

## 会議報告

## サイクロトロン国際会議 2010 報告

坂本 成彦\*

Report on the 19<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and  
their Applications September 6-10, 2010, Lanzhou

Naruhiko SAKAMOTO\*

## Abstract

The 19<sup>th</sup> International Conference on Cyclotrons and their Applications was held in Lanzhou, China from September 6 to September 10, 2010. The overview of the conference is reported.

20世紀半ばに始まったサイクロトロン国際会議は、3年毎に開かれ、2001年のミシガン、2004年東京、2007年シチリアに引き続き、E. Lawrenceによるサイクロトロン発明80周年の年に、初めて中国で開催されることになった。

北京から飛行機で2時間半、中国内陸部に位置する西域シルクロード起点の、開催地となった蘭州市は、石油産業の盛んな人口260万の巨大都市である。海拔1520メートルの黄土の平地に広がる街の中心を黄河が流れ、悠久の歴史をたたえる。

今回のホストは、その蘭州市の中心にある中国近代物理学研究所 (IMP)。1957年設立のIMPは、20世紀半ばから後半に建設された2器のサイクロトロンの後段に2器のCSR (Cooler Storage Ring) と In-Flight のRIビーム発生装置を建設し、2005年のコミッションング以来、着実にその性能を上げている。

会議は9月6日から10日までの5日間、IMPの隣にある寧臥荘賓館 (NINGWOZHUANG HOTEL) の会議場で行われた。参加人数は、参加者リストによると209人。そのうち154人が、IMPの外部からの参加である。論文数は、147本。口頭発表が55本でそのうちの34本が招待講演。あとはポスターによる発表となる。

口頭発表は、600人収容のメインホールで行われ、IMPのH. W. Zhaoによる開会の挨拶、蘭州市長Z. Yuanの歓迎の挨拶により始まった。

オープニングセッションでは、原子核物理学者のI. Tanihataが、「この20年で原子核物理学がいかに変遷を遂げたか」というタイトルで講演した。最初の10年を発見、後の10年を理解の期間として加速器の発展と共に不安定な原子核に対する理解が深まって来た経緯の説明があり、最後に加速器のさらなる高性能化—大強度、高エネルギー、多様な核種—を望むと締めくくった。続いて、M. K. Craddockが、サイクロトロンの80年の歴史を振り返り、1930年のE. Lawrenceのサイクロトロンの発明は、原子核物理学に革命を起こしたのは言うまでもなく、マイクロトロンからFFAG、シンクロトロンに至るまで新たに開発された円形加速器の礎となり、それらの加速器は科学、医学、産業に大きなインパクトを与え、そしてサイクロトロンも何年もかけて新しいアイデアを取り入れながらビームの大強度化を目指して進化して来ており、これからの80年も新しい技術を取り入れ、さらに進化する事が期待されると述べた。



図1 蘭州中川空港

\* 理化学研究所仁科加速器研究センター RIKEN Nishina Center  
(E-mail: nsakamot@ribf.riken.jp)



図2 市の中心を流れる黄河



図3 会議場となった寧臥莊賓館

オープニングセッションに引き続き以下のカテゴリでセッションが展開された。

- Cyclotron status, high intensity
- Cyclotron status, upgrade and development
- Newly operating cyclotrons and new cyclotrons under commissioning
- New projects and new ideas
- Ion sources
- RF systems and beam diagnostics
- Radioactive beam facilities
- Beam dynamics and beam strippers
- FFAG accelerators
- Cyclotron applications

近年、2次ビームや中性子発生を目的とする施設は、ビームの大強度化、高エネルギー化、大電力化を図り、加速器のアップグレードを計画、実行している。

最初のセッションでA. Gotoにより、～10 kW級の重イオンビームを供給する6つのサイクロトロン施設、仏GANIL、米NSCL/MSU、露FLNR/JINR、中HIRFL+CSR/IMP、蘭AGOR/KVI、日RIBF/RIKEN、

について大強度化への取り組みに関するレビューが行われた。

F. Chautardにより、GANILの現施設現状報告がなされた。ISOL方式でRIビームを発生させるSPIRAL1(イオン源, charge breeder, CIMEサイクロトロン)のreliability向上への取り組みに関して報告があった。また、P. Bertrandにより建設中のSPIRAL2のイオン源, RFQ, ビームライン, 超伝導リニアック(重陽子40 MeV, 5 mA)の進行状況についての報告と、2014年のSPIRAL2コミッショニングに向けてSPIRAL1装置の大強度化対応のための性能向上について、CIMEの中に鉛直方向にRF電場をかけて加速2次ビームの純度を上げる試みなどが紹介された。

NSCL/MSUでは2000年より2台の超伝導サイクロトロン(K500, K1200)の結合運転(coupling operation)によりIn-Flight法を用いてRIビームを作るのに必要な、核子当たり120 MeV/uの重イオンビームを発生させている。J. W. Stetsonの報告によると、2台のサイクロトロンの通過効率が劇的に向上し(それぞれそれまでの2倍)、現在 $^{16,18}\text{O}$ ,  $^{40}\text{Ar}$ ,  $^{48}\text{Ca}$ ,  $^{78}\text{Kr}$ のビームパワーを1 kWまで上げる事に成功したという。同MSUからは、G. Machicoaneにより新しく建設した超伝導ECRイオン源(SuSI)から大強度のビーム、300 e $\mu$ AのXe $^{20+}$ , 400 e $\mu$ AのKr $^{13+}$ を発生させる事に成功したと報告があり、また、F. Martiによりサイクロトロンの入射で荷電変換のために用いる炭素膜とFRIB計画のウラン加速に用いる炭素膜のR&Dについて報告された。

FLNR/JINRのサイクロトロンU400では、超重元素合成のための $^{48}\text{Ca}$ ビーム、1 p $\mu$ Aを達成しているが、更なる強度増強を図るためのアップグレードを進めている。G. G. Gulbekyanの報告では、2012年に3 p $\mu$ Aの強度を実現するとのことである。さらに、10 p $\mu$ Aの強度を得る為に、新しく建設を計画しているDC-200サイクロトロンの設計について報告があった。

ホスト研究所IMPからは、まずH. W. Zhao氏が20年以上稼働している前段加速の2台のサイクロトロンSFC, SSCの改良, 改善について報告され、続いてY. J. Yuanにより2007年より稼働しているCSRm/CSReの2台のシンクロトロンの現状報告とSFCに代わる新しい入射器建設の計画について説明があった。既に2次ビームの発生にも成功しているという。

KVIからは、まずS. BrandenburgによりAGORのアップグレードに関しての報告があった。KVI-AECRISイオン源の改良についてのV. Mironovの報告によると、入射・引き出し側のスクリーンをアルミからステンレスに、引き出し電極の形状を円錐計から円筒形に



図4 会場前で撮影した集合写真

変更することにより、プラズマの安定度が上がったとのこと。また、多価イオンを加速する際に大きな問題のひとつとなるサイクロトロン内の真空を解析するため、TRIUMFを用いて3次元の真空シミュレーションについてのA. Senの報告があり、M. A. Hevingaにより、大強度ビームをハンドリングするため、サイクロトロン内及びビームラインにおいて損失をモニタし、規定の量を越えた場合にビームのDutyを自動的に下げるインターロックシステムの構築に関して報告があった。これらの改良により、Pbイオンの強度を $10^{12}$ 個/秒(1 kW相当)まで上げるといふ。

RIBFは、2006年のファーストビーム以来、新旧施設のRF、真空、冷却、診断系などあらゆる場所に改良を加え、ビーム強度とavailabilityを年々上げている。今年春には、 $^{48}\text{Ca}$  345 MeV/u ビームで3 kWのビームパワーを実現している。会議ではO. KamigaitoによりRIBF全体の報告がなされ、N. Sakamotoにより超伝導リングサイクロトロン(SRC)の高周波系の改良と現性能に関する報告がなされ、K. SudaによりRF信号の分配を各所に設置したパワーディバイダを廃止する事により、高周波系の電圧/位相安定度が大きく改善したこと、またT. Watanabeにより、大強度ビームを扱うための診断系についての報告があった。当施設では、大強度ウランビーム加速のために新たに入射器の建設を行っており、新しい28 GHz超伝導ECRイオン源に関して、T. Nakagawaにより報告され、また、K. Yamadaにより2010年末のコミッションングに向け

て順調に進んでいる旨報告があった。

ビームパワーの観点から言えば、上に挙げたどの施設もPSIには敵わない。PSIでは、サイクロトロンから、590 MeV, 2.2 mAの陽子ビームを中性子源に供給している。現在、さらなるビーム強度増強の取り組みについてM. Seidelにより報告があった。1974年から稼働している終段のサイクロトロンの加速空洞をギャップ電圧1 MVのものに入れ替えたが、フラットトップ空洞の電圧が不足しているために、加速電圧を上げることにより取り出しでのビーム損失を減らせない問題に対するひとつの答えとして、昨年来ハーモニック10のsuper buncherを入射ラインに導入して試験を行っているとの事。さらに、入射器のフラットトップ空洞(現在、加速位相で用いている)を新しい空洞に入れ替えるプロジェクトの進捗状況について、L. Stingelinにより報告があった。診断グループからは、J. M. Humbelにより大強度ビームを扱うためのビームモニタについて紹介され、また、A. Adelmanにより、空間電荷効果を取り込んだビームシミュレーション(OPAL)について、実際のビームプロファイルと比較して議論された。

RIビームの施設として、サイクロトロンからの陽子ビームを用いるTRIUMFでは、ビーム強度が建設当初の100  $\mu\text{A}$ から300  $\mu\text{A}$ に増強され、最大エネルギー500 MeVの $\text{H}^-$ ビーム供給は、おおよそ90%のreliabilityに達成しているとI. Bylinskiiにより報告された。またISOL方式で発生させたRIビームを再加速するISACのドライバとして、超伝導電子リニアック



図5 ある日の夕食の様子. フランスチームと

(50 MeV, 500 kW) を建設する計画についても紹介があった。Y. Rao からは、サイクロトロンから3つのエネルギーの陽子ビームを同時に引き出して ISAC やミュオン生成などの3つのビームラインへの同時供給運転の reliability の向上への取り組みについて報告があった。その中で、300 keV 入射ラインの横方向のエミッタンスを、ワイヤスキャンにより複数の軸へ投影した絵ではなく、トモグラフィーによっての2次元の分布図にすることにより視覚化し、シミュレーションとの比較を行った。

その他の施設においても、大強度化、安定化のための既存のマシンのアップグレードの取り組みがなされており、Texas A&M (D. P. May) では、入射器 K150 サイクロトロンを RI ビーム製造のためのドライバとして用いるための改造、iThemba (J. L. Conradie) は、イオン源の補強と制御システムの更新、RCNP/Osaka Univ. (K. Hatanaka) は、18 GHz 超伝導 ECR イオン源 (T. Yorita) 及び AVF サイクロトロンにフラットトップ空洞を導入 (M. Fukuda)、HIRFL (X.T. Yang) は大掛かりな SFC の真空機器/チャンバーの更新、NIRS (S. Hojo) の AVF930 の magnetic channel の更新の検討、JAEA (S. Kurashima) の AVF サイクロトロンでのシングルパルスビームの安定供給への取り組み、RIKEN (S. B. Vorozhtsov) でも AVF サイクロトロンの入射領域の改造の検討などなど、枚挙に遑がない。

そんな中で、新しく建設中のサイクロトロンとして報告されたのが、VECC (C. Mallik) の超伝導サイクロトロンで、取り出し半径までの加速に成功し、いよいよ取り出しまであと少しのところまでこぎつけた。また、JYFL (P. M. T. Heikkinen) の新しい MCC30/15 サイクロトロンの設置 (仮組されたサイクロトロン本体が、クレーンでつり上げられて天井から搬入される写真が印象的でした)・組み立てが進んでいる。

新しい計画、構想のセッションでは、L. Calabretta

(LNS/INFN) のメガワットサイクロトロンや、K. Takayama (KEK) の提唱するデジタル加速器の発表が注目を集めた。

第16回サイクロトロン会議から新たに設けられた FFAG のセッションでは、Y. Mori が、日本での FFAG 加速器の現状報告を行い、S. L. Smith により STFC/DL/ASTeC で新たに建設した EMMA のコミッショニング成功の報告と、C. Johnstone と、M. Craddock によりそれぞれ FFAG の新たな設計手法を提唱する発表があった。

応用の分野では、特に医療利用が目的のサイクロトロンの開発が目覚ましく進んでいる。その中で注目を集めたのはプログラム最後の論文で KURRI/Kyoto Univ. (H. Tsutsui) において、Boron Neutron Capture Therapy (BNCT) のための中性子発生用陽子サイクロトロンでエネルギー 30 MeV、電流 1 mA を達成したことへの報告であった。

全てのセッションが終了し、S. Brandenburg (KVI) により Conference Summary が行われた。サイクロトロンの性能向上の駆動力となるのは何か？ それは、これまでもこれからも極限状態に迫る原子核物理であることは間違いないだろう。はたまた、中性子源のドライバとしてもさらなる強度の向上が求められている。応用としては、医療用のサイクロトロンが世界で600台稼働していて今でもおおよそ年に50台のペースで建設されているとのこと。さらに、将来的には、Home Land Security のための小型サイクロトロンや、ニュートリノ物理のためのマシンなど新たに開拓される分野もあるだろう。サイクロトロン本体でなくその付帯技術の向上も必要不可欠で、ISOL 方式の RI ビームの施設では、標的、粒子選別、Charge Breeder, Post Accelerator の開発が求められている。また、In-Flight 方式の施設では、多価の重イオンを発生する ECR イオン源、荷電変換膜の開発が急務である。全体を通して議論があったのは、サイクロトロンのリニアックに対する優位性は何かということである。コスト？ 建物の規模？ などなど様々な議論があるのは言うまでもないが、少なくともサイクロトロンは長寿命である。LBL の 88-Inch サイクロトロンは、48年目を迎え、スウェーデン Svedberg 研究所の Gustaf Werner サイクロトロンは59歳。(すると会場から1939年から動いているサイクロトロンがあるよとコメントが出た。残念ながらどこの研究所かを聞き逃した)。そして、サイクロトロンはまだまだその性能の限界に達していないと述べて会議の最後を締めくくった。

次回第20回は、2013年、バンクーバーで開催される。