

## 会議報告

## 第 11 回 European Particle Accelerator Conference 報告

菊谷 英司\*1・佐伯 学行\*2・大竹 雄次\*3・  
 阪井 寛志\*4・金正 倫計\*5・庄司 善彦\*6

## Report on 11th European Particle Accelerator Conference

Eiji KIKUTANI\*1, Takayuki SAEKI\*2, Yuji OTAKE\*3,  
 Hiroshi SAKAI\*4, Michikazu KINSHO\*5 and Yoshihiko SHOJI\*6

## 1. 会議の概要（庄司）

2008年6月23日から27日にかけて、イタリアのジェノヴァで11th European Particle Accelerator Conferenceが開催された。今回の会議報告は分野別に5人の方に執筆をお願いし、学会誌編集委員の庄司が取り纏めをさせて頂いた。全ての分野をカバーできない一方で重複があるのは庄司の責任であるが、この点をご容赦願いたい。EPACについては今更説明の必要もないと思うので省かせて頂き、まずは今回の開催地の概要から簡単に紹介させて頂く。

ジェノヴァ（イタリア語で Genova, 英語で Genoa）は紀元前からの古い港で、現在でもトリノとミラノという産業都市を内陸に控えた、地中海で最大級の貨物量を誇る貿易港である。16世紀には金融業などを営む都市国家として繁栄し、当時の建築が残るガリバルディ通りなどにユネスコ指定の世界遺産も多い。ちょうど会議中の6月24日はジェノヴァの守護聖人（洗礼者聖ヨハネ）の日で、地域の祝日であった。会場近くの聖ロレンツォ教会から、聖職者や、大きな十字架を持った信者、その他大勢が聖歌を歌いながら通りを行進するのである（写真1）。ジェノヴァからジェノヴェーゼソースを連想される方も多いと思うが、レセプション（写真2）などでは、このバジルの緑が鮮やかで香りの良いソースをたっぷり味わう事ができた。街の特に港湾地区は国際的であって、旧くて狭い通りは雑多な異国情緒に溢れていた。例えば、キャップと



写真1 港側から見た聖ロレンツォ通り。残念ながら、平日に写したもの。左手の塔が聖ロレンツォ教会（Cattedrale di San Lorenzo）である。

長衣の男性は珍しくないし、大きな荷を頭にのせたアフリカ女性を見かける事もある。ヨーロッパ文化の奥深さを多少とも感じ取れる街であったと思う。

コンファレンス会場は旧港地区の棧橋の突端にある（写真3）Magazzini del Cotoneであった。大会議場は中央に発表者が位置し、左右に客席があるという珍しい構造である（写真4）。パラレルセッションの際は中央が区切られて、独立した2つの会場として使われる。会議開始前日には学生ポスターセッションが

\*1 KEK (E-mail: kikutani@post.kek.jp)

\*2 KEK (E-mail: takayuki.saeiki@kek.jp)

\*3 播磨理研 (E-mail: otake@spring8.or.jp)

\*4 東大物性研 (E-mail: hrsakai@issp.u-tokyo.ac.jp)

\*5 JAEA (E-mail: kinsho.michikazu@jaea.go.jp)

\*6 兵庫県立大 (E-mail: shoji@lasti.u-hyogo.ac.jp)



写真2 レセプションが行われたデューカーレ宮殿 (Palazzo Ducale) 内部.



写真3 右手の長い建物の先端に会議場 (Magazzini del Cotone) がある. 出席者は写真奥 (太い栈橋状の地形の先端で、突き当たりの海の近く) まで延々と歩かなければならない. 左の建物は駐車場になっている.

生まれ、2名の Best Student Poster Prize 受賞者の一人には KEK 総研大の Yanuja DIXIT 氏 (発表タイトルは “Digital Acceleration scheme of the KEK-All Ion Accelerator” で指導教員は高山健教授) が選ばれた (写真5). 一般の European Physical Society Acceler-



写真4 2階席から見た大会議場. パラレルセッションは2会場で、中央部分で区切って会場とする.



写真5 ポスター発表は3つの階に分かれて行われた. 写真は最上階で、木造の屋根裏が見える.

ator Group Accelerator Prize 受賞者は以下であった. The Frank Sacherer Prize; Viatcheslav Danilov (ORNL/SNS) The Gersh Budker Prize; Norbert Holtkamp (ITER, formerly ORNL/SNS) The Rolf Wideröe Prize; Alex Chao (ORNL/SNS)

Proceedingsはこの原稿を書いている時点(8月)で、既にJACoWで検索可能となっている. この稿のゲラ刷り校正は9月末に行われたが、この時点で既に古い印象を与える報告(LHCのコミッショニングなど)もある. この点についてもご容赦願いたい.

## 2. リングコライダー関連 (菊谷)

EPAC2008の初日6月23日の最初の招待講演はCERNのF. Bordry氏による“Status of LHC”であった。LHCは様々な障害を克服し、この夏頃にビームコミッションングに突入することを目指して最終段階の準備を行っている。講演者は、まだ全てが終わってはいないものの、もうゴール寸前にいるという安心感(自信)をもちながら、ここ約一年の様々なトラブルを紹介し、それがどのように解決されてきたかを説明していた。LHCに関してはこの二日後にJ. Dainton氏による電子と陽子の衝突実験の検討が解説された。将来、LHCリングに蓄積された陽子と線形加速器などによる100 GeVオーダーの電子を用い、e-p衝突の方式を検討している。HERAが停止した今、この方面の物理に興味をもつ実験家もそれなりの人数がいるようである。

電子・陽電子コライダーについては、約2か月前に運転を終了したPEP-II (SLAC)の運転のレビューをJ. Seeman氏が行った。同じB-factoryであるKEKBでのcrab空洞を使ったオペレーションについてはKEK船越氏が発表した。KEKBでは二つのビームを正面衝突させているPEP-IIと異なり、有限角度での衝突を行ってきた。昨年crab空洞をインストールし、バンチを回転させて実質的に正面衝突させる方式の運転をしてきたが、実際にビームを使ってこのcrab空洞の効果を研究した成果が発表された。また、ハードウェアの立場からKEK細山氏が、crab空洞の開発過程の発表を行った。

さらに、B-Factory関係では、フラスカーティのP. Raimondi氏がイタリアで建設をめざしているSuperB計画の話をした。この案によれば、今まで正面衝突か、浅い角度の衝突に限られていたビーム衝突を大きな角度とし、予想される共鳴を衝突点両側に設置された六極磁石の効果で緩和し(crab waistと呼ぶ)、極端に小さなビームサイズでルミノシティを稼ごうというものである。DAΦNEリングで行ったこの方式の予備実験の説明もあった。

電子・陽電子加速器については、このほかに北京のBEPC-II (tau-charm領域のコライダー)とロシアのVEPP-2000の発表があった。BEPC-IIは今年のPACの頃にコミッションングは始まっていたが、今回の講演では衝突点近くに磁石を設置した後の、コライダーとしての本格的なコミッションングが紹介された。また、ロシアのVEPP-2000では今まで試みられなかったことのない、丸いビーム(断面が丸い電子・陽電子)

の衝突実験が説明され、ロシアの同種の加速器と比較でルミノシティが上がったことが報告された。

LHC以外のハドロンの加速器としては、Tevatronの発表があり、ビーム・ビーム効果で失われる陽子ビームを「電子レンズ」で救うという話が興味深かった。これは非常に低いエネルギー( $\beta=v/c \ll 1$ )の電子のビームをリングのある場所で陽子ビームにあて、これによるチューンのずれで、陽子のロスを減らそうというもので、はっきりと陽子ビームの寿命が延びているデータが示された。

## 3. リニアコライダー関連 (佐伯)

リニアコライダー(ILC)関連では、初日の招待講演にて、KEKの山本明氏がILCのプロジェクトマネージャーとして、ILCのライナック用超伝導空洞の開発の現状を“Co-ordinated global R&D effort for the ILC linac technology”と題して講演した。ILCのライナックにおける運転加速勾配は、基本設計として31.5 MV/mと規定されている。DESYのTTF/FLASHにおけるEURO-XFELのライナック超伝導加速空洞の開発において、その運転加速勾配である23.5 MV/mでの量産化技術がほぼ達成され、現在、その技術は25~28 MV/mの付近までできていることが示された。また、ILCの研究開発は、2007年のReference Designから、Technical Design Phase 2008-2012に移行し、さらなる超伝導加速空洞技術の進展が期待されている。このために、温度計による超伝導空洞のクエンチ箇所の特定制と、京都大学とKEKが共同で開発した高解像度光学カメラによる空洞内面の検査による診断を基に、空洞の内表面を再処理することで量産化の歩留まりを上げる計画が示された。これらの研究開発は、DESY/Saclay/FNAL/ANL/JLab/KEKなどが核となり、さらに各国の大学が連携し、完全に国際的な研究体制で進められていることが強く印象付けられた。これに関連し、3日目のオーラルセッションで、京都大学の岩下氏から、高解像度光学カメラの開発の現状が報告された。また、4日目の“Linear Colliders, Muon Accelerators and New Acceleration Techniques”と題したセッションでは、KEKの田内氏からATF2の現状報告、CERNのG. Geschonke氏からX-bandに移行したCLICの研究開発の現状報告、さらにアメリカでMuon Inc.なる企業を立ち上げたR. P. Johnson氏から、アメリカにおけるMuon Acceleratorの研究開発の現状報告があった。Muon Acceleratorは、直接ILCには関係ないとはいえ、この講演では、FNALの次期将来計

画である Project-X の延長線上に、ILC というよりは、むしろそれを飛び越えて Muon Collider があると言いたげな内容で、Muon Accelerator 開発者の意見とはいえ、ILC 関係者としては多少の驚きがあった。また、ILC に関連して、印象に残った講演として、3 日目のセッションで、“Prospects for a Large Hadron Electron Collider (LHeC) at the LHC” と題した J. Dainton 氏 (Cockcroft Institute) の講演で、LHC の拡張計画の 1 つとして、LHC を利用した e-P Collider の可能性について報告があった。この計画では、電子を加速するために、LHC トンネルを利用する方法と、EURO-XFEL で開発された超伝導加速空洞技術を使い、電子ライナックを新たに建設する方法があり、ライナック建設の方法であれば、これを延長すれば ILC にもなりうる構想であった。実現には多くの困難が伴うと考えられるが、DESY を中心としたヨーロッパにおける e-P Collider コミュニティーの強い意思表示が伝わる講演だった。ポスターセッションでは、これらのトピックスについて、さらに詳しい報告を聞くことができた。印象的だったことは、昨年末のアメリカでの ILC 予算削減などがあったにも関わらず、ILC を含む Future Technology 関連のポスターセッションでは、セッション終了の時間が過ぎても、若者がセッション会場に残って盛んに議論を続け、熱気に満ち溢れていたことである。ILC Global Design Effort (ILC-GDE) などに属する責任のある立場の方たちが、ILC に対して総じて深刻であったのとは対照的に、若者は将来の加速器技術に熱い希望を持っていることが感じられ、ILC はこれらの若者たちが成し遂げるのではないかと感じた次第であった。

#### 4. 放射光用電子線型加速器 (大竹)

放射光用電子線型加速器は、従来はリングの入射器という役割が一般的であった。しかし EPAC に限らず他の国際会議での状況から見ても、入射器という意味での発表は非常に少なくなっているという印象である。それは、電子線型加速器が FEL (自由電子レーザー) や ERL (エネルギー回収型リニアック) 技術の登場で光源加速器そのものになっているという事で、今回の EPAC に参加させていただいてより確かに感じた点である。

リニアックの高周波関連では超伝導空洞に関する発表が主であった。超伝導の視点で見れば、FEL や ERL も ILC (リニアコライダー) と技術を共有しているので、区別するのがちょっと見には難しい感じがする。加えて、レーザー駆動の高周波電子銃が、やは

り前記の 3 つの線型加速器の電子源として標準となりつつあるようで、この 2 つの技術に関連した発表が多かったように思った。しかしながら手前味噌になるが、6 月 25 日 (水) 午前の 1 番のセッションで Rene Johan Bakker (PSI, Villigen) 氏の“Overview of VUV and Soft X-Ray FELs Worldwide” の発表を聞いた後は、少し考え方が変わった。この発表では世界の FEL 源を紹介していたが、思いのほか常伝導空洞を使用した計画が多い印象を受けた。またこの関連の多くの施設では、レーザー駆動の高周波電子銃を使用していることも再確認できた。この 2 つの組み合わせは、既存のリニアックを転用することや常伝導空洞が超伝導と比較して安価であるなどの建設コストを考えた時には、合理的なのかと思われた。この点に関しては、筆者の参加している日本の XFEL 計画は独自で、5712 MHz の常伝導空洞と 500 kV の CeB6 単結晶の熱電子銃を使用している。コスト面と安定性を理解していただければ、我々の方式の更なる普及も可能になるのではないかと思う。

もう一つ印象深かったことは、FEL や ERL などの安定性の良いリニアックが必要とされることから、実際にリニアックのビームの時間ジッタやエネルギージッタ、エミタンスなどのパラメータが詳細に測定されるようになった点である。たとえばスタンフォードの LCLS や我々の SCSS 試験加速器では、50 fs 以下の加速高周波とビーム間の時間ジッタが測定されている。また安定度では、先にのべた 50 fs 以下の時間ジッタが実現して、 $10^{-4}$  程度のエネルギージッタもほぼ可能になり、 $1 \pi \text{ mm} \cdot \text{mrad}$  以下の規格化エミタンスも現実化していると言っても過言ではない。リニアック単体で得られるこのような性能は、十数年前には考えられないもので隔世の感がある。これは、我々が持つ FEL, ERL, ILC の実現への強い動機づけの賜物と言える。

さらにこの動機付けから、我々はビームの質により高いものを必要するようになった。そのためにビームの縦方向の構造を詳しく知り、その構造をも制御することが求められるようになっている。これは、たとえば FEL の発振に寄与するバンチ内のピーク電流が大きい部分のスライスエミタンスを良くするなどである。このようなビームのバンチ内構造を知るためには、1960 年代の SLAC などで原型 (LOLA) が開発された古くて新しい技術である RF ビームデフレクター空洞の研究が、近年、盛んになっていることがある。今回の EPAC でも、我々も含めていくつかのこれに関連した発表があった。驚かされたのは、X バンドの

HEM11 後進波管のデフレクターの開発に関する発表があったことである。これは、内部の高周波の偏向の変化を抑制するための機構であるビームホールの横の小さな穴に関する加工を考えると、驚くべきことである。これは、Alex Murokh 他“Design and Fabrication of an X-band Traveling Wave Deflection Mode Cavity for Longitudinal Characterization of Ultra-short Electron Beam Pulses”に書かれている。加えて、FEL などのフェムト秒領域の電子ビームのバンチ幅や構造を評価するために、通常レーザー光（たとえば 800 nm 領域）を電気光学結晶に通しておき、ビームの電場でその結晶の偏光方向を変えて、通過レーザーにビームパルス幅に比例した変調をかけるモニターが開発されつつあった。また、OTR, CSR などの光学的なビーム診断方法に関する多くの発表も目立った。

以上、筆者の趣味で取り上げたような項目であるが、他の会議も含めて今回の EPAC でも、放射光用電子リニアックに関して高品質ビームを得るための研究が目白押しといった感触であった。

## 5. リング型放射光源 (阪井)

海外のリング型放射光施設、特に第3世代放射光源の現状と次世代光源の一つである Energy Recovery Linac (ERL) 計画の現状について報告する。

最近建設し、稼動中のリング型加速器では第3世代型光源加速器として、Diamond (英), SOLEIL (仏) などがあり、それらの review がまず R. Bartolini から行われた。Diamond (3 GeV, 周長 562 m) では現在ビーム電流が前年に比べ、漸く設計値の 300 mA (マシンスタディのみ) まで達成し、ユーザー運転として 200 mA を提供している。ビームエミッタンスは設計値の  $2.7 \text{ nm} \cdot \text{rad}$  を達成した。SOLEIL (2.75 GeV, 周長 354 m) でもビーム電流が設計値 500 mA に対し、300 mA まで伸ばし、またビームエミッタンスについても設計値  $3.7 \text{ nm} \cdot \text{rad}$  まで達成しており、順調に稼動している様子が伺われた。また今年新たに commissioning が行われた SSRF (中国) について、Z. T. Zhao から発表が行われた。SSRF (3 GeV, 周長 432 m) の storage ring は 2007 年 12 月に commissioning が行われ、現在、3 GeV のフルインジェクションにて 100 mA まで蓄積されているとの報告であった。残念ながら、超伝導空洞が間に合わず、現在は KEK-PF から常伝導空洞 3 台を借りて、運転しており、この秋以降に超伝導空洞を 2 台入れ、200 mA を目指すとのことである。

個々の光源の現状の話に対し、最近の第3世代放射光源に関する topic として、SPring-8 の大熊氏からまずは世界の放射光源における top-up 運転の review が行われた。世界最初には SORTEC (日本) にて top-up 運転が行われたとのことだが、実際の user 運転としては、第3世代光源 TLS (台), APS (米) にて入射スキームの改良などを行い、特に APS では現在、入射効率ほぼ 100% の top-up 運転を実現している。また近年では 2001 年に commissioning が始まった SLS (スイス) のように建設から Top-up 運転を考慮した設計を行うことで、入射効率 90-100% にて電流安定性  $\pm 0.3\%$  を達成し、user に対し、非常に安定した光を供給している。日本でも SPring-8 が 2004 年に top-up 運転への改良を行い、いまや世界の第3世代光源において top-up 運転は standard となりつつあるとの現状が報告され、非常に興味深い講演であった。なお、top-up 運転において一番の心臓部は蓄積リングへの入射スキームであるが、最近、bump 軌道による入射ではなく、パルス四極電磁石やパルス六極電磁石による入射を行うことで、蓄積ビームに影響を与えない入射スキームについてそれぞれ PF-AR と PF リングで成功しているとの結果報告があり、これも非常に興味深いものであった。もう一つの興味深いというか気になった topic としては、第3世代光源に用いられているビーム診断システムの review が G. Rehm から行われたが、近年建設された Diamond, SOLEIL さらに SSRF において BPM の回路部には独自では開発せず、Instrument Technologies 社により開発された LIBERA という FPGA を用いた Digital BPM が用いられ、非常に高い分解能と 1 kHz 程度の速いフィードバックにて sub ミクロンでの軌道安定化を達成しているとの現状が報告された。今後、ALBA (スペイン) や PETRA-III (ドイツ) でも用いられるとのことであるが、全て市販で済ませて、BPM 回路の独自開発が無くなりつつあることに対し、筆者としては危惧を感じる部分もあった。

次に次世代光源である ERL について現状を述べる。一番印象に残ったのは口頭発表こそなかったが、Cornell 大学 (米) にて大電流運転に向けての ERL の入射器試験器の commissioning が行われていることであった。最大 100 mA で 5.5 MeV の運転を行うのであるが、現在までに入射器用の電子銃の単体の試験までは終わり、現在、buncher と 2cell の超伝導空洞 5 台分のクライオモジュールに繋ぎこまれ、冷却後の横測定を行っているとのこと、8 月にビーム運転を開始するとのことであり、どれくらいの電流運転

が出来るかが非常に興味深いところである。一方イギリスの Daresbury にある ERL prototype (ERLP) については D. J. Holder から報告あった。ERLP はさらに加速器とレーザーの統合施設として ALICE (Accelerators and Lasers in Combined Experiments) と命名された。電子銃は pulse であるが現在 350 kV の電圧まで達成され、非常に電荷量が低いところでは 1 mm·mrad 程度の規格化エミッタンスを達成しているが、電荷量が高い 80 pC ではエミッタンスが増大する現象が見られており、まだ study が必要という状況である。その他、日本からも ERL 関係の発表が多数見られた。

その他、MAX-IV (スウェーデン)、NSLS-II (米) など 1 nm·rad を切る超低エミッタンスを目指す放射光源の話などがあったが、現在詳細設計を進めつつ、周長と Lattice の選択により超低エミッタンスを目指すが、dynamic aperture の確保や Touscheck lifetime の最適化、damping wiggler の導入を行っているという段階であった。

## 6. ハドロン加速器 (金正)

今回 EPAC に参加して、「ハドロン加速器の分野が元気だ!」と感じた。理由を考えてみたが、以下のようなことではないかと考えられる。

核破砕パルス中性子源として、米国 SNS が約 3 年前からビーム試験を開始し、順調にビーム強度を増加させ、500 kW 以上 (設計は 1 MW) のビームを既にユーザーに供給している。さらに、J-PARC の 3 GeV シンクロトロンが昨年 10 月に 3 GeV の加速に成功し、既に現在 1 パルス当たりのビーム出力においては、3 年先行している SNS と同等までの成果を

上げていることが報告された。SNS は蓄積リング (AR) 方式、J-PARC は速い繰り返しのシンクロトロン (RCS) 方式と、それぞれ異なる方式の加速器を採用している。今後熾烈な国際競争が行なわれるものである。さらに、この分野での先駆者である英国の ISIS でも加速器の大幅な改造を伴った大強度化の計画案が発表された。

別分野のフロンティアで、素粒子実験の分野で世界的な注目を集めているものの 1 つである CERN の LHC についても発表が多数あった。従来の加速器の到達エネルギーを遥かに越える巨大な加速器で、未知の素粒子や現象の発見が期待されている加速器である。今年の夏からビーム調整試験が開始される旨が発表され期待に胸躍るものである。

今回の会議では、従来のシンクロトロンとは違う手法を用いた加速器についての発表も多かった。例えば、原理自体は 50 年以上前に提唱されていたものの、シンクロトロンの隆盛の陰でほとんど省みられることがなかったが、10 年ほど前から日本で開発が始まった FFAG 加速器について、今や世界各国で実証機及び新たな建設計画が持ち上がるほどになっていた (ちなみに、2000 年での EPAC ではたった 1 件の発表であったが、今回は 26 件もの発表がなされた)。シンクロトロンを越える速い加速と大きな運動量分散を持つビームを受け入れる能力で、ミューオンやニュートリノといった分野のための加速器として脚光を浴びている。

以上のように、ビーム増強が順調に推移しているもの、新たにビーム試験が始まったもの、そして、まもなく開始されるもの、等、ハドロン加速器は新しいものに挑戦している活気に漲っていると感じた。