

会議報告

タンデム加速器及びその周辺技術の研究会

笹 公和*

Report of the Community Meeting on the Electrostatic Particle Accelerators and Their Related Technologies

Kimikazu SASA*

「第20回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」が、2007年7月12-13日の会期で日本原子力研究開発機構原子力科学研究所において開催された。1988年に「第1回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」が開催されてから、20周年を迎えたことになる。「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」は静電加速器全般とその周辺技術を題材として、静電加速器の開発、運転、応用の現場におられる研究者、技術者の方々が気楽に意見及び情報の交換、議論できる場を提供し、参加者相互の親睦を図りつつ発展してきた。本報告では「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」の歴史と変遷、最近の静電加速器施設を取り巻く状況について紹介する。

「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」とは

国内にはいくつかの加速器関連の研究会が存在しているが、「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」(以下、通称の「タンデム研究会」を使用)は主に静電加速器に関わる研究者・技術者及びその利用者を対象とした研究会である。研究会の名称に「タンデム加速器」とあるが、シングルエンド型の静電加速器なども含めて考えている。「第1回タンデム研究会」は日本原子力研究所の峰原英介氏と東京工業大学原子炉工学研究所の新井栄一氏の呼び掛けにより、1988年に日本原子力研究所東京本部において開催された。以降、国内の静電加速器施設が持ち回りで主催する形式で、例年7月頃に2日間程度の会期で20年間継続して開催されている。

タンデム研究会は非常にユニークな研究会であり、

その特徴は下記に示す「第1回タンデム研究会」報告書序文に掲載された設立主旨説明に表されている。研究会の設立主旨

1988年7月6-7日 日本原子力研究所

「第1回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」報告集 序文より

「最近、世界的にタンデム加速器、バンデグラーフ加速器の応用範囲は、大きく広がっており、数100kVの分析機器から、MV程度の半導体製造装置、原子分子物理、加速器年代測定、極微量元素分析、高出力高効率自由電子レーザー、更に核物理、中高エネルギー物理の重イオン超伝導後段ブースター、重イオンシンクロトロン、重イオンストレージリング等の大型加速器システムの為の入射器と急速な発展をとげております。しかしながら、今まで国内では、静電加速器関係の定期的な研究会はなく、開発、運転、応用の各現場に置きまして、発生します種々の問題については個々の研究機関で個人的な解決の努力とそれに関係した意見の交換しかできない状況でした。今回の研究会に置きましては実務に携わっておられる現場の技術者、研究者に集まっただき、具体的な問題の解決、解決方法まで知らなくても関連した意見、情報の交換、議論の場所と機会を持ちたいと考えています。研究会では、特に、完成した仕事よりは未完の仕事、華々しい成功例よりは失敗例、外国の仕事の物真似よりは新しい独創的な仕事(新しい独創的な失敗も含む)を歓迎したく思います。」

これはこの研究会を始めた目的と主旨であります。

日本原子力研究所(現日本原子力研究開発機構)

峰原英介氏

* 筑波大学研究基盤総合センター応用加速器部門

Applied Accelerator Division, Research Facility Center for Science and Technology, University of Tsukuba
(E-mail: ksasa@tac.tsukuba.ac.jp)

上記の設立主旨から、「タンデム研究会」は静電加速器関連研究者、技術者の方に情報交換、議論の場所と機会を与えることを第1の目的と考えている。静電加速器施設の維持管理とその運用を担う者は、加速器の専門家で無い者が多く、利用者の立場から加速器の運用、保守整備を担う立場になった方が多い。特に小型静電加速器は1~2人の小人数で保守整備を実施しており、技術的な問題が発生した時にその解決方法を自ら模索するしかない状況となる。「タンデム研究会」では、個々の事例、特に上記の設立主旨を伝統的に尊重した「失敗の技術紹介」を重んじており、また先駆的な研究課題や技術の紹介が奨励されている。1人では解決できない問題について、率直な意見交換と情報提供を心がけ、お互いに得た知見と情報を共有できるアットホームな研究会となっている。

現在、「タンデム研究会」では、各静電加速器施設を代表した17名が世話人としてその運営を担っている。国内の静電加速器施設のネットワークを形成し、静電加速器に興味がある全ての方々に開かれた研究会となっている。現在のところ明確な会則や会報などは無いが、2005年度より筑波大学研究基盤総合セン

ター応用加速器部門が事務局代表となり、「タンデム研究会」ホームページの運営及びメーリングリストの整備をおこなっている¹⁾。2007年12月時点で、「タンデム研究会」メーリングリスト登録者数は310名となっている。

「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」の開催履歴

表1に「タンデム研究会」開催履歴を掲載する。研究会参加者は毎年100名程度であり、国内の多くの静電加速器施設から参加者を得ている。「第14回タンデム研究会」からは、発表件数の増加に伴いポスター形式の発表セッションも設けている。過去の報告内容を見ると、大型タンデム加速器の後段加速器として超伝導加速空洞などの技術開発報告などもあり、静電加速器に関連した研究であれば幅広く受け入れている。研究会では各静電加速器施設の現状報告を中心として、関連技術開発から応用研究まで幅広いテーマを取り扱っている。最近ではイオンビームを用いた応用研究の発表が増えており、静電加速器をどう利用して発展させていくかが研究会での主要な議題となってい

表1 「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」開催履歴

開催回数	開催期間	主催機関（開催時の名称で表記）	参加者数	報告概要			
				報告件数	施設報告	技術開発	応用研究
第1回	1988年7月6-7日	日本原子力研究所・東京工業大学原子炉工学研究所	60	36	9	19	8
第2回	1989年7月13-14日	東京工業大学原子炉工学研究所	89	27	5	11	11
第3回	1990年7月19-20日	京都大学理学部	66	33	7	14	12
第4回	1991年7月11-12日	日本原子力研究所高崎研究所	115	33	10	10	13
第5回	1992年7月9-10日	筑波大学加速器センター	88	32	7	12	13
第6回	1993年7月12-13日	九州大学理学部	67	26	6	10	10
第7回	1994年6月28-29日	東京大学原子力研究総合センター	109	34	11	12	11
第8回	1995年7月6-7日	名古屋大学年代測定資料研究センター	73	29	7	6	16
第9回	1996年7月4-5日	日本原子力研究所東海研究所	112	28	8	10	10
第10回	1997年7月7-8日	国立環境研究所	92	33	11	13	9
第11回	1998年7月2-3日	東京工業大学原子炉工学研究所	102	37	13	12	12
第12回	1999年7月7-8日	京都大学理学部	89	44	14	12	18
第13回	2000年6月8-9日	日本原子力研究所むつ事業所	65	31	17	6	8
第14回	2001年6月28-29日	核燃料サイクル開発機構 東濃地科学センター	92	43	17	10	16
第15回	2002年6月24-25日	若狭湾エネルギー研究センター	85	48	14	16	18
第16回	2003年6月30日-7月1日	神戸商船大学	85	46	14	11	21
第17回	2004年6月21-22日	放射線医学総合研究所	121	43	18	12	13
第18回	2005年7月1-2日	九州大学大学院理学研究院	110	46	18	9	19
第19回	2006年7月1-2日	株式会社パレオ・ラボ	72	30	13	7	10
第20回	2007年7月12-13日	日本原子力研究開発機構 原子力科学研究所	110	47	15	16	16

る。過去の研究会などでは、静電加速器メーカー側の発表セッションを設けて、メーカーとユーザーとのコミュニケーションをより進めていく機会を設けたりしている。また、「第19回タンデム研究会」は、主催機関が民間企業である株式会社パレオ・ラボであった。株式会社パレオ・ラボは ^{14}C 年代測定用の500 kV タンデム加速器²⁾を所有しており、加速器質量分析法(AMS)による年代測定サービスを主要な業務内容としている。民間企業が加速器関係の研究会を主催した稀有な例であり、静電加速器を取り巻く環境変化を良く表している出来事であった。2007年に日本原子力研究開発機構原子力科学研究所で開催された「第20回タンデム研究会」では、施設現状報告15件、技術開発報告16件、応用研究報告16件の計47件の報告があった。応用研究報告の内訳は、マイクロビーム関連研究が5件、 ^{14}C のAMS測定による年代測定や環境研究が5件、粒子線励起X線(PIXE)による環境研究が2件、その他、イオンビーム照射や核融合プラズマ計測、高速クラスター、 ^8Li 短寿命核トレーサー研究など多彩な研究成果が発表された。

「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」の今後

静電加速器施設間の持ち回りで開催している「タンデム研究会」は、凡その開催順序が決まっているが、新規静電加速器施設等が開催を希望した場合、優先的に取り扱うことになっている。なお、次回2008年に開催予定の「第21回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」は、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所が主催する予定である。

「タンデム研究会」はその設立経緯から、静電加速器施設間の親睦会的な要素を強く残しており、準学会化も図られていない状況である。関連する学会・研究会として、「日本加速器学会」が挙げられるが、「タンデム研究会」世話人でも全ての者が加入してはいないようである。静電加速器の利用範囲は広く、原子核物理や物性関係者は「日本物理学会」や「応用物理学会」への入会者が多い。また静電加速器の応用関連の研究会として「AMS研究協会」、「PIXE研究協会」、「マイクロビーム生物研究連絡会」など、既に会則を定めて活動している団体が増えつつあり、「タンデム研究会」関係者の応用研究発表の場となっている。

「タンデム研究会」の組織化をどのように図るのかについては、まだその議論も進んでいないのが現状である。「日本加速器学会」設立時に「タンデム研究会」はどのような立場を取るか、世話人会において議論に

なったことがある。「日本加速器学会」に分科会のようなものが出来た時、その分科会に入るのか、また「リニアック技術研究会」のように「日本加速器学会」年会と共催するのかという議論もあった。この時の結論としては、「タンデム研究会」はその独自の特徴を残す為にも、当面は独立の研究会として存続して行くことになった。

静電加速器施設の現状

ここで静電加速器施設の現状について触れておきたい。大学等の教育研究機関において静電加速器はもっとも身近な加速器であり、「日本加速器学会」会員各位も利用された経験をお持ちの方が多いのではないだろうか。静電加速器の歴史は古く、その研究開発の経緯は既に磯矢彰氏により詳細な紹介が学会誌に掲載されており³⁾、ここでは省略させていただく。日本には1940年代より静電加速器を独自に開発した歴史があり、国内の重電機器メーカー(東芝、三菱電機、日新ハイボルテージ等)も静電加速器開発に携わっていた。例えば、国産のバンデグラーフ型静電加速器としては、1968年三菱電機製(4 MVバンデグラーフ)が京都大学量子理工学研究実験センターに現存し、現役として活躍している。しかし、現在では静電加速器の製造開発は、アメリカのNEC(National Electrostatics Corp.)とオランダに本拠があるHVEE(High Voltage Engineering Europe)の2社による独占状態となっている。静電加速器の初期の利用分野は主に原子核実験分野であったが、原子核実験分野で必要とされる粒子エネルギーが高くなるにつれ、サイクロトロンやシンクロトロンなどにその主役の座を譲ることになった。しかし、加速エネルギーの安定性と精度の高さ、また加速できる粒子種類の多様さなどで静電加速器の特徴を活かした応用研究の分野が拡がりつつある。以下、「タンデム研究会」で報告されている主な静電加速器施設の現状及び応用研究分野について、まとめて報告する。

現在、国内にターミナル電圧6 MV以上の大型タンデムと呼ばれる加速器は、日本原子力研究開発機構原子力科学研究所(20 MVタンデム)、筑波大学UT-TAC(12 MVタンデム)、九州大学(10 MVタンデム)、京都大学(8 MVタンデム)の4台が存在している。国内最大のタンデム加速器である日本原子力研究開発機構の20 URペレットロンタンデム加速器は、加速管の交換などにより18 MVでの実験利用が可能となっている⁴⁾。またターミナルECRイオン源⁵⁾や超伝導ブースター⁶⁾、短寿命核分離加速実験装置

TRIAC⁷⁾など特徴的な実験施設を有している。筑波大学タンDEMは²⁶Al, ³⁶Cl, ¹²⁹Iなどの重い核種のAMS測定が可能であり、特に³⁶Clを用いたAMS応用研究が活発になっている⁸⁾。九州大学タンDEMは独自に開発した加速器であり、加速電圧効率の高さに特徴がある。また加速減速強収束法などを開発し、天体核反応実験に利用されている⁹⁾。京都大学では最近、細胞照射用の重イオンマイクロビームラインが設置されている¹⁰⁾。

ターミナル電圧5 MV程度の中型タンDEM加速器では、若狭湾エネルギー研究センターの5 MV シェンケル型タンDEM加速器（日新ハイボルテージ社製）が、がん治療用陽子シンクロトロンの入射器及びイオンビーム応用研究に使用されている¹¹⁾。またAMS専用加速器として、国立環境研究所NIES-TERRA（5 MVタンDEM）、日本原子力研究開発機構東濃地科学センター（5 MVタンDEM）が¹⁴C年代測定に利用されている。東京大学MALT（5 MVタンDEM）では¹⁴Cの他、¹⁰Be, ²⁶Al, ³⁶Cl, ¹²⁹IなどのAMS測定が可能であり¹²⁾、PIXEや共鳴核反応法（NRA）による表面水素分析などもおこなわれている。

3 MV領域のタンDEM加速器もAMS専用機が多く、名古屋大学年代測定総合研究センター（3 MVタンDETロン、2.75 MVタンDETロン）を始め、株式会社加速器分析研究所（3 MVタンDEM、500 kVタンDEM）、¹⁴Cと¹²⁹IのAMS測定による海洋科学研究等¹³⁾をおこなう日本原子力研究開発機構青森研究開発センター（3 MVタンDETロン）などがある。名古屋大学のAMS専用機では、¹⁴C年代測定で5千年前よりも若い試料では、ほぼ定常的に±20～±30年の誤差（1標準偏差）で測定可能となっている¹⁴⁾。近年ではAMS利用者の急速な拡大により、¹⁴C年代測定施設はフル稼働状態となっている。例えば東京大学MALTの加速器年間稼働時間は6,300時間を超えている¹²⁾。既存の大型タンDEM加速器（九州大学、京都大学、筑波大学）でもAMS研究が一つの主要な研究課題となっている。また、AMS装置の小型化も進んでおり、実験室に収まる程度のAMS専用500 kVタンDEM加速器（NEC社製）が民間企業2社に導入されている。

中小型静電加速器施設では、PIXEやラザフォード後方散乱分光法（RBS）、反跳原子検出法（ERDA）などのイオンビーム分析法（IBA）の研究が利用課題の中心となっている。PIXE分野では、マイクロビーム技術と組み合わせて単一細胞中の元素分布が取得できるようになっている。日本原子力研究開発機構高崎

量子応用研究所TIARA施設の3 MVタンDEMでは荷電粒子を1個単位で制御しながら照射できる技術も開発されている¹⁵⁾。また、3 MVシングルエンドでは大気マイクロPIXE技術に加えて、最近ではMeV級集束プロトンビームを用いた微細加工技術（PBW）の開発が進められ有機物の微細加工が行なわれている¹⁶⁾。放射線医学総合研究所PASTA（1.7 MVタンDETロン）は、生物や環境試料のPIXE分析用施設であるが、最近、マイクロビーム細胞照射装置SPICEが開発されている¹⁷⁾。また最新のビーム集束技術として、高知工科大学のグループを中心にガラスキャピラリーを用いたマイクロビーム形成技術とその応用研究が発展しつつある¹⁸⁾。その他、原子クラスターを加速器でMeVエネルギーまで加速して照射する技術が、日本原子力研究開発機構高崎量子応用研究所TIARA（3 MVタンDEM）を始め¹⁹⁾、筑波大学（1 MVタンDETロン）などで開発されている。東京工業大学（1.7 MVタンDEM、3.2 MVシングルエンド、4.75 MVバンデグラーフ）、神戸大学（1.7 MVタンDEM）、奈良女子大学（1.7 MVタンDEM）、広島大学（2.5 MVバンデグラーフ）、東北大学（4.5 MVダイナミトロン）などの大学教育機関での小型静電加速器は研究室単位で運営されており、個々にユニークな研究を実施している施設が多い。他にも複数の静電加速器を有する京都大学量子理工学研究実験センター（4 MVバンデグラーフ、1.7 MVタンDETロン）や同時イオンビーム照射が可能な東京大学重照射研究設備HIT（3.75 MVバンデグラーフ、1 MVタンDETロン）及び京都大学DuET（1.7 MVタンDETロン、1 MVシングルトロン）など多くの静電加速器施設が国内に存在している。

最後に

加速器科学研究の基盤を担ってきた静電加速器であるが、多くの施設では加速器の老朽化が進んでいる。特に大学における静電加速器施設では、設置後20年から30年以上を経過した加速器が多く、その維持費すら支給されない施設が出てきている。また人的削減も進んでおり、この分野での後継者育成も大きな課題となっている。活発な研究活動を展開しているAMS分野でも、利用者は急増しているが加速器実験装置を管理できる人材が少なく、研究分野の発展上、大きな問題となっている。大学等の加速器科学教育の基盤ともなる静電加速器施設の支援を「日本加速器学会」にもお願い申し上げる。

本報告の作成に当たっては、「タンDEM研究会」世

話人の方々にご協力をいただいた。ここに記して感謝申し上げます。「タンデム研究会」事務局ホームページには、研究会の詳細な情報、入会方法等について紹介してあるので興味のある方は是非ご覧下さい。

参考文献

- 1) 「タンデム加速器及びその周辺技術の研究会」事務局ホームページ
<http://web2.tac.tsukuba.ac.jp/tandem/>
- 2) K. Kobayashi et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 259 (2007) 31.
- 3) 磯矢 彰「日本の静電加速器の歴史」, 加速器 Vol. 2, No. 2 (2005) 136.
- 4) 松田誠他, 第19回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 (2006) 9.
- 5) M. Matsuda et al., Proc. 14th Int. Workshop on ECR Ion Sources, Geneva, 1999 (CERN, 1999) 176.
- 6) S. Takeuchi et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A 382 (1996) 153.
- 7) A. Osa et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 261 (2007) 1048.
- 8) K. Sasa et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 259 (2007) 41.
- 9) K. Sagara et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A 484 (2002) 88.
- 10) 中村正信他, 第19回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会報告集 (2006) 67.
- 11) S. Hatori et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 241 (2005) 862.
- 12) H. Matsuzaki et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 259 (2007) 36.
- 13) T. Suzuki et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 259 (2007) 370.
- 14) T. Nakamura et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 223-224 (2004) 124.
- 15) T. Kamiya et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 219-220 (2004) 1010.
- 16) N.Uchiya et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research B 260 (2007) 405.
- 17) H. Yamaguchi et al., Radiat. Res. 161 (2004) 94.
- 18) T. Nebiki et al., J. Vac. Sci. Technol. A21(5) (2003) 1671.
- 19) Y. Saitoh et al., Nucl. Instr. and Meth. in Physics Research A 452 (2000) 61.