

## 会議報告

## 第 21 回サイクロトロンとその応用に関する国際会議報告

倉島 俊\*<sup>1</sup>・北條 悟\*<sup>2</sup>Report on 21<sup>st</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications (Cyclotrons 2016)Satoshi KURASHIMA \*<sup>1</sup> and Satoru HOJO \*<sup>2</sup>

第 21 回サイクロトロンとその応用に関する国際会議 “21<sup>st</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications” が 2016 年 9 月 11 日から 16 日までの 6 日間、スイス連邦工科大学チューリッヒ校 (ETH Zürich) とポール・シェラー研究所 (PSI) がホストとなり、スイスのチューリッヒで開催された。

会場となった ETH Zürich は、スイス国鉄のチューリッヒ中央駅から急な坂道を上った高台に位置しており、高低差 40 m のケーブルカーも引かれているほどである。そのため、テラスからの眺めは良く、中央駅からチューリッヒ湖まで見渡すことができる。ETH Zürich は 1855 年から続く工学や自然科学において国際的にも最先端の大学で、2014 年の学生数は 19,200 人、教職員等も含めると 110 カ国以上から約 29,000 人が集う規模の大きな教育・研究機関である。

カンファレンスへは 200 名以上の参加者があり、口頭とポスター発表を合わせて 132 件の報告があった。

以下のようなセッションで、口頭発表が行われ、併せて質疑応答等において活発な議論が行われた。

- Upgrades
- Beam Dynamics and Simulation I
- High Intensity: Practice and Theory
- Young Scientists
- Applications in Particle Therapy
- Control of Dynamics
- Recent Projects
- High Energy and Strippers
- Cyclotrons for Isotope Production



写真 1 ETH テラスよりチューリッヒ湖方面を望む。中央にフラウミュンスター (聖母聖堂)



写真 2 会場となった ETH Zürich の歴史ある Hauptgebäude (本館)

\*<sup>1</sup> 量子科学技術研究開発機構 高崎量子応用研究所 TARRI, QST  
(E-mail: kurashima.satoshi@qst.go.jp)

\*<sup>2</sup> 量子科学技術研究開発機構 放射線医学総合研究所 NIRS, QST  
(E-mail: hojo.satoru@qst.go.jp)

- Beam Dynamics and Simulations II
- RF and Magnet Design
- Operation and Status
- New Technologies
- Space Charge and New Concepts
- Cyclotron Performance Improvement and Commissioning
- Fields for Cyclotrons Applications

これらのセッションから、いくつかの発表をピックアップして報告する。

まずは会議初日である12日, Openingセッションに続く Upgrades セッションにて, RIKEN の H. Okuno 氏より, これまでの10年間のウランビームを主とした強度増強と2025年にファーストビームを目指したRIBFの新たなアップグレードとしてNew-fRC等の提案がなされた。次に, INFN/LNS の L. Calabretta 氏より, LNS 超伝導サイクロトロン強度増強へ向けた取り出しフォイルストリッパーなどのアップグレードの報告がなされた。

Upgrades セッションの後, RCNP K130 AVF, INS SF-cyclotron, HIMAC と多くの加速器に携わった Yasuo Hirao 氏, Philips 27 MeV AVF cyclotron, PSI の Injector I に携わりハミルトニアンによるサイクロトロン軌道解析の研究を行ってきた Henk Hagedoorn 氏, TRIUMF の 500 MeV  $H^-$  サイクロトロンに携わった加速器物理学者で UBC 教授である Mike Craddock 氏の3名の故人を偲ぶ Special memorial presentations が行われた。

Beam Dynamics and Simulations のセッションでは, QST/Takasaki の S. Kurashima 氏により細胞一つずつを狙い撃ちするスポットサイズ  $1\ \mu\text{m}$  のマイクロビーム形成に向けた, フラットトップ加速や中心領域の改造等による0.05%以下のビームエネルギー幅達成や, カクテルビームによるイオン種の短時間切替の実現など, これまでの取り組みについての報告がなされた。FZJ の Ch. Wolf 氏からは, 教育用の小型サイクロトロン COLUMBUS を用いたイオンビームのらせん軌道のシミュレーションについての発表が行われた。

High Intensity: Practice and Theory のセッションでは, PSI の D. C. Kiselev 氏により, 高

強度の陽子線加速器における放射線ダメージについての報告があった。これまでの事例における材質表面の電子顕微鏡でのモニターや, 熱的なダメージなどの紹介が行われた。しかしながら, これまでの事例からの定量的な評価は難しいため, 照射試験等が必要であるとの発表であった。

今回, この会議においての初の試みとして Young Scientists として若手研究員の発表を集めたセッションが行われた。その中では HUST の Z. K. Liang 氏による陽子線治療用の早いエネルギー変更システム設計, デュースブルクエッセン大学の S. Jendrzzej 氏による RI 標識されたナノ粒子を用いたエンジンオイルの消耗測定, ハダースフィールド大学の A. M. Kolano 氏による PSI Injector II の強度増強に向けた OPAL を用いた3次元空間電荷効果のシミュレーションの3件のプレゼンテーションが行われた。さらに, ミニオーラルセッションとして質疑応答なしの5分間での短いプレゼンテーションが4件行われた。

その後, ポスターセッションを挟んでの Applications in Particle Therapy のセッションでは, TERA の A. Garonna 氏によるサイクロトロンとライナックブースターを組み合わせ, デグラダーを使わずにエネルギー変更可能な治療装置の提案と, さらにこれを炭素線に向けた検討についての報告がなされた。

13日の Control of Dynamics セッションでは, NSCL の S. Schwarz 氏による Cyclotron gas stopper の開発についての報告がなされた。入射核破砕による希少 RI ビームの低エネルギー化のために, Cyclotron マグネットにより減速を行うもので, 磁場測定, イオン収束のための RF テストが行われ, 低エネルギーイオンの輸送テストが行われる予定である。

Recent Projects のセッションでは, MIT の D. Winklehner 氏による DAE  $\delta$  ALUS と IsoDAR サイクロトロンの高強度化へのアップグレードについての報告がなされた。インフレクタのビームテストが行われ, 6-8 mA で95%の効率が確認された。この1%程度がRFにより加速されると見込まれている。また, RIKEN の N. Sakamoto 氏により, RIBF における偏極重陽子ビームのためのシングルターン取り出しについての報告がなされた。190, 250, 300 MeV/u の各エネルギーにお

いて 99%以上の純度の高いシングルターン取り出しビームを実現している。その後の Cyclotrons for Isotope Production のセッションでは、ARRONAX の F. Poirier 氏により、70 MeV proton  $750 \mu\text{A}$  の 52 kW 出力の C70 サイクロトロンでは、67 MeV  $\text{He}^{2+}$  の取り出しビーム強度は、 $26.6 \mu\text{A}$  を実現しているとの報告があった。アップグレードとしては、コントロールサーバーを強化し、ビームロスモニターの開発や  $\text{He}^{2+}$  ビームのパルシング等の開発が行われている。

14 日の Beam Dynamics and Simulations II のセッションでは、N. Yu. Kazarinov 氏 (JINR) から DC280 サイクロトロン of the ビーム入射効率改善に関する報告があった。入射ビーム電流が  $100 \mu\text{A}$  を超える場合、元となる ECR イオン源のマイクロ波のパワーを上げるためにエミッタンスが悪化して輸送中にビームロスが生じる。そこで、イオン源やビームラインの一部を 75 kV 高電圧ターミナルに乗せてビームを再度加速し、エミッタンスを減らす手法が検討されている。イオン源の分析磁石やソレノイドレンズなどについて 3 次元の電磁場を計算し、ビーム輸送シミュレーションを行った結果、この手法により 100% の輸送効率が見られる解が見つかり、今後の進展が期待される。続く RF and Magnet Design のセッションでは W. Duckitt 氏 (iThemba LABS) からデジタル・ローレベル RF 制御システム開発の報告があった。施設では 13 の RF 関連機器が稼働しているが、これまで使用してきたアナログのローレベル回路は使用開始から 30 年を越えるものもあり、最新のデジタル方式に置換された。このシステムは Field Programmable Gate Array (FPGA) を基本に生まれ、閉ループの電圧安定度は 0.01%、位相安定度は 0.01 度が可能となる。操作やパラメータ診断など、制御には Experimental Physics and Industrial Control System (EPICS) が用いられ、製作した 3 つのプロトタイプモデルは 2014 年の 1 月から順調に機能している。

午後からは PSI へのテクニカルツアーが生まれ、会場から北西に 30 km ほど離れた Villigen までバスで移動した。PSI には 590 MeV、2.4 mA (1.4 MW) を誇る世界最強のプロトンサイクロ



写真 3 実物大の 590 MeV サイクロトロンが描かれた天井を歩く説明員 (PSI 見学)

ロンがあるが、当日は運転中のためか入射器も含めてサイクロトロンは一台も見学できず残念であった。ただし、実物大の絵 (写真?) が描かれたサイクロトロン of the 天井付近へはアクセスできた。その他にも、Spallation Neutron Source (SINQ), Swiss Muon Source ( $S\mu S$ ), SLS (Swiss Light Source), 超伝導サイクロトロンによる陽子線治療用のガントリーなどを見学した。

15 日は、Operation and Status のセッションから始まり、J. Grillenberger 氏 (PSI) が “The Energy Efficiency of Cyclotrons” というタイトルで報告した。PSI のリングサイクロトロンは、入射器を含めて 10 MW の電力を消費するが、ビームパワーは 1.4 MW に達するためにエネルギー効率としては 14% となる。この数字は、直線加速器やシンクロトロンなど他の加速器と比べてサイクロトロンはエネルギー効率の面で非常に優れていることを表す。最も電力を消費する RF 系の改良や電磁石を超伝導化すれば更に効率は改善し、25% を達成できる見込みとなる。この数値を達成できれば、加速器駆動システム (ADS) へのサイクロトロン of the 応用が十分に可能となるため、高効率化はサイクロトロン研究者・技術者にとって重要なテーマとなっている。

New Technologies のセッションでは、K. Hatanaka 氏 (Osaka Univ.) からビスマス系の高温超伝導体を用いた加速器施設用の電磁石開発の報告があった。この線材は臨界温度が高いため、交流やパルス励磁に対してもクエンチに至るまで余裕がある。プロトタイプにおける性能確認試験では良好な結果が得られ、実用化を目的とした極

低温偏極中性子用の 3.5 T 円筒電磁石とパルス励磁可能なスイッチング電磁石が製作された。同セッションでは、J. Vincent 氏 (Ionetix 社) から医療用 RI ( $^{13}\text{N}$ ) 製造を目的とした重量約 2.3 トンの超小型超伝導サイクロトロンの開発報告もあった。開発目標値は 12.5 MeV,  $25\mu\text{A}$  であり、特徴としてはマグネットヨークの大部分もコイルと同様に冷却されることである。2016 年 1 月に第 1 号機がミシガン大学に納入され、2 月から  $^{13}\text{N}$  の製造が開始された。同社の工場では年間 32 台の製造が可能とのことである。Space Charge and New Concepts and Projects のセッションでは、Y. Ishi 氏 (Kyoto Univ.) から京大 FFAG の現状報告と ADS 未臨界炉用ドライバとしての研究開発を目的としたアップグレード案についての報告があった。案では、ビームエネルギーを現在の 150 MeV から 400 MeV まで上げるために、主リングの外側にさらに大きな FFAG リングを設置し、ADS 研究の他に中性子やミュオン発生の研究も念頭に置いている。同セッションでは、S. L. Sheehy 氏 (Univ. of Oxford) から京大 150 MeV FFAG の空間電荷効果や軌道計算結果に関する報告もあった。オックスフォード大と京大 KURRI は 2013 年から FFAG に関する共同研究を行っており、シミュレーション結果と実際の装置における加速実績を照らし合わせ、将来における大電流加速へ向けた取り組みが進んでいる。

最終の 16 日は、Cyclotron Performance Improvements and Commissioning のセッションから始まり、E. Forton 氏 (IBA 社) から陽子線治療用の小型超伝導“シンクロ”サイクロトロン S2C2 の製品化に関する報告があった。この装置開発に関しては、前日の 15 日の口頭及びポスター発表でも報告があり、過去の装置とわかれていたシンクロサイクロトロンが 21 世紀においても脚光をあびることになった。偶然であろうが、会期中の 14 日に患者への初めての治療が始まったとの報告があり、会場はお祝いムードに包まれ



写真 4 会場前における参加者集合写真

た。本会議最後のセッションは、Fields for Cyclotrons Applications。O. Kamalou 氏 (GANIL) からは、リングサイクロトロンにおける通常不安定核ビームの加速の他に、SPIRAL 1 における ISOL とサイクロトロンを用いた高強度の不安定核ビームの加速に関して、この 16 年間の総括する報告があった。SPIRAL 1 についてはアップグレード計画が進行中であり、生成・加速できる不安定核をこれまでのガス系の元素以外へと拡大するため、FEBIAD (Forced Electron Beam Induced Arc Discharge) イオン源や Charge breeder 等が開発され、2016 年は新設機器の据付や不安定核ビームによるコミッションングが行われる。

最後は H. Okuno 氏 (RIKEN) による Conference Summary である。前回のバンクーバー開催から 3 年間にファーストビームを加速した 5 つのサイクロトロンに対して祝辞を述べた後、注目すべき発表について簡単な紹介があった。総括として、特に小型サイクロトロンについて超伝導化や RI 製造用マシン開発など着実に進歩を遂げていること、大電流加速、小型・高性能化、安定な運転、応用の拡大に関して、今後とも我々の限りない挑戦が続いていくことを述べた。

次回の第 22 回は、2019 年に南アフリカのケープタウンで開催される予定である。