

会議報告

HB2010 会議報告

山本 風海^{*1}・外山 毅^{*2}

Report on the 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams (HB2010)

Kazami YAMAMOTO^{*1} and Takeshi TOYAMA^{*2}

1. はじめに

HB2010 とは 46th ICFA Advanced Beam Dynamics Workshop on High-Intensity and High-Brightness Hadron Beams の略で、ICFA (International Committee for future accelerators) の協力の元、2年おきに開催されている大強度ハドロン加速器を対象としたワークショップである。この会議では、大強度ハドロン加速器の理論および測定結果、アップグレード計画の設計状況、既存加速器における運転状況や経験、といった内容についての報告と議論が行われている。今回は5回目の開催になり、第1回がイリノイ州 Batavia、第2回がドイツの Bensheim、第3回がつくば、第4回がテネシー州の Nashville と、アメリカーヨーロッパアジアを順番に回っている。今回は9月27日から10月1日までの期間にスイスの Morschach で行われ、ホストはポールシュラー研究所 (PSI) が務めた。開催地の Morschach は、スイス有数の観光地 Lucerne 湖を眼下に望む山間にあり、ヨーロッパ人の避暑地といった趣の場所である。会場のホテル Swiss Holiday Park もプー

ルやサウナ、体育館、カートサーキットが併設されており、子供連れの観光客も多数滞在していた。今回のワークショップでは、160名を越える参加者が集まり、口頭発表が108件、ポスター発表が54件行われた。参加者内訳は、アメリカからの参加者が最大で46人、ついでスイスから43人、以下ドイツ26人、イギリス14



図2 Morschach の街並み. 手前の建屋が会場のホテル



図1 集合写真



図3 ホテル周辺からの展望. 手前が Lucerne 湖, 奥の山が Rigi 山

*1 日本原子力研究開発機構 Japan Atomic Energy Agency (E-mail: kazami@post.j-parc.jp)

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

人, 日本 13 人, 中国 6 人といった状況であった. 我々の所属する J-PARC からは 10 名が参加した.

2. 会議報告

2.1 日程とワーキンググループ

初日に招待講演およびポスター発表があり, 2 日目から 4 日目までが各ワーキンググループに分かれての口頭発表とグループミーティング, 最終日の 5 日目に PSI に移動してサマリートークおよび見学が行われた. 口頭発表は議題毎に 7 つのワーキンググループ (WG-A ~ WG-G) に分かれて議論が行われた. 発表は 2 つのワーキンググループが平行に行われた.

WG-A は円型加速器 (含ストレージリング) におけるビーム力学の検討と測定結果に関して, WA-B は線形加速器におけるビーム力学の検討と測定結果に関して, WG-C は新規加速器の設計, アップグレード, および既存加速器の入射, 出射のパフォーマンスと問題点について議題した. WG-D は既存加速器の運転状況と達成性能およびそこに至るまでのビームコミッション, WG-E はビーム力学のコンピュータシミュレーションについて, WG-F はビームモニターに関する議論を行なっている. WG-G は新たに設置されたワーキンググループで, コリメータやビームターゲット, ダンプといった機器の設計やそれらの放射線対策に関する発表が行われた. 以下, 各ワーキンググループで行われた議論に関して, 筆者の参加したセッションを中心に報告する.

2.2 WG-A (円形加速器のビーム力学), WG-B (線形加速器のビーム力学)

WG-A および WG-B では, 現在稼働している加速器として CERN PS/SPS/LHC, FNAL Tevatron/Main Injector, SNS, SARAF (Soreq Applied Research Accelerator Facility), J-PARC Linac/RCS (Rapid Cycling Synchrotron)/MR (Main Ring), GSI UNILAC/SiS18, ISIS, RHIC, COSY のシミュレーションと実

測との比較, また現在設計が進められている加速器として ESS, CERN SPL (Superconducting Proton LINAC), IFMIF-EVEDA, PROJECT-X, FRIB (Facility for Rare Isotope Beams), SARAF, SPIRAL2 (Système de Production d'Ions Radioactifs en Ligne de 2^{ème} génération), CSNS のビーム力学設計の報告, またそれに付随した問題に関する議論が行われた. 各加速器とも, ビームコアの挙動に関しては実測値が比較的計算で追えているが, ハロー部分の形成とそれに伴うロス は想定外のケースが多々見られる, といった状況である.

2.3 WG-C (加速器設計, 入射, 出射)

WG-C では運転中の加速器の入射および出射の現状として, J-PARC および SNS からの報告があった. SNS および J-PARC RCS では, いずれもリング入射部がもっとも放射化が進んだ箇所となっており, 特にダンプへの分岐部はアパーチャを稼ぐことが難しくホットスポットとなっている. また, SNS では荷電変換フォイルで剥ぎ取られた電子の処理がうまくいっておらず, フォイルフレームを損傷するという事例が報告された. 一方, 以前より危惧されていたフォイルの寿命に関しては, 入射エネルギーが比較的低い RCS (ISIS および J-PARC) の場合は 100 - 200 kW のパワーで 1 年, また入射エネルギーが 1 GeV 前後の蓄積リング (SNS および LANSCE) の場合最大 1 MW の出力での運転でも数ヶ月の連続運転に耐えることが確認されている. ただし, 今後さらなる大強度 (例えば 5 MW 以上) を目指す上では, フォイルでの発熱のモデルと実測の比較が重要となるであろう, との見解がサマリーとして出された. サマリーでは他に, SNS と J-PARC の実状からダンプラインの設計を重視すべし, とも述べられた.

加速器のアップグレードの検討としては, CERN の増強案として PS Booster でのペインティング入射の検討, および PS 入射エネルギーの 2 GeV への増強計画が報告された. Fermi からは Project-X の検討報告が, また KAERI からは PEFP (Proton Engineering Frontier Project) の RCS の設計に関する報告があった. Non-Scaling FFAG の話としては, EMMA (Electron Model for Many Applications) のコミッションの現状と種々のアプリケーションへの利用の可能性に関して報告された.

2.4 WG-D (ビーム調整, 運転状況および達成性能)

各施設の運転状況を議論する WG-D では, まず本格的に稼働しだした LHC の状況が報告された. He 漏洩事故により一旦運転が休止された後, 昨年 11 月 20



図 4 発表風景

日よりビームコミッショニングを再開, 11月23日には入射エネルギーにて最初のビーム衝突を確認した. その後も順調に調整を続け, 現在はバンチあたりの粒子数は設計値である 10^{11} 個, バンチ数は104個 \times 104個, 加速エネルギーは3.5 TeVで運転が行われている. これまでのコミッショニングおよびユーザー運転で, ビームロスによって引き起こされたクエンチは無く, ごく稀に起こる早いロスを除いてMPS(機器保守のためのインターロックシステム)の発報によるビームアポートの理由は把握できているとの事である. LHCのメンバーの報告では, 事故後の順調なコミッショニングの進展は次の二点に因るとまとめられていた.

①コリメータが設計通りのパフォーマンスを発揮し, 超電導電磁石が保護されていること.

②オフビームの時点より, MPSシステムの冗長性を確認しながら慎重にコミッショニングを進めたこと.

これらの詳細に関してはWG-Dのみならず, 招待講演でコリメータのパフォーマンスに関して, またWG-FでロスモニタとMPSの状況に関してそれぞれ報告が行われており, さらにポスターセッションにも関連する発表が数件あるなど, 重ねて強調されていた. 今年度の目標としては, 蓄積ビームパワーは30 MJ(設計値の8%, バンチ数700個に相当), ルミノシティは $10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (Tevatronのルミノシティに相当)という値を挙げていた.

さらに, このWGでは各加速器の状態としては, MPSの状況, 残留線量, 稼働率等が報告され, 比較が行われた. MPSの応答時間に関しては, CWで運転されるPSIは数ms, それ以外のパルス運転される加速器(SNS, LANSCE, J-PARC)では10マイクロ秒程度が一般的であった. 残留線量に関しては, J-PARCが極めて低い状態で運転しており, SNS, LANSCE, FNAL, ISISはそれより一桁位大きく, これらの加速器はどれも同じようなレベルで運転を行っている. そ



図5 ロビー

のため, 年間を通しての作業者の集団線量もJ-PARCが最も低い値であった. この辺りは, 欧米と日本とで被ばくに対する考え方に大きな違いがあるように見受けられる. ユーザー運転の稼働率はどの施設も90%程度で, それ以上の稼働率は難しい事が伺える. また, WG-A, WG-Bでもあった通り, ロスに直結するハロー部分を予測する事は出来ておらず, ロスのチューニングは理論に基づいた方針のみならず, 経験に基づいた微調も行われている.

2.5 WG-F(円形および線形加速器におけるビーム力学のコンピュータシミュレーション)

WG-Eでは, より詳細な現象を組み込んだコードの開発や, モデルの改良, マルチCPUに対応したパラレル計算コードの開発, 既存コードの統合や機能追加, といった内容が報告された. また, 次のWG-Fとのコラボレーションとして計算と実測の比較検討も行われた.

2.6 WG-F(大強度ビーム診断および計測器)

WG-Fのミッションは, 大強度ハドロン加速器施設でのビーム診断におけるチャレンジングなテーマ, 効率的な加速器調整・運転, 信頼性への貢献についてワークすることである. ビーム診断のワークショップとしてはBIW, DIPACシリーズがあるが, HBは大強度・高輝度ハドロンビームという切り口である. 今回はビームプロファイルモニターに関するトークがメインであった. 診断対象となる加速器としては, J-PARC, CERN LINAC4, SNS, RAL front end test stand, GSI, IFMIF-EVEDAについて報告があった. 数100 kW~数MWクラスの陽子ビームを, 破壊型(ビーム輸送路), あるいは, 非破壊型(円形加速器)で測定する装置が紹介された. その他, PSIから1MW級のビーム電流モニター, CERN LHCから蓄積エネルギー30MJのビームを担保するビームロスモニター, FNALからMW級の超伝導LINAC project-Xのビーム診断に関する興味ある話題が報告された.

破壊型プロファイルモニターとしては, 大強度ビームに耐えうるカーボン系のフォイルが使われている. それぞれ一工夫があり, 1-2 μm 厚のグラファイト・フォイルをレーザーで短冊状に切断, 水平または垂直方向に並べた「カーボン・リボン・プロファイルモニター」(J-PARC), フォイルから放出される電離電子・2次電子を高速ゲートを使って時間分解能を1nsまで追求したプロファイルモニター(CERN LINAC4)について報告された.

非破壊型としては, 負水素(負重水素)ビームについては, レーザーで電離された電子を使うビームプロ

ファイルモニター (RAL front end test stand, IFMIF-EVEDA) の報告があった。陽子ビームについては、電子ビームをプローブに使用する方法 (SNS)、真空容器内ガスとビームとの衝突で生成される光 (GSI)、あるいは電子・イオン対 (J-PARC) を利用する方法について報告があった。

2.7 WG-G (ビームと物質の相互作用)

WG-G は他のワーキンググループと異なり、ビーム力学よりも運転時に発生する放射線の影響評価や、機器の耐放射線性、熱設計といったハードウェア設計に関する内容が主に議論された。放射線の影響の評価に使用されるコードとしては、MARS15 の改良、実測値との比較が報告された。生成核種の見積もりおよび線量評価は実測とかなり良く一致するが、DPA (Displacement Per Atom) の値は他のコード (SRIM, PHITS, MCNPX) と比較して最大 2 桁の違いが出ており、さらなる改良が必要とのことであった。また、FAIR における重イオンビーム運転時の Hands-on-Maintenance のためのロス量の基準値を FLUKA で計算した結果が報告され、陽子加速器で提唱されている 1 W/m に相当する量として 1 GeV/u のウランビームの場合、マグネット等の塊で 5 W/m、ダクト等の薄い標的で 12 W/m までのロスが残留線量の観点からは許容されるという計算結果が示された。

具体的なハードの設計報告は、ニュートリノターゲットやビームダンプ、コリメータにおける線量評価、熱および機械設計について発表があった。これら材質としては、低放射化を求める場合は炭素、冷却効率を優先する場合は銅が選択されていた。それ以外にも SUS、タングステン、ベリリウム等も比較対象として検討が行われていた。

ディスカッションでは、問題点として高エネルギー粒子による照射のデータがあまりない点が挙げられた。熱中性子のデータは、原子力利用の観点から豊富に集められているが、この熱中性子のデータから高エネルギー粒子による照射の影響は外挿できない。違う粒子、エネルギーで単純なパラメータで照射効果を評価するために、DPA、H/He ガス生成量といった値も考えられるが、これらも単純に増加量＝ダメージ量とはならず、様々な粒子、エネルギーの照射効果のデータを地道に収集していくしかない、との事であった。また、原子炉や核融合関連の施設から材料照射データのハンドブックを集めてはどうか、といった意見も出された。さらに、こうしたデータを取得するための照射施設の重要性も確認され、現在稼働している施設として BLIP (BNL LINEAR ISOTOPE PRODUCER) における測定

結果と、建設中の施設として CERN の HiRadMat が紹介されていた。BLIP では、グラファイトと C-C コンポジット、GUM メタル、タングステン、タンタル等のビーム衝撃による影響の比較として温度、DPA、変形量等の測定結果が示された。また、NuMI ターゲットの試験結果として、CC コンポジットターゲットが破壊される陽子ビーム密度のしきい値が報告された。CERN で建設が進められている HiRadMat は、SPS から LHC へのビーム輸送ラインの途中で分岐してビームを供給する設計となっており、2011 年末に運転開始予定である。ビームエネルギーは 450 GeV で、年間 10^{16} 個の陽子を施設に送り、パルスビーム衝撃とショックウェーブ、材質の変性、劣化の確認試験が行われる。

2.8 施設見学

最終日の朝に会場の Swiss Holiday Park をバスで発ち、PSI のオーディトリウムに集合した。その後、各ワーキンググループのサマリーが報告され、昼食後に加速器施設の見学を行った。現在 PSI では 590 MeV の陽子サイクロトロン HIPA (High-Intensity Proton Accelerator) と放射光源の SLS (Swiss Light Source) がユーザー運転を行っている。これらの加速器は共通の制御室で運転監視が行われている。加速器の見学で一つ面白い趣向が凝らしてあるのは、HIPA が収められている遮蔽体上に実物大の加速器装置全景の俯瞰写真が貼られており、さながら実際の加速器を見下ろしているような状況で説明を聞く事ができた点である。ただし、残念ことに遮蔽体直上は比較的線量が高く一般見学者は立ち入ることができなかった。PSI ではこれら以外に、FEL の試験施設があり、電子リニアックの調整が行われていた。



図 6 PSI オーディトリウム前の像



図7 実物大写真がHIPA遮蔽体の上に貼り付けられている



図8 アルプホルンの演奏

3. その他

今回の会議は風光明媚なスイスの山で行われ、暑かった夏の残滓がまだ残る日本を離れ快適に過ごす事ができた。3日目の夜に行われたバンケットの会場は、ホテルの正面の山をロープウェーで登った先で、すぐそばに雪化粧した山頂を望むことができた。バンケット会場では、頭の上で振り回し、逆回転させるなどして先端と中間あたりをぶつけることにより爆竹のような音を出す鞭や、アルプホルン（長さ3 m以上の木製角

笛）、シュビーツアエルゲリ（スイスアコーディオン）、クーグロックケン（牛の首につける鐘の楽器）の演奏が行われ、スイスの文化を存分に堪能した。惜しむらくは、天気が良かったのが3日目だけだったこととスイスの物価が非常に高かったことである。ほとんど全ての物が日本の倍の値段で、日本と同程度の価格設定なのは税金の安い酒類くらいであった。なお、次回2012年の開催地に関しては北京で行うとサマリートークの最後で発表された。