

話 題

第 17 回サイクロトロンとその応用に関する国際会議 (Cyclotrons 2004)

後藤 彰*

Cyclotrons 2004

Akira GOTO

標記国際会議 (<http://ribfweb1.riken.go.jp/cyc2004/index.html>) が昨年 (2004 年) 10 月 18~22 日の 5 日間にわたって東京代々木の独立行政法人国立オリンピック記念青少年総合センターで開催された。本国際会議は、文字どおり、「サイクロトロンの建設および運転に従事する研究者・技術者、利用する立場の研究者等が世界中から集い、それぞれの最新成果を発表し、意見交換等を通じて相互に啓発し合いながら当分野の発展を促進する」ことを目的としたサイクロトロンの分野における最大のイベントである。1959 年に第 1 回が開催され、これまでアジア・米・欧の主要研究所によって 3 年毎に持ち回りで開催されており、今回理化学研究所が事務局となってわが国で開催することになった。アジア地域としては 1986 年の第 11 回東京大会以来 18 年ぶり 2 回目の開催となる。

会議は H. Kamitsubo (理研) による日本の加速器の現状の紹介を兼ねた Opening Address と L. Conradie (iThemba Labs) 主導による Dr. H. Jungwirth (国際組織委員会委員で 2003 年 9 月逝去) の追悼セレモニーによって始まった。都心にありながら喧騒からはちょっとはなれて落ち着いた環境にある会場に、世界 18 ケ国より約 200 名 (外国と日本からほぼ半分ずつ) の人々が集い連日熱心な発表・討論が行われた。プログラムは、午前には口頭発表のセッションが 2 つ、午後はポスターセッションに続いて口頭発表のセッションが 1 つという構成であった。発表総数は 152 で、内訳は口頭発表が 64 (その内招待講演が 35) でポスター発表が 88 であった。以下に発表の内容を少し詳しく紹介する。

1. 建設中の施設

講演の先頭をきいて、Y. Yano (理研) による理研の RI ビームファクトリー計画に関する報告があった。ウランまでのイオンを 350 MeV/核子に加速してすべての元素にわたる RI ビームを生成しようという計画で、2006 年のファーストビームを目指して超伝導リングサイクロトロンを含めた 3 台のリングサイクロトロン (K=570, 980, 2500 MeV) および RI ビームセパレータの建設が順調に行われていることが述べられた。

W. Zhan et al. (IMP, 中国) によって報告された IMP では、既存の K450 リングサイクロトロンの後段にシンクロトロン 1 台とストレージリングを 1 台、その間に設置する RI ビームセパレータを建設中で、既にシンクロトロンの手前までビームを輸送してシンクロトロンのコミッショニングを始めたとのことであった (その後 2005 年 2 月に入射に成功)。陽子で 2.6 GeV、軽イオンで 1 GeV/核子、ウランイオンで 500 MeV/核子まで加速できる。

A. Geisler et al. (ACCEL 社, ドイツ) はスイスの PSI とドイツの RPTC に納入した 2 台の医療用 250 MeV 陽子サイクロトロンについて報告した。

インドの VECC で建設が進められている K500 超伝導サイクロトロンに関しても今回の会議で報告される予定であったが、ビザの関係で発表者が来日することができず残念ながらキャンセルとなった。ちょうど電磁石が完成した段階である (2005 年 2 月に冷却・励磁に成功。ただし、励磁は電源の問題で 10 A までで止める)。

2. 現状報告

* 独立行政法人 理化学研究所 RIKEN
(E-mail: goto@riken.jp)

口頭発表で, GANIL (フランス), NSCL (米国), PSI, INFN/LNS (イタリア), RCNP, TRIUMF (カナダ), KIRAMS (韓国), KVI (オランダ), JYFL (フィンランド), JINR (ロシア), iThemba Labs (南アフリカ), IBA (ベルギー), UCL (ベルギー), HMI (ドイツ) といった主だった施設からの報告があった. 前記建設中の施設とともにこれらの施設の多くが, 大強度ビームや RI ビームをキーワードとして掲げている.

GANIL では, K450 リングサイクロトロンのビームを使って ISOL 法で RI 核種を生成しそれを中型の AVF サイクロトロンで 25 MeV/核子まで加速している. (B. Jacquot)

NSCL では, K500 超伝導サイクロトロンで加速したビームを K1200 超伝導サイクロトロンにチャージストリップング法で入射しそこで最終的に 80~150 MeV/核子まで加速することができ, これまでに酸素からビスマスにわたって 14 種類の核種を加速した. (P. Miller et al.)

PSI のリングサイクロトロンは世界最大ビームパワーを誇るもので, 590 MeV の陽子を 2 mA 強のビーム強度で加速している. 縦方向の空間電荷効果によるビーム強度の限界値が加速電圧の 3 乗に比例するため, より大強度のビーム加速 (3 mA) に向けて全部で 4 台ある共振器の更新を行っているところである. 目標は 500 kW の電力損失で 1 MV の電圧を発生させることであり, ベンチテストではこの目標が達成できた. 現在 1 台目を取り替えたところで, この新しい共振器では 810 kV の電圧が発生できている. 印象的だったのは, 高周波電場計算や構造計算に関する 3 次元計算プログラムの発達により, 大気圧によって共振器が変形した場合の共振周波数も正確に予測できるようになったということである. (H. Fitze)

RCNP のサイクロトロンに関しては, K. Sato (RCNP) によって, 磁場の高安定化および加速技術の改善による超高品質ビームの達成の報告があった.

RI 生成用や医療用サイクロトロンを製作販売しているメーカーである IBA (Ion Beam Applications) 社の W. Kleeven は, 3 年前の今回のこの会議で提唱した静電デフレクターなどの取出し機器を一切使わない「自己取出し」型サイクロトロンの開発を進め, 今では取出し効率 75% 以上で 1 mA 以上の陽子ビームが安定に取り出せるようになった, という報告を行った. 2.5 mA のビーム強度も射程距離内にあるとのことである.

3. FFAG

FFAG (Fixed-Field Alternating-Gradient) は前回の会議からそのためのセッションが設けられたカテゴリーで, 今回も 1 セッションが割り当てられた.

まず, Y. Mori (KEK) によって, FFAG によるイオン加速の先駆けとなった POP-FFAG に続いて建設した 150 MeV 陽子 FFAG 加速器の現状と日本のその他の FFAG の設計・建設状況についての報告があった.

その日本の現状について, 口頭発表では, M. Tanigaki et al. (京都大), A. Sato et al. (大阪大), H. Tanaka et al. (三菱電機) によって, それぞれ, 京都大学原子炉の ADS (Accelerator-driven Subcritical System) 研究用の陽子 FFAG 加速器, 大強度ミュオン源を目指した PRISM 計画用の FFAG 加速器, FFAG とシンクロトロンを組み合わせた加速エネルギー 1 MeV の超小型ハイブリッド電子加速器 (磁石の直径が 100 mm で重さが約 3 kg) についても個別に報告された.

また, ミュオン加速用に提唱されている non-scaling FFAG についても J. Berg (BNL) や S. Koscielniak et al. (TRIUMF) によって報告された. Non-scaling FFAG は, 磁石の配列を scaling FFAG の DFD とは逆に FDF とすることによって, リングの周長を短くすることができる, 動径方向の軌道の広がりが小さくなるため磁石やビームチェンバーのサイズがより小さくてすむ, 軌道長が単調に増加せず加速エネルギーの中程で最小値をとるため周回時間の変化の幅が小さくなる, 等の利点があるため最近精力的に検討されている方式である.

4. イオン源

J. Ishikawa (京都大) による「10th International Conference on Ion Sources」の総括報告があった. 重イオン加速用サイクロトロンには不可欠の ECR イオン源に関する論文は全体の 27% を占めていたということである.

大強度多価イオンの生成のために超伝導 ECR イオン源がいろんな施設で設計・製作されているが, それらのイオン源からのビーム強度の限界を決める要因は主に空間電荷効果に関与するビームの取出しや輸送に関することがらであることが S. Gammino et al. (INFN/CNS) によって論じられた.

また, GANIL, 理研, IMP, LBNL (米国), NSCL, PANTECHNIK 社 (仏) における ECR イオン源の

現状についてそれぞれ報告があった。T. Nakagawa et al. (理研) は、プラズマ電極の位置と磁場分布の選び方によってビーム強度が大きく変わること、これらのパラメータを最適化することによって理研の ECR イオン源において Ar^{8+} で 2 emA , Kr^{13+} で 600 emA , Xe^{20+} で 300 emA のビームが得られたことを示した。C. Lyneis et al. (LBNL) によると、LBNL では 28 GHz の第 3 世代超伝導 ECR イオン源が完成したところで、重いイオンでは Bi^{25+} が 160 emA , Bi^{30+} が 100 emA という最初の結果が得られている。ちなみに、彼らの目標は、RIA 計画用に U^{30+} を 240 emA および 88 インチ サイクロトロン用に U^{48+} を 5 emA 生成することである。P. Miller (NSCL) によって、NSCL では軸方向のソレノイド 6 台と六極コイル 6 台のすべてを超伝導で設計している、という報告があった。また、C. Bieth et al. (PNATECHNIK 社, フランス) は高温超伝導線を用いた ECR イオン源の設計・製作について報告した。

5. 電磁石

H. Okuno et al. (理研) によって、理研の超伝導リングサイクロトロン (SRC) のセクター電磁石と入射用偏向電磁石の製作状況についての報告があった。SRC (の磁石) は 6 台の超伝導セクター電磁石で構成され、最大必要磁場 3.8 T , 最大コイル電流 5000 A , 最大起磁力 4 MA/セクター , 全重量 7800 トン , 全蓄積磁気エネルギー 235 MJ という仕様である。これまでに前例のないサイクロトロンである。メインコイルとトリムコイルにはアルミ安定化 NbTi 超伝導線が使用され、メインコイルは液体ヘリウムによる浸漬冷却方式、トリムコイルは強制 2 相流ヘリウムによる間接冷却方式で冷却される。セクター電磁石 6 台とも上ヨークを組立て中 (2005 年 2 月現在組立て完了) で、2005 年の夏から冷却・励磁を始める予定である。入射用偏向電磁石は、超伝導コイルが負の曲率をもつため巻き方に工夫が必要で、それに対しては数層分を負の曲率部と同じ長さで正の曲率を持つ仮の枠に巻き付けた後それを本来の負の曲率を持つコールドポールにまとめて押し付ける、といったことを数層毎に繰り返すことで解決した。3 回のクエンチの後に最大必要磁場 3.8 T を達成することができた。

6. 高周波

P. Sigg (PSI) による「3rd Workshop on High Power RF-systems for Accelerators」の総括報告があった。40 kW / 350 MHz トランジスタアンプ, IOT

(Inductive Output Tubes), 100 kV / 20 A トランジスタ高速スイッチなどが紹介された。また、ここでも PSI の新しい共振器の高周波特性に関して 3 次元計算プログラムによる値と測定値が非常に良く一致するということが強調された。

J. de Villiers et al. (iThemba Labs) は、ビーム強度の増強を目指して既存のリングサイクロトロン (のバレー部の真空チャンバー内) にフラットトップ共振器を新たに組み込んでコミッショニングを行った。ちなみに、この施設は AVF サイクロトロンの共振器に高調波 (5 倍) 共振器を結合させてフラットトップ電圧波形を得ることを初めて行ったところで、現在ではいくつかの施設でこの方式を採用もしくは検討している。今回の会議でも、理研 (A. Goto et al.), 原研高崎研 (S. Kurashima et al.), RCNP (T. Saito et al.) から AVF サイクロトロンのフラットトップ化に関する報告があった。

サイクロトロンに限らず加速器においては高周波関連のトラブルはいつも悩みの種である。Y. Bylinski et al. (TRIUMF) は、RF 放電の原因を徹底的に調べることによってその頻度を減らす対策を施し、放電でシステムがダウンした場合の再立上げの時間を短縮する方法を考案し、トラブルの診断法を開発するなどしてこれまで RF のトラブルでマシンがダウンしていた年間 200 時間もの時間を $1/3$ 以下に減らすことに成功した。まことに賞賛すべき成果である。

7. ビーム運動学

ビームの大強度化にともなって、空間電荷効果を考慮したビームシミュレーションが精力的に行われている。

A. Adelman (PSI) は、PSI の複合加速器系におけるイオン源からターゲットまでのビームの複雑な振舞いを定量的に理解するために、3 次元空間電荷効果を取り入れた計算プログラムを開発した。これは、現状のビーム強度 (2 mA) をさらに増強させる場合の運転に役立てられる。

A. Goswami et al. (DAE/VECC, インド) は、大強度ビームに付随する問題を研究するために、 10 MeV , 10 mA のラジアルセクター型の小型陽子サイクロトロンを開発している。彼らの設計によると、入射エネルギー 100 keV , 入射半径 6.6 cm , ディー電圧 100 kV の仕様であれば 10 mA のビーム強度でも入射領域での横方向空間電荷効果は問題にならない、ということである。

F. Marti et al. (NSCL) は、自分たちで開発した空

間電荷効果を取り入れた軌道計算プログラムの面白い結果が実際に起こっているかどうかを確かめるために、周長 6.6 m の小型の等時性ストレージリング (20 keV H_2^+ , 約 200 ターン) を開発・製作した。スケーリング則によれば、PSI の入射器リングサイクロトロン (72 MeV 陽子) での 2 mA というビーム強度に対する空間電荷効果と同等の効果が 10 μA のオーダーのビーム強度で得られる。空間電荷効果によってビームバンチが分割されクラスター化するという計算結果がこのリングでよく再現されることが分かった。

いくつかの超伝導サイクロトロンで、メインコイルの鉛直方向の位置の微妙なずれによってビーム損失が生じる現象が起こっている。S. Brandenburg et al. (KVI) は、彼らのサイクロトロンでもそのようなビーム損失が生じたこと、鉛直方向のビーム運動の振幅の測定とシミュレーションからコイルと鉄芯の間の位置誤差が 0.5 mm 程度あると判断したこと、コイルの位置を微調整しながらビームが損失しない条件を探した結果最終的にコイルを 0.34 mm シフトさせたこと、を報告した。M. Schippers et al. (PSI) は、このようなコイル位置のずれによる磁場の上下非対称分布を取り入れた 3 次元軌道計算プログラムを開発してビームの発散運動について詳しく調べた。

P. Bertrand et al. (GANIL) は、鉛直方向の共鳴をうまく利用することによってサイクロトロンの質量分離能力を改善する方法を考案した。取出し領域で動径方向 25 cm ほどにわたってビームを鉛直方向にキックする電極を置き、その電極に RF 周波数の 2 倍の周波数とビーム周回周波数の ν (鉛直方向ベータトロンの周波数) 倍の周波数をミックスした電圧をかけることによって、同期した所望の核種ビームだけ加速を続けそれ以外の核種のビームは上下に振られて核種の分離が行われる、という方法である。彼らの RI ビーム加速用サイクロトロンの本来の質量分離能力は 3×10^{-4} であるが、この方法を用いることによって計算上は 2×10^{-5} を達成できる。

空間電荷効果とは関係ないことであるが、T. Honma et al. (放医研) は、静電デフレクターの放電の原因についてビーム運動学的になかなか面白いなぞ解きをした。彼らのサイクロトロンでは内部イオン源を使ってある条件でイオンを加速するときにデフレクターの放電が間欠的に起こる。この放電は、通常の運転では全く問題にならない 30 kV 程度で起こり、しかも加速ビームを中心付近で止めても起こるのである。そこで、軌道計算を行って彼らがたどり着いた結論は、たとえば $^4He^{2+}$ を加速する場合イオン源で同時に生

成される $^4He^{1+}$ がたまたま低いエネルギーを得てそれが磁石のヒルとバレーの境界にそって回転運動をしながらドリフトしてデフレクターの電極を叩くことがあり、それが放電の引き金になっている、ということである。その昔サイクロトロンへのビームの入射方法として、イオンを外から (同じように) ヒルとバレーの境界にそって中心付近までドリフトさせてそこでうまくちょうど加速位相に乗せて加速させる、というアクロバチックな方法が提案されたことがあるが、彼らの解析はそういったことも思い出させて興味深い。

8. ビーム診断と制御

前にも述べたように、PSI では 590 MeV の陽子を 2 mA のビーム強度で加速している。ビームパワーにして 1 MW 以上である。したがって、このビームが何らかの原因で真空箱の壁やその他のパーツに当たると数 ms でダメージを与えてしまう。また、ビームのチューニングは 1 μA 以下から 2 mA までの非常に広い範囲をカバーしなければならない。ビーム強度によってビームプロファイルが大きく変わる。このような状況に対応すべく、PSI では、ビームロスモニターを 110 台、コリメータを約 80 個、その他ビームプロファイルモニター、ハローモニター、ビーム位置モニター等を各所に多数設置している。A. Mezger (PSI) は、これらのシステムを用いて行っている高速ビーム遮断や自動復帰チューニングなどについて包括的な報告を行った。

9. 応用

口頭発表では、J. Flanz (MGH) による MGH (Massachusetts General Hospital) での治療用 230 MeV 陽子サイクロトロンの現状に関する報告、S. Yoshida et al. (理研) による理研リングサイクロトロンビームを使った植物の品種改良に関する報告、A. Denker et al. (HMI) による ERDA (Elastic Recoil Detection Analysis) を使った物質科学の研究や高エネルギー PIXE (Proton Induced X-ray Emission) を使った美術品の非破壊分析などに関する報告、S. Enomoto et al. (理研) による理研リングサイクロトロンビームを使ったマルチトレーサの生成とその生物学への応用に関する報告、などがあった。また、ポスター発表で、 ^{18}F -FDG の合成や RI 製造に関する報告が 8 編あった。

10. RI ビーム施設と将来計画

G. Bollen (NSCL) によって米国の RI ビーム施設の現状と将来 (RIA 計画) に関する報告, J. Cornell (GANIL) によってヨーロッパの RI ビーム施設の現状と将来 (EURISOL 計画) に関する報告, M. Moscatello (GANIL) によって GANIL の将来計画 SPIRAL 2 に関する報告, があった。

SPIRAL 2 は, 線形加速器で加速した 5 mA, 40 MeV の重陽子ビーム (200 kW) を炭素板に当てて中性子を発生させ, その中性子をウランカーバイド (UC_2) ターゲットに照射して核分裂による RI を生成しようという計画である。それをイオン化した後に 2 本のビームラインが同時に使える設計になっていて, 一つは低エネルギー用でもう一つは既存のサイクロトロンまで運ばれそこで 5~10 MeV/核子まで加速される。

11. その他

超伝導技術のサイクロトロンへの応用が初めて提案されてからちょうど 30 年になる。超伝導サイクロトロンの生みの親の一人である H. Blosser (NSCL) によって, この間の超伝導サイクロトロンの発展の経緯が報告された。超伝導サイクロトロンで最初にビームが加速されたのは 1982 年で, NSCL の K500 サイクロトロンであった。それ以来, さらに 8 台の超伝導サイクロトロンが建設され, また理研の超伝導リングサイクロトロンを含めて 4 台が現在建設中である。

会議 4 日目の午後はエクスカージョン, 夜はバンケットに当てられた。エクスカージョンは浅草見物と江戸東京博物館の見学をし, バンケットは東京湾クルーズの船の上で行われた。Y. Hirao (放医研) が

「Cyclotrons and Tokyo Bay」というタイトルで昔の貴重な写真のスライドを使いながらバンケットスピーチを行った。日本の加速器の歴史について述べ, そして「皆さんのこの下の海の底に (投棄された) サイクロトロンが眠っている」と臨場感たっぷりに締めくくりその歴史的事実を出席者の心に焼き付けた。その後全員が料理を, また東京湾の夜景を楽しんでいた。数日前から超大型台風が日本に接近しておりちょうどバンケットの頃に東京付近を直撃することも懸念されたため, 一時はどうなることかと主催者側としてはかなりヤキモキさせられたが, 無事挙行することができてホッとした。

最終日は午前中で終了し, 午後からバスで理研へ移動し施設見学が行われた。たっぷり時間をかけて施設の全てを見学していただいた。サイクロトロンが専門の面々も, 超伝導リングサイクロトロンの大きさにはさすがに強い印象を受けたようであった。なお, 翌日は KEK の施設見学も行われた。PoP-FFAG, 150 MeV 陽子 FFAG 加速器等を見学した。

サイクロトロン国際会議は今回から, PAC, EPAC, LINAC 等と同様に, アブストラクトの受付けやプロシーディングスの原稿の受付け・編集を JACoW (<http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/>) の取決めに従って行うようになった。

次回の会議は 3 年後の 2007 年 10 月にイタリアのカターニアで開催されることが決まっている。

最後になりましたが, 会議の開催に際しては, 独立行政法人日本学術振興会の「国際研究集会奨励」による補助, 日本加速器学会, 日本物理学会, 応用物理学会, 日本原子力学会の後援, 多数の企業からの協賛, 理化学研究所の関係者はじめ多くの方々の協力, を仰ぎました。この場を借りてお礼申し上げます。

(敬称略)