

会議報告

国際ワークショップ E-CLOUD'12 報告

福間 均*

Report on E-CLOUD'12

Hitoshi FUKUMA *

第5回電子雲に関する国際ワークショップ (E-CLOUD'12) は、2012年6月5日から6月8日までイタリアのエルバ島で開催された。ワークショップ参加者は11ヶ国から計62人であった。計50編の発表は全て口頭発表だった。この会議は、LHCの電子雲対策プログラムで指導的役割を果たしながら早世したイタリア出身の加速器研究者 F. Ruggiero 氏を記念して開かれた。会議の冒頭には M. Furman による特別講演 Electron Cloud Effects in Accelerators があり、最後には R. Cimino と F. Zimmermann によるまとめがあった。プログラムのセッション名は以下の通りだった。(口頭発表のスライドは <http://www.lnf.infn.it/conference/eccloud12/> で見ることができる)。

プログラムセッション名

1. ECE on Beam Dynamics: observations and prediction
2. ECE Effects on Vacuum and Heat Load

3. Surface Properties, Coating and Experimental Studies
4. Multipactoring and Related Effects
5. Simulations and Diagnostics
6. Mitigation

以下に、筆者の印象に残った発表について紹介する。括弧内の人名は関連する項目の発表者名である。

1. LHC での電子雲効果の観測

2010年のビームコミッショニング時にバンチ間隔 150 ns で運転したとき二つのビームが共通に通過するチェンバで圧力上昇が観測された。バンチ間隔 75 ns と 50 ns での運転では、NEG コーティングされていない直線部での圧力上昇、アーク部での冷たいビームスクリーンでの熱負荷の上昇、バンチ列に沿ったエミッタンス増加、電子雲によるビームのエネルギー損失で起きる RF 加速位相の変化等の、強い電子雲の影響が



E-CLOUD'12 の参加者 (Vinicio Tullio 氏の撮影による写真)

* 高エネルギー加速器研究機構 High Energy Accelerator Research Organization, KEK
(E-mail: hitoshi.fukuma@kek.jp)

観測された。2011年の4月に一週間ほど50 ns ビームによるスクラビング（チェンバ表面を電子で叩くことにより二次電子放出率（SEY）を下げること）が行われ、圧力の1桁の減少、熱負荷の測定分解能以下までの減少、RF位相変化の1桁の減少、ビーム不安定性やエミッタンス増加の消滅、で示されるような顕著な効果があった。更に、短期間の25 ns 運転のあとSEYが50 ns ビームで電子雲成長を起こす閾値以下になった。しかし、設計値の25 ns ビームではまだ電子雲効果が観測されている。SEYを25 ns ビームで電子雲成長を起こす閾値以下にするには、25 ns ビームで2週間程度のビームスクラビングが必要と評価されている（G. Rumolo, V. Baglin, O. Dominguez）。

2. 表面とコーティング

CERN SPS ではLHC用に25 ns 間隔で 2.5×10^{11} protons per bunch のビームを供給しなければならない。この条件ではビーム不安定性や圧力上昇が起きるためSEYの最大値が1以下のアモルフォスカーボンを現場でコーティングすることが検討されており、コーティング方法の試験・開発が行われている。既存のチェンバを磁石内に置いたままでコーティングするDC Hollow Cathode Sputtering 法も試験されているがコーティングにむらができるため対策が検討されている（P. C. Pinto, J. M. Jimenez）。SPS チェンバのコーティング効果を実験室で測定するために、タングステンワイヤをチェンバ軸上に張って導波管構造を作りマイクロ波を通して人工的にマルチパッキングを起こす実験も行われている（F. Caspers）。コーティングしたチェンバではマルチパッキングで作られた電子による反射パワーは観測されなかった。また、低磁場でサイクロトロン共鳴による強いマルチパッキングが観測された。この条件では、多量の電子が壁を叩くため、表面状態の変化に対する測定の感度を高めることができる。

BNLではRHICのルミノシティ向上のために表面抵抗が低くかつSEYが小さいチェンバが求められており、現在使用中のステンレスチェンバに銅をコーティングし更にその上にアモルフォスカーボンをコーティングすることを検討している。ここでもトンネル内の現場でコーティングすることを目指している（A. Hershcovitch）。

KEKで建設中のSuperKEKBでも陽電子リングのほとんどのチェンバにTiNコーティングをすることになっており、コーティング施設やコーティング法の紹介があった（K. Shibata）。

電子雲の成長を計算するにはチェンバに当たる放射光の分布の情報が必要である。放射光はチェンバ表面で反射されて伝搬していくため放射光の吸収・反射を考慮した光の追跡が必要である。このための計算機コードSYNRAD3Dがコーネル大で開発されている（G. Dugan）。

電子の入射エネルギーがゼロになる極限でSEYが1に近づくという報告が2004年にあった。これに対して、1) ポテンシャル障壁からの反射の理論的計算では反射率が2～4%であること、2) 電子の入射エネルギーが低いときは電子ビームのコリメーション等測定に困難さがあること、3) 過去の実験では数eVの電子に対する反射係数は7%程度であることなど、これまでに得られている結果が忘れられているのではないかという指摘があった（I. Kaganovich）。

ANLのAPSでは超伝導アンデューレータが設置される予定であるが、低温チェンバへの電子雲による熱負荷の評価をしなければならない。電子リングでも、ビームポテンシャルよりも大きいエネルギーを持つ光電子は壁から離れビームで加速され壁に当たって二次電子を出す。電子リングでの電子雲の計算には量子効率の知識が重要と考えられるので、量子効率の光子入射角依存性、材料の表面粗さ依存性、材料の温度依存性のデータを測定しているという報告があった。小入射角、滑らかな表面では量子効率が大きい。また、室温と185 Kでは室温のほうが量子効率が大きい、その違いは0.025以下であった（L. Boon）。

3. 電子雲対策法

コーティング以外の電子雲対策として静電電極と横方向フィードバックが紹介された。

静電電極について、CERN SPSではKEKで開発された電極が成功裏にテストされたという報告があった（J. M. Jimenez）。ただし、現存する磁石内のチェンバに電極を設置する解が見つからないため実行可能性の検討は止まっている。

DAFNEでは銅の電極を全てのダイポールとウィグラー磁石に設置して通常運転で使用しているという報告があった。数百ボルトの電圧を印加することで、水平方向の結合パンチ不安定性の強さの減少、パンチ列内での水平方向チューンシフトの減少、垂直方向ビームサイズの減少が観測されている。結果、陽電子リングで1 Aのビーム蓄積が可能になった（M. Zobov）。

CERN SPSでは電子雲によって起きるパンチ内振動をGHzの広帯域横方向フィードバックで抑える研究が行われている。4～8 GS/sec（Giga-Samples/second）

の A/D と D/A, このサンプリング周波数に適した FIR (Finite Impulse Response) フィルタとピックアップおよびキッカーが必要であり開発が進められている. その一環として, SPS において, 現在設置されているピックアップを用いて 4 GS/sec のシステムでバンチ内振動を励起する実験が行われた. キッカーとしては, ストリップライン, ストリップラインとオーバーロード空洞の複合型, スロット型導波管が検討されている (J. Fox, W. Hofle).

4. 電子雲効果の観測法

新しい観測法として, CERN LHC において, バンチの平衡位相測定から電子雲とビームの相互作用によるビームのエネルギー損失を測定する方法の報告があった (J. F. E. Müller). ピックアップ信号から求めたバンチ位相と RF 位相の差からビームのエネルギー損失を求める. ビーム運転の時間とともに位相差のビーム強度依存性が減っていくこと (ビームによるスクラビング) が示された.

チェンバに導入した TE 波の位相が電子雲 (つまり電子プラズマ) によってずれることを測定し電子雲の密度を測定する TE 波透過実験についてもいくつかの報告があった. ビームパイプは, イオンポンプやゲートバルブなどのパイプ内の障害物のために, しばしば導波管の様ではなく空洞の様に振る舞う. 空洞内の共鳴モードを使って電子雲密度を測定する報告があった (J. Sikora). 測定に対する電場のパターンや磁場の影響が検討されていた. CERN SPS でも TE 波透過実験が行われており, コーティングされないチェンバで観測されたビームによる変調信号がコーティングされたチェンバでは観測されないことが示された (F. Caspers). Green 関数を使って電磁場計算を行い LHC ビームパイプ内での電子雲とマイクロ波の相互作用を計算する試みも始まっている (M. Mattes).

コーネル大の CesrTA では X 線モニタにコーデッドアパーチャイメージング法を適用してバンチ毎の横方向ビームサイズを測定する試験が行われている. この方法と普通に使われているピンホールカメラを使って, 電子雲によるヘッドテイル振動で起きるバンチ形状のゆがみを測定する試みの紹介があった. これまでのデー

タ解析でははっきりしたゆがみは得られていない (J. W. Flanagan).

5. 人工衛星での帯電と放電

宇宙空間のプラズマによって人工衛星が負 (例えば -3 kV) に帯電し, 測定の障害になったり, マルチパッキング放電によって太陽電池や制御系に故障が起きる. 人工衛星の故障の半分近くが静電放電による. 帯電は入ってくる電子と出て行く電子のバランスで起きるが, 出て行く電子のフラックスを見積もるのに二次電子放出率, 光電子効率, 入射光の反射率等の情報が必要になるため, 電子雲の研究と重なる部分がある. ヨーロッパでは VAL Space Consortium と European Space Agency のもとに European High Power RF Space Laboratory という施設がスペインのバレンシアに作られ, マルチパッキングの実験やシミュレーションが行われている (S. Lai, G. M. Benito).

最後に, R. Cimono と F. Zimmermann のまとめによれば, まだ多くのパズルや未回答の問題が残っている. パズルについては, 例えば, 1) KEKB や PETRA-III で観測されているヘッドテイル不安定性によるサイドバンド周波数は電子雲密度が増えるに従って増加するが, CesrTA で観測されているサイドバンド周波数はほとんど変化しないこと, 2) PEP-II でのビームサイズ増大がシミュレーションで予言されている垂直方向だけでなく水平方向でも観測されていること, 3) インコヒーレント効果の複雑性, 4) LHC の銅チェンバについて入射電子エネルギーがゼロでの二次電子放出率はいくらか, 5) ステンレスと銅で表面のコンディショニングは同じかどうか, などが挙げられていた. また未回答の問題としては, 1) SEY が加速器サイクルの秒程度の時間スケールで変化するか, 2) CO ガスを注入して表面のコンディショニングを増進できるか, が挙げられていた.

まとめの最後で, 次回の E-CLOUD ワークショップは 2015 年に日本で開いてはどうかという提案があった. この年は最初に電子雲が観測されてから 50 年になる記念の年だそうである.