

会議報告

E-CLOUD07（電子雲効果に関する国際ワークショップ）の報告

金澤 健一*

Report on E-CLOUD07 (International Workshop on Electron-cloud Effects)

Ken-ichi KANAZAWA*

E-CLOUD と銘打ったワークショップは E-CLOUD07 で 3 回目を迎え、これまで 2002 年にスイスの CERN で、2004 年にアメリカのカリフォルニア州 Napa で開かれている。主要なテーマは加速器の中に発生する電子雲が引き起こすビーム不安定性等の現象の観測とその理解・対策であるが、Two stream instability の観点から Fast ion instability 等の現象も視野に入れている。

今回は 2007 年 4 月 9 日から 12 日まで、韓国の Daegu (大邱) で開催された。主催は Kyungpook National University の The Center for High Energy Physics (CHEP) である。CHEP 所長の Dongchul Son の歓迎挨拶によると、韓国では現在高エネルギー物理学の研究を国が重要課題として推進しており、CHEP はその中心として活発に活動しているということである。ILC 計画への参加もその活動の一つであり、また E-CLOUD07 の後には国際会議 Lepton-Photon 2007 を主催する予定になっている。韓国の組織委員としてこのワークショップを取り仕切った Eun San Kim の話によると、KEKB の前身である TRISTAN 実験で AMY グループに所属して研究していた人の多くが、現在の韓国の高エネルギー物理学のコミュニティで活躍しているという。

参加者は公式発表では 38 名で、3 月に CERN で Large Hadron Collider (LHC) における電子雲の除去の問題を中心にしたワークショップ ECL2 が開かれたこともあってヨーロッパ勢は少なく、アメリカ、アジアの研究者がほとんどであった。KEK からは組織委員である大見和史、福岡均の他 5 名が参加した。E-CLOUD07 での報告はホームページ (<http://chep.knu.ac.kr/ecloud07/>) で見ることができる。またブローディングスもこれから準備されるので詳細はそ

ちらに譲ることにして、簡単に印象に残った点を述べる。

初日に、新たに運転を開始した Oak Ridge National Laboratory (ORNL) の中性子実験施設 Spallation Neutron Source (SNS) からの報告があった (S. Cousineau)。SNS では、線形加速器で 1 GeV まで加速した負水素イオンのパルストレインを陽子蓄積リング (周長 248 m) を使って大強度の陽子パルスに変換し、水銀標的に衝突させて大強度の中性子を発生させる。陽子蓄積リングには電子雲による不安定性を防ぐために以下のような対策がされている。

- 真空チェンバー (ステンレス鋼) には Secondary Electron Yield (SEY) を小さくするためにすべて TiN コーティングをする。
- ビームロスによる二次電子発生により電子雲が成長するのを防ぐために、コリメーター部にはソレノイドを巻く。
- 入射した H^- イオンを陽子に変換する Stripper foil では電子が発生するので、付近には Clearing electrode を取り付ける。

この陽子蓄積リングは 2006 年の春から運転を開始し、目標 1.4×10^{14} ppp に対し 8.4×10^{13} ppp (Bunched beam) まで順調に到達した。通常の運転パターン (RF を ON にして 700 ns のパンチを蓄積する) では、期待通りビームは安定で目標達成には問題がなさそうである。ビームの条件を変えると、例えば RF を切ってビームをため込むと、e-p instability とと思われる振動が見られ、シミュレーションによる解析が進行中である。ただし電子を測るモニターが無いので電子雲の存在は直接確かめられていない。SNS の順調なコミッショニングはこのワークショップにおける情報交換が貢献しているのではないかと思う。

* 高エネルギー加速器研究機構 加速器研究施設
(E-mail: ken-ichi.kanazawa@kek.jp)

Relativistic Heavy Ion Collider (RHIC) からも電子雲対策が功を奏しつつある報告があった(W. Fischer). RHIC は Brookhaven National Laboratory (BNL) にある 2 リングからなる超伝導加速器で現在世界で唯一の Ion collider である. 周長は 3.8 km, Au を 100 GeV/n まで加速でき, 偏極陽子同士の衝突実験も行える. RHIC ではかねがねビーム入射中に室温区間の急激な圧力上昇により真空系からアポートがでるために電流が制限されるという問題があった. 彼らはこれを Dynamic Pressure Rise といっている. この現象が起こるときに,

- 電子雲の存在を示唆するチューンシフトがある.
- チェンバー壁面にあたる電子電流をモニターするために取り付け Argonne National Laboratory (ANL) 製の Retarding Field Analyzer (RFA) の出力と圧力に相関がある.

等が観測されることから, Dynamic Pressure Rise は電子雲密度の急激な増加によるものと考えられる. この対策として室温区間のステンレス鋼製のチェンバーを予備試験を経て 2005 年から逐次 NEG コーティングチェンバーに交換しており, 圧力上昇は大幅に改善されている. 実は BNL は SNS のチェンバーの TiN コーティングを行っているが, RHIC の電子雲対策では予備試験の段階から NEG コーティングを採用している. RHIC の真空担当の H. Hseuh は, SNS チェンバーの TiN コーティングを担当した人であるが, 筆者が BNL を訪問した折りに彼から個人的に聞いた話では, TiN コーティングを試したかったが「上」の意向で NEG コーティングが採用されたという. 「上」の人は多分 NEG の排気能力にも期待したものと思われる.

Fermi National Accelerator Laboratory (FNAL) では, Tevatron の Main Injector (MI) において, 将来計画に向けて RFA と圧力計代わりの応答の早いイオンポンプを用いて電子雲の測定を開始したという報告があった (R. Zwaska). 将来計画では陽子強度を上げていく予定で, M. Furman の予想によると電子雲が急激に成長する敷居値を越えることになる. 現状では,

- トランジション付近で, 圧力, 電子雲の増加がある.
- ちょうどトランジションで電子電流が一時減る. 但し圧力ではわからない.
- 電子雲成長の敷居値はほぼ予想通り.

等の結果を得ている. ただし応答の早いイオンポンプ電源を用意しても, 圧力減少の時定数はポンプの排気

速度とそのポンプの受け持つダクト容積で決まるので注意が必要だろう.

陽電子リングにおける電子雲のビームに対する影響に関して, KEK からは 4 件の報告があった. KEKB の Low Energy Ring (LER) はいわば電子雲と共存状態で運転しているのだから, 電子雲の研究には意図せず格好のリングとなっている. 報告は多方面に渡り,

- Single bunch instability に関する報告 (J. Flanagan, 2 件).
- ソレノイドと Coupled bunch instability の関係 (飛山真理の代りに Flanagan が報告).
- 電子雲の作る wakefield を, 一つのバンチのチューンの変化, 幅, 等から考察しようという試み (家入孝夫).

が報告された. 興味深かったのは飛山が作成した報告で, LER の Coupled bunch instability には現在ドリフトスペースの電子雲が主に寄与している, Secondary Electron Yield (SEY) の最大値 δ_{\max} が 1 程度である, という推測を引きだしていることである. 他には Cornell Electron Storage Ring (CESR, Cornell 大学) や Beijing Electron Positron Collider (BEPC, 中国科学院高能物理研究所) におけるビームスタディの報告があった. CESR は CesrTA という International Linear Collider (ILC) の Damping Ring (DR) のテストファシリティを立ち上げようとしている.

今回は電子雲の直接観測でいくつかの新しい話題が提供された. その一つは Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE) の Proton Storage Ring (PSR) における電子の移動の話である (R. Macek). PSR では, かねてから電子雲による e-p instability が観測されている. これも ANL 設計の RFA で電子を観測した話であるが, Q マグネット中の電子を電極でスイープすると隣接するドリフトスペースの電子雲電流が減ることを見いだした. 陽子の長いバンチの電場と四重極電磁石の磁場によるローレンツ力で電子が Q 電磁石の外に流れ出している様子を示す詳細なシミュレーションも発表された.

もう一つは電子密度測定の直接的な方法が提示されたことである. イオンビームに関して報告を行ったのは, University of California, Lawrence Livermore National Laboratory (LLNL), Lawrence Berkeley National Laboratory (LBNL) が共同で進めているリニアコライダーに似た加速器装置でイオンを加速し慣性核融合を行わせようとする計画に関連する報告である. (彼らはこの共同体を The Heavy-Ion Fusion Science Virtual National Laboratory と称している.) 予算を

抑えるためにイオン輸送用のダクトの径を大きくできないので、ビームによってダクト壁から多数の電子が発生することが予想され、電子雲の成長が懸念されている。この状況を調べるためにLBNLのHigh Current Experiment (HCX) という重イオン加速器を使って電子雲の測定を行った (M. K. Covo)。電子にもイオンにも使える3グリッドタイプRFAを使って、ビーム (6×10^{12} K⁺/pulse) が通過した時に生じるイオンの最高エネルギーを測り、ビームのneutralizationを知ることにより電子密度を評価する。この実験では装置の圧力が 5×10^{-7} Torr なのでより低い圧力の蓄積リングでも有効かどうか (イオン電流が測れるか) が気になる。

陽電子リングにおける電子密度の測定に関しては筆者がKEKBのLERで行った測定を報告し、磁場がないドリフトスペースでRFAを使って高いエネルギーの電子を測り、ビーム付近の電子密度を知るという原理を説明した。原理の説明を点状のバンチの近似で行ったので、S. Heifets等から有限の大きさのバンチを考えるとバンチのごく近傍の電子は加速されないで何処の密度を見ているかに関して注意する必要があると言うコメントがあった。

今回の参加者に大きなインパクトを与えたのは、二次電子放出効率のコンディショニングの話である。F. L. PimpecによるStanford Linear Accelerator Center (SLAC) で行われている実験室でのSEY測定の報告では、SEYが電子照射を続けることにより減少すること、特にCu, TiNをコーティングしたAlのSEYは電子を 10^{19} cm⁻² (エネルギー不明) 程度照射すると δ_{\max} が1以下になることが示された。KEKの西脇みちるはKEKでの更に詳細、多様なSEY測定の結果を示し、同様に 10^{20} cm⁻² (5 keV) 程度の電子照射で δ_{\max} が1程度あるいは1以下になること、その時の表面状態の特徴はグラファイト化した炭素の存在であることを示した。更に加藤茂樹 (KEK) はLERのチャンバー内面にサンプルを設置し、一定の運転時間後SEYが δ_{\max} が1程度あるいは1以下になることと、表面にグラファイトが成長していることをその場測定 (SEY測定までに試料を大気に晒さない) で示した。一方M. Pivi (SLAC) からはPEPIIでもTiN付きステンレスのサンプルについてSEYの減少が確認されたが表面の炭素はむしろ減少していることを示した。

電子照射による表面のエージングは実験室のみならず電子雲それ自身によっても充分行われうること、SEYの減少にはグラファイトの存在が深くかわっ

ていることを示したこれらの報告は参加者に強い印象を与えたが、また一方ではこれから解決すべきいくつかの問題点も提供した。

- 一つは、どのような表面でも δ_{\max} が1を切るためには表面のグラファイトが必要なのか? 銅は必要だがTiNは無くてもよさそうである。
- 加速器の中でグラファイトの成長が可能か? 例えば放射光の存在はその妨げになるのではないか?

等である。またいずれにしろSEYがコンディショニングで下がるのであれば、電子雲密度の評価において、陽電子リングの場合は電子雲のソースである放射光による光電子放出の評価が重要になることにも注意が必要だろう。ハドロン関係者が気になるのはステンレス鋼のSEYのコンディショニングであるが、西脇の結果によると δ_{\max} が1以下になることは期待できないようである。

International Linear Collider (ILC) のDamping Ring (DR) に関するR&Dの報告がSLACのM. Piviからあった。一つはPiviが中心になってかねてから提案していた (角形) 溝付きチャンバーをテストした結果である。サンプルのSEY測定では、溝付きの表面にTiNコーティングを施した場合の δ_{\max} が、平らな面にTiNコーティングした場合より低い値、しかも1以下であるという結果を得ていた。しかしPEPIIの直線部にチャンバーを設置して、電子モニターの読みを比べた結果では溝付きチャンバーの方が電子電流が多い。インピーダンスの点からも問題視されていた溝付きチャンバーは更に不利になった。ただこの測定では、全電子電流を見ているので、エネルギーの高い電子に絞ればどうなるか分からない。またこの結果がそのまま電子密度を反映しているとすれば、電子雲抑制を検討する際には電子源となる光電子の生成の多少も良く検討しなければならないということを示していると思う。今後のPEPIIでの試験予定としては、ウィグラーや偏向電磁石部の電子雲対策のための下面にclearing electrodeを持つチャンバーや、上下の対向面に三角形のとがった山と谷を持つ溝をつけTiNコーティングしたチャンバーの図面が示された。

シミュレーションに関する発表は多く、筆者には細かいところは分からなかったが電子雲の成長に関するシミュレーションでは視覚的に面白いものが多かった。アイデアとして面白かったのは加速器の中の陽子のバンチのシミュレーションで、ローレンツ変換によってバンチ長の加速器の構造に対する比が大きくなる

ようにしてメッシュの切り方の効率化をはかり計算時間を短縮するという案である (J-L Vay, LBNL). 理論的な話では SLAC の S. Heifets が Two Stream instability の標準的な扱いにしたがった解析を行い、ビームの振動の振幅が小さい線形領域では振動の立ち上がりでは指数関数的であるが、振幅が大きくなり非線形領域に入ると振幅の増大は時間の $1/3$ 乗で緩く増加するという結果を示した話が印象的だった。

始めに述べたように CERN 等ヨーロッパ勢が不参加で、このワークショップの中心人物の一人である F. Zimmermann は欠席し、LHC 関係の報告もなかった。しかし大見、福間、Harkay, Furman, Macek 等これまでこのワークショップを支えてきたメンバーの参加のもと、新たに運転を開始した SNS の報告や、

SEY に関する話題、具体化してきた ILC の陽子 Damping Ring における問題点等、充実した議論が行われた。ILC 関係の発表は、Pivi が一手に引き受けていたが、若手の多くがシミュレーションの話に走る傾向にある中で良く実験もカバーしており、良い研究者に育っていると思った。PSR の報告を長く続けていた Macek がもう引退するということだったので、バンケットでは同じテーブルを囲んだ皆で「百歳酒」で乾杯し労をねぎらった。ワークショップの終にその Macek から Indiana 大学が次期開催地に手を上げていることが報告された。

開催に尽力された組織委員のかたがたのご苦勞をねぎらい、この報告を終としたい。(日本人の敬称は省略しました。)