

会議報告

## ICFA-HB2012 報告

佐藤 洋一\*

### Reports on the ICFA-HB2012

Yoichi SATO \*

#### 1. はじめに

2012年9月17日から9月21日までの5日間に、中華人民共和国北京市においてThe 52nd ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (略称 HB2012) が開催されました(図1)。このワークショップの内容・感想を報告します。

HBワークショップは2002年以来、隔年で開催されています。今回は、各国から174名が参

加し、各地の大強度もしくは高輝度ハドロンビームにおける進展、現状、開発に関して発表および議論が行われました。会場はIHEP近くのホテル内でまとめてあり、参加者のほとんどが同ホテルに宿泊していました。

日中関係の緊張時期と重なったこともあり、北京市内でもデモが行われる中での開催でしたが、幸い、著者の知る限りにおいて、トラブルに巻き込まれた参加者はいませんでした。



図1 HB2012参加者集合写真

\* 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization  
(E-mail: yoichi.sato@j-parc.jp)

## 2. ワークショップ概要

HB2012 は、初日のプレナリーセッションとポスターセッション、2日目から4日目までのパラレルセッション、最終日のサマリーセッションで構成されました。

パラレルセッションではテーマ毎に次の5つのワーキンググループが構成されました。

1. 円形加速器ビームダイナミクス
2. 線形加速器ビームダイナミクス
3. 加速器システムデザイン, 入射, 出射, ビーム-物質の相互作用
4. コミッショニング, オペレーション, パフォーマンス
5. ビーム診断, 診断機器

各ワーキンググループでは、あらかじめ招集者が提示した論点に沿って口頭発表とディスカッションが行われました。

最終日午前のサマリーセッションでは、ポスター発表内容も含めたワーキンググループのまとめが行われ、パラレルセッションのために参加出来なかったセッションの概要を知ることが出来る構成となっていました。各発表の詳細はワークショップホームページのリンク(但し執筆時点ではプレプレス版のもの)の参照をお願い致します<sup>1,2)</sup>。

発表以外には、会期前日のレセプション、各日午前午後のコーヒブレイク、ホテル内のランチ、4日目夜のホテル近くのレストランでの晩餐会、最終日午後に IHEP ツアーがありました。晩餐会では、中国の伝統芸能や、雑技団ショーが披露されました(図2)。



図2 晩餐会での「貴妃醉酒」の一幕

## 3. 発表紹介

プレナリーセッションでは次の8つの発表がありました。

LHC-Challenges in Handling Beams Exceeding 100 MJ (R. Schmidt 氏: CERN): LHC ではデザイン以下の陽子エネルギー 4 TeV (デザイン 7 TeV), 2 倍のバンチ間隔でもデザイン 75% のルミノシティ達成が紹介されました。これはエミッタンスをデザインよりも絞ったこと, バンチ当りのカレントをデザインより 30% 増やせたことによります。また蓄積エネルギー 130 MJ で運転しているにも関わらず, 入射キッカー磁石以外ではビーム由来の磁石クエンチを起こしていないことも特筆に値すると思います。ベータトロン・運動量コリメータによるロス回収効率が 99.99% であることや, ビームロスモニターシステムの重要性が強調されました。最後に LHC のヘビージュールをチョコレートのカロリーに見立て, チョコ一枚を LHC ジュールとして HB2012 委員長の Tang 氏に渡したパフォーマンスも会場を和ませていました。

J-PARC Recovery Status (山本風海氏: J-PARC): 東日本大地震による J-PARC 各加速器への影響と復旧作業, また長い停止期間を利用したアップグレード, 運転再開後の運転状況が紹介されました。リニアックでは, トンネルの最大 40 mm の折れ曲がりとねじれには, 早期復旧のためビーム軌道を曲げて対処し, 震災前と同じ強度のビームを安定して加速しています。Rapid Cycle Synchrotron では新コリメータの設置とダイナミクスの改良により, 線量を抑えた上でのビームパワーの増強に成功しています。MR では, 再アラインメント, 機器の健全性確認, 改修作業に加え, 性能向上に関わる作業も行い, ニュートリノ利用運転では 145 kW から 200 kW へ増強, ハドロン利用運転では 3.5 kW から 6 kW への増強, 取出し効率 99.5% の達成, 14 kW デモに成功しました。

High Intensity Issues at FAIR (O. Kester 氏: GSI): FAIR プロジェクトにおける増強計画が, 入射器としての GSI 加速器のアップグレード, 新規建設予定のシンクロトロン SIS100 (磁場リジディティ 100 Tm) のデザインを中心に紹介さ

れました。低エネルギービーム輸送系では重イオン加速器にもかかわらず分析磁石を省いたディスプレイフリー・空間電荷領域短縮設計がなされ、横方向コリメーションチャンネルを採用することでRFQ アクセプタンス内にビームを納める設計がユニークでした。入射器リニアック UNILAC と重イオンシンクロトロン SIS18 (磁場リジディティ 18 Tm) の間の輸送系ではスキュートリプレットで x, y エミッタンスをアンバランスにしています。荷電変換ストリッパは検討中です。SIS100 デザインでは、電荷数ずれ粒子ロスに由来する真空度の急な変動に対応可能な、コリメータ位置と排気のラティスが組みられました。空間電荷効果を踏まえた数値計算は遂行中のようです。最後に増強計画の予算が確保されていることが強調されていました。

Technological Challenges for High-Intensity Proton Rings (山崎良成氏: MSU): MW 級大強度陽子リング達成へのアプローチが、SNS, The Los Alamos Neutron Science Center (LANSCE) に代表される蓄積リング方式と、J-PARC RCS, 英国ラザフォード・アップルトン研究所中性子ミュオン研究施設 ISIS に代表される Rapid cycle synchrotron (RCS) 方式の比較を中心に論じられました。MW 級といえば、CW リングで 1.3 MW の記録を持つ PSI サイクロトロンがありますが、取出し時の放射化が増強の伸び代を制限すること、FFAG も有望ですが、磁石の精密な 3D デザインと入出射が課題となることが指摘されました。パルスリングでは空間電荷効果の抑制が増強の鍵であり、リニアックからの入射エネルギー上限が 1.3 GeV であることから、RCS の方が蓄積リングよりも空間電荷効果としては有利であること、J-PARC RCS の MW 級への技術的課題は、高勾配 RF として Magnetic Alloy Loaded 空洞が開発されるなど、着実な増強プランが進行中であることを受けて、SNS の超伝導 GeV リニアックと J-PARC RCS の技術が数 MW への鍵だと強調されていました。なお、FRIB での超伝導 RF による、重イオンビームパワー増強の予定も紹介されていました。

Technical Challenges in Multi-MW Proton linacs (V. Lebedev 氏: FNAL): 近年の超伝導 RF 技術の進展により、Spallation Neutron

Sources (SNS 1 MW, European Spallation Source (ESS) 5 MW, China Spallation Neutron Source (CSNS) 0.1 MW), Accelerator driven systems (ベルギー原子力研究センターの MYRRHA 2.4 MW, Indian ADS 30 MW) など、各地でマルチ MW 陽子リニアックが計画されています。特に SNS, ESS, フェルミ研究所のマルチメガワット陽子加速器次期計画 (Project X) を例として物理的、技術的な制限と到達可能な性能が論じられました。Project X はコストパフォーマンスの良いステージ I で 120 GeV, 2 MW。その中エネルギー領域ビーム輸送系では、超伝導を 2.1 MeV 以上で使用し、マッチングに加え bunch-by-bunch chopping も入れるため複雑化しています。しかし超伝導加速初段で低周波数を採用することで空間電荷効果の緩和、高加速勾配、収束の線形性向上などの利点を見込めるそうです。また、 $H^-$  ビームサイズを広げることで、 $H^-$  ビームバンチ内のイオン衝突による電子剥離 Intra-beam stripping 由来のロスが軽減できるという SNS の成果も生かされるそうです。

Intense-Beam Issues in CSNS and C-ADS Accelerators (S. Fu 氏: IHEP): 現在建設中の CSNS 計画と China Accelerator Driven System (C-ADS) 計画のそれぞれの加速器デザインがビーム不安定性対策を中心に紹介されました。CSNS は  $H^-$  リニアックと RCS で構成され、C-ADS は超伝導空洞を用いた CW 陽子リニアックで構成されます。ビームシミュレーションを通して、CSNS DTL では FD ラティスではなく FFDD ラティスを採用、C-ADS リニアックでは超伝導空洞クエンチ時のビームコントロール対応が決められました。計算にあたっては既存コード改良、新規コードの開発が行われていました。

Challenges in Benchmarking of Simulation Codes against real High Intensity Accelerators

(I. Hofmann 氏: GSI): シミュレーションコード開発に当って守るべき 2 段階のベンチマーク規範: (1) 解析的モデルとの比較検証, (2) 実験結果の再現性確認による予言性能の検証, が提示された後、各研究所で開発されたコードに対して (2) の観点でどのようなベンチマークがなされてきたかが紹介されました。既存コードはリニアック、リングともに定性的な実験結果の再現性

は良好であるものの、定量的な再現性となるリニアック用コードはまだ開発の余地が大きいという結論です。全体を通して、シミュレーション担当者は実験パフォーマンス向上への寄与を目指し、ハードウェアとビーム診断装置の理解やハード担当者との協力を深めることの重要性が強調されていました。J-PARC is joining this world という表現が出されたのを見て、インパクトのあるシミュレーション結果を発信する重要性を思いました。

Beam Loss Mechanisms in High Intensity Linacs (M. Plum 氏: ORNL): 大強度リニアックにおいて、 $H^-$ ビームは陽子ビームよりも多くのロスメカニズムが存在し、各地の $H^-$ リニアックでの比較が紹介されました。中でも Intra-beam stripping は SNS 超伝導リニアックでのロスのうち 90% の要因となっていました。Residual gas stripping,  $H^+$  capture といったロスメカニズムは SNS 以外の大強度 $H^-$ リニアックでは問題となっているものの、SNS ではごくわずかな影響に留まっていました。 $H^-$ ビーム固有のロスメカニズム以外にも、ビームハロー、テールといった陽子ビームでも見られるロス要因も存在し、SNS では低エネルギー段階でスクレイプすることがロス軽減に大きな効果がありました。SNS リニアックにおける $H^-$ ビームと陽子ビームの比較では、陽子ビームの方がプロファイル幅、ロスともにはるかに少なく、超伝導陽子リニアックの開発が進みそうです。

各ワーキンググループでも興味深い発表や議論が数多くなされました。セッションチェアの一人としても参加したのですが、長く発表したい人、議論を続けたい人が続出していました。パラレルセッションで参加した2つのワーキンググループの中からいくつかを紹介します。

ワーキンググループ「円形加速器ビームダイナミクス」: 集団効果不安定性への対策としての新オプティクスの採用と利点 (S. Gilardoni 氏, F. Antoniou 氏, E. Shaposhnikova 氏: LHC CERN), コライダーにおけるビームビーム相関の研究 (S. Paret 氏: CERN, Y. Luo 氏: BNL), Circular mode の利用による空間電荷効果緩和の提案 (A. Burov 氏: CERN) などが大強度リング

の物理として発表されました。小型加速器による空間電荷効果領域の実験としては、メリーランド大学の電子リングで確認されたソリトンや縦方向収束が無い場合の DC 化したマルチストリーム粒子による不安定性 (R. Kishek 氏: U. Maryland), 広島大学で開発された非中性プラズマトラップ装置 Simulator for Particle Orbit Dynamics で確認されたビーム集団現象: 共鳴, ストップバンド, ハローの観測 (岡本宏己氏: 広島大) が報告されました。新加速器や増強計画では、高エネルギー入射によるインコヒーレントチューン広がりへの抑制がトレンドとなっていて、CSNS, ISIS, FAIR, ジェファーソン研究所電子加速器 CEBAF、ブルックヘブン研究所イオンコライダー RHIC, 他での報告がありました。シミュレーション手法としては、共鳴線近傍における空間電荷効果の Frozen モデルと自己無撞着モデルの相違 (G. Franchetti 氏: GSI) や、Twiss および x-y カップリングパラメータの測定値に基づいた空間電荷効果の評価 (大見和史氏: KEK) が発表されました。その他の話題としては、電子雲や head-tail カップリング由来の横方向不安定性に対する広帯域フィードバック (C. Rivetta 氏: SLAC) が注目を集めました。入射フォイル散乱計算 (J. Holmes 氏: ORNL) では、ビームロスモニターとロス粒子数との校正が未解決点として挙がりました。3次共鳴線によるエミッタンス増加の新たな指標 (KY Ng 氏: FNAL) は、新加速器のデザインに有益と考えられます。

ワーキンググループ「コミッショニング, オペレーション, パフォーマンス」では、ロス軽減を主眼に据え、(1) ロスのどこを見るべきか (2) ロス軽減のための設定とデザイン設定との相違 (3) コリメータ設定指針 (4) ロス軽減のために重要となるビーム輸送系のパラメータ、がテーマになりました。PSI サイクロトロンでは、経験則に基づいて取出し時の軌道中心をずらす調整がロス軽減の鍵となっています (M. Seidel 氏: PSI)。ISIS では、取出し時セプタムのアクセプタンスを拡張することでロスを軽減しています。そして入射ビームの質の改善、ロスを低エネルギー時に限定させることを基本方針としています (C. Warsop 氏: RAL)。LHC では、99.99%以上の回収率、ビーム由来クエンチを一度も生じていない

実績を誇る LHC100 台のコリメータの運用法 (S. Redaelli 氏 : CERN), 輸送ラインにおけるコリメータの重要性 (L. Ponce 氏 : CERN), RF ノイズの抑制 (P. Baudrenghin 氏 : CERN) が調整の鍵として挙げられました. J-PARC では, シミュレーションによるロス計算の精度, RCS における移動式アブソーバー導入および 2 倍高調波の運用によるロス軽減効果 (原田寛之氏 : J-PARC), MR におけるパワー制限要素となった各種トラブル, Transverse bunch-by-bunch feed-back システムと RF feed-forward システム導入によるロス軽減, パワー増強方針と課題 (佐藤洋一 : J-PARC) が報告されました. FNAL ブースターではロス軽減のために, 軌道の改善, 2 段階コリメータシステムの採用, 取出しキッカー立ち上がりに対応するために入射ビームを切り出す notch システムの改善が行われました (F. Gallinucci 氏 : FNAL). LANCE では多粒子計算オンラインモデルの整備が進んでいます (L. Rybarcyk 氏 : LANL). SNS では, 入射器におけるビーム裾のカット, ビームサイズ拡張による Intra-beam stripping 抑制, シミュレーションではなく経験則に基づく磁石調整, がリング内ロス軽減の鍵となっています (M. Plum 氏 : ORNL). 新建設の PEPF 100 MeV 陽子リニアック (J. Jang 氏 : KAERI), CSNS 入射器 (S. Wang 氏 : IHEP) のコミッショニング計画も発表されました.

ディスカッションタイムでは, シミュレーションの重要性が強調されました. ビームロスとハドロンシャワー計算がコリメータシステムのデザインとコミッショニングに不可欠であること, しかしそのモデリングの困難さから, CAD 図からのモデリングの自動化への動きなどの話も出ました. ハローとビームロスのシミュレーション精度を上げるには, ビーム裾分布の測定が重要であること, オンラインモデルが必要であるという認識は共通していました. 経験則に基づくロス軽減のパラメータ調整のアルゴリズム構築が IFMIF で検討されています.

ポスターセッションは 60 近くの発表に対し 2 時間ほどしかなく (図 3), ごく一部しか見ることが出来なかったのですが, 興味ひかれたもの, 話



図 3 ポスター会場

題になったものとしては, ダイヤモンド測定器による Bunch-by-bunch ビームロス測定 (M. Hempel 氏 : CERN), RCS 1 MW シナリオ (發知英明氏 : J-PARC), ビームハロー測定とハロー構成理論の検証の提案 (H. Zhang 氏 : U. Maryland), コリメータアラインメントのビームベース調整 (G. Valentino 氏 : CERN), コリメータ内 BPM による調整 (D. Wollmann 氏 : CERN), Longitudinal resistive impedance のビームベース測定 (J. Muller 氏 : CERN) がありました.

#### 4. 最後 に

短い期間で多くの情報を得たワークショップでした. 各施設の担当者が持つ問題意識を話し合えたことは貴重な経験でした.

ワークショップの運営も, 参加費のオンライン振込の敷居が高い, 発表ファイルのアップデートが会場端末になかなか反映されないなどはありませんでしたが, 時間外でも議論しやすいように会場が閉められずに遅くまで電気が通っていたこと, 水分の補給が常に用意されていたこと, 英語と中国語の話せるスタッフを常時ではないものの用意されていたことなど, 運営委員会のホスピタリティの高さは随所に表れていました. また, ICFA スタッフによるプロシーディング校正作業の迅速さはいっ見ても感心させられます.

次回は米国ミシガン州 MSU で開催されます.

#### 参考文献

- 1) <<http://hb2012.ihep.ac.cn/>>
- 2) <<http://spms.kek.jp/pls/hb2012/toc.htm>>