

第6回世界加速器会議 (IPAC'15) 報告

公益財団法人高輝度光科学研究センター

加速器部門 谷内 努、満田 史織、下崎 義人、高雄 勝

第6回世界加速器会議 (The 6th International Particle Accelerator Conference, IPAC'15^[1]) が2015年5月3日から9日まで、アメリカ・バージニア州リッチモンドで開かれた。リッチモンドは南北戦争の南軍の首都であった歴史的な都市である。その開催地から100 kmほど離れたバージニア州ニューポートニューズに位置するジェファーソン研究所がホストとなった。IPACは2009年までアジア、ヨーロッパ、北米でそれぞれ独立して開催されていた加速器の国際会議を統合し、毎年開催されている国際会議で、2010年に京都で第1回が開催されて以来、アジア、ヨーロッパ、アメリカの順に開催地が巡回している。ちなみに第1回以降の開催地は、サンセバスチャン、ニューオリンズ、上海、ドレスデンであった。今回の会場となった Greater Richmond Convention Center は、参加者1,000人規模を優に収容できる大規模な会議場であり、最終的な会議参加者数31ヵ国、309施設からの1,187名に対して余裕のある対応ができた。大規模会議場の選定に苦労のあるアジア、ヨーロッパでの会議とは趣が異なっているように思われた (図1)。



図1 Greater Richmond Convention Center

基本的な会議プログラムは、9時～16時までが招待講演およびプログラム採択講演、16時～18時まではポスター発表という形態で、講演で広く扱った内容をポスター発表にて詳細を専門の担当者に問い合わせる流れは、効率的に情報収集し易くなっている。ポスター会場は例年よりも非常に大きく確保されており、ポスター前で議論の群衆があったとしてもスムーズにポスター間を移動でき快適であった (図2)。

ポスター発表、口頭発表いずれにおいてもソフトウェア的なテーマの発表が多数を占めているように思われた。これは、周長100 kmで100 TeVの衝突エネルギーを生み出す次期大型高エネルギー衝突型加速器 (ヨーロッパや中国で計画、FCC (Future Circular Collider))、LHCのヒッグス探索実験から新粒子の探索を目指し、直線距離50 kmで500 GeVの衝突エネルギーを生み出すILC (国際線形衝突加速器)、100 pm・rad以下の極低エミッタンス次世代放射光光源加速器、アタッシュケース規模の超小型医療加速器など、次世代加速器において飛躍的な加速器技術の進歩や材料開発技術などが望まれる中で、それらの進歩が緩やかであるためではないかと考えられる。

全体を通して、現在コミッショニングが進んでいるNSLS-II、TPS関連の発表がポスター発表の件数などからも存在感を示していた。また、アメリカでのIPAC開催ということもあり、超伝導運用に欠かせないHeを潤沢に使用できる産出国としての圧倒的なアドバンテージとともに、超伝導技術の牽引国にふさわしく、超伝導空洞、超伝導アンジュレータ、超伝導ケーブル、超伝導に関する発表も比較的多かったのではないかと印象を受けた。超伝導空洞ではILCに向け、Nb材によるTESLAベースの量産向き超伝導空洞の生産技術の向上が日米欧で行われている。これらの技術は超伝導空洞を使っ

た XFEL などでの利用が進んでいる。Nb 空洞より臨界磁場が高い Nb₃Sn 空洞の開発がアメリカで進められており、実現できれば、これまでの Nb 空洞の加速電界強度 25 MV/m よりも高い 50 MV/m 以上を得ることができる。超伝導ケーブルは NbTi 材から Nb₃Sn が主流となりつつあり、LHC アップグレードや超高エネルギー衝突型加速器において必要とされる NbTi 材の臨界磁場 9 T を超える 15 T 以上の磁場に対応が可能なケーブルの開発が進んでいる。この技術は高エネルギー加速器にとどまらず、放射光光源加速器では、高エネルギーフォトンの要求に応える磁場強度を高めるための真空封止アンジュレータやクライオアンジュレータ、真空外でも十分に磁場強度を実現可能な超伝導アンジュレータへの利用へと展開されている。電子蓄積リングで低エミッタンスを実現するためのダンピングウィグラーも視野にあるようである。尚、アメリカでは、FNAL、BNL、SLAC、ANL 各加速器施設が、空洞、ケーブル、磁石と開発テーマの住み分けを持って開発を並行的に進めており、技術の進歩と応用の速度が目覚ましい。

LHC はヒッグス探索の成功からさらに実験確度を向上させるため、また新粒子の探索のため、衝突エネルギー 4 TeV–4 TeV から 6.5 TeV–6.5 TeV へのエネルギー増強を目指している。デザインとしては 7.5 TeV × 2 であるが、超伝導磁石のクエンチ・トレーニング問題が足かせとなっており、磁石入れ替えにより 2015 年夏までに前段階の 6.5 TeV × 2 による実験を開始させる。将来的には、15 TeV エネルギーの達成とルミノシティ向上が重要となっており、収束用 4 極磁石用 Nb₃Sn 線材の開発が鋭意進められている。さらに、beam deposit のエネルギーが 500 MJ に達することから、超伝導システムを冷却する冷凍プラントの追加が必要である。

NSLS-II は 2012 年の 200 MeV Linac、2013 年のブースターに続き、2014 年 3 月より蓄積リングのコミッションを開始、beam based alignment と linear optics correction で、COD の残差が 50 μm、ベータ関数の modulation が $\Delta \beta/\beta = 3\%$ (RMS) となるまでラティスのエラーを補正したとのことで、「ラティスが安定なので 1/2 の half integer resonance を安定に横切ることができる」とのことであった。また 3 台のダンピングウィグラーを用いることで、設計値通りのエミッタンス (0.98 nm・rad@3

GeV) を達成することができた。低電流でのユーザー運転は開始されており、2015 年内に 200 mA の蓄積、トップアップ運転などの試験を行う予定となっている。真空封止アンジュレータの 6 mm gap がビームの不安定性の閾値を決めているが、この不安定性を抑制して 2016 年に 500 mA、6 mA single bunch の達成を目指している。

建設中の MAX-IV は、ブロックからの削り出しにより、1 cell 分の電磁石が 1 ブロックの中に同包されている特徴を持つ。このアライメント方法・精度が世界の注目するところであるが、ブロック全体における相対誤差で設計値 25 μm (RMS) 以下に対して 20 μm 以下を達成したとの報告があった。

超伝導 RF (SRF) の開発は欧米のみでなく、日本でも ILC に向けた開発が KEK を中心に進められている。ドイツ DESY の TESLA ベースとした SRF の開発では、量産に向けたメーカーとの共同開発が、KEK 内への製作、試験、組み上げ工場の建設とともに着実に進行しているとの報告があった。目指す体制は、ILC に向けた量産高品質同一性能の達成と、高圧ガス取り扱いも含めた表面処理経験の蓄積である。ILC をターゲットとしているが、この空洞は FEL、ERL、CLS などのあらゆるケースに展開可能である。KEK 独自に開発を進めていた空洞は、量産体制に向かないとのことから、現実的な選択として TESLA-9 cell の選択となったとのことである。

放射光アンジュレータの開発動向としては、真空封止からクライオアンジュレータへと開発が移行し、狭小ギャップによる磁場応力を支持する構造をコストダウンさせるためのシステム開発が進んでいる。超伝導アンジュレータの開発も進んでおり、APS が主となり、Nb₃Sn 線材開発とアンジュレータ応用、ANL では高温超伝導線材 HTS のアンジュレータ応用が進められている。

ALS における擬似シングルバンチ利用技術は、利用者側のサンプルの放射線ダメージを下げるため開発され、キッカーおよびキッカー電源の高度な技術により実現できている。バンチのうち、一部のバンチをユーザーの要求する周波数で蹴ることによりカムシャフト軌道を描いて、特定のバンチは常時、振動によりユーザー側へ提供する光が off-axis となる。これにより、周波数依存の放射光をユーザーが作為的に利用できることになっている。ここで、8 極磁場のカムシャフトキッカーを利用することにより、メインバンチは振動が誘起さ

れずに、on-axis 光を提供可能である。

PAL では、XFEL の建設が急ピッチで進んでいる。昨年末には、建屋の鉄骨が組み上がったばかりで搬入道路なども整備されていない状況であったが、現在は、LINAC、アンジュレータギャラリーすべての建屋が完成し、2015年夏には LINAC のコミッショニングが行われる。クライストロンモジュレータは POSCO との共同開発で、7 ppm の安定度のことである。2015年中に全装置のインストールを済ませ、2016年にはコミッショニングの予定である。

3 GeV リング TPS のコミッショニングは、ブースターリングの真空チェンバーが磁化するというトラブルがあったものの、2014年末に 5 mA の電子ビーム蓄積に成功、2015年3月に 100 mA の蓄積に成功した。エミッタンスも概ね設計値 (1.6 nm·rad) 通りで、エミッタンスカップリング比は 1% 以下とのことであった。TPS の 3 GeV 低エミッタンスリングの検討は、2004年より磁石アライメントの要となる架台システムの検討が開始され、2013年にリングへの架台設置が開始された。架台の据え付けはステッピングモーターの分解能にて 0.03 μm の分解能で設置、架台内磁石アライメントはチャンネルの削り出しが 15 $\mu\text{m}/4\text{ m}$ となっており、水平 20.4 μm 、垂直 18.4 μm (RMS) を達成している。架台の伸縮変化をレーザーセンサーで感知し、リアルタイムアライメントを全周にわたり実施している。今後、超伝導 RF キャビティの調整、ID のコミッショニング、ビーム不安定性と非線形ダイナミクスの調査などを行った後にユーザー運転に適用するとのことであった。

現在、世界各地の放射光リングで低エミッタンスオプティクスへのアップグレードが検討されている。例えば、APS は 12 ヶ月で既存のリングの撤去、新リングのインストール、およびコミッショニングが検討されている。このうち、コミッショニングにかかる時間を 3 ヶ月と予想している。これに絡み、ANL の M. Borland 氏より、ここ最近 (10 ~ 15 年前) にコミッショニングを行った 9 つの施設に対し、過去のリングのコミッショニング経験と、予想される将来のリングにおけるコミッショニングについてのサーベイを行ったとの口頭発表があった。詳細は省くが、「過去のリングで、何がコミッショニングにおいて最もディレイを生じさせたか？」の問いに対して最も多かった答えが

「Vacuum obstruction」なのに対し、「新しいリングで、何がコミッショニングにおいて最もディレイを生じさせるとするか？」の問いに対して最も多かった答えが「Obtaining stored beam with small dynamic / physical aperture」だったり、「新しいリングでコミッショニングを進めるにあたり必要なものは？」の問いに対して最も多かった答えが「Working, well-understood diagnostics」だったり、SPRING-8-II 以外の施設で何を考えているのかという点において、興味深い講演であった。



図2 ポスター発表会場

会議5日目には、加速器ソサエティに貢献した人を讃える Award Session と、PAC シリーズが始まってから今回で 50 年ということで、50 周年記念を祝う Special Session が開催された。Special Session では、アメリカ、アジア、ヨーロッパにおける加速器会議のこれまでを振り返る講演が行われた。アジアからは黒川眞一氏が PAC、APAC、そして IPAC までの変遷を振り返り、孔子の「学びて時にこれを習う、亦 (また) 説 (よろこ) ばしからずや。朋 (とも) あり遠方より来る、亦樂しからずや」を引用して「これが、まさに IPAC である」と言っていたのが印象的であった。

会議最終日は、ジェファースン研究所 (J-Lab) ツアーが催行された。J-Lab が保有する原子核実験施設である CEBAF は、電子ビームエネルギーを連続的に可変かつ取り出しが可能である施設として特徴的である (図3)。最大 24 GeV の到達エネルギーが可能のようにリング設計されており、今年 6 GeV から 12 GeV へのアップグレードが完了している。

決め手となったのは、Nb 超伝導空洞の表面状態の改善（窒素ドーピング）により、従来よりも高い加速電界を達成したことによる。この超伝導表面技術の開発は、加速長の短縮が望まれる ILC だけでなく小型加速器などへの展開が可能である。J-Lab ツアーでは実際に CEBAF リングの見学を行い、異なるエネルギーの電子ビームの連続的取り出し機構が、およそ幅 4 m 高さ 4 m ほどの狭い加速器収納部内に緻密な設計と高密度な装置の配置のもと組み上げられていることを確認した。収納部内は周回クレーンがなく、エネルギーの異なる電子ビームを振り分けて周回させる多段の加速器ライン（1 t クラスの電磁石も含め）の平積みや、今回のアップグレードによる機器再配置および入れ替えをフォークリフトによる設置で実現していることは驚きであった。

次回 IPAC'16 は、2016 年 5 月 8 日～13 日に韓国釜山で開催される。また、IPAC'17 はコペンハーゲン、IPAC'18 はバンクーバーでの開催が予定されている。

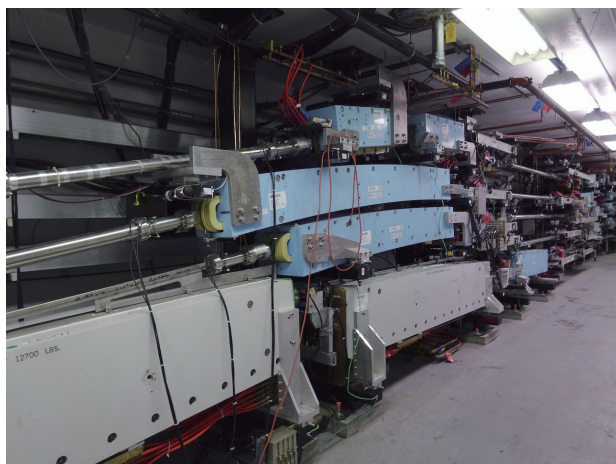


図3 CEBAF リング収納部

[1] <https://www.jlab.org/conferences/ipac2015/>

谷内 努 TANIUCHI Tsutomu

(公財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0851
e-mail : ihcuinat@spring8.or.jp

満田 史織 MITSUDA Chikaori

(公財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0851
e-mail : mitsuda@spring8.or.jp

下崎 義人 SHIMOSAKI Yoshito

(公財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0851
e-mail : shimosaki@spring8.or.jp

高雄 勝 TAKAO Masaru

(公財)高輝度光科学研究センター 加速器部門
〒679-5198 兵庫県佐用郡佐用町光都1-1-1
TEL : 0791-58-0851
e-mail : takao@spring8.or.jp