

会議報告

第 18 回サイクロトロンとその応用に関する国際会議 (CYCLOTRONS 2007)

福田 光宏*

Report on CYCLOTRONS 2007

Mitsuhiro FUKUDA*

1. はじめに

サイクロトロンに関連した加速器研究・技術開発、応用研究等に携わる研究者、技術者、利用者などが一堂に会する「サイクロトロンとその応用に関する国際会議 (“International Conference on Cyclotrons and their Applications” (通称 “CYCLOTRONS 2007”))」 (<http://www.lns.infn.it/cyclotrons2007/>) が、2007 年 9 月 30 日から 10 月 5 日までイタリア南部シチリア島の東海岸に位置する町 Giardini Naxos で開催された。1959 年に始まったこの国際会議は 3 年毎に開催され、今回で 18 回目を迎える。今回のホスト役は、会場から南に 50 km ほど離れたカタニア市に超伝導サイクロトロン施設を有する INFN-LNS (Istituto Nazionale di Fisica Nucleare, Laboratori Nazionali del Sud) が務め、約 25 カ国から 200 名を超える参加者を得て盛大に行われた。ヨーロッパでは 1998 年にカーン市 (フランス) で行われた第 15 回国際会議以来の開催となる。Giardini Naxos はヨーロッパでも有数の活火山であるエトナ山に程近いリゾート地で、日本の感覚では 10 月初旬とは思えない地中海独特の温暖な気候に恵まれたこともあり、大変印象深い環境での国際会議であった。

今回の会議には、口頭発表が 60 件、ポスター発表が 115 件、合計 175 件のエントリーがあり、10 月 1 日午前から最終日の 5 日午後まで中身の濃い発表が相次いだ。途中 INFN-LNS へのテクニカル半日ツアーなどを挟みながら毎日夕方まで活発な議論は絶えなかった。口頭発表は、① Newly Operating Cyclotrons and Facilities Under Construction, ② New Cy-

clotron Projects, ③ Cyclotron Applications and Target Technology, ④ New Projects and New Ideas, ⑤ Radioactive Beam Facilities, Status Report, ⑥ Radioactive Beam Facilities, ⑦ FFAG Accelerators, ⑧ FFAG and Cyclotrons for Applications and Superconducting Magnets, ⑨ Upgrading and Status Report, ⑩ Medical Applications, ⑪ Ion Sources and RF system, ⑫ Beam Dynamics and Computer code のセッションに分けられ、それぞれ数件の招待講演と一般講演が行われた。以前の口頭発表のセッションは、電磁石系、RF 系、制御系、ビームダイナミクスなどのようにサイクロトロンを構成するシステム毎に区分けする場面が多かったが、今回はプロジェクトや応用目的に応じたテーマ設定になっていて特徴的であった。また、前々回、前回に引き続き、今回も FFAG に関連したセッションが独立して設けられ、今や FFAG がサイクロトロン国際会議の中で欠かせない存在になっていることが伺える。さらに近年、世界各地で建設や計画が相次いでいる粒子線治療施設や医学・医療応用に関連した発表も増えていることから、特に今回は粒子線治療用加速器としてのサイクロトロン、シンクロトロン、FFAG, cyclinac (サイクロトロンとライナックの組み合わせ) のそれぞれの利点・難点を議論し、将来の粒子線治療用加速器の方向性を模索するためのパネル・ディスカッションが設けられたのも特徴の一つである。一方、ポスター発表は会場スペースの制限から 2 カ所に分かれて 3 日間行われた。都合によりいくつかの発表がキャンセルされたものの、2007 年 12 月上旬時点で会議録としてホームページにアップロードされている論文は 137 件にも上る。多数の講演の中か

* 大阪大学核物理研究センター
Research Center for Nuclear Physics, Osaka University
(E-mail: mhfukuda@rcnp.osaka-u.ac.jp)

ら、特に注目に値するトピックスを幾つか紹介したい。

2. 新しいサイクロトロンと建設中の施設

今回、最も注目を浴び、各方面から絶賛の声が上がったのは、理化学研究所の A. Goto による RI ビームファクトリーの加速成功の報告であった。2006 年 12 月 28 日に世界初の超伝導リングサイクロトロン SRC から 345 MeV/n $^{27}\text{Al}^{10+}$ イオンビームの引き出しに成功し、次いで 2007 年 3 月 23 日には同じ 345 MeV/n の $^{238}\text{U}^{86+}$ イオンビームの引き出しにも成功した。これにより、2007 年 6 月にはウランビームを用いた超伝導 RI ビーム生成分離装置 BigRIPS のテスト実験において未知の同位元素である ^{125}Pd を発見し、RI ビームファクトリーの卓越した性能を早速実証してみせた。ビーム強度やチャージ・ストリッパ等に課題を残しているものの、概ね順調に建設が進み、目標通りのスケジュールでファースト・ビームが得られたことは特筆すべきことである。SRC のコミッションの詳細については H. Okuno から、RF システムについては N. Sakamoto から、個別の機器開発等については K. Yamada から報告があった。

スイスの PSI とドイツの RPTC で並行して進められていた世界初の陽子線治療用超伝導 AVF サイクロトロンコミッションについて A. Geisler (ACCEL 社, ドイツ) から報告があり、双方とも 2005 年 4 月にファースト・ビームが得られ、その後改良が加えられてほぼ目標性能を達成したことが告げられた。PSI では既に 2007 年 2 月から定常運転を開始して治療が行われており、J.M. Schippers (PSI) によりサイクロトロン及びビームラインの性能試験と運転経験について報告が行われた。特にサイクロトロンでは 80% を超えるビーム引出し効率が達成されていて機器の放射化量が少なく、大変メンテナンスがしやすいことなどが報告された。

T. Zhang (CIAE, 中国) からは、CIAE で建設が進められている放射性イオンビーム施設の 1 次ビーム供給源である 100 MeV H^- サイクロトロン (CYCIAE) の設計と電磁石・RF システム・ H^- イオン源の開発状況について報告があった。

3. 新プロジェクト

ロシアの JINR とベルギーの IBA 社が共同で進めている重粒子線治療用超伝導サイクロトロン C400 (K1600) の設計について G. Karamysheva (JINR) から報告があり、既に IBA 社が実用化している陽子線治療用 C235 サイクロトロンの設計をベースに、4

セクター型主電磁石や RF システムなどを $Q/M=1/2$ の粒子加速に最適化することにより、 $^{12}\text{C}^{6+}$ や $^4\text{He}^{2+}$ を 400 MeV/n まで加速可能であることがシミュレーション計算により示された。等時性磁場を生成するために半径とともに磁極間隔が狭くなる楕円ギャップ形状のスパイラルセクターを採用し、磁極端に近い位置まで等時性磁場を形成している。これにより、磁極端外側での急激な磁場減少を利用して 1 台の静電デフレクターでビームを引き出すように工夫している。さらに、陽子線治療にも利用できるような H_2^+ を加速し、ストリッピング・フォイルを用いた 2 ターン引き出し法により 260 MeV の陽子ビームも取り出し可能であることが示された。この場合、陽子の引出軌道は $^{12}\text{C}^{6+}$ イオンと異なるため、サイクロトロンを出た後に偏向電磁石と四重極電磁石を配置して 2 つの取り出しビームラインを合流させ、下流のエネルギー・デグレーダー上にビームを集束するように設計されている。

前回の国際会議では発表できなかった VECC/DAE (インド) の K500 超伝導サイクロトロン開発状況について B. Sinha は、超伝導電磁石の励磁に成功して磁場測定が完了し、ファーストハーモニック成分の補正のためのシム調整が上手くいったこと、2008 年春からのコミッション開始に向けて現在 RF 系や真空系、入射系、引出系、制御系などの組み込みを急いでいることなどを報告した。

この他、JYFL (フィンランド) の P. Heikkinen からは、既存の K130AVF サイクロトロンにかかる運転負荷を軽減するため、陽子 18~30 MeV、重陽子 9~15 MeV の加速が可能な RI 生成専用の小型サイクロトロン MCC30/15 の導入計画について報告があった。また、KIRAMS (韓国) の J. S. Chai は、国内の RI 及び中性子利用のニーズに応えるため、30 MeV、500 μA の小型サイクロトロン KIRAMS-30 の開発状況について報告を行った。

4. アップグレードと現状報告

PSI では定常的に 590 MeV 陽子を 2 mA に近いビーム強度で運転できるようになり、さらに 1.8 MW のビームパワーに向けて入射器及び K590 リングサイクロトロンへの新しい共振器や入射ビームラインへのハーモニックバンチャーの導入を進めていることなどが M. Seidel (PSI) から報告された。W. L. Zhan (IMP, 中国) からはサイクロトロンとクーラーシンクロトロンなどから構成される HIRFL-CSR のコミッションの状況について、R. Gebel (FZJ, ドイ

ツ) からはクーラーシンクロトロン COSY の入射器サイクロトロン JULIC の運転状況について, K. Hatanaka (RCNP) からは 18 GHz 超伝導 ECR イオン源の導入及び AVF サイクロトロンのアップグレードによるビーム強度と質の改善について, S. Kurashima (JAEA) からはビーム径 $1 \mu\text{m}$ の高エネルギー重イオンマイクロビーム形成に成功した AVF サイクロトロンのアップグレードについて報告があった。

5. FFAG

日本における scaling FFAG 開発の現状と進行中のプロジェクトについて K. Okabe (福井大学) から報告があり, 大阪大学の PRISM プロジェクト, 京都大学の ADS プロジェクト, 中性子捕捉療法 (BNCT) 用 FFAG-ERIT 開発などの概要が紹介された。FFAG-ERIT は, ユーティリティ関連の整備が完了し, マシンの据付調整作業が進められているところである。

STFC Daresbury Laboratory (英国) では, CONFORT (the Construction of a Non-scaling FFAG for Oncology, Research and Medicine) プロジェクトの予算が認められ, 10~20 MeV 電子加速リングとして用いられる non-scaling FFAG (EMMA) の建設に向けて動き出したことが N. Biliss から報告された。

E. Keil (CERN) は, 周長の異なる 3 つの non-scaling FFAG リングを同心円状に配置した陽子線・炭素線がん治療用加速器群の検討結果について報告を行った。H⁺ の場合には最内周のリングで 31 MeV まで, 中間のリングで 250 MeV まで加速し, C⁶⁺ の場合には中間のリングで 69 MeV/n まで, 最外周のリングで 400 MeV/n まで加速する。

6. 応 用

粒子線治療応用については, A. Montelius (Uppsala 大学) からスウェーデン国立陽子線治療センター構想について報告があり, 大学病院を有する 7 つの州が丸ごとになってプロジェクトを推進し, 2011 年からの治療開始を目指しているとのことであった。U. Amaldi (TERA, イタリア) は, 粒子線治療用加速器としてサイクロトロンとライナックを組み合わせた cyclinac の仕様を紹介し, 特にサイクロトロンが持つビームの連続性とビーム強度の変異性, シンクロトロンが有するエネルギー変更の迅速性の両方の利点を兼ね備えた cyclinac は, 動きのある器官の治療に適していることを示した。また, V. Anferov (IUCF, 米国) は, 既設 K220 サイクロトロン施設を,

2 本の水平固定照射ラインと 2 台のガントリーを備えた陽子線治療専用施設に転換する工事が 2005 年に完了し, ガントリーを使った治療が 2007 年 4 月より開始されたことを報告するとともに, ビームキッカーシステムを用いたマルチユーザー治療の可能性やこれまでの運転制御経験などについても言及した。

E. Pedroni (PSI, スイス) は, PSI で開発を進めている陽子線ペンシルビーム・スキャニング法による新しいガントリーシステムの開発状況について報告した。また, D. Trbojevic (BNL) は, 固定磁場の超伝導電磁石を並べた non-scaling FFAG でガントリーを作ることにより, 炭素線用ガントリーの重量を従来の約 1/100 に軽量化し, コンパクト化が実現できることを示した。

“Advantages and disadvantages of different types of accelerator in tumors treatment” と題したパネル・ディスカッションでは, パネラーとして U. Amaldi (TERA), E. Baron (GANIL), Y. Jongen (IBA), E. Keil (CERN), E. Pedroni (PSI), M. Schippers (PSI) が壇上に上がり, サイクロトロン, シンクロトロン, FFAG, cyclinac の特徴について各々がプレゼンテーションを行った後に, 会場の参加者を交えての全体討論が行われた。サイクロトロンは, 器官の動きに対応できる連続的な高速スキャニングが可能で, ビーム強度及び時間構造の制御性にも優れているが, 重粒子線治療用としては未だ実用に至っておらず, エネルギーを変えるためにデグレーダーを用いることからその中性子遮蔽も問題となる。一方, シンクロトロンは加速粒子やエネルギーの可変性に優れているものの, 大きなスペースを必要とするだけでなく, ビームバンチのスピル構造に起因してデッドタイムが生じ, 連続的な高速スキャニングが困難であるなどの不利な点も抱えている。cyclinac はサイクロトロンとシンクロトロンの利点を併せ持ち, 特にライナック・ブースターのクライストロンの ON/OFF 出力制御によりエネルギーを迅速に変更できるという特徴を持っている反面, まだ実用に至っておらず, 複数の加速器を必要とすることからコストや信頼性などの点でも懸念されている。結局, いろんな観点からそれぞれの加速器の長所短所が挙げられたものの, 今後の方向性として統一的な見解が得られるような段階ではなかったというのが率直な印象である。

核医学・核化学分野での新たな RI 利用の開拓を目指した応用研究も着実に増えている。フランスの Nantes 大学では, 30~70 MeV H⁻ ビーム (最大 350 μA), 17.5 MeV H₂⁺ ビーム (最大 50 μA), 15~35

MeV D^- ビーム (最大 $50 \mu A$), $70 \text{ MeV } ^4\text{He}^{2+}$ ビーム (最大 $35 \mu A$) の加速が可能な RI 製造専用のサイクロトロン ARRONAX の建設が進められており, その状況について J. Martino から報告があった. これは, ^{18}F よりも長い半減期を持つ β^+ 放出 RI を用いた PET イメージング, ^{67}Cu や ^{47}Sc などの β^- 放出 RI の治療応用などを目指したものである.

イオンビームのバイオ応用でも優れた成果が生み出されており, T. Abe (理研) は, イオンビーム照射により植物の突然変異率が高まり, 園芸植物や農作物の品種改良の効率を極めて向上させることを, 理研の RI ビームファクトリーでの実例を持って示した. 理研ではイオンビームを用いた植物育種を行っているユーザーグループが既に 120 を数え, 産学官の連携による幅広い利用が特徴である.

7. ビーム制御&ターゲット技術

F. Marti (MSU, 米国) は, NSCL での核破砕反応によって生成した 140 MeV/n 程度の高エネルギー RI ビームを 100 mbar の He ガスで満たされたサイクロトロン風の装置 cycstopper に入射させ, Si デグレーダーと He ガスで減速された 1 価または 2 価の RI イオンを, RF カーペットと RF イオンガイドを使って keV オーダーの低エネルギー RI ビームとして取り出す手法の検討結果について報告した.

H. Ryuto (理研) は, RI ビームファクトリーにおいてウランビームを 345 MeV/n まで加速するのに必要なカーボン・ストリッパーフォイルの厚さと得られる電荷数の関係について報告するとともに, カーボンフォイルの寿命がウランビーム増強の限界を与えていることを明らかにした. ウランビームの大強度化の重要な鍵を握っているのはチャージ・ストリッパーの長寿命化であることから, 平行して開発された回転式シャフト・ストリッパーについても報告した.

8. イオン源

2004 年に LBNL (米国) で 28 GHz の第 3 世代超伝導 ECR イオン源 VENUS が運転を開始して以来, イオンビーム生成電流の記録は次々に塗り替えられており, そこで得られた知見は GYRO-SERSE や SC-ECRIS などに受け継がれている. VENUS ECR イオン源での多価重イオン生成について D. Leitner (LBNL) から報告があり, 既に U^{34+} で $200 \text{ e}\mu A$, U^{47+} で $5 \text{ e}\mu A$ のビーム電流が得られているとのこと

であった. 2006 年 9 月には LBNL の 88 インチサイクロトロンに VENUS が連結され, これまでに Ar, Kr, Xe, U イオンがサイクロトロンで加速されている. 56 GHz などのさらに高い周波数を用いた第 4 世代イオン源の設計検討も始めており, より高い磁場を発生させるための超伝導マグネット技術の開発, X 線シールド強化, ビーム引出・輸送の最適化など克服すべき課題も多いことが明らかになった.

IMP (中国) の 18 GHz ECR イオン源 SECRAL は, ソレノイドコイルを 6 極コイルの内側に配置してコイル間に働く力を低減させる工夫を凝らしており, ビーム強度として Xe^{20+} で $500 \text{ e}\mu A$, Xe^{27+} で $306 \text{ e}\mu A$, Xe^{38+} で $2.4 \text{ e}\mu A$ などが得られていることが H. Zhao から報告された. また, S. Gammino (INFN-LNS) は, コミッショングが始まった 28 GHz ECR イオン源 MS-ECRIS の状況と第 4 世代 ECR イオン源開発の展望について報告した.

9. おわりに

50 年近い歴史を刻んでいるこのサイクロトロン国際会議は, 参加者が 1000 人を超える PAC や EPAC などの大規模な加速器国際会議とは違って, 毎回 200~300 名程度の参加者が集う中規模の会議である. 各サイクロトロン施設を代表する顔ぶれもあまり変わらないことから, 終始アットホームな雰囲気議論し合う姿があちこちで見受けられた. 既に第一線を退かれた賢人の元気な姿も拝見することができ, 若手研究者には大変励みになり, また刺激的である. 今後の益々の発展を期待したい.

なお, 次回の会議は 3 年後の 2010 年に中国の蘭州で開催されることになった.

