

OBSERVATION OF ELECTRON CLOUD IN J-PARC MAIN RING

Masahiko Uota[#], Takeshi Toyama

KEK

Oho 1-1, Tsukuba, Ibaraki, Japan

Abstract

The electron-cloud was observed for the first time by the detector in J-PARC Main Ring Synchrotron at the high intensity beam of about 1.3×10^{13} protons per bunch. The electrons are rarely formed in a specific bunch of 8 bunches between about 170 milliseconds to 350 ms from the acceleration period, but aren't piled up by the multi-bunches effect. The creation sources of electron-cloud are discussed.

J-PARC主リングシンクロトロンにおける電子雲観測

1. はじめに

大強度陽子加速器施設 J-PARC の主リングシンクロトロン (MR) では、東日本大震災の被災からの復旧後、Rapid Cycle Synchrotron からエネルギー 3 GeV、最大強度 1.3×10^{13} ppb の陽子ビームを 8 バunch 入射し 1.4 – 1.9 s で 30 GeV に加速、速い取り出しモード (FX) でニュートリノビームラインへ、遅い取り出しモード (SX) でハドロンビームラインへ供給している。現在ユーザへの供給強度は最大で FX で約 200 kW、SX で約 6 kW である。

MR のビーム強度が上昇する度に運転周期に同期して真空ダクト内壁より気体放出する現象について我々は 2010 年に報告を行い^[1]、同じ強度で運転が継続されると放出量が徐々に減るコンディショニング効果を観測した。また、電源回路に未接続、あるいは電源を切ったイオンポンプを終端とする排気用枝管から、大強度ビーム運転時に指数関数的に増大する気体放出現象が起こることを 2011 年に報告し^[2]、排気用枝管内に設置した電極へビームダクトの排気用スリットまたは小孔越しに、真空圧力に比例する量の電子がビームライン側ダクトから飛来していると思われる現象を観測したことを述べている。

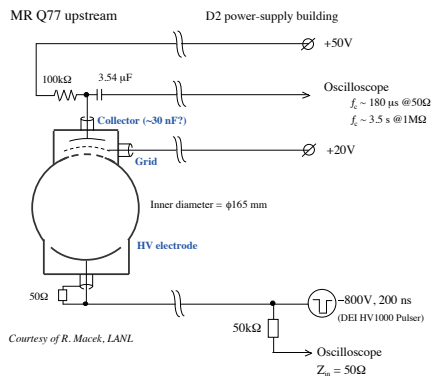


図 1. 電子雲観測装置の概要。

[#]masahiko.uota@kek.jp

大強度陽子加速器では、ビームバunch電場により捕捉された電子集団 (電子雲) がビーム不安定性をもたらす要因となり得ると言われている^[3]。そこで、さらに強度が上昇し 160 – 200 kW の連続運転を行えるようになった 2012 年春に、ビームラインに設置した電子雲観測装置を用いて電子雲の観測を行った結果を報告する。

2. 実験装置の概要

電子雲観測装置の構造は文献^[4]に倣い、図 1 のように円形ビームダクト (内径 165 mm) の真空壁の一部にメッシュ (58%) を張ったスリットを設け、その外側に電位をかけた加速用グリッド、さらにその外側にグリッドより正の電位を印加したコレクタ電極を配した。スリットの実効開口角は 12.4 度、実効開口面積は約 10.8 cm² である。コレクタ電極に収集された電荷は C を介して 10 M サンプルのオシロスコープで観測される。またスリットの反対側にはビームダクト内に発生した電子をパルス電場で弾き飛ばし掃除するスイーパー電極が設けてあるが、現時点では明確な効果が見られなかった。

装置の位置関係を図 2 に示す。装置は 2011 年秋に、MR の 3 直線部のうち遅い取り出し用出射機器が並ぶ直線

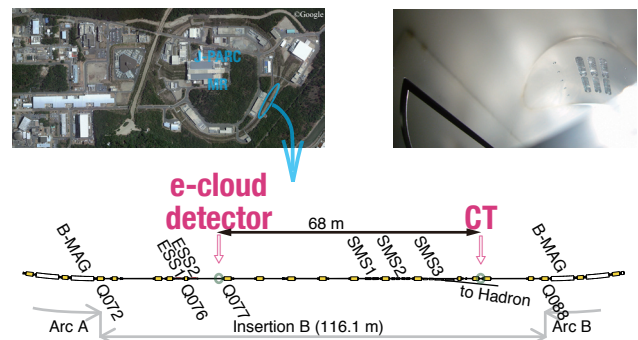


図 2. 電子雲観測装置と CT の場所 (ビーム進行方向は→)。右上の写真は内側から見たスリット及びスイーパー電極。

部で、2 台の静電セパタム電磁石 (ESS) のうち下流側と同じドリフトスペース #077 の下流側の四極 (defocus-Q) 電磁石に近い側に設置した。この場所は、Q 毎に設置された比例計数管型ロスモニタによると、ESS のアパーチャが前後のビームダクトと比べて比較的狭い等の理由により、ESS として励磁していない FX 運転時でもビームロスが入射時及び加速開始時に発生していることが知られている場所である。バンチ観測用の電流モニタ (CT) は電子雲モニタから約 68 m 下流にある。地上の測定系までのケーブル経路の遅延等により、バンチ信号は電子雲モニタから約 0.42 μs 遅れている。測定装置への配線は 2012 年 4 月初頭にずれこんだので観測はそれ以降となった。

3. 測定結果

2012 年 3 月から 6 月末までの MR のビーム強度 (パルス当たり粒子数、及び近傍の真空圧力の変遷を図 3 左) に示す。4 月以降の周期 2.56 s (加速時間 1.4 s) では 100 Tppp は約 190 kW に相当する。6/8 以降は SX 運転のため粒子数が少ない。図 3 右) は 100 Tppp で数日間安定した連続運転が実現できた 4/21 からの 15 日間の拡大である。

まず電子が 1 周期の中のどのタイミングで発生しているかを知る為、オシロのインピーダンス (Z) を 1 M Ω の非整合とし多重反射を積み重ねる事で時間分解能の低下を補い

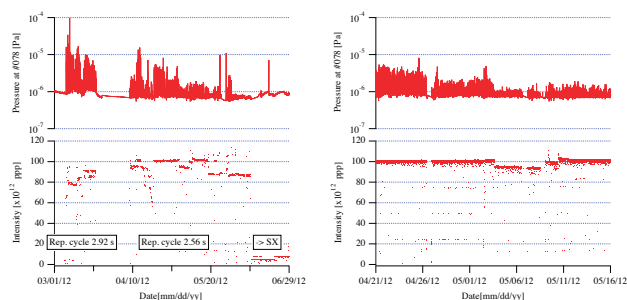


図 3. 左) 2012 年 3 月から 6 月まで、右) うち 4/21-5/16 のビーム強度 (ppp) 及び装置近傍の真空の圧力。

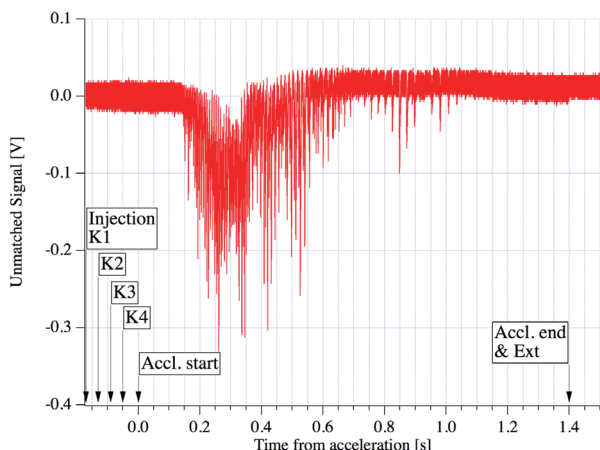


図 4. 非整合多重反射での観測例 (4/11, 102 Tppp).

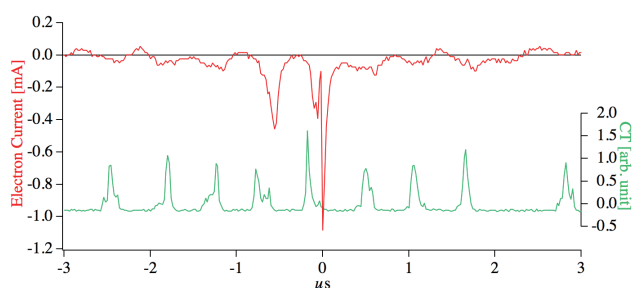
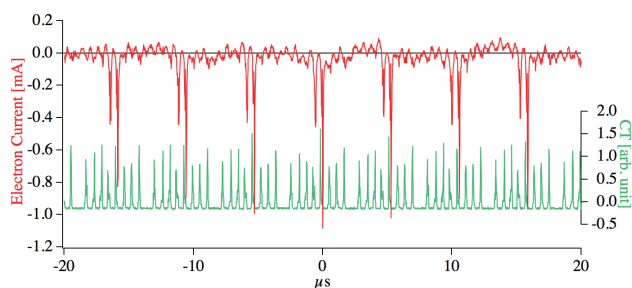
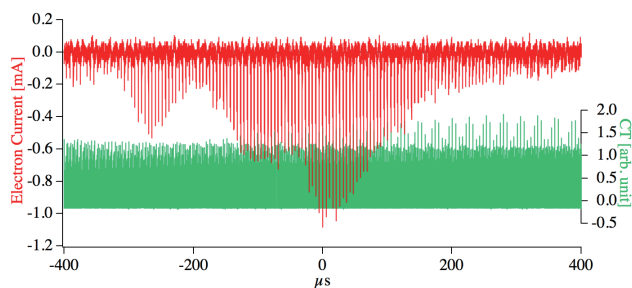
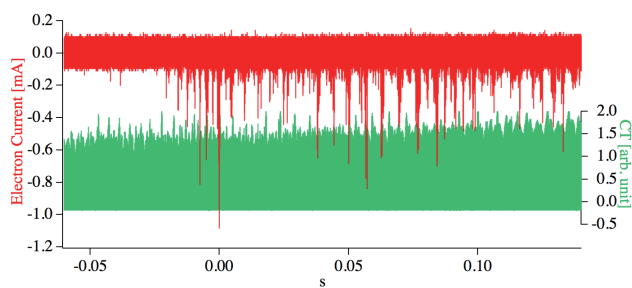


図 5. 電子電流測定例 (4/21, 102 Tppp)。最上段がデータ全幅 200 ms、以下時間幅を 0 \pm 400, 0 \pm 20, 0 \pm 3 μs へ拡大。緑の実線は CT で測定されたバンチ電流に比例する量。測定トリガである時間 0 s は RF revolution clock から見積ると加速開始後約 176 ms に相当。

入射～加速～出射時間全体を観測した例 (4/11, 強度 102 Tppp) を図 4 に示す。負、すなわち電子の発生は入射時や加速直後では無く、加速開始後 150 – 400 ms 付近で顕著であり、その後頻度を下げながら 0.7 s 辺りまで発生しているが、さらに 0.9 s 付近でも散発的に発生していることがわかった。shot 毎の発生頻度は、この観測日の機器条件では 20shot に 1 回程度であった。

図 5 に通常の整合 Z=50 Ω での測定例 (4/21, 強度 102 Tppp) を示す。この時の運転条件では、発生頻度は高く数発に 1 回大きな信号が観測された。同様の多数の観測により、

- 電子雲を生じさせているバンチは 8 バンチ中の一部のみで特に第 1 バンチからはあまり発生しない。
- 発生する時のバンチ形状は頭か尾に集中しピーク電流が高くなっていることが多い。
- 数十～百ターン程度継続して発生し、発生が 7 ms 程度の周期で数回繰り返すことが多い。
- 電子電流は 1 mA 程度で、電極面積から、電子が等方的に飛び散るとすると発生した電子の電流密度は 0.1 mA/cm² 程度である。
- 同じ強度で運転を継続すると、電子雲の生成頻度・電流値が下がり、遂には見えなくなる。

などがわかってきた。

さらに、この測定では RF 加速空洞の revolution clock を同時測定していたので、電子電流とバンチ形状を 1 ターン毎に切り出して横軸を時間、縦軸をターン数とするサーフ

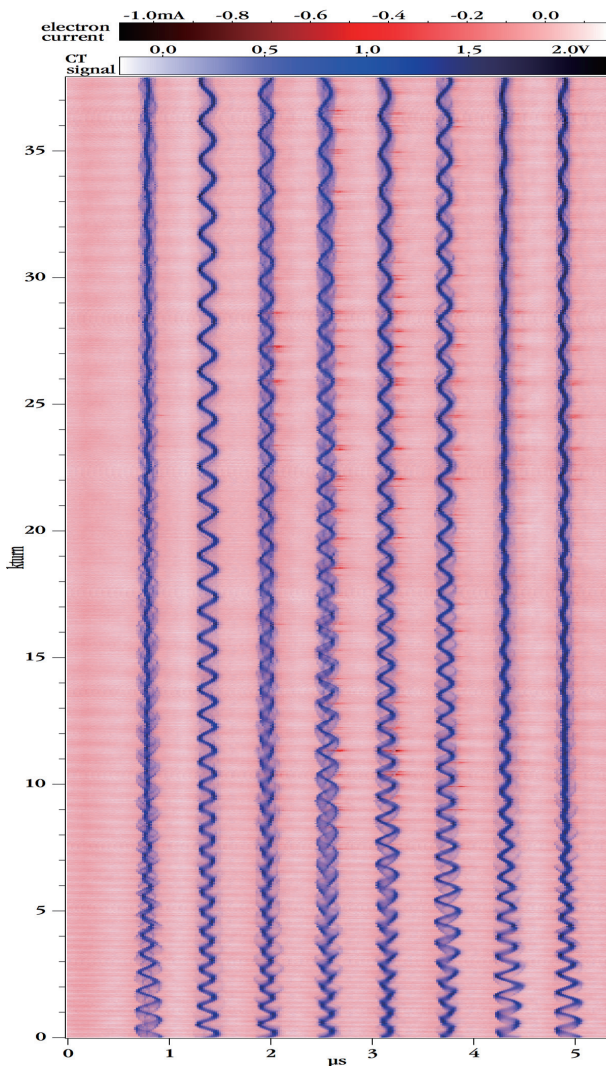


図 6. 図 5 のデータから 1 ターン毎に切り出した時間 vs turn 数のサーフェスプロット。赤系が電子雲信号、青系がバンチ信号。図 5 同様に左下は加速開始 +116 ms 後、10 kturn は約 53 ms に相当し右上は同 +316 ms。

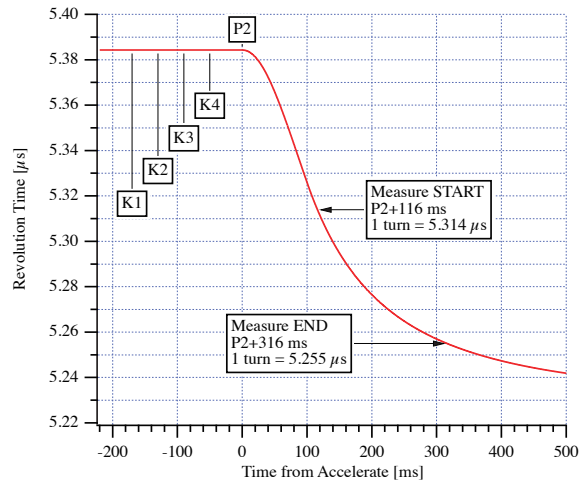


図 7. 図 5.6 測定時の RF revolution time と実時間との関係。

ェスプロットを行った (図 6)。横軸のゼロ点を空バケツ用 clock の立ち上がりで揃えたので、最初のターンから比べて図の最終ターンは 60 ns 程度速くなっている (図 7)。この測定が行われた時期は、RF 加速空洞のフィードフォワード (FF) 制御実施 [5] よりも前であるため、青い濃淡で示された各バンチは個別に RF キャプチャー位相範囲で時間軸上を前後に振動している。中には 2 山が逆位相で振動している場合すらある。図からは主にバンチが振動している場合に、赤い濃淡で示された電子雲がバンチの通過後に飛び散っているように見えるが、例えば 7 番目のバンチの 25 kturn 付近は振動が少ないにもかかわらず電子は発生している。なお FF 制御後は 210 kW トライアルでも明確な電子雲信号は検出されなかった。

一方、電子雲信号が出る shot と出ない shot で、真空の圧力に差がある事がわかった。図 8 は非整合での 50 s (19 shots) 間の測定における、電子雲信号と近傍及びリング各地の圧力、さらに各地のロスモニタの電子雲頻発時間のみを積分した信号を並べた物である。電子雲生成時に圧力

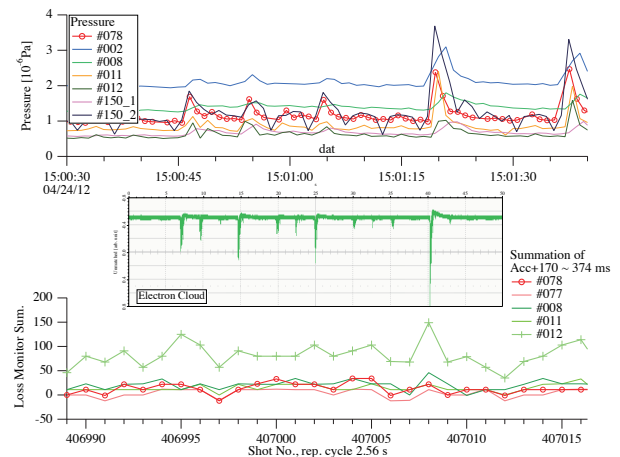


図 8. 装置近傍などのビームダクト圧力、電子雲信号 (非整合測定)、及びビームロス信号の shot 毎の変動。圧力は約 1 s 間隔で取込。

が近傍のみならず各地で突発的に上昇しており、量も比例傾向である。ビームロスモニタには明確な相関は見えない。

4. 考察

図5で示したように電子はバンチ間で成長する事無く急速に消失しており、これは初期のシミュレーション^[6]で示されていたものに近い。

電子雲生成は、J-PARC MRのように数百 ns の長いバンチの場合単一バンチ内での現象である。ロス粒子が真空ダクト内壁へ衝突、あるいは残留ガスとの衝突によって電子が放出され、バンチ電場で加速され反対側の壁に衝突し二次電子を生成しバンチ電場に捉えられ成長、バンチの通過後に周囲に雲散霧消していると言われている。特にMRではビームダクトの殆どは積極的なコーティング処理を行っていないステンレスであり、二次電子放出係数が高く電子はよく増倍される。一方現状のMRでは、図4で示したように電子雲の発生時期は加速開始+170 – 350 ms 付近であるので、入射時及び加速開始時のロスでは時間が合わず、これらは生成の火種では無い。また図8に示したように条件の揃ったバンチは全周の各所で電子雲を生成していると思われることから、アパーチャが狭いなどの理由による特定のロスポイントでのみ電子が発生していると言う事でもない。図6に示したようにバンチの縦方向振動が顕著の場合よく生成しているようである事、及びRF加速空洞のFF制御後には全く発生しなくなった事から、加速途中の縦方向の振動によるロス粒子が種となっている可能性が高いであろう。ビームロスモニタで明確に検出されなかったのは、感度や測定帯域のためと思われる。

一方、電子雲生成時に真空の圧力がヒゲ状に突発的に上昇し、図3に示したように同じ強度での連続運転で時間経過と共にヒゲが取まっているのは、生成した電子がバンチ通過後にダクト内壁を叩くことで吸着分子が脱離し、清浄化していることの表れと思われるが、運転継続によりビーム条件が同じでも電子雲が生成されなくなるという事実からは、逆に残留ガスが電子雲生成の種となっている可能性もまだ残されていると言える。

5. おわりに

J-PARC MR でバンチ当たり 1.3×10^{13} 個の大強度ビームにより、稀に単発的な、早く消える電子雲が発生している事を観測できた。電子雲の形成はビーム強度、その強度になってからの時間(真空壁の表面状態)、隣接ビームバンチの縦方向の電荷分布に依存しており、真空表面が清浄化してもバンチの縦方向振動が抑制されても顕著な発生は収まる。電子雲生成時には真空の圧力が全周で peaky に上昇しており、条件の揃ったバンチ集団は周回しながら

全周で電子雲を発生させていると思われる。電子雲形成はビームロスモニタで顕著な影響は見られず、現時点ではビームの運動に影響を与える程では無いと思われる。

参考文献

- [1] M. Uota et al., “PRESSURE RISE and BEAM LOSS with HIGH INTENSITY BEAM in J-PARC MR”, Proceedings of the 7th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2010), p.721.
- [2] M. Uota et al., “REMARKABLE PRESSURE RISE AT PUMPING PORT IN J-PARC MAIN RING”, Proceedings of the 8th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2011), p.1383.
- [3] T. Toyama et al., “STUDY FOR AN EP INSTABILITY IN THE JOINT PROJECT OF KEK AND JAERI”, Proceedings of E-CLOUD’02 Workshop, CERN-2002-001 (2002), p.155.
- [4] R. J. Macek et al., “ELECTRON PROTON TWO-STREAM INSTABILITY AT THE PSR”, Proceedings of the 2001 Particle Accelerator Conference (2001), p.688.
- [5] F. Tamura et al., “Commissioning of multiharmonic feedforward system for J-PARC MR”, The 9th Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan (2012), WELR07.
- [6] T. Toyama et al., “ELECTRON CLOUD BUILD-UP AND BEAM INSTABILITIES IN THE KEK-PS AND J-PARC”, Proceedings of the 1st Annual Meeting of Particle Accelerator Society of Japan and the 29th Linear Accelerator Meeting in Japan (2004), p.625.