeV rapid cycling synchrotron and 50 GeV Synchrotron.

KEK-PSおよび J-PARC における電子雲の発生と電子雲不安定性

1. はじめに

現在建設中のJ-PARCは、3 GeVシンクロトロン (RCS) と50 GeVシンクロトロン (MR) を用いて、LINACからのビームを加速し、それぞれのトップエネルギーで、1 MW, 750 MW の大強度陽子ビームを得る計画である[1]。リング部分は2007年からコミッションが開始される。バンチあたり陽子数 (N_p) $\sim 4 \times 10^{13}$ 、バンチ長 ~ 16 -110 mであり、電子雲不安定性にビーム電流を制限されている Los AlamosのPSR[2]と類似のパラメータとなっている。その他に、CERN, BNL, KEK, SLACの陽子リング、陽電子リングでも、電子雲不安定性、電子雲によるビームモニターの信号汚染、および真空悪化が報告されている[3]。そのため、J-PARCも電子雲による問題が懸念されている。一方で、ISISの陽子シンクロトロンのように、やはり $N_p \sim 1.25 \times 10^{13}$ で2バンチの陽子を加速しながら、電子雲が観測されていない例もある[3]。J-PARCの電子雲に関係する基本的なパラメータを表1にまとめる。

表1 J-PARCの陽子シンクロトロンのパラメータ

	RCS		MR	
	injection	extraction	injection	extraction
Circumference (m)	348.3	348.3	1567.5	1567.5
γ	1.43	4.20	4.20	54.29
N_p $\times 10^{13}$	4.15	4.15	4.15	4.15
number of bunches	2	2	8	8
harmonic number	2	2	9	9
beam size (m)	0.019	0.012	0.011	0.0035
bunch length (m)	110	82	82	16
$\Delta p/p$ (%)	0.6	0.7	0.7	0.25
slippage factor	-0.48	-0.047	-0.058	-0.0013
v_s	0.0058	0.0005	0.0026	0.0001
beam pipe radius (cm)	12.5	12.5	6.5	6.5

ここでは、J-PARCでの電子雲によるビームの安定性について見積もり、これらの基とした計算の信頼性を確認する一つの方法としてKEK-PSで行っている実験の報告をする。

2. J-PARCにおける電子雲不安定性

放射光がほとんど出ない陽子リングの場合では (LHCは放射光が支配的)、電子雲は、ビームロス (陽子の真空容器壁への衝突)、あるいはビームと残留ガスとの衝突によって発生する電子が引金となって、成長すると考えられている。

バンチビームとコースティングビームで発生機構がやや異なるので、それぞれについて考察する。

2.1 バンチビームによる電子雲[4]

ビームロス、あるいはビームと残留ガスとの衝突によって発生する電子は、当初は数-数10 eVであるが、ビームの電場によって最大数100 eVまで加速され、真空容器壁に衝突し、2次電子を叩き出す。これら2次電子がさらに後続のビームに加速されて同様のことが起こる。真空容器表面の2次電子放出係数は通常1より大きいので、ネズミ算的な電子の増殖が起こり、空間電荷で飽和するまで繰り返される。

今回の計算は、計算時間の短縮のために、(1)電子雲の成長のシミュレーション計算、(2)飽和レベルに達した電子雲によるビーム不安定性の計算、の2段階で行っている。

まず、電子雲の成長の計算における初期電子の量は以下のように仮定した。ビームロスによる場合は、Los AlamosのPSRの経験から、リング1ターン (90 m) 当たりのビームロス割合 4×10^{-6} 、および陽子1つのロス当たり電子発生量100 e/pとして導きだされた、陽子1個が1 m通過するときのロスによる電子発生率 4.4×10^{-6} e/(m·p)を適用した。残留ガスの場合は、COとH₂が主成分として 2×10^{-7} Paでの電子発生率 7.7×10^{-9} e/(m·p)を使った。

2次電子放出係数は、

$$\delta_2(E) = \delta_{2,\max} \frac{E}{E_{\max}} \frac{1.44}{0.44 + (E/E_{\max})^{1.44}}$$

に従った。ここで $E_{\max}=200\text{eV}$ 、 $\delta_{2,\max}=2.1$ 。計算結果を図1に示す。ビームロスによる電子の寄与が支配的であった。破線はバンチ形状である。zを縦方向座標、 l_b をバンチ長として $\sin(\pi z/l_b)$ を仮定した。ビーム通過の後半に電子増倍率が増えている(trailing-edge multipacting)。数バンチの通過後に定常状態に達することがわかる。

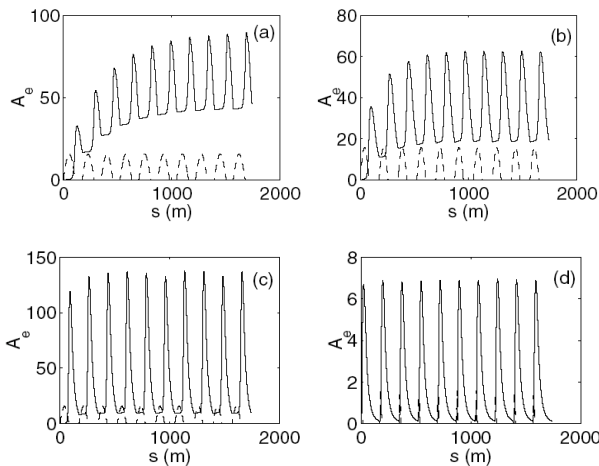


図1 J-PARCでの電子雲の成長。(a) (b) RCSの入射、取出し、(c) (d) MRの入射、取出しエネルギーでの計算値。横軸はリングに沿った距離、縦軸は電子増倍率(電子雲密度/1次電子密度)。

不安定性の判定は、コースティングビーム近似で行った。 $\omega_c \sigma_z / c \sim 100 \gg 1$ が成り立っているので、この近似は成り立つ。MRでは、電子雲密度の最大値で不安定性の閾値を超える。RCSでは、取出し時に閾値に近い値を取る。

表2 J-PARCリングの電子雲不安定性

	RCS inj.	RCS ext.	MR inj.	MR ext.
$A_c(\text{bottom})$	42	18	9.4	0.13
$A_c(\text{peak})$	88	62	136	6.9
$\eta(\text{bottom})$	0.020	0.0067	0.0035	0.00001
$\eta(\text{peak})$	0.042	0.023	0.05	0.0005
$\eta(\text{threshold})$	0.28	0.03	0.03	0.00043

η : neutralization factor

計算結果の信頼性は、入力パラメータの信頼性による。不確定な要素は、ビームロス量、1次および2次電子放出効率、バンチ形状である。

ビームロス量については、荷電変換フォイル、コレクターで発生する電子を、ソレノイド磁場、あるいはクリアリング電極で収集し、制御不能なビームロスをデザイン値以下に抑えれば、上記仮定の範囲内に収まる見込みである[5]。

高エネルギー陽子の衝突による1次電子放出係数

のデータはないので100と仮定した。2次電子放出効率については、各種材質についての測定がなされている。表面処理を施さないと通常 $\delta_{2,\max}$ は2を超える。RCSで採用されるセラミックチェンバーは内面をTiNコーティングするので、2次電子放出効率は十分小さくなると期待される。また、 $\delta(0)=0.5-0.8$ という測定結果が報告されているが、この効果はfactor程度であった[6]。

バンチ形状による影響は、 η (neutralization factor) に2-3倍程度のバラツキの生じることが報告されている[3]。

2.2 コースティングビームによる電子雲[7]

MRのフラットトップでは、コースティングビームによる遅い取出しが予定されている。残留ガスとの衝突で発生する1次電子は、上述の通り少ない。しかし、DCビームなのでビームポテンシャルに電子が溜まり続けてしまうと、1 ms程度で不安定性の閾値に達してしまうことになる。

実際には、ビームの横方向の振動によって電子の振幅は増大し、ビームの束縛から離脱し、壁に当たり、吸収あるいは2次電子放出が予想される。シミュレーションによると、 $2 \times 10^{-7} \text{ Pa}$ (電子発生率 $7.7 \times 10^{-9}/(\text{m.p})$) の真空では、不安定性の問題はない。

さらに、電子発生率が増え、 $10^{-6}-10^{-5}/(\text{m.p})$ になると、ビームの雑音的な横方向振動が引金になり、上記より多くの電子が壁に衝突し、multipacting が起きようになり、ビームサイズの増大が起き始める。

電子発生が、ロスした陽子と壁との衝突による場合も、ビームサイズの増大が起き始める電子発生率の値は同様に $10^{-6}-10^{-5}/(\text{m.p})$ であった。

真空の圧力は $10^{-7}-10^{-6} \text{ Pa}$ を目標にしているので[1]、multipacting が起こるレベルではないが、ビームロスが、電子発生率 $10^{-6}-10^{-5}/(\text{m.p})$ に対応する値より大きいと、不安定性が発生する可能性がある。

3. KEK-PSにおける電子雲の観測

目的は、(1) 電子雲成長のシミュレーションと比較を行う、(2) TiNコーティングの効果を実測することである。

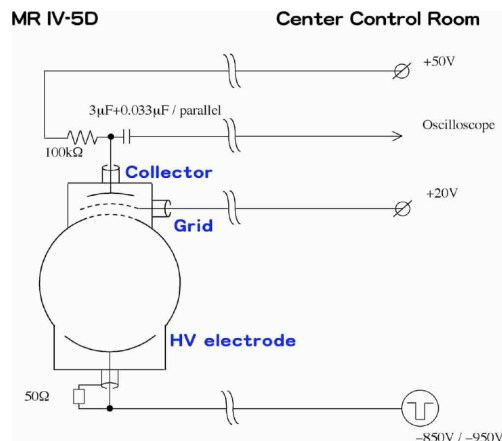


図2 Electron sweeping detector

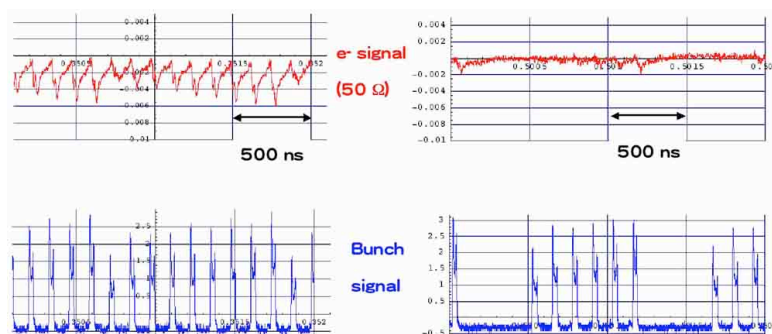


図3 Electron sweeping detector による電子雲の測定。

Sweeping電圧は加えていない。9バンチ（左図）、6バンチの場合。

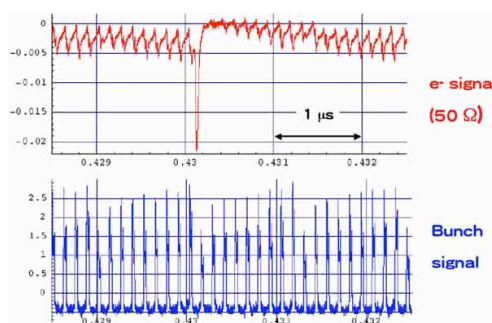


図4 Electron sweeping detectorによる電子雲の測定。

パルス高電圧を印加し、空間に漂っている電子を強制的に収集した。電子が掃引されて空間電子密度がほぼゼロリセットされたため、直後の電子信号が減少している。

現在使用している装置（図2）は、Los AlamosのPSRのグループで開発された“electron sweeping detector”である[2]。KEK-PS MRで電子雲不安定性は、現在観測されていない。

3.1 バンチビーム

バンチビームでは、トランジション付近およびフラットトップ付近で、電子雲の信号が観測される。図3、4にはトランジション付近での測定結果を示した。sweeping電圧を印加しないと壁に衝突する電子が観測される。バンチ数を変えると、電子信号は5バンチ以下では観測されなかった。これは、連続するバンチによって電子の蓄積が増長される電子雲の性質に一致している。また、sweeping pulse電圧 ~ -850 Vを印加すると、そのタイミングで空間中の電子が押し出されて大きな信号として観測された。

3.2 コースティングビーム

図5に、フラットトップでRF電圧オフからの各時刻にsweepされた電子信号を示した。ビーム強度、ビームロスに依存し、また飽和することがわかった。ビーム強度 3.6×10^{12} の時、電子生成率 $\sim 1 \times 10^{10}$ e/m's、時定数 ~ 0.3 sであった。この場所で $\eta \sim 30\%$ となる。

Swept electrons @ IV-5D
Black: NB- 3.6×10^{12} ppp, no bump
Blue: NB- 3.0×10^{12} ppp, no bump
Green: NB- 1.9×10^{12} ppp, no bump
Red: NB- 3.6×10^{12} ppp, vert. bump \rightarrow beam loss

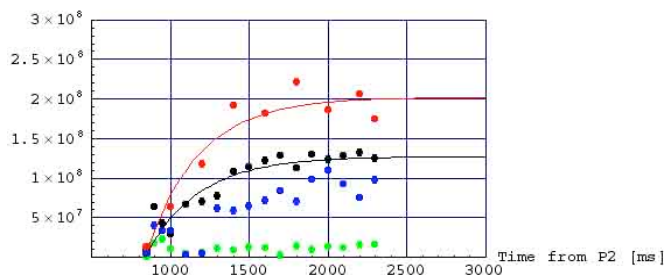


図5 Electron sweeping detector による電子雲の測定。

12 GeV フラットトップ、コースティングビームでの測定。電子雲の蓄積が示された。

4. 議論

先に仮定したビームロス率 $4 \times 10^{-6}/\text{turn}$ でロスが持続的に発生すると、一加速周期のビーム周回数 $10^4 - 10^6$ を考慮して、膨大なロス量になり非現実的なことがわかる。しかし、不安定性の成長するのに必要な ~ 1 ms以下のロスとすると、起きうる程度である。ビームロスの管理が重要であると考えられる。実験の解析、TiNサンプル測定は今後の課題である。

下崎義人氏、鳥飼幸太氏には実験でお手伝いいただいた。林直樹氏、野田文章氏、加藤茂樹氏、佐藤康太郎氏、菖蒲田義博氏、町田慎二氏、生田勝宣氏、横谷馨氏、入江吉郎氏、大森千広氏、高山健氏には有用な議論、示唆をいただいた。

参考文献

- [1] “Accelerator Technical design report for J-PARC” edited by Y. Yamazaki, KEK-report 2002-13.
- [2] R. Macek, 31st ICFE Advanced Beam Dynamics Workshop on Electron-Cloud Effects “ECLLOUD’04” Napa (California), April 19-23, 2004.
- [3] Presentations at “ECLLOUD’04”.
- [4] K. Ohmi, et al., PRST 5 114402 (2002).
- [5] T. Toyama, Presentation at “ECLLOUD’04”.
- [6] K. Ohmi, http://www-acpps.kek.jp/J-PARC/beam_instability/epi_ohmi_2002Jun12.pdf.
- [7] K. Ohmi, Presentation at “ECLLOUD’04”.