

## 会議報告

## IPAC'16 会議報告

中村 衆<sup>\*1</sup>・渡部 貴宏<sup>\*2</sup>・芝田 達伸<sup>\*3</sup>

## Reports on the 7th International Particle Accelerator Conference (IPAC'16)

Shu NAKAMURA<sup>\*1</sup>, Takahiro WATANABE<sup>\*2</sup> and Tatsunobu SHIBATA<sup>\*3</sup>

## 会議概要 (中村)

5月8日から13日にかけて第7回加速器国際会議 (IPAC'16) が韓国の釜山で開催された。今回は30カ国から1270名の参加者があり、98件の口頭発表と1313件のポスター発表、および86の企業と15のNPOのブースが出展された。これらの発表のPre-press ProceedingsはIPAC'16のウェブページに掲載されている<sup>†1</sup>。写真1は会議および懇親会の会場となったBusan Exhibition & Convention Center (BEXCO) である。

8日の午後は恒例となっている学生ポスターセッションが開かれ、優秀なポスターは12日の午後に表彰された。翌9日はMain hallにおいてConference ChairのW. Namkung氏 (PAL) の開会宣言から始まり、午前中はILCの現状報告、PAL-XFELのコミッションング、MAX-IVのコミッションング、Laser wakefield 加速の展望、ビー

ムオプティクス計測と補正に関するレビューの4件のPlenary Oralが行われた。その後は基本的にMain hallとHall Bの平行セッションとなった。

ポスター発表はConvention Hallの1階と3階が会場で(2階にHall Bがある)9日から12日の毎16時から18時がコアタイムに当てられた。ポスターの掲示は当日の午前10時半までに行うことが推奨されていた。会場となったホールは二つとも十分に広いものであったが、中央部に企業ブース、外周部にポスター発表用の2列のパネルという配置のためかポスター周辺の混雑が気になった。

前回の第6回会議において配布されたモバイルアプリは今回も作成、配布が行われた。会場のネットワーク環境は良好で、IPAC'16専用のSSIDがアナウンスされたほか、会場(BEXCO)の公衆無線LANも利用できたため、インターネットに接続できないということは少なかった。



写真1 会場となったBusan Exhibition & Convention Center (BEXCO)。左端のAuditorium BuildingがMain hallとなり、そのとなりのConvention HallがHall Bおよびポスター会場となった。右端の木立の向こうに懇親会会場のExhibition Center 2がある。会期中、中央のExhibition Center 1では他の展示会が開催されていた。

\*1 高エネルギー加速器研究機構 KEK (E-mail: shu.nakamura@kek.jp)

\*2 高輝度光科学研究センター JASRI (E-mail: twatanabe@spring8.or.jp)

\*3 高エネルギー加速器研究機構 KEK (E-mail: tatsunobu.shibata@j-parc.jp)

†1 <http://www.ipac16.org/proceedings/index.html>

今回の学生に対するサポート制度の利用者は、アジアから 38 名、アメリカから 12 名、ヨーロッパから 26 名であった。

### 放射光関連 (渡部)

今回、放射光関連における注目の 1 つは PAL (Pohang Accelerator Laboratory) の 10 GeV XFEL のコミッショニング状況であり、Plenary Session にて J. H. Han 氏から「Beam Commissioning of PAL-XFEL」が発表された。その中で、PAL-XFEL は 2016 年 4 月 14 日にコミッショニングを開始し、その 12 日目にあたる 4 月 25 日にはフルエネルギーの 10 GeV まで加速された旨、報告された。現在、レーザーフォトカソード電子銃の調整等、入射部および線型加速器の最適化が進行中であり、今後、5~6 月にアンジュレータの調整、6 月以降に硬 X 線領域の SASE 発振、その後、軟 X 線の SASE 発振を計画しているとのことであった。

続いて、MAX-IV のコミッショニング状況について M. Eriksson 氏より発表された。スウェーデンの MAX-IV とブラジルの Sirius は、マルチバンドラティスによる次世代放射光源の先駆的な存在であり、特に MAX-IV はハードウェアを含めたトータル設計に様々な新規アイデアを組み込んでいるため、コミッショニングの動向が注目されている。発表では、2015 年 9 月に 0.1 mA を蓄積し、11 月に“First light”を観測、2016 年 1 月末には 120 mA まで蓄積した旨報告され、併せて、クロマティシティ、寿命、入射効率等、現在行われているビーム評価の途中経過が示された。また、ここまでに生じたトラブルリストが示され、これまで磁石電源、RF 空洞等にトラブルがあり、これらのトラブルがビーム調整に影響を与えていることについて言及された。全体的に順調だという報告であったが、会場からは、蓄積電流が 120 mA から数ヶ月間上がっていない理由などに質問が及んでおり、今後も動向が注目される。

その他、Plenary Session 後に複数の会場で並行して行われた Oral Session、および Poster Session では、ESRF のアップグレード計画 (P. Raimondi 氏)、SPring-8-II 計画 (田中均氏)、Sirius 計画 (L. Liu 氏)、回折限界光源のための設計概論 (Diamond の R. Bartolini 氏) 等、次世代光源開発に関する口頭・ポスター発表が多数行われ、昨今、次世代

放射光源開発が世界各地で盛んに進められている状況を反映する発表内容となっていた。今回の IPAC は口頭発表に対して会場からあまり活発な質疑応答がなかったという印象だったが、これらアップグレード計画に関する発表については、比較的多くの質問があったように思えた。例えば、ESRF のアップグレード計画では、低エミッタンス化によって狭くなるダイナミック・アパーチャに既存のブースターから入射して問題ないか、という質問があり、発表者の Raimondi 氏からは、ブースターのエミッタンスを約半分にする計画が進行中である旨、回答されていた。

現状の次世代放射光源の流れとは異なる話としては、A. Chao 氏 (SLAC) より、高いピークパワーではなく高い平均パワーを持つリング型放射光源を目標とした“Steady-state micro-bunching (SSMB)”に関する発表があった。これは、光共振器内にセットされた“Modulator”で電子にエネルギーモジュレーションを掛け、 $R_{56}$  でマイクロバンチング後、“Radiator”によってシングルパスでコヒーレントな光 (ただし、FEL ではない) を放射し、もう一度  $R_{56}$  と Modulator で元に戻すことで“Steady-state”を保持する、というのが基本コンセプトのようである。具体的な手法としては、いくつかの実験体系が想定されることに言及されていたが、いずれにしても実現のためにはハードウェアも考慮した上でより詳細な議論が必要だろう。

放射光源の高度化実現に向けた各要素技術の課題についても多数発表された。一例を挙げると、次世代放射光源ではダイナミック・アパーチャが狭いため、従来の Off-axis 入射を用いる場合に入射効率をどのように高めるかが 1 つの課題となっている。これに対し、入射点におけるダイナミック・アパーチャとセプタム壁の間に存在するアクセプタンスの位相空間分布に最適化した入射ビーム整形を行い、入射効率を高める手法が P. Kuske 氏 (ドイツ HZB) により紹介された。具体的には、カップリング共鳴やスキュー 4 極を用いる手法をいくつか提案し、これらについて 1 つずつ詳しく説明していた。その他、ベータatron 振動の位相進みを計測することでラティス関数を修正する手法 (NSLS-II の W. Guo 氏)、Dog-leg と Deflecting cavity を組み合わせて Transverse 方向と Longitudinal 方向の電子分布を交換し、

Longitudinal 方向の電子分布を所望の分布に整形する手法 (POSTECH の G. Ha 氏), Low Level RF (LLRF) の位相を一瞬で飛ばすことで蓄積ビームに Longitudinal 方向の振動を誘起し, これを用いて Momentum aperture の計測等に用いる手法 (NSLS-II の G. Wang 氏) 等々, 様々な提案が発表された. その他, クライオアンジュレータをはじめアンジュレータの開発に関する発表もいくつか見られた.

国内からの発表としては, UVSOR-II でヘリカルアンジュレータから発生する光渦の実験結果に関する口頭発表 (名古屋大の保坂氏), 筆者による SPring-8-II の磁石開発に関する口頭発表 (JASRI/RIKEN), コンパクト ERL に関するポスター発表 (KEK), KEK-PF のアーク部を改良することでエミッタンスを現状の  $35.4 \text{ nm} \cdot \text{rad}$  から  $8 \text{ nm} \cdot \text{rad}$  程度まで小さくする案に関するポスター発表 (KEK の原田氏) 等, ここでは書ききれない多数の発表が行われていた.

### ハドロン加速器関連 (芝田)

ハドロン加速実験は主に標的実験と衝突実験に分類できる. 標的実験は二次粒子をより多く生成する事が必要であるため標的へのビームパワーが重要である. 衝突実験はビーム同士の衝突数が重要なのでルミノシティが重要である. 幾つかの発表を標的実験, 衝突実験の順に簡単に紹介していく.

LANSC は 2015 年に  $\text{H}^+$  ビームの繰返し頻度を 60 Hz から 120 Hz への増強に成功した. 増強した 60 Hz 分のビーム供給先は IPF (40 Hz  $\rightarrow$  100 Hz) と WNRF (40 Hz  $\rightarrow$  100 Hz) である. 繰返しは 2 倍になったが 800 MeV-Linac と 800 MeV の陽子ビーム蓄積リングでのビームロスを実験前と比較してそれぞれ 64%, 54% に軽減させる事に成功した.

SNS では 2015 年には 1.4 MW の安定維持供給に成功し, 供給エネルギーの総量は  $3 \times 10^4 \text{ MW} \cdot \text{hr}$  を超えた. 今後ビームパワーを 2.8 MW に増強する事と第二標的施設の建設を目指す. ビームパワー増強のため超伝導加速空洞を 28 台追加する. ビームエネルギーは 1 GeV から 1.3 GeV に増強する. イオン源出力電流も増強し, RFQ も大強度用に交換する. 増強後は現在の第一標的に 2 ~ 2.3 MW, 第二標的には 0.47 MW を供給する. イオン源から MEBT までのビーム試験施設も構

築し, 交換用 RFQ, イオン源, ビーム診断の試験を行っている.

FermiLAB では長基線ニュートリノ実験のための陽子加速器のアップグレード (PIP) を 3 段階で行う. 1 段階目の PIP は 8 GeV-Booster からの陽子ビームを 15 Hz で供給し, 供給陽子数を  $2.2 \times 10^{17}$  個/hr に増強する事, NuMI への 120 GeV 陽子ビームパワーを 700 kW に増強する事である. また 8 GeV ビームパワーを 30 kW に増強する. 2 段階目の PIP-II は 120 GeV 陽子ビームパワーを 1.2 MW に増強し, 8 GeV ビームパワーを 82 kW に増強する. そのため 400 MeV-Linac を 800 MeV-超伝導 Linac にアップグレードし 8 GeV-Booster からのビーム繰返しを 15 Hz から 20 Hz に増強する. Linac 増強のための 25 MeV 陽子ビームの試験施設も建設した. そして NuMI とは別に新しい長基線ニュートリノ施設 (LBNF) も建設する. ニュートリノ検出器として FermiLAB から 1300 km の距離にあるスタンフォード地下研究施設に DUNE を建設する. 3 段階目の Beyond PIP-II としてまず 8 GeV-Booster を Pulse-Linac または RCS に交換する事が検討されている.

J-PARC では MLF への陽子ビームが  $8.41 \times 10^{13}$  ppp (25 Hz 運転で 1 MW 相当) に達した. T2K への供給ビームパワー (FX) は 395 kW に到達し, MR 内のビームロスを 940 W に抑える事ができた. 現在 FX の繰返し周期は 2.48 秒であるが 2018 年には 1.3 秒に短縮しビームパワーを 750 kW に増強する. ハドロン実験への供給ビームパワーは 42 kW に到達し, 2019 年の 100 kW を目標にアップグレードをしている. J-PARC の将来計画として, Linac は繰返しを 25 Hz から 50 Hz に増強する. 増強分ビームは ADS 用基礎研究施設 (TEF-P, TEF-T) に入射する. RCS は 1.5 MW への増強と第二標的施設の新設を目指す. MR は 1 MW 以上の増強を目指す.

ここで話題を変え, 「標的」研究についてのレビューを紹介する. 内容は標的の研究の歴史から始まった. 第一世代は固体標的であった. 固体標的の冷却方法は水冷であるため供給ビームパワーの限界は数 100 kW 程度であった. 第二世代は現在の主流である液体標的である. SNS や J-PARC MLF では標的に水銀が使用されている. 液体標的は二次粒子生成物質であると同時に冷媒にもな

る事で大強度ビーム (~ MW) を受け入れる事ができる。しかし扱いは難しく標的容器からの液体標的の漏れが重大な問題を引き起こす。他にも空洞現象により液体標的が接している容器面の破壊が起こるため容器内の液体標的は壁に沿って流れるようにし、バラバラな流れを作ってははいけない。第三世代の標的は回転型である。利点として熱負荷の分散化や残留放射線による崩壊熱の緩和が挙げられる。欠点として移動や回転駆動部や標的の交換が複雑になる。SNS で計画している第二標的は回転標的であり標的物質はタングステンを考えている。最後に RaDIATE が紹介された。米国内の機関が多く参加し有効な標的の物性データ、加速器や原子力技術への応用、新しい科学+技術者の育成、そして科学研究や産業、カーボンフリー工学での陽子加速器の応用が目的である。

最後に衝突型加速器について RHIC の発表を紹介する。

BNL の RHIC では 2007 年の Au+Au 衝突のピークルミノシティは  $30 \times 10^{26} / \text{cm}^2 / \text{sec}$  であったが 2014 年末にはバンチの強度を増強する事で  $75 \times 10^{26} / \text{cm}^2 / \text{sec}$  を達成した。更に 3D Stochastic Cooling によってルミノシティ寿命を伸ばす事にも成功した。偏極陽子衝突のアップグレードについても報告された。ルミノシティに制限を与えている主な原因の一つである head-on ビームビーム効果を小さくするためラティスを新しくした。その結果ビームビームパラメータが 1.56 倍になった。また e-lens の導入で更に 1.38 倍になった。これらの補正により 2015 年のピークルミノシティと平均ルミノシティは 2012 年に比べてそれぞれ約 2.5 倍, 2 倍になった。

### 電子加速器関連 (中村)

ILC については初日の Plenary Oral で駒宮氏による現状報告が行われた。その中で技術的な課題については、各地で進められている超伝導 RF 空洞の量産化の検討やナノビーム技術において目処がつき、次のステップとして実現に向けた予算獲得のための日本および諸外国政府機関でのレビューや議論が始まりつつあるとのことだった。要素技術の開発が順調であることは喜ばしいが、ポスターも含めた発表件数が少ないことが気になった。

電子-陽電子コライダーでは IHEP の BEPCII と KEK の SuperKEKB のビームコミッショニング

についての発表があった。2008 年から運転が始まった BEPCII では Longitudinal Instability に悩まされてきたが、Longitudinal feedback system の導入によってそれを解消するなど改良を重ねることによって 2016 年 4 月 5 日にデザイン値である  $1.0 \times 10^{33} / \text{cm}^2 / \text{sec}$  を達成した。BEPCII はコライダーとしてだけでなく、放射光施設として 14 のビームラインも整備されている加速器である。放射光施設としては 2015 年 10 月にトップアップ運転を実現している。

また 2016 年 2 月から開始された SuperKEKB のビームコミッショニングについては、蓄積電流が 4 月末時点で電子リングでは 590 mA, 陽電子リングでは 650 mA まで達成したこと、真空チェンバーの入れ替えを行った陽電子リングでビーム電流に対して非線形な真空度上昇が発生していること、Optics correction の現状についての報告があった。現在わかっている外乱要因はアボート用 Lambertson Septum の漏れ磁場で、これを補正するための方法を検討している。

真空焼きや Optics study を行う Phase1 は 6 月で終了し、衝突実験を行う Phase2 に向けて衝突点の超伝導電磁石群や BelleII 検出器のインストールを 2017 年 10 月まで行う予定である。

今回の IPAC ではレーザープラズマ加速の発表が多かったように感じた。初日の Plenary Oral で LBNL の W. Leemans 氏によるプラズマ加速の可能性に関する発表では、冒頭で CERN の次期 Director-general が雑誌 Nature に発言した「高エネルギー加速器は重要だが、加速器技術の R&D を行い、コンパクトな加速器で高エネルギーに到達すべき」という主旨の言葉を紹介した上で、プラズマ加速の可能性と課題を示した。また CERN の C. Bracco 氏の発表では AWAKE (Advanced WAKE field Experiment) collaboration について、施設建設が進められていることと、2016 年 9 月から CERN の Super Proton Synchrotron (SPS) からの陽子ビームを利用したプラズマセルのコミッショニングを始め、2018 年には電子ビームを入射した physics run を目指すとあった。上記以外にレーザー励起ではないが、Argonne で計画されている電子ビーム励起による Plasma wake field acceleration を利用した電子-陽電子 Linear collider の R&D についての発表があった。