

会議報告

IPAC'12 報告

下崎 義人^{*1}・梅森 健成^{*2}・佐藤 健一郎^{*2}

Report on Third International Particle Accelerator Conference (IPAC'12)

Yoshito SHIMOSAKI^{*1}, Kensei UMEMORI^{*2} and Kenichirou SATOU^{*2}

Abstract

The International Particle Accelerator Conference (IPAC'12) was held at the Morial Convention Center, New Orleans, USA, from May 20 - 25, 2012. The outline of the conference is reported with some personal impressions.

1. はじめに

2012年5月20日から25日にかけて、アメリカでは現時点で六番目に広いとされる Morial Convention Center (図1, 資料によると100万スクエアフィートとのこと)の一部を使用して、ルイジアナ州のニューオリンズにおいて International Particle Accelerator Conference IPAC'12 が開催された。IPAC シリーズとしてはこれで3回目の、そしてアメリカで開催された初めての IPAC である。5月21日(月)の最初の“Welcome

from the Chairs”によると、IPAC'12の参加者は1160名であり、内訳はアメリカ：44%、ヨーロッパ：37%、アジア：19%とのことであった。

ニューオリンズと言えば2005年8月25日のハリケーン・カトリナによる被害が思い起こされるが、今回、会場近郊のフレンチ・クォーターにおいては復興作業をしている様子はなく、夜ともなれば路上や店内からジャズの生演奏(図2)が聞こえてくる盛んな雰囲気であった(関係あるかわからないが、空港からコンベンションセンターへ向かう途中は工事をしているように見えた。場所によっては今でも復興作業をしているのかもしれない)。期間中は天候に恵まれ、外は30°C



図1 横に長い線の入った右側の建物が Morial Convention Center, New Orleans, USA. ちなみに写真で見えているのが IPAC'12 会場側で、建物の半分の長さにも満たない(折り返して逆側はもっと長い)。



図2 バンケット会場におけるジャズ生演奏

*1 高輝度光科学研究センター JASRI, Japan Synchrotron Radiation Research Institute
(E-mail: shimosaki@spring8.or.jp)

*2 高エネルギー加速器研究機構 KEK, High Energy Accelerator Research Organization
(E-mail: kensei.umemori@kek.jp, kenichirou.satou@j-parc.jp)

以上, 内は非常に冷房が効いているという環境下において, 講演/ポスター発表/企業展示が行われ, 活発な議論が行われた。

今回のIPACにおいて, 全部で8件の特別講演(Plenary Session), 42件の招待講演, 及び54件の一般口頭講演が行われた。このうち日本からの講演数はそれぞれ1件, 6件, 及び10件であった。世界最大の加速器会議IPACにおける全講演の1割以上が日本からのものであり, 会場で見た印象では, 日本からの講演が多かったと思う次第である。頑張っている人達の講演を全て紹介したいが, 紙面の都合と, これら講演についてはその後の進展等も含め今後日本の学会等で議論される機会もあろうかと思われることから, ここでは講演者とタイトルのみを掲載させて頂いた。なにとぞ, ご了承頂きたい。

特別講演:

- K. Saito (KEK), “State-of-the-Art and Future Prospects in RF Superconductivity”.

招待講演:

- S. Nagamiya (JAEA / J-PARC), “Status of J-PARC Facility”.
- N. Nakamura (KEK), “Review of ERL Projects at KEK and Around the World”.
- Y. Mori (KURRI), “FFAG Experience and Future Prospects”.
- H. Tanaka (RIKEN SPring-8 Center), “The SPring-8 Angstrom Compact Free Electron Laser (SACLA)”.
- T. Nakamoto (KEK), “High Field Magnet Developments”.
- K. Ohmi (KEK), “Beam-beam Effects in Hadron Colliders: Theory and Experiment”.

一般口頭講演:

- K. Umemori (KEK), “Status of Main Linac Cryomodule Development for Compact ERL Project”.
- M. Kumaki (RISE), “Development of a High-power Coherent THz Sources and THz-TDS System on the basis of a Compact Electron Linac”.
- D. Zhou (KEK), “An Alternative 1D Model for CSR with Chamber Shielding”.
- Y. Yuri (JAEA / TARRI), “Focusing Charged Particle Beams Using Multipole Magnets in a Beam Transport Line”.
- K. Hatanaka (RCNP), “Development of HTS Magnets”.

- K. Yamada (RIKEN), “Beam Commissioning and Operation of New Linac Injector for RIKEN RI-beam Factory”.
- H. Nakayama (KEK), “Small-Beta Collimation at SuperKEKB to Stop Beam-Gas Scattered Particles and to Avoid Transverse Mode Coupling Instability”.
- K. Yasuoka (University of Tsukuba), “Future Medical Accelerators”.
- M. Yoshimoto (JAEA / J-PARC), “Development of the Beam Halo Monitor in the J-PARC 3-GeV RCS”.
- K. Sakaue (RISE), “Refraction Contrast Imaging via Laser-Compton X-ray Using Optical Storage Cavity”.

以下は, 著者らが興味を持った講演/ポスター発表について紹介するものである。

2. ハドロン加速器関連の会議報告

会議初日のオープニング Plenary Session では S. Myers 氏 (CERN) による “First Two Years of LHC Operation” という講演で LHC における 2010, 2011 年の蓄積ルミノシティの変遷が報告された。2010 年までに 45 pb^{-1} を達成し, 2011 年には intensity 増強, 蓄積バンチの積み上げ (100 以下から約 1400 に増強), エミッタンス低減化, 衝突点ベータの調整 ($1.5 \rightarrow 1.0 \text{ m}$) などのビーム調整を着々と進め, 約 6000 pb^{-1} (目標値は 1000 pb^{-1}) を達成したとの報告があった。これは目標値の実に 6 倍という強度であり驚異的な伸びである。2012 年にはヒッグス粒子探索実験にはやくも一区切りつく公算であるという。結論が待ち遠しい。最終日の Closing Plenary では P. Heuwer 氏 (CERN) の “Physics Results at the LHC and Implications for Future HEP Programs” の講演が行われ, ヒッグス粒子探索の現状について紹介があった。同セッションでは P. Derwent 氏 (FNAL) による講演 “Accelerators for Intensity Frontier Research” もあり, FNAL で計画されている物理プログラムの紹介と加速器整備計画のレビューが行われた。ともに加速器そのものの講演というより利用者側 (物理屋側) に立った講演であり, 加速器開発を担う会議参加者へ向け物理プログラムを紹介するとともに, 大強度・高エネルギー加速器開発への強烈的な動機付けを目的としていたようであった。

今回の会議で特筆すべきこととして ADS (Accelerator Driven System) 関連の講演が目立っ

たことが挙げられる。初日の Plenary Session で D. Vandeplasche 氏 (SCK-CEN) による “Accelerator Driven System” という講演で ADS のレビューが行われ、ADS の解説、加速器の要求性能、各地の現状が報告された。ADS は加速器からの大強度陽子ビームを Pb-Bi ターゲット (冷却材にも使用) に照射して中性子を生成し、その中性子で未臨界原子炉を駆動・制御する技術であり、使用済み核燃料の長寿命核種の低減化が期待できる。欧州ではベルギーが計画している実験炉 MYPPHA に対して主にベルギー政府から R & D 予算が承認されている。加速器は 0.5 ~ 3 GeV, 1 ~ 2 MW (商業炉では 1 ~ 2 GeV, 10 ~ 75 MW!!) 出力の CW 超伝導リニアックが想定されている。同様の計画が米国 (LDRD), 日本 (J-PARC), 中国 (C-ADS), インドで進んでおり、とくに中国では、今後国内で増加する原子炉からの使用済み核燃料処理の必要性から開発が進んでいるようだ。この他、R. Cywinski 氏 (Huddersfield 大学) による “Thorium Energy Future” という一般講演があり ADS を応用した Th サイクル原子炉に関する紹介も行われた。その他 2 件の ADS 関連のポスター発表が行われていた。福島原発事故後の原子力発電を取り巻く厳しい状況を踏まえたプログラム構成であろう。

非常に興味深い講演として A. Shishlo 氏 (SNS) による “H⁻ and Proton Beam Loss Comparison at SNS Superconducting Linac” が挙げられる。SNS 超伝導リニアックでは想定外のビームロスが発生しているが、このロスの起源は理論的に Intra beam stripping (H⁻ バンチビーム内原子・原子散乱荷電変換作用による H⁻ ビームの中性化) であると考えられている。今回の講演はこの現象の実験的な実証についてである。実験では加速 RF 位相を 180° シフトして陽子を加速し、H⁻ ビームとロスの違いを比較している。実験では H⁻ ビームと陽子ビームのプロファイルを注意深く調整し、縦と横の形状は逆転しているものの、ほぼ同等のビームを再現している。実験の結果は、H⁻ ビームのロスはビーム強度が上がるとともに増加し、30 mA では陽子の場合の 10 倍以上にもなる。これはビーム強度が上がるとともに Intra beam stripping が顕著なることを示唆している。この現象は理論的にもすでに評価されており、また同種の報告は 98 年にすでにロスアラモスの LANSCE のグループでも行われているという。実験的な検証を尊ぶ姿勢には頭が下がるばかりである。

ビーム診断機器のセッションでは 13 件の講演があり、ポスターでも約 100 件の発表があった。興味深い

ものとして、C. Kurfuerst 氏による CERN の超伝導電磁石のクエンチ対策を目的として開発が進んでいるビームロスモニタ (BLM), CryoBLM の開発についての講演がある。この BLM は液体ヘリウム内で使用するため極低温 (1.9 K) かつ高放射線場 (10 年で 10 MGy) の使用に耐えなければならない。液体ヘリウムそのものを使用したイオンチャンバーのアイデアは放射線損傷の問題がないため非常に興味深かった。その他、シリコンとダイヤモンド検出器との比較も行われていた。

3. FEL と ERL 関連の会議報告

FEL 関係は 9 件の講演及び多くのポスター発表が行われた。少し前までは SASE FEL が発振したとの話題で賑わっていたと思っていたが、気付いてみると、既に Seeded FEL が主流になりつつあり、さらに様々な発振スキームが試されるなど、FEL 関連の進展の速さには驚かされた。

まずはイタリアの FERMI@ELETTRA であるが、現在 FEL-1 と呼ばれる最初の段階であるが、2010 年末より既に laser seeded FEL にての EUV/Soft X-ray FEL ユーザー運転を行っている。HGHG (High Gain Harmonic Generation) の方式を用いて最短 20 nm までの波長の FEL を供給している。さらにこの施設での FEL-2 と呼ばれる次の段階では、cascaded HGHG の方式を用いて 4 nm までの FEL 発振を計画している。

LCLS においては、self-seeding という方法を用いて、1.5 Å の FEL を発振させることを実証した。この方法では、初段 undulator からの SASE 放射をダイヤモンド結晶に通し、ブラッグ反射を利用することで狭いバンド幅を得るという方法である。SASE FEL で見られたエネルギー広がりが 1/40 にも小さくなることを実験的に示しており、Seeded FEL のメリットを強く印象付けた講演であった。ただし、FEL power のふらつきが 50% 以上あるとのことで、これを安定させることが今後へ向けての課題である。

SACLA は 2011 年に最初の SASE 発振を確認。2012 年よりユーザー運転が開始されている。エミッタンス測定用のモニターの調整、バンチ圧縮の最適化、電子軌道とレーザー強度の調査など、一つ一つの地道な作業を通してビーム運転を安定化させていった様子のわかる講演であった。ユーザーに供給している SASE FEL も安定なようで、非常にうまく運転が行われている様子が伺えた。SACLA は現在 SASE FEL での運転であるが、seeded FEL にアップグレードする計画があり、近い将来実現されることが期待される。

European XFEL は現在建設中であり、完成までまだ

数年が必要である。どのような FEL 運転がなされるのか早く見てみたいものである。この間、FLASH では FLASH II という新たなビームラインの整備を進めている。このビームラインでは SASE FEL とともに HHG (High Harmonic Generation) での seeded FEL の発振も検討されている。

また EEHG (Echo Enabled Harmonic Generation) と呼ばれる方式も最近提唱されているが、上海の SDUV にて既実験されており、波長 350 nm での EEHG seeded FEL での発振が実証されている。このように日進月歩で技術が進歩している感があり、今後の進展からも目が離せないであろう。

以上に挙げた以外の XFEL 建設計画としては、SwissFEL, PAL XFEL, Shanghai XFEL, NGLS などが挙げられる。

ERL 関係では、ERL 全体のレビューの他に、KEK の cERL (Compact ERL) 計画や Cornell ERL の入射部や photocathode 開発などの計 4 件の講演及び多くのポスター発表があった。

ERL 電子銃は将来光源 ERL の実現のための重要課題の一つであるが、100 mA CW の大電流、0.1 ~ 1 mm.mrad の超低エミッタンス、カソードの長寿命化などの多くの難題が待ち構えている。Cornell 大学ではかつてより ERL 入射部試験機を立ち上げ R&D を進めてきたが、今回様々な進展が報告された。まず、入射部の各コンポーネントのアラインメントを丁寧に精度良く行った結果、80 pC のバンチ電荷 (1.3 GHz 繰り返しで 104 mA 相当) にて 0.8 mm.mrad, 20 pC にて 0.4 mm.mrad のエミッタンスを実現したとの報告があった。ビーム電流に関しては、GaAs 陰極を用いた場合には、短時間ではあるが 50 mA 以上の電流引出に成功、また GaAs より長寿命が期待できる CsK₂Sb 陰極を使用した場合には、20 mA CW の電流を 8 時間にも渡って連続的に出し続けることに成功している。かつてははるか彼方に思っていた ERL 電子銃に求められる性能も、だいぶ現実的な物になりつつあるという印象を強く受けた講演であった。

KEK においても ERL 試験機である cERL 計画が進められている。電子銃やレーザー周辺の開発、ラティス設計、入射部や主加速部の超伝導空洞システムの開発などが精力的に行われるとともに、現在は放射線シールド用のコンクリートブロックの設置などが急ピッチで進められている。いよいよ今年度末には電子銃からのビーム取り出しが予定されている。来年度には、ERL ビーム試験が予定されており、まずは 35 MeV, 10 mA での運転を目指している。どのような性能の

ERL ビームが周回するのか非常に楽しみである。

その他、ERL 試験機の開発が進められている研究所には、BNL, HZB などが挙げられる。BNL は原子核実験の加速器に ERL を用いる事を検討している。BNL の試験機もだいぶ開発が進んできており、こちらも今年 9 月には超伝導 RF 電子銃からの最初のビームを予定、来年度には ERL ビーム運転を予定している。HZB は試験機の開発に着手したばかりではあるが、既に超伝導 RF 電子銃からのビーム取り出しに成功するなど、開発を進めている。

その他に、現在稼働中の ERL 施設を持つ研究所として、J-Lab, BINP, Daresbury, ERL 計画を持つ研究所として、IHEP, 北京大学, CERN などが挙げられる。

各国の ERL 研究者と議論をしていて、共通に危惧しているのが、電子銃や超伝導空洞からの暗電流である。これは CW で運転する ERL ならではの問題であるが、放射線遮蔽の問題や機器の破損といった問題を引き起こすとともに、ビームハローを形成してビーム品質を損ねる可能性がある。暗電流の研究はなかなか難しく十分にされていないのが現状であるが、今後、どの程度理解が進み解決していけるかも、将来のユーザー運転に向けての重要な要素ではないかと思われる。

4. 電子加速器関連の会議報告

蓄積リング型放射光施設関連では、アメリカの M. Borland 氏 (APS) により “Progress Towards Ultimate Storage Ring Light Sources” という招待講演が行われた。X 線の高輝度化を目的とした放射光施設のアップグレード計画や、放射光施設の新規建設計画は世界各地で検討されており、また一部、建設が始まったところもある。近年は、高輝度 X 線を発生させる為に、回折限界までエミッタンスを低減させたラティス設計というものが検討されている。これに加え、更に挿入光源の発光点における、単一電子から発生した光の広がりや電子ビームのサイズの convolution を考慮し、輝度を最大限に高める為にベータ関数を最適化したラティスが、講演の中では “Ultimate Storage Ring” として定義されていた。ラティスの低エミッタンス化に伴い問題となるのは、六極磁石等による非線形問題で、極めてダイナミックアパーチャーが小さくなり、入射方式以外にビーム寿命なども問題となってくる。ビーム寿命が短いと、放射光強度は著しく変化する。ダイナミックアパーチャーが広ければ off-axis 入射を利用した top-up 運転も入射器性能などにより可能となる

が、ダイナミックアパーチャーの小さいラティスでは、放射光強度を平均的に一定に保つ為に、swap 方式を用いた on-axis 入射（蓄積ビームを1度捨てて、再度入れ直す）などを検討する必要がある。以上を踏まえた上で、世界で検討・建設中の蓄積リング型放射光施設 (NSLS-II, MAX-IV, PEP-X, SPring-8 II, 最新のものとしてはアメリカ Tevatron のトンネルを利用した “Ultimate Storage Ring” 設計など) について、レビューを踏まえながら、「これはダイナミックアパーチャーも広く、ビーム寿命が長いので現実的」「これはダイナミックアパーチャーが小さいので on-axis 向き」、「これはベータ関数を最適化していないので “Ultimate Storage Ring” ではない」との批評を的確に入れていくものであった。高輝度化に絡むビーム物理、“Ultimate Storage Ring” の定義、低エミッタンスラティス設計における非線形物理等の問題点及びその補正手段のトレンド、低エミッタンスラティス検討の歴史的経緯から昨今の “Ultimate Storage Ring” のラティス検討状況まで、ほぼ全てを網羅し非常にバランスのとれた、すばらしい講演であったと思う。

同じ日に、韓国の S. Shin 氏 (Pohang Accelerator Laboratory) により、“Commissioning of PLS-II” という一般口頭講演が行われた。PLS (Pohang Light Source) から PLS-II へのアップグレードに伴い、H. Wiedemann 氏を筆頭に world-wide に研究者が参加して commissioning が行われているとのことで (SPring-8 から数人参加)、現状及び今後の予定が報告された。PLS-II の設計パラメータは 3 GeV, 400 mA でナチュラルエミッタンスが 5.8 nm.rad である。2011 年 5 月 23 日に線形加速器の commissioning を開始し、7 月 1 日にはビームが蓄積リングを 1 周することに成功、しかし 7 月 5 日に入射用キッカー磁石の電源が “fired (“turned on” の意ではなく「燃えた」の方)” とのことで、燃えた電源の写真が公開された。しかし 1 ヶ月後には commissioning を再開し、SPring-8 開発の BBF (Bunch-by-Bunch Feedback) の導入、LOCO (Linear Objective Combinatorial Optimization) program を用いたラティス関数補正、ビームラインチューニングを経て、2012 年 3 月 21 日より、ユーザー運転を開始しているとのことであった (現在は 100 mA の蓄積電流で運転しているとのこと)。ただ放射線の問題で top-up 運転のユーザー運転への適用はまだ行ってないとのことで、今後、スリットでビームをカットする、シールドを積み増すといったことを考えているとのことであった。ちなみに、SPring-8 では top-up 運転を適用しており、講演終了後のポスターセッションの時間、

Shin 氏と SPring-8 の関係者で、「SPring-8 ではスリットはトランスポートラインのどこに置いているのか」、「スリットで切ったら、エミッタンスはどこまで小さくなるのか」といった詳細な議論が熱心に行われた。非常に熱意のある方のように見受けられ、PLS-II で top-up 運転が行われるのも、そう遠くないのではないかと感じられた。

中国の Z. Zhao 氏 (SINAP) により “Future Government-funded Accelerator Project in Asia” という興味深い講演が行われた。アジアにおける 20 以上の加速器 (将来) 計画について、Electron Accelerator Projects, Proton Accelerator Projects 及び Rare Isotope and Heavy Ion Accelerator Projects の 3 項目に分けてレビューしたものである。医療用加速器が 1 つしか紹介されていなかったのも、おそらく全てを網羅している訳ではないのだろうが、認知度という観点で紹介された将来計画の内訳を見てみると、まず中国と日本が最も多くて 7 projects, 次いで韓国が 4 projects, インドが 3 projects であった。また加速器の種類としては電子加速器が 16 projects (Synchrotron Light Source が 11, FEL が 2, ERL が 2, Collider が 1) で最も多く、次いで陽子加速器が 5 projects (High Power Proton Linac が 3, Spallation Neutron Source が 2), 希少核・重イオン加速器が 4 projects (Rare Isotope が 3, Heavy Ion が 1) となっていた。ちなみに日本の将来計画として紹介されていたのは、全て電子加速器 (SuperKEKB, CJSRF, LSEJ_{apan}, HiSOR, SPring-8 II, cERL, KEK-ERL) で、電子加速器は日本以外でもアジアに万遍なく計画されているとの由。一方で陽子、希少核、重イオン加速器は中国、インドと韓国において将来計画として動いているとのことであった。「核保有国の場合、加速器 (将来) 計画と核ってリンクするのかしら？」など考えながら耳を傾けていた。加速器ソサエティに対する要請は国ごとに異なるものであろうし、政治状況、経済状況などに強く依存するものでもあろう。今後も推移を注視していきたいと思う。

5. その他の報告

まず ePoster (Electric Poster) が今回の IPAC で新たに導入された。大きいディスプレイとパソコンを接続することで、従来のポスターでは伝えきれない情報をより効果的に伝えることができ、更により観客を魅了する見せ方ができるものと期待されて導入されたものである。しかし実際は 20 インチ程度のディスプレイに PowerPoint (?) でスライドを表示するという程度のもので (図 3)、動画はあるが、画面が小さいので字



図3 ePosterの様子.



図4 レーザー干渉計の設置された建物 @ Livingston LIGO.

も小さく遠くから見にくいといったものが多く見受けられた。むしろ通常のポスター(紙)の方で、紙面上にiPad等を固定して動画を表示するといった、字も大きいし動画もあって遠くからでも見やすいという好演出をなされたものが、いくつか見受けられた。紙と小型電子機器の組み合わせは予算的にもお手軽だろうし、今後、ポスター発表のあり方が劇的に変わるかもしれないというのが個人的感想である(ただし電子機器が無くならないように(盗まれないように)管理する必要が出てくるであろう)。

今回のIPACでは、Prof. H. Padamsee (Cornell) が “For contributions to the science and technology of RF superconductivity” で、また Dr. V. Yakimenko (Brookhaven National Laboratory) が “For contributions to high-brightness electron beams and to their application to advanced accelerators and light sources” で、IEEE Particle Accelerator Science and Technology Awardを受賞した。紙面の都合上、詳細は省略させて頂く。

IPAC'12のスペシャルイベントとして、5月26日(土)に、ルイジアナ州リビングストンにある Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory (LIGO)の見学ツアーが企画された。今回、ツアーの参加人数は50名程度で、12時半にIPAC会場に集合し、1台のバスで1時間半程かけて展望台まで移動した。到着後 Science education centerで簡単な昼食と展示物(共鳴や干渉など物理に関連し、子供も大人も楽しめるような科学おもちゃが、解説と共に陳列されていた)の見学、ムービーで重力波検出の原理と施設の説明を受けたあとに、実際にレーザー干渉で重力波の観測をしている建物(図4)へ移動し、コントロールルーム、

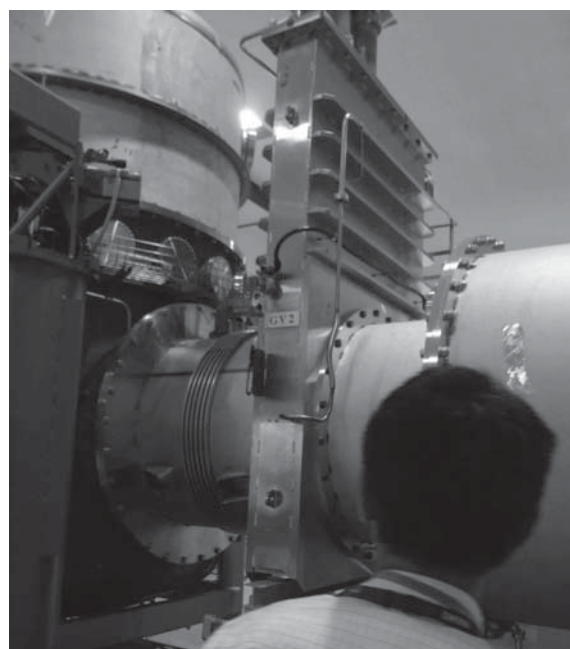


図5 (奥)干渉計の入ったチェンバーと(手前)ゲートバルブ。この写真では遠近法で大きさが伝わらない……が、とにかく大きいのである。

電源室及び干渉計等の見学を行った。干渉計の周囲は人が立って歩けるであろう大きさの真空チェンバーが設置されており、よって見上げるほどに大きいゲートバルブ(図5)というものを、著者は加速器ソサエティに入って初めて見た。16時頃に見学が終了、18時半頃に会場に戻ってきて解散で、これにてIPAC'12の全てのイベントが終了となった。

次回、IPAC2013は2013年5月12日から17日にかけて、上海にて開催される予定である。