

会議報告

IPAC'11 報告

本田 融^{*1}・池田 仁美^{*2}・丸田 朋史^{*3}

Report on Second International Particle Accelerator Conference (IPAC'11)

Tohru HONDA^{*1}, Hitomi IKEDA^{*2} and Tomofumi MARUTA^{*3}

第2回世界加速器会議 (IPAC'11) はスペインのサンセバスチャンで2011年9月4日から9日に開催された。サンセバスチャンはフランス国境まであと15キロほどにせまる、ピレネー山脈の麓、バスク州の港湾都市である。数kmにわたって弧を描く美しいビーチを持つ、高級保養地として知られる。9月にはいって日中の気温は30度を少し下回る程度であったが波の穏やかなビーチには日が暮れるまでたくさんの海水浴客があり、学会の開かれた会場もサーフィンを楽しむ人がみられるビーチに面した、とても景色の良い場所であった (図1)。

スペインでは周長270m、エネルギー3GeVの第3世代放射光源ALBAが運転を開始しており、2011年6月にリングのコミッションが完了し、2011年後半に挿入光源やビームラインの立上げを行い、2012年春

よりユーザー運転を開始する予定であることがオープニングのPlenary SessionでD. Einfeldの講演で報告された。ALBAはカタルーニャ地方のバルセロナ近郊にあり、サンセバスチャンからは500kmあまり隔たった場所にあり、学会のスケジュールには施設見学は企画されていなかった。

ESS (European Spallation Source) プロジェクトに関してPlenary SessionでC. J. CarlileとS. Peggsによる2件の講演があった。ESSはEU加盟17カ国が参加し、スウェーデンのルンド市近郊に計画している陽子加速器施設である。サンセバスチャンの隣にあるバスク地方の随一の都市ビルバオはESSの建設候補地として最後まで競っていたが、2009年にスウェーデン、ルンドにあるMAX-IVに隣接するサイトでの建設が決定されたそうである。2000億円近くにのぼる建設費用の半分をスウェーデン、デンマーク、ノルウェイなどの北欧各国が分担して支出する計画である。

ESSでは陽子ビームをタングステン標的に照射し、核破砕反応によって中性子ビームを生成する。加速器の性能は5MWの長パルス(2.86ms)陽子ビームで、繰り返し周波数14Hzである。スケジュールは2012年末に技術設計報告書を提出、2014年から建設を開始し、2019年に最初の中性子ビームを生成する予定である。その後徐々にビーム強度を向上させ、2025年までに設計性能を達成する予定である。

陽子リニアックの構成は、75keVの陽子イオン源、3MeVのRFQ (radio frequency quadrupole)、50MeVのDTL (drift tube linac)、それ以降は超伝導加速器に切り替わる。超伝導空洞は3種類のベータが異なる空洞を採用しており、ベータが0.57のスポーク型で



図1 IPAC'11の会場となったSan SebastianのKursaal Congress Centre.

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

*2 高エネルギー加速器研究機構

*3 日本原子力研究開発機構

188 MeV, ベータが 0.70 と 0.90 の楕円型でそれぞれ 606 MeV, 2.5 GeV まで加速する. RF 周波数はスポーク型空洞までが 352.21 MHz で, それ以降は 704.42 MHz である. J-PARC (Japan Proton Accelerator Research Complex) のリニアックと比較すると, 加速電荷の正負は異なるが 50 MeV DTL までは近い構成になっている. しかしそれ以降では, J-PARC が引き続き常伝導で 181 MeV (アップグレード後は 400 MeV) まで加速するのに対し, ESS は超伝導を採用しており, この設計の違いが対照的で興味深かった. この計画で特徴的なのは, 環境負荷の抑制を重要視している点にある. 建設予定地であるスウェーデンは環境先進国として有名だが, ESS プロジェクトも, その方針に沿った取り組みがされている. 具体的には, 消費電力の一部を近郊に建設する風力発電所から供給する, 加速器運転中に発生する温水を近郊の工場や住宅の暖房に再利用すること等が検討されている. これらにより, 年間 100 GWh の消費電力削減と約 16 万 5 千トンの二酸化炭素の削減できるようだ. 現在は 2012 年末の技術審査報告書提出に向けた作業を進めており, 主に各構成要素の設計作業に注力しているようである. 実際, ポスターセッションでは 17 の発表があり, そのほとんどが HOM (higher order mode) カプラー形状の検討状況等, 設計に関連した内容だったことから, 設計が順調に進捗している印象を受けた.

同じくルンドで建設が進んでいる MAX-IV はユニークなデザインを持つ第 3 世代放射光リングである. M. Eriksson による “The MAX IV Synchrotron Light Source”, M. Johansson による “MAX IV 3 GeV Storage Ring Prototype Magnet”, E. Al-Dmour による “Vacuum System Design for MAX IV 3 GeV Ring” など多数の発表があった. 同じ施設内に周長 96 m の 1.5 GeV リングも同時に新設される. 周長 528 m の 3 GeV リングのラティスは 20 回の 7-bend achromat からなり, 水平エミッタンスは 0.3 nm rad である. 3 GeV リングの電磁石は他の放射光リングではあまり例を見ないユニークな設計である. 先代の 700 MeV リング MAX III のデザインを進化させたものであるが, 1 台の偏向電磁石と 2 台の四極電磁石が一つの鉄のブロック上に削り出して製作され, また六極電磁石 1 台や八極電磁石 3 台, 補正電磁石 2 台もそれと同一の鉄ブロック内に組み込まれ, 個別にアライメントを必要としない構造となっている. これらの電磁石が組み込まれる一つの鉄ブロックは全長が 1.8 m とコンパクトである. 電磁石のボア直径も 25 mm と小さく, 真空ダクトには内径 22 mm の円形無酸素銅管を用いる. ダク

トの内径が小さいので真空のコンダクタンスが小さく, 効率的な排気をする上で問題となるが, 曲線部も含めてリング全周のビームダクト内面に NEG (non evaporable getter) コーティングを施し, 徹底した分布排気を行って圧力を十分低く保つ設計である. ビームダクトは必要なベーキングや NEG ポンプの活性化をすべて完了し, 超高真空を保持した状態でリングに設置する構想である.

CERN の M. Lamont により, 2008 年にコミッショニングを開始した LHC (Large Hadron Collider) についてこれまでの運転報告があった. 2008 年の 8 月から 9 月にかけての一連の入射試験で, 制御ソフト, 入射プロセス, 電磁石の極性試験等が行われ, アパーチャの確認, ビーム計測の機能性確認, オプティクス測定も無事終了していた. 9 月 10 日にはビームがリングを 1 周する様子が広く公開されたが, 9 月 19 日の事故によって LHC 実験は中断されてしまう. 2009 年のほとんどは事故のあったセクター 3, 4 の広範囲な修理に費やされた. 特に超電導電磁石のクエンチプロテクションシステムの高度化高速化に力が注がれ, 問題のあった接合部についての理解も深まったが, いまだにその内部接合部分についての懸念からビームエネルギーは 3.5 TeV に制限されている. ビーム運転が 2009 年 11 月 29 日に再開された後はクリスマスシャットダウン前に 450 GeV での安定したビーム衝突が確立され, 当時の最大エネルギー 1.18 TeV へのランプもうまく行った. 2010 年は 2 月 19 日に運転を開始し, 3 月 30 日にメディアの前で 3.5 TeV の衝突ビームを公開した. その後 4 箇所にあるすべての実験で β^* (衝突点の β) を 2.0 m まで絞った衝突実験, 予定のバンチ強度での物理ラン, 更にビーム強度を段階的に上げた後はバンチトレインでの運転へと移行した. 11 月には入射ビームを陽子から鉛イオンへ変えて, ピークルミノシティ $3 \times 10^{25} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$, 積分ルミノシティ $9.7 \mu\text{b}^{-1}$ を蓄積するランも行った. 2011 年は 2 月 19 日に運転を開始し, 3 月 21 日までにピークルミノシティは $1 \times 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ に到達, バンチ数を 1380 まで増やした運転では $2.4 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ を達成し, 24 時間当たり 90 pb^{-1} のルミノシティを蓄積できた. 夏の会議までには年間の目安である 1 fb^{-1} の積分ルミノシティを蓄積でき, 運転は順調に進んでいる.

ILC (International Linear Collider) については M. Ross による “Present Status of the ILC Project and Developments” と題するレビュー講演があった. ILC の最新の設計, コスト評価, 推進計画, 研究開発動向を含むテクニカルデザインレポートが 2012 年を目処に

まとめられる予定である。最も重要な要素であるニオブ製超伝導空洞の加速勾配には大きな進歩が見られ、縦測定では 35 MV/m を超える値が実現されている。実機の加速勾配はかねてより 31.5 MV/m と定められているが、製造上のばらつきやコストの低減を考慮して $\pm 20\%$ の許容範囲を設けることが決定された。TESLA (TeV Energy Superconducting Linear Accelerator) コラボレーションが始まってから 20 年間ですでに数百台の超伝導空洞が製造され試験をされてきたが、さらに現在は European XFEL の為に約 800 台の超伝導空洞が製造中である。ILC の主 LINAC の建設に際しては 16000 台の空洞を数年の間に製造することが必要となる。

E. Kako による “S1-Global Module Tests at STF/KEK” と題する講演では、FNAL (Fermi National Accelerator Laboratory), DESY (Deutsches Elektronen-Synchrotron), KEK でそれぞれ開発された ILC 用にデザインされた 8 台の超伝導空洞を KEK の STF (超伝導 RF 試験設備) に集めて、それらをイタリアの INFN (National Institute of Nuclear Physics) と KEK がそれぞれ開発した 2 台のクライオモジュールに組み込んで性能試験をする S1-Global と呼ばれるプロジェクトが 2010 年から 2011 年にかけて実施されたことが報告された。結果的に 7 台の空洞を同時に安定して動作させることに成功し、肝心の加速勾配については縦測定の値より下がるものの中には見られたが、平均では 25 MV/m を達成した。

Daresbury Laboratory に建設されていた世界で初めての nonscaling Fixed Field Alternating Gradient (FFAG) accelerator, EMMA (Electron Model of Many Applications) のコミッションングについて S. Machida の “First Results From the EMMA Experiment” と題する講演があった。短い時間で加速をすることができる FFAG は Neutrino Factory や Muon Collider の muon 加速器の候補として注目されている。EMMA は nonscaling FFAG の原理実証を目的とした電子の加速器である。エネルギーは 10 MeV から 20 MeV, 周長 16.57 m の円形加速器で、1 ペアの収束、発散四極電磁石 (QF, QD) からなるユニットセルが 42 セル, 19 台の 1.3 GHz シングルセル RF 空洞が設置されている。energy recovery linac として稼働している ALICE (Accelerators and Lasers In Combined Experiments) に隣接して設置されており、その ALICE から 10 MeV から 20 MeV までの任意のエネルギーで電子を入射することができる。現在までに 12 MeV で入射した電子が “serpentine channel acceleration” によって 18 MeV 以

上まで加速できることが確認され、加速中にいくつかの integer tune を通過してもベータatron振動の増大がみられないことが観測されている。

X 線 FEL 関係の発表では、Plenary Session で H. Tanaka による “Status Report on the Commissioning of the Japanese XFEL at SPring-8” と題する講演があった。SPring-8 の SACLA (SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser) は 2011 年の 3 月に建設が完了し、順調にコミッションングが進んで 6 月 7 日に 0.12 nm で SASE (Self Amplified Spontaneous Emission) レーザー発振が達成された。現在は 7 GeV \sim 7.4 GeV で 0.16 nm \sim 0.08 nm の範囲で発振が得られ、最大 4 GW のレーザーパワーが達成されている。アンジュレータに入射するビーム軌道やビームエネルギーの slow feedback を行ってレーザーパワーのドリフトを抑制していることなど立ち上げ調整やオペレーションの詳細が報告された。今後は電子のエネルギーを 8 GeV まで増強することで、発振波長をさらに短波長にすることが可能である。2012 年 3 月からはユーザー運転が開始される予定である。

C. Pellegrini によって “The Challenge of 4th Generation Light Sources” と題して、第 4 世代放射光源として位置づけられる X 線 FEL について、SLAC の LCLS (Linac Coherent Light Source) が達成した性能を中心とするレビューがあった。現在 DESY の FLASH (Free Electron Laser in Hamburg) が 50 \sim 4 nm, LCLS が 2.2 \sim 0.12 nm, SPring-8 の SACLA が最短で 0.08 nm, Elettra の FERMI (Free Electron Laser for Multidisciplinary Investigations) が 40 \sim 30 nm で稼働している。LCLS では電子の電荷が 250 pC, ビームエネルギー 13.6 GeV, 発振波長 0.15 nm では、パルス長 70 \sim 100 fs, ピークパワー 15 \sim 40 GW であるが、電荷を 20 pC にすると normalized emittance が 0.15 μm , バンチ長が最短で数 fs となり、発振波長 0.15 nm でピークパワー 60 GW が達成されている。将来にむけた X 線 FEL の発展としては、共振器タイプの FEL で 10^{-6} \sim 10^{-7} の狭いライン幅を達成すること、シングルショットイメージングには 10 fs かそれより短いパルス幅に 10^{13} 個以上のフォトン、すなわち約 1 TW のピークパワーを達成すること、また特に fs からサブ fs のパルス長で発振の繰り返し周波数を MHz まであげることなどが考えられるとの講演であった。

S. Ackermann による “sFLASH - Present Status and Commissioning Results” と題する講演で sFLASH 計画の現状が報告された。DESY の FLASH は 50 \sim 4 nm の SASE FEL として稼働しているが、あらたに high

harmonic generation (HHG) によって発生させた 40 nm 付近のレーザー光を種光として GW レベルまで増幅することを目的とした sFLASH 計画が進められている。2010 年から 2011 年にかけて HHG 光源や sFLASH 専用のアンジュレータが先にインストールされていた SASE 発振用アンジュレータより上流にインストールされ、電子ビームとレーザー光を精密に重ね合わせるための基礎実験が進んでいる。sFLASH 用のアンジュレータを用いた SASE によるレーザー発振はすでに達成されたそうである。

S. Di Mitri により FERMI@Elettra のコミッションングと運転の現状についての報告があった。Elettra に建設されている FERMI は極端紫外から軟 X 線領域の High Gain Harmonic Generation (HG) FEL である。すでに稼働を始めている FEL-1 で 100 nm ~ 20 nm の範囲を、これからコミッションングが行われる FEL-2 で 20 nm ~ 4 nm の範囲をカバーする計画である。FEL-1 は一段階の modulator-radiator の構成となっており、一方 FEL-2 は two stage HG と称し、modulator-radiator による高次光の発生が二段階となっており、より短い波長の発振を可能にする計画である。種光として必要となるレーザーの波長は最短で 200 nm, パワーは 100 MW とされている。現在までに FEL-1 ではデザイン値である 20 nm までの発振が達成されており、30 nm ~ 50 nm では 1 パルスあたりの光子数 1×10^{13} が得られている。

H. Koiso による “Colliders for B factories” と題する講演で、日本の KEK で進んでいる Super KEKB 計画とイタリアの Super B 計画のレビューがあった。両計画はすでに承認されており、PEP-II と KEKB の B factory での経験と資源を有効に活用して建設される予定である。PEP-II と KEKB は世界最高ルミノシティ $1.21 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (PEP-II) と

$2.11 \times 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ (KEKB) を達成し、積分ルミノシティでは両者を合わせて 1.5 ab^{-1} 以上を蓄積した。その結果、小林益川理論の証明とスタンダードモデルを超える新しい物理のためのヒントを得ることが出来たが、更なる調査のために $50 \sim 75 \text{ ab}^{-1}$ の積分ルミノシティを得ることが要求されている。新計画は垂直ビームサイズを衝突点で 40 ~ 60 nm に絞ることでルミノシティを $\sim 10^{36} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ にまで上げることを目的としている。そのための主なパラメータは表 1 の通りである。

Super B プロジェクトはイタリアの国家研究の一部として 5 年の建設予算とともに承認され、建設サイトには、ローマ・トルヴェガタ大学のキャンパスが選ばれた。LER (low energy ring) に進行方向偏極電子ビームを使う、マシンパラメータに柔軟性を持たせるため低エミッタンスオプションと大電流オプションも準備する、 $10^{35} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ で τ /チャームランを行う、放射光源として使う等の可能性も考えられているようだ。ハードウェアは大部分を PEP-II のものを再利用する予定である。

一方の KEKB の運転は 2010 年 6 月に終わり、Super KEKB が 2011 年度予算で承認され、建設が始まったところである。現在は電磁石やビーム・パイプなどの大量生産が続いている。衝突点周りは両リングともすべて刷新する。また LER のアーク部では偏向電磁石は長いものに置き換えるが、それ以外の主な磁石は再利用する。ビーム・パイプは LER アーク部ではアンテナチェンバー型の TiN コートのアルミニウム合金パイプと交換するが、HER (high energy ring) アーク部は現在の銅製ビーム・パイプを再利用する。新しい陽電子ダンピングリング建設や入射器のアップグレードも含めた建設は 2014 年度に終わり、Super KEKB リングのコミッションングは 2014 年度の後半に始まる

表 1 SuperB と SuperKEKB の主なパラメータ

パラメータ	SuperB		SuperKEKB		単位
	LER (e ⁻)	HER (e ⁺)	LER (e ⁺)	HER (e ⁻)	
Beam energy	4.18	6.7	4	7.007	GeV
Circumference	1258.4		3016.3		m
Half crossing angle	33		41.5		mrاد
Beta function at IP β_x^*/β_y^*	32/0.205	26/0.253	32/0.27	25/0.30	mm
Beam size σ_x^*/σ_y^*	8.872/36	7.211/36	10.1/48	10.7/62	$\mu\text{m}/\text{nm}$
Beam current	2.447	1.892	3.60	2.60	A
Luminosity	10×10^{35}		8×10^{35}		$\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
Integrated luminosity	75		50		ab^{-1}

予定である。

加速器のコントロールシステム (CS) について最近の動向をレビューする講演が Cosylab の Verstovsek からあった。ここで CS は加速器を安全にかつ目的に沿って制御するために構築されたハードウェアとソフトウェア全体を指している。まず CS の構成を決めるには、使用者の視点に立ち、求められている機能を考えなければならない。例えば、大量の設定値やログを記録するのに十分な量のストレージと、それらを容易に検索するための機能や、加速器を調整するためのアプリケーション、双方向ユーザーインターフェースである。つぎにこれらの機能を適切に実装するには、それぞれについて実時間処理が必要か、どういうサブシステムに分け、各サブシステムの関連性をどうするか検証することが必要である。つぎにサブシステムの実装に関連して、FPGA (field-programmable gate array) の優位性について話があった。FPGA はその価格と、プログラミングによる柔軟な機能の実装が可能なることから、様々なサブシステムに使われている。FPGA に対する関心の高さは、国際会議における FPGA 関連の発表数の推移からも明らかで、特に 10 年程前から非常に関心が高まっている。しかし、容易にプログラムの修正が可能であることが、逆に落とし穴になる場合があるらしく、これらに注意しないとコストと時間を無駄に浪費する可能性があるそうだ。具体的には、容易さから実装方法の決定をなるべく後にずらすという心理が働き、プログラミングの途中で大規模な修正が必要になる場合があること、必要以上の機能を実装して、煩雑なプログラムを作ることの 2 点である。このようなことを避けるため、プログラムを始める前に、実装する機能とその方法をしっかり固めておく必要がある。次にハードウェアのプラットフォームについての話もあり、加速器の CS で良く採用される 3 種類の規格 (VME, ATCA, ePCI) について、導入費用や通信速度等、様々な角度から比較していた。どれが一番良いということは無く、各プラットフォームには一長一短があるため、構築する CS に照らし合わせて、最適なプラットホーム

選択をすべきである。またその際には、プラットホームの特徴、有用性とそのプラットホームの寿命も基準にすべきとの結論だった。

R. Tikhoplav による “Cavity-recirculated Laser Charge Stripping of Hydrogen Ions” と題する発表を紹介する。J-PARC や SNS (Spallation Neutron Source) などの大強度陽子加速器施設では、入射器であるリニアックで加速された H^- ビームを、荷電変換入射法により蓄積リングもしくはブースターリングに入射している。荷電変換には、一般的に耐久性に優れた炭素薄膜が採用されているが、ビーム強度が上がるに従い、熱による薄膜の振れや、ビームが薄膜の散乱することによるロスが大きくなる。そのため、薄膜の代わりにレーザーを照射して負電荷水素イオン (H^-) 中の電子を励起させ、荷電変換を行う方法が研究されている。この方法では、高い変換効率を達成するために、光学的にレーザーを周回させてレーザーの強度を上げる必要がある。しかしそのためには光学機器をビームの近傍に設置しなければいけないため、高い耐放射線性が要求される。この発表では、レーザーの波長変換に使われる BBO (BaB_2O_4) 結晶の耐放射線性を調べるため、放射線照射後の透過率の測定結果が報告された。非常に興味深い点は、BBO 結晶に放射線を照射するため、なんと原子炉炉心の燃料棒近傍に結晶を設置し、大量の中性子 (SNS で使用した場合に予想される放射線量の 3400 年相当) を照射した点であった。結論としては、BBO 結晶の耐放射線性は SNS の使用環境に対して十分であり、10 年以上安定して使用できるとのことだった。10 年の耐放射線性を調べるために、2 桁以上多い放射線を原子炉で照射するという、かなり印象に残る内容だった。

本誌前号にすでに詳細が報告されているとおり、The Rolf Wilderoe Prize を KEK の黒川真一氏が、The Gersh Budker Prize を理研の矢野安重氏がそれぞれ受賞され、表彰式と記念講演が行われたことを最後に付記する。