

話 題

九州大学 FFAG 加速器施設の建設

池田 伸夫*1・石橋 健二*2・米村祐次郎*2
有馬 秀彦*2・野呂 哲夫*3・相良 建至*3

Construction of FFAG Accelerator Facility at Kyushu University

Nobuo IKEDA*1, Kenji ISHIBASHI*2, Yujiro YONEMURA*2,
Hidehiko ARIMA*2, Tetsuo NORO*3 and Kenshi SAGARA*3

Abstract

The first stage building of a new accelerator facility of Center for Accelerator and Beam Applied Science has been built on Ito Campus of Kyushu University. The 150 MeV FFAG accelerator has been transported from KEK to Ito Campus as a main accelerator of the facility. Beam commissioning of the injector cyclotron has successfully been performed in October 2008.

1. FFAG 加速器施設建設までの経緯

九州大学は1943年頃よりヴァンデグラフ加速器の建設に取り組んで以来、加速器科学研究において60有余年の伝統を持つ。理学部においては、このヴァンデグラフ加速器の建設を戦争による中断を挟み推進し、1952年には重陽子の加速に成功した。その後も改良を重ね、6 MVの加速電圧を達成している。さらに1972年より10 MVタンデム加速器の建設に取り掛かり、1981年に世界最高の電圧勾配を達成している。ヴァンデグラフ加速器の改良及び10 MVタンデム加速器の開発については、これらの加速器開発を主導された磯矢彰先生が本誌特集に寄稿されている¹⁾。一方、工学部においては、1959年頃、園田正明先生の下で我が国初のインバータ型コッククロフトワルトン加速器が建設され、 $T(d, n)^4\text{He}$ 反応による14 MeV中性子を用いた原子核工学研究が展開されてきた。これら3つの加速器の大きな特徴は、いずれも九州大学の加速器研究者による手作りの加速器であり、またビーム利用研究の要請に応じてビーム利用者自身が加速器開発を進めてきた点にある²⁾。その他、1983年には医学部附属病院にPET用サイクロトロンが、また1991年にはトカマク型プラズマ実験装置 TRIAM の付属装置として1 MV タンデトロンが応用力学研

究所に設置されたが、これらは市販品の加速器であり、理学部、工学部の加速器とは趣を異にするものといえる。

このように、九州大学では、箱崎地区に工学部コッククロフト実験室コッククロフトワルトン加速器、理学部原子核実験室ヴァンデグラフ加速器及びタンデム加速器、病院地区に医学部附属病院 PET 用サイクロトロン、筑紫地区に応用力学研究所タンデトロンと、九州大学の部局が所有する形で分散して加速器が設置され、研究及び教育に用いられてきた³⁾。タンデム加速器の建設決定を契機として、1973年に加速器センター設置準備委員会が設置され、学内共同利用センターの設置に向け活動が進められたが、自作機の宿命としてタンデム加速器の完成に時間を要したこともあり、タンデム加速器の完成とともに学内共同利用化というシナリオは実現しなかった。1991年には九州大学の移転が正式に決定し、箱崎地区にある工学部コッククロフト実験室及び理学研究院原子核実験室が新キャンパスに移設されることとなった。これに対応し、九州大学の原子核物理学・工学の研究者を中心に、材料科学や生命科学など幅広い分野の研究者も含め、センターのあり方について再検討がなされ、その結果、箱崎地区に現存する量子線施設を統合し、陽子エネルギーにして100~200 MeV 領域の円形加速器、加速

*1 九州大学大学院工学研究院 Faculty of Engineering, Kyushu University
(E-mail: nikeda@nucl.kyushu-u.ac.jp)

*2 九州大学大学院工学研究院 Faculty of Engineering, Kyushu University

*3 九州大学大学院理学研究院 Faculty of Sciences, Kyushu University

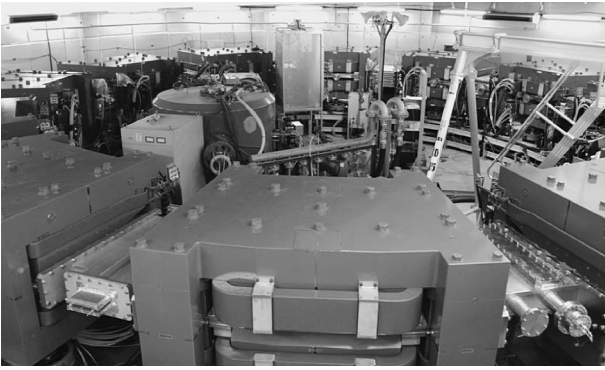


図1 150 MeV FFAG 加速器の写真 (KEK にて撮影)

器質量分析 (AMS) 等の学際研究に資する小型タンデム加速器及びコバルト 60 ガンマ線照射分析システムを有する新たな施設を要求することとし、その要求窓口として学内センター設置を求めることとした。しかしながら1大学が巨額の新加速器を有する施設の建設認可を求める活動は非常な困難を伴い、またキャンパス移転の具体的計画が定まる以前においては学内センター化も困難な状況にあった。

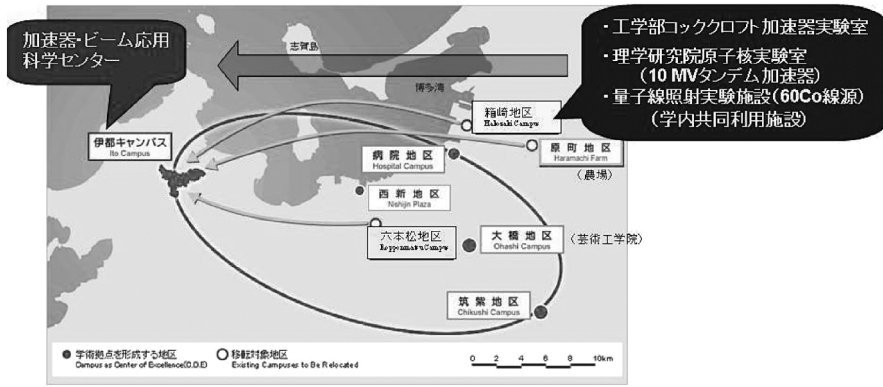
2004年、新たな2つの動きにより、学内センターの設置と新キャンパス加速器施設の建設は実現の可能性がにわかに高くなった。その動きの1つは先陣を切る工学系の伊都キャンパス移転が2005年度後期開始と正式に決定したことであり、もう1つは高エネルギー加速器研究機構 (KEK) において開発中であった150 MeV FFAG 加速器⁴⁻⁶⁾の九州大学への譲渡について、開発グループリーダーである森義治教授 (現 京都大学原子炉実験所) よりご協力いただけるとの返答を頂けたことである。図1はKEKで撮影された150 MeV FFAG 加速器の写真である。FFAG 加速器の譲渡については、KEKの神谷幸秀理事・加速器施設長、木村嘉孝監事、KEK 事務部では早田憲治九州大学理事・事務局長 (現国立大学協会常務理事) を通じ宮脇和男理事・事務局長 (現日本学術振興会審議役) など、多くの方々の厚情を賜り、2006年6月に正式に梶山千里九州大学総長名でFFAG 加速器譲渡依頼書をKEKに提出し、同月に鈴木厚人KEK 機構長より承諾の旨回答をいただくに至った。また、FFAG 加速器の移設・整備費と新キャンパス施設の建屋建設費の要求が2007年、2008年の2ヵ年計画で認められた。九州大学ではこれらの動きに合わせて量子ビーム教育研究支援体制の見直しを行い、学内共同教育研究支援組織として「加速器・ビーム応用科学センター」を2007年4月1日付けで新たに発足させ

た。この数年の急激な動きは過去30年を思うと夢のようであり、キャンパス移転とFFAG 加速器譲渡のタイミングが合ったことはまさしく僥倖といえる。その一方で、森信俊平先生や的場優先生をはじめとする多くの先達の先生方のセンター化に向けた弛まぬご努力がなければ今日に至っていないのは明らかであり、改めて先達の先生方のご努力に頭が下がる思いである。

2. 加速器・ビーム応用科学センター整備計画

九州大学加速器・ビーム応用科学センターは、キャンパス移転を機に、箱崎地区の理学研究院原子核実験室、工学部コッククロフト実験室および学内共同利用施設である量子線照射分析実験施設を統合し、伊都キャンパスに新たな量子ビーム科学研究教育拠点を形成することを目標とする。伊都キャンパスに新設するセンター施設の主加速器はKEKより移設した150 MeV FFAG 加速器であり、それに加え5 MV級の市販小型タンデム加速器を導入し、単体でAMS等の学際利用に供するとともにFFAG 加速器への重イオン入射器としても利用する計画としている。また箱崎地区の量子線照射分析実験施設は定格185 TBqのコバルト60線源を有するガンマ線照射分析実験施設であるが、現在では線源は約1/30に減弱している。伊都キャンパス新施設に定格のコバルト60線源を新規導入し加速器と併設することにより、ハドロンビームと光子ビームを同じ施設内で共用できる特徴的な施設へと発展させることを意図している。

伊都キャンパス施設は上述の通り箱崎の3施設の統合施設という位置づけであるため、その建設、整備はキャンパス移転計画に大きく依存する。2005-2006年の工学系移転決定時には、引き続き2007-2008年に理学系が移転するスケジュールとなっており、理学系移転開始に合わせ2007年より施設建屋全体を一気に建設すべく計画を立てていた。ところがその後、図2に示すように、理学系の移転については2014年まで延期することが決定され、施設の建設を2期に分けざるを得ない状況となった。建設計画としては、まず150 MeV FFAG 加速器移設を最優先させることとし、図3に示すように、第1期においてFFAG 加速器室、制御室等のFFAG 運転に必要な部屋、及びコバルト60ガンマ線照射装置関連の部屋を有する建屋を工学部コッククロフト実験室と量子線照射分析実験施設の移転施設として建設し、理学系移転に合わせた第2期においてFFAG 加速器からのビーム利用実験



伊都キャンパス移転スケジュール

2005	2006	2007	2008	2009	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019
工学系 I	工学系 II			六本松地区 数理					理学系			文系 I	文系 II	農学系
用地再取得														
加速器施設		第1期 建屋建設							第2期 建屋建設					

図2 九州大学の伊都キャンパスへの移転スケジュール. 上図は九州大学新キャンパス推進計画室ホームページ (<http://suisin.jimu.kyushu-u.ac.jp/>) より転用した.

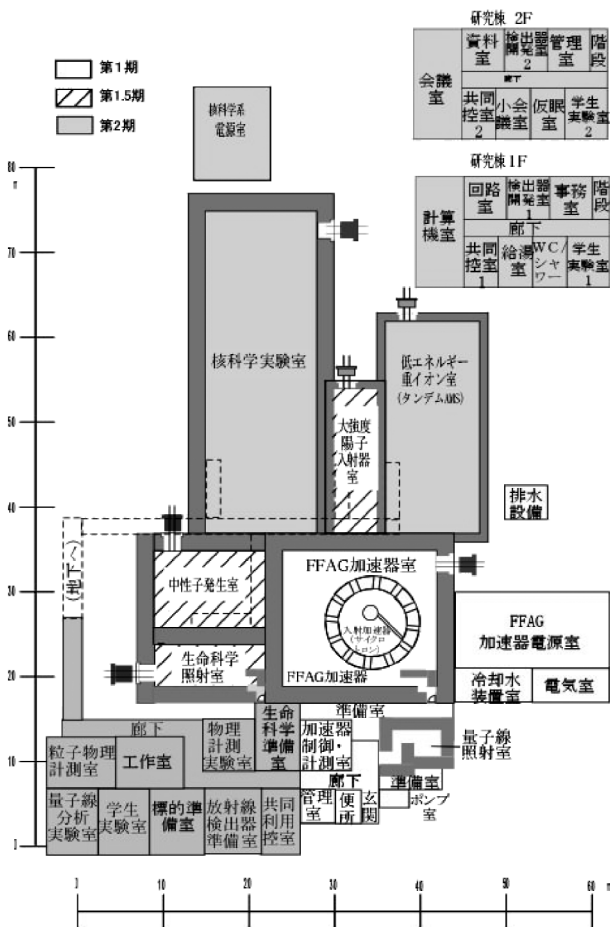


図3 2006年における九州大学加速器・ビーム応用科学センター施設の全体レイアウト案. 第1期建屋の位置変更によりレイアウトの修正設計を進めている.

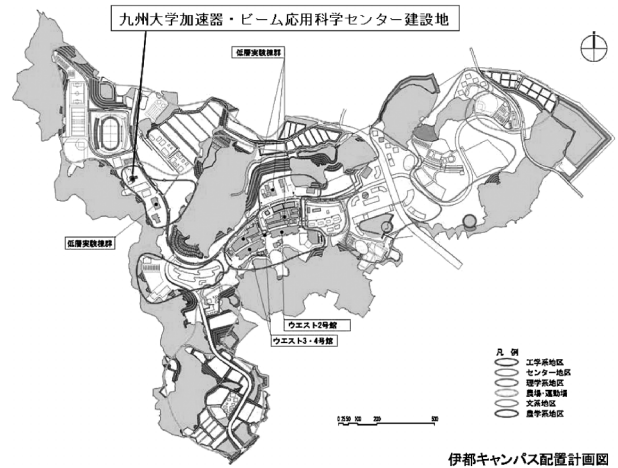


図4 伊都キャンパス施設設置図 (九州大学新キャンパス推進計画室ホームページ <http://suisin.jimu.kyushu-u.ac.jp/> より転用した図に加筆)

室, タンデム加速器室などを増設し, また研究棟を別棟として建設することとした. 加速器利用については, 第1期には面積不足のため実験室がつかれず大きく制限されたものとなるため, 第1.5期として実験室の増設を早急に実現すべく努力することとした. また陽子ビームの強度増強を図るため, 大強度陽子入射器の導入を第1.5期に組み入れ実現を目指すこととした.

施設の建設用地としては, 図4に示すように, 伊都キャンパスの北西端に近い, 切土の用地を選んだ. こ

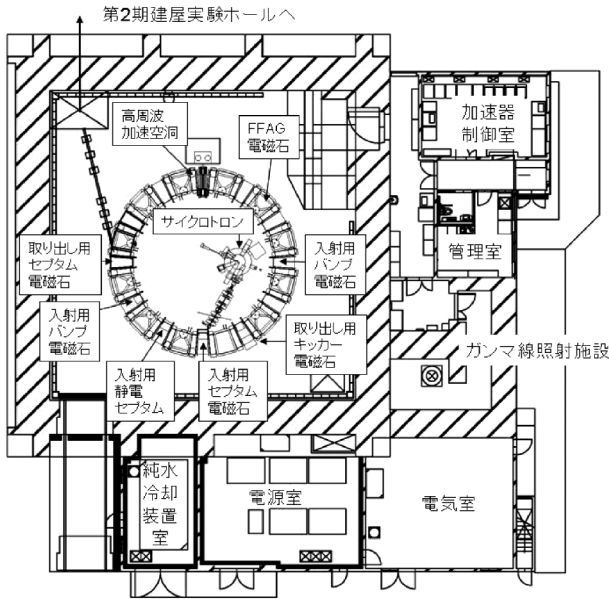


図5 加速器・ビーム応用科学センター施設第1期建屋レイアウト

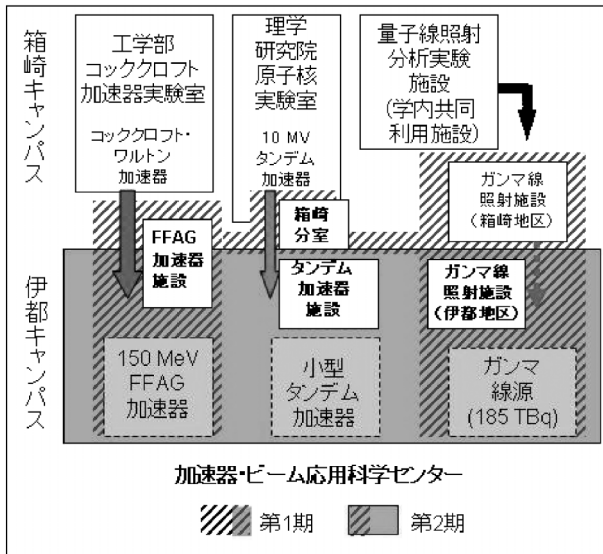


図6 箱崎地区の量子線関連施設の移設とセンター運営体制の改変計画

れは岩盤が存在するとの予想のもとでの選地であったが、地盤調査の結果、予想に反し、岩盤がある領域が非常に限られていることが判明した。そのため FFAG 加速器室を南西（図3左下方向）に移動させざるを得なかった。図5は最終的な第1期建屋のレイアウトである。この変更に応じた建屋全体のレイアウト再考を現在鋭意進めているところである。

センターの体制としては、2期計画に合わせ、当面は図6のように FFAG 加速器施設とガンマ線照射施

設の2つを伊都に置き、移転がまだ行われていないタンデム加速器は従来のまま理学研究所属として、原子核実験室内にタンデム加速器の供用推進を担うセンター箱崎分室を設置することとした。第2期建設により原子核実験室が伊都に移る際に現体制を見直す予定である。

3. 大学等連携支援事業

1章に記したように、九州大学は60有余年にわたり研究者自身が加速器を自作、改良してきた伝統を持つ。しかしながら開発してきた加速器は直流加速器がほとんどであり、円形加速器については経験の乏しさは否めない状況にあった。そこで、KEKにおけるFFAG加速器開発研究に積極参画し九州大学の円形加速器技術のスキルアップを図ることを主たる目標として、2005年にKEKが立ち上げた大学等連携支援事業に「FFAGシンクロトロン加速器の開発研究とそれを介した大学院教育」事業を応募し、採択された。FFAG加速器の建設及び開発には、当時米村がKEKの特別研究生として従事していたが、本支援事業により、有馬がKEKに長期滞在してFFAG加速器開発研究に従事し、また九大研究者数人が定期的にKEKに出向し、スキルアップを図った。九大がFFAG加速器開発研究に支援事業により本格的に参加したのは150 MeV FFAGがFFAG加速器実用機として世界で初めてビームの加速・取り出しに成功した直後であった。FFAG加速器の大きな特長は固定磁場の利用により速い繰り返しが実現可能という点にある。表1は150 MeV FFAG加速器の設計パラメータである。共同研究として九大が参加した開発研究により、2006年4月に設計値である繰り返し周波数100 Hzでの陽子加速に成功したが、翌5月に150 MeV FFAGは解体され、KEKのテントハウスに保管された。

2006年及び2007年に本事業は継続採択され、(1)FFAG加速器の要素開発⁷⁾、(2)九州大学院生の教育、(3)伊都キャンパス施設の設計研究をKEKの援助の下に推進した。(1)については、繰り返し100 Hzでの加速に成功はしたものの安定運転には未だ課題が残っていたため、新たに高効率冷却システムを備えた加速空洞の設計・製作をKEKにおいて行った。またビーム取り出し効率の改善を目標とする取り出しキッカーの改良、加速器制御システムの開発、大口径非破壊型ビームモニターの開発などの要素開発を進めた。これらの成果については、できれば稿を改めて報告したいと考えている。(2)についてはFFAG加速器開発をテーマとした博士論文1件、修士論文2件、卒業論

表1 150 MeV FFAG 加速器の設計パラメータ

電磁石	Radial セクター型 (DFD-triplet)
セル数	12
k 値	7.62
ビームエネルギー	陽子 12-150 MeV (10-125 MeV) 重イオン $12 \frac{q^2}{A} - 160 \frac{q^2}{A}$ MeV
平均半径	4.47-5.20 m
ベータトロンチューン	水平方向: 3.69-3.80 垂直方向: 1.14-1.30
最大磁場	F 磁極: 1.63 T D 磁極: 0.78 T
周回周波数	陽子 1.55-4.56 MHz 重イオン $1.6 \frac{q}{A} - 5.7 \frac{q}{A}$ MHz
繰り返し	100 Hz

文3件が九州大学に提出されており、また現在修士院生4名、学部学生1名がFFAG研究に携わっている。(3)については、高木昭氏、中山久義氏、木村嘉孝氏、福本貞義氏と定期的に検討会を持ち、また神谷幸秀氏、佐藤康太郎氏、佐藤皓氏(現 筑波技術大学)、久保忠志氏ら多くのKEKの方にご教示をいただいた。現施設は支援事業によるKEKの方々、ならびに本センターの客員教授である森氏、冨増多喜夫佐賀LS顧問のご教示により、限られた面積の制限のもとで極めて現実的かつ安全な設計となったといえる。

4. 施設第1期建屋建設とFFAG加速器移送

2007-2008年の特別教育研究経費により150 MeV FFAG加速器の移設事業が認められ、2007年度内に150 MeV FFAG加速器をKEKより伊都キャンパスに移送するとともに、純水冷却装置を新規導入することとなった。これに合わせ、新施設第1期建屋を2008年3月半ばまでに完成させる予定とした。建屋建設は2007年8月に開始されたが、建設に遅れが生じ、2007年度内の建屋完成は難しい状況となった。加速器本体の施設内への搬入の断念を真剣に検討した時期もあったが、FFAG加速器室及び純水冷却装置室の施工を優先させることにより、2008年3月15



図7 FFAG加速器施設の外観(2008年3月撮影)



図8 FFAG加速器施設の外観(2008年7月撮影)

日には、図7のように外環の舗装がなされていない状況ではあるが、なんとか加速器電磁石を加速器室に受け入れることが可能な状態にまでに漕ぎ着けた。しかし電源室の施工は間に合わず、KEKより移送した電源類及び非放射化周辺部品の多くは、第2期建屋建設予定地に新たに仮設倉庫を建て、一時的に保管せざるを得なかった。電源室等の施工、外環工事は最終的には約4ヶ月遅れ、2008年7月にまで建屋の引渡しはずれ込んだ。現在は図8の写真のとおり、第1期建屋とその外環は整備が整った状況となっている。

このような経緯の下、FFAG加速器及びその周辺機器のKEKから伊都キャンパスへの移送を2008年3月15日より2週間にわたり実施した。先述の通り、この時点で外環は未舗装であり、搬入には慎重を期する必要があるが、無事2007年度内に全移送物品の搬入を終えることが出来た。図9に加速器電磁石搬入の様子を示す写真を示した。FFAG加速器の移

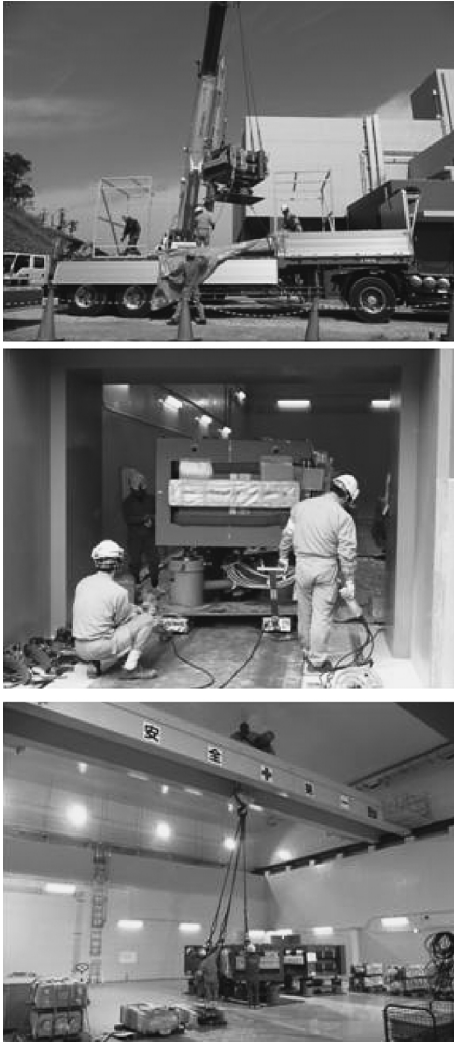


図9 FFAG 電磁石の伊都キャンパス施設への搬入の様子

送に当たっては、高木昭氏、中山久義氏、佐藤康太郎氏、伴秀一氏、豊田晃弘氏をはじめ、KEK の多くの方々にご協力頂いた。この場を借りてお礼を申し上げたい。

5. 施設の状況

FFAG 加速器の移送は 2008 年 3 月に無事終了のもの、建屋の引渡しに至るまで加速器の整備を進めることが出来ず、結果、予定より約 4 ヶ月の遅れを余儀なくされた。この間、施設自身については、地下ピットの配線ラック工事や冷却水配管工事、インターロック系整備等が着実に進められた。建屋引渡しを受けた直後より、満を持して、仮設倉庫から電源室への電源移設、FFAG 電磁石ベースプレートの補修、加速器アラインメントの準備作業等、加速器整備に向けた作業を開始した。

加速器は 2 年足らず KEK のテントハウスに保管されていたため、まず補修が必要か点検を行う必要がある。特に入射器として 150 MeV FFAG とともに譲渡いただいたベビーサイクロトロンについては FFAG を組上げる前に補修の必要性の有無を確認する必要があるため、サイクロトロンのビームコミッションングを最優先項目とすることとした。2008 年 9 月にサイクロトロンの製造元である㈱日本製鋼所、及び㈱太田エレクトロニクスとサイクロトロンの内部点検を行い、幸いなことに大きな支障はないことを確認した。いくつかの微細な補修の後、翌 10 月に両社とともにビーム加速試験を実施し、ビームの加速・取り出しを確認した。RF を繰り返し 100 Hz, duty 20% で運転したとき、サイクロトロンから引き出されたビームの平均強度は $1 \mu\text{A}$ であった。これは KEK での使用時のパフォーマンスを再現するものである。

サイクロトロンのビームコミッションングに成功した機会を捉え、FFAG 加速器施設のお披露目を兼ね、加速器・ビーム応用科学センター開所式を 2008 年 12 月 4 日に催した。伊都キャンパス施設の第 2 期建屋完成時に本格的式典を行うことを念頭に、今回の式典は規模を限り、九州大学の関係者、KEK の関係者、コッククロフト実験室関係者、近隣地域住民の方々にご臨席頂き、とりおこなった。10 時より開催された開設記念式典では、有川節夫九州大学総長をはじめ宮原三郎理学研究院長、末岡淳男工学研究院長の代理として古川明德副研究院長より御挨拶頂き、神谷 KEK 理事、早田国立大学協会常務理事より御祝辞をいただいた。続いて森京大教授に「FFAG の世界」と題する学術講演を頂き、相良が「箱崎キャンパスにおける加速器の歴史」、石橋が「加速器の歴史と課題」について講演を行った。11 時 45 分より FFAG 加速器施設見学会を行った後、12 時 45 分より開設祝賀会を催した。祝賀会では的場先生に祝辞を頂いた後、園田先生に乾杯の音頭を取っていただき、和やかな歓談の後、森信先生、桑折範彦徳島大学教授に祝辞を頂き、宴を閉じた。図 10-14 に開所式の写真をいくつか載せたが、華やかさは控えげみながら和気藹々とした会であった。センター関係者一同にとってはこれからが施設整備の肝要な時期と改めて気を引き締めなおす機会ともなった。

6. 施設の整備計画

サイクロトロンのコミッションングが終わり、2008 年 12 月よりいよいよ FFAG 本体の整備に取り掛かることとなった。図 15 に示すように、FFAG 本



図10 センター開設記念式典で挨拶をされる有川九大総長



図12 センター開設記念式典で学術講演をされる森氏



図11 センター開設記念式典で祝辞を述べられる神谷氏



図13 センター見学会の風景

体の点検, アラインメントを2008年度末までに終える予定である. 2009年度に加速器全系の組上げ, 各要素機器の試験を経て, なるべく早い時期にFFAG加速器のビームコミッシングを実施し, KEKにおけるパフォーマンスの再現を確認したいと考えている.

当面は移設したサイクロトロンを入射器として用い, FFAG加速器開発研究ならびにビームを用いた基礎研究を進める. しかしビームの大強度化, 加速ビーム種の拡大を考えると, 新たな入射器の導入が不可欠である. 重イオン入射器としては, 理学研究院移転に合わせ導入予定の小型タンデム加速器を用いる計画である. タンデム加速器とFFAG加速器の特長を活かした同位体ビームの交互加速法の確立による新しいAMS法, 迅速な加速イオン種の切り替え法や短寿命核ビームの加速法などの実現を目指した検討を鋭意進

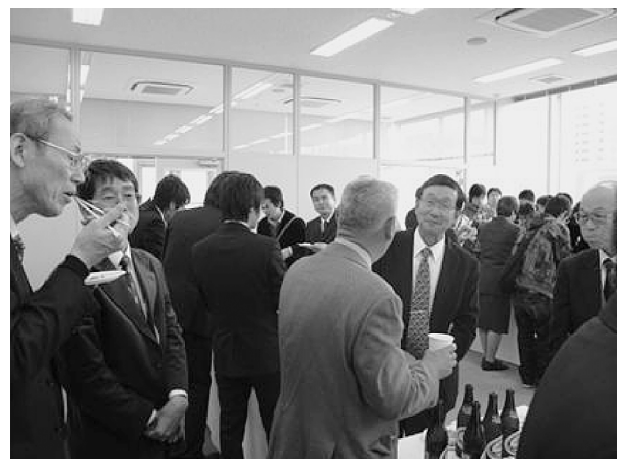


図14 センター祝賀会の一風景

めている. タンデム加速器をFFAG入射器として用いる際の最大の問題は両者のビーム時間構造の不一致

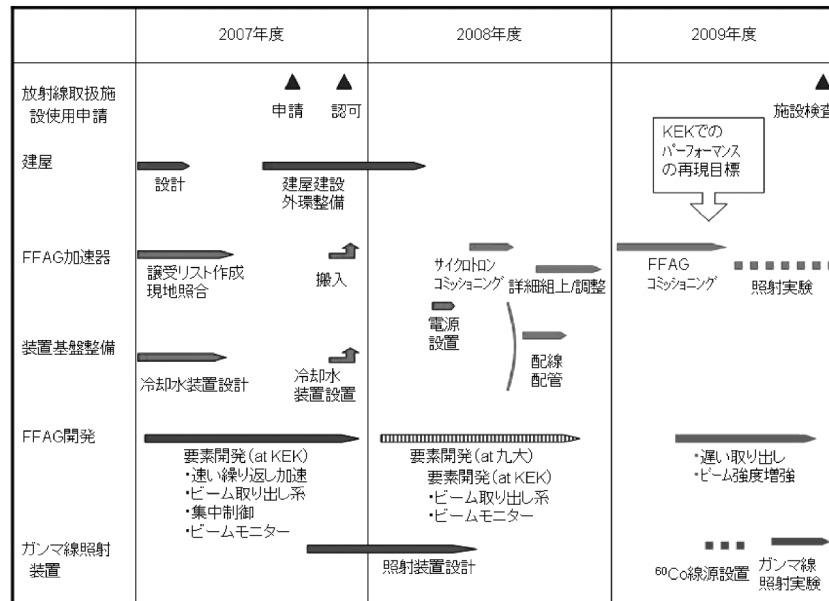


図15 FFAG 加速器施設整備短期スケジュール

にある。この問題の解決にも努力を注ぐ予定である。一方、ビーム時間構造の不一致は現有のサイクロトロンとFFAGにも共通する問題であり、FFAG加速器の特長である速い繰り返しによる大強度陽子ビームの加速を実現するには線形加速器を代表とする時間構造がFFAGに合う大強度陽子入射器の導入が必須である。できるだけ早期に大強度陽子入射器を導入し、 μA 級の陽子ビームを用いた魅力的なビーム応用研究を展開したいと念願している。

7. おわりに

九州大学FFAG加速器施設は、まだ産声をあげたばかりの施設である。その誕生に当り、実に多くの方々のご支援を頂いた。FFAG加速器開発グループをはじめとするKEKの方々、佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターの方々、大阪大学核物理研究センターの方々等、本稿に御名前を記すべき方が多くいらっしゃるにもかかわらず、稿の制限により割愛せざるを得なかった。失礼をお詫びするとともに、すべての

方々にお礼申し上げたい。本施設はこれからが成長の時である。なお一層のご教示、ご支援をお願いする次第である。

参考文献

- 磯矢 彰, 加速器, **2**(2), pp. 137-155 (2005).
- 相良建至, 加速器, **3**(2), pp. 192-195 (2006).
- 石橋健二, Proceedings of the Workshop on Research and Development of Accelerators in Atomic Energy Science -Perspective of Accelerators and Beam Science in the 21st Century-, Kumatori, Aug. 7-8, 2001 (KURRI-KR-68), pp. 79-83.
- 森 義治, 加速器, **2**(3), pp. 293 (2005).
- M. Aiba, et al., Proceedings of 10th European Particle Accelerator Conference (EPAC '06), Edinburgh, Scotland, June 26-30, 2006, pp. 1672-1674.
- Y. Yonemura, et al., *Nucl. Instrum. and Methods A*, **576**, pp. 294-300 (2007).
- Y. Yonemura, et al., Proceedings of 11th European Particle Accelerator Conference (EPAC '08), Genoa, Italy, June 23-27, 2008, pp. 3521-3523.