

ISSN 1349-7960

KURRI-KR(CD)-1

原子力分野における加速器の研究開発 () ワークショップ
新たな展開を目指して

Proceedings of the Workshop on
Research and Development of Accelerators in Atomic Energy Science (II)
- Toward New Development -

開催日時：平成 16 年 8 月 10 日、11 日
(August 10- 11, 2004)

共 催：京都大学原子炉実験所
日本原子力学会加速器・ビーム科学部会
後 援：日本学術会議
協 賛：日本加速器学会、日本原子力学会

編集：的場 優、川瀬洋一
Edited by M. MATOBA and Y. KAWASE

京都大学原子炉実験所
Research Reactor Institute, Kyoto University

はじめに

去る2004年8月10-11日、暑い夏の休み中、北海道から九州までの多くの加速器関係の研究者の方々にお集まりいただき、表記シンポジウム(京大炉ワークショップ)、すなわち、3年前の2001年8月7-8日に開催した同テーマのシンポジウムの第2回目といえる会議が開催されました。

加速器に関わる研究開発は、長い歴史があるにもかかわらず、加速器の「使用の目的毎に」、「種類毎に」、「ビームの物理自体として」、数年おきの研究会の形で、むしろ分断された形で議論されてきました。一方、我が国には現在1000台以上の加速器があり、その利用の広がり極めて大きいものがあります。また、当日ご出席いただいた田川精一先生の委員会で調査されたものですが、放射線利用に関わるGDPが~8兆円と評価されており、基盤技術として、そして多くの人材を供給している分野として、当分野も多様な貢献が期待されています。私共は、当日ご出席いただいた柴田徳思先生のご提案でこの分野の研究開発のあり方について議論をスタートし、3年前、ここ京大炉においてシンポジウム(京大炉ワークショップ)が開催された次第です。そこでは、

大型の国家プロジェクトについては、もう少し広く、かつ大きな場での議論が必要、

設置台数の多い医療・産業利用については極めて幅広くなっており、別に検討すべき、との観点から、大学と地域の研究所における研究活動に焦点を当て、国家プロジェクトを推進している大研究所については大学等との連携に関わる問題を中心に議論いただくこととして実施され、多くの研究機関からの参加者を得て活発な議論が行われました。このような観点からの会合はあまり例がなく、参加者は認識を新たにすることが出来たと思いますが、議論は始まったばかりで、近い将来再度会合を持ちたいとの要望が多くありました。

そして本年度、当日会長の木原元央先生にもご出席いただきましたが、「日本加速器学会」が設立され、同じ8月に第1回年会が開催されました。この分野の学術の広がりが極めて大きく、これまでのように個々の同好会的団体に閉じこもった状態を打破すべきとの認識が関係者間で確認され、不定期な分野別研究会でなく、経常的な活動を行い、社会的に責任ある発言を行っていくべき「学術団体」として設立されることになったものと考えています。

また、今年度からの国立大学の法人化の中で、一定規模以上の施設と装置の導入・維持の必要なこの分野は、大研究所はともかく、大学等の中小研究施設は存立し得ないのではないかと危惧があることも忘れてはならないと思います。もちろん、公私立大学に対しても新たな問題が生ずると考えています。

議論の多い原子力の冠について、大きく利用が広がる加速器に関する学術は、自然現象と装置に関する学術だけでなく、産業、医療などへの応用の一層の広がりとその支援、コストと安全性、社会的責任と受容性、そして、研究者を目指す学生以外をも念頭に置いた人材育成など、好むと好まずとに関わらず議論が必要とされる問題を多く抱える原子力分野、特にその人材育成の場に共通な一分野と認識しており、このようなテーマ名も一つはあってもよいかと考えて残した次第です。ご理解いただければ幸いです。

シンポジウムでは、北海道から九州までの26以上の研究機関から参加された50名以上の研究者が熱心に報告と討論を行いました。木原元央先生と田川精一先生の基調講演と各研究機関での研究の現状と今後についての報告を中心に会は進められました。そして、最後のパネル討論では、これからの研究開発の在り方について、活発な討論がなされました。

大学の研究は多様性が命であり、研究者の意見も必ずしも一致しないこともあることは当然のことですが、お互いの忌憚のない意見のぶつけ合うことが、学問を健全に発展させることになると考えています。シンポジウムの在り方については、前回より参加者のコンセンサスが進み、我が国の関係研究機関の現状と今後については、互いの理解、あるいは認識は一致する方向にあったと思います。多くの参加者から、次回はパネル討論をもう少し時間をかけて行っては、またテーマを絞った討論を行って、との意見がありました。

本シンポジウムは、京都大学原子炉実験所と日本原子力学会加速器ビーム科学部会が主催し、日本学術会議、日本加速器学会、および日本原子力学会からご支援をいただきました。また、京都大学原子炉実験所内外の多くの方々にご協力いただきました。ここに、心からお礼申し上げます。

平成16年12月

九州産業大学

京都大学原子炉実験所

的場 優

川瀬 洋一

P r e f a c e

Succeeding a workshop on “Research and Development of Accelerators in Atomic Energy Field” held in August 7-8, 2001, so-called , the second workshop was held in August 10-11, 2004 to discuss present status and future plan in the R & D on accelerator itself and their applications.

The accelerator was invented in first period of the 20 century to provide a powerful tool for investigating the elementary particle and nuclear physics. Thereafter, remarkable improvements on accelerator technology have widely enlarged its applicability to a variety of fields on science, medicine and industry. In present days, the developments on the accelerator have steadily been going on and new accelerator projects in many laboratories have been in progress. The JAERI-KEK Joint Project on High-Intensity Proton Accelerator and the RIKEN RI-Beam Factory have been progressed. And also in Research Reactor Institute (RRI), Kyoto University, an anticipated project on accelerator-driven non-critical reactor has been approved and started.

Under the stimulus of these noticeable progresses in accelerator related fields, the present workshop has been held. Over 50 participants from 26 research laboratories in Japan were joined in RRI, Kyoto University. New data of all the participated facilities were reported and hot discussions have been performed. The information on recent status of facilities and problems to be resolved has become a consensus of the participants.

Here, the proceedings of the workshop is presented. We hope that the present issue may be of use for works in various laboratories. The next workshop on this field was desired by many participants to discuss on some focused topics in the present theme.

This workshop was supported by RRI, Kyoto University, Science Council of Japan, Accelerator Society of Japan and Atomic Energy Society of Japan and its division of Accelerator and Beam Applications. Here, we are grateful to these organizations and support staffs to the opening this nice meeting.

December, 2004

M. Matoba (Faculty of Engineering, Kyushu Sangyo University)

Y. Kawase (Research Reactor Institute, Kyoto University)

Editors

目 次

日本における加速器の現状と先端科学技術への応用例	(1)
阪大産研 田川精一	
S. Tagawa (The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.)	

各研究機関における加速器に関わる研究開発

1) 日本原子力研究所における加速器に関わる研究開発	(7)
原研東海 水本元治	
M. Mizumoto (JAERI)	
2) 高エネルギー加速器研究機構における加速器開発	(13)
-J-PARCの現状-	
KEK 森 義治	
Y. Mori (KEK)	
3) 理化学研究所における加速器に関わる研究	(14)
理研 後藤 彰	
A. Goto (The Institute of Physical and Chemical Research)	
4) 放医研における加速器に関わる研究	(19)
放医研 野田耕二	
K. Noda (National Institute of Radiological Sciences)	
5) 産総研における加速器に関わる研究	(25)
産総研 豊川弘之	
H. Toyokawa (Quantum Radiation Group, Research Institute, AIST)	
6) SPring-8 における加速器に関わる研究開発	(29)
JASRI/SPring-8 米原博人	
H. Yonehara (SPring-8, JASRI)	
7) 分子科学研究所における加速器に関わる研究	(37)
分子研 加藤政博	
M. Kato (Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences)	
8) 東京大学における原子力大学院改革と加速器研究・共同利用	(40)
東大院工原施 上坂 充	
M. Uesaka (Nuclear Engineering Research Laboratory, The Univ. of Tokyo)	
9) 東京大学原子力研究総合センターにおける加速器に関わる研究開発	(44)
東大原総センター 松崎浩之、岩井岳夫	
H. Matuzaki, and T. Iwai	
(Research Center for Nuclear Science and Technology, The Univ. of Tokyo)	

- 10) 赤外自由電子レーザーによる光科学とその利用技術 (48)
東理大 中井浩二
K. Nakai (FEL-SUT, Tokyo Univ. of Science)
- 11) (財)若狭湾エネルギー研究センターにおける加速器に関わる研究開発 (53)
若狭湾エネルギー研究センター 大谷暢夫
N. Otani (The Wakasa Wan Energy Research Center)
- 12) 佐賀光源の建設 (55)
九州シンクロトロン光研究センター
富增多喜夫、江田 茂、岩崎能尊、高林雄一、吉田勝英
T. Tomimasu, S. koda, Y. Iwasaki, Y. Takabayashi and K. Yoshida
(SAGA Light Source, Kyushu Synchrotron Light Research Center)
- 13) 京都大学における加速器に関わる研究開発 (58)
京大院工 伊藤秋男
A. Itoh (Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)
- 14) 加速器駆動未臨界炉研究のための FFAG 加速器の建設 (62)
京大原子炉、KEK¹、三菱電機²、立命館大 SLLS³
谷垣 実、三島嘉一郎、代谷誠治、森 義治¹、町田慎二¹、石禎 浩²、福本信太郎²、
井上 信³
M. Tanigaki, K. Mishima, S. Shiroya, Y. Mori¹, S. Machida¹, Y. Ishi², S. Fukumoto² and M. Inoue³
(Research Reactor Institute, Kyoto Univ., ¹KEK, ²Mitsubishi Electric Corporation,
³SLLS, Ritsumeikan Univ.)
- 15) 大阪大学核物理研究センターにおける加速器に関わる研究 (66)
阪大核物理研究センター 二宮史郎
S. Ninomiya (RCNP, Osaka Univ.)
- 16) 大阪大学産業科学研究所の加速器施設 (68)
阪大産研 田川精一
S. Tagawa (The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.)
- 17) 北大における加速器に関わる研究 (69)
北大院工 鬼柳善明
Y. Kiyonagi (Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ.)
- 18) 東北大学における加速器実験施設を用いた原子力研究教育 (73)
東北大院工 石井慶造
K. Ishii (Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)
- 19) 筑波大学における加速器に関わる研究開発 (74)
筑波大研究基盤総合センター、筑波大陽子線医学利用研究センター¹
笹 公和、榮 武二¹
K. Sasa and T. Sakae¹
(Research Facility Center for Science and Technology, Univ. of Tsukuba,
¹Proton Medical Research Center, Univ. of Tsukuba)
- 20) 日本大学電子線利用研究施設における加速器に関わる研究開発 (78)
日大量子科研 田中俊成
T. Tanaka (Inst. Quantum Science, Nihon Univ.)

21) 東京工業大学原子炉工学研究所における加速器研究開発の 20 年	(80)
東工大原子炉研 服部俊幸、林崎規託	
T. Hattori and N. Hayashizaki (Research Lab. Nuclear Reactor, Tokyo Inst. of Tech.)	
22) 立命館大学における加速器に関わる研究	(83)
立命館大 / 光子研 山田廣成	
H. Yamada (Ritsumeikan Univ. / Photon Production Laboratory Ltd.)	
23) 大阪府立大学先端科学研究所における加速器に関わる研究	(86)
大阪府大先端研	
奥田修一、谷口良一、松田八束、岡 喬、中村茂樹、小嶋崇夫、伊藤憲男、 岩瀬彰宏	
S. Okuda, R. Taniguchi, Y. Matuda, T. Oka, S. Nakamura, T. Kojima, N. Itoh and A. Iwase (Rept. Radiat. Center Osaka Prefecture Univ.)	
24) 神戸大学における加速器に関わる研究	(89)
神大海事科学 北村 晃	
A. Kitamura (Faculty of Maritime Sciences, Kobe Univ.)	
25) NewSUBARU における加速器に関わる研究	(91)
兵庫県立大高度研 安東愛之輔	
A. Ando (NewSUBARU /LASTI, Univ. of Hyogo)	
26) 広島大学における加速器に関わる研究開発	(96)
広大放射光科学研究センター 堀 利匡	
T. Hori (Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima Univ.)	
27) 九州大学における加速器に関わる研究開発	(100)
九大院工 石橋健二	
K. Ishibashi (Graduate School of Engineering, Kyushu Univ.)	
・ パネル討論の総括	(102)
・ プログラム	(103)
・ 出席者名簿	(104)
・ 参考資料 「日本における加速器一覧」	(105)

日本における加速器の現状と先端科学技術への応用例

阪大産研 田川 精一

S.Tagawa (The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.)

1. はじめに

本年4月に発足した加速器学会の創刊号に掲載した「日本における加速器の現状」と最近、研究室で行っている加速器の先端科学技術への応用例を紹介する。

加速器の現状としては、加速器利用の拡大と多様化、加速器台数の変遷、分野別の動向、加速器の社会への貢献、加速器の共同利用・施設共用という視点から紹介する。研究室で行っている加速器の先端科学技術への応用例としては、次世代半導体デバイスの量産技術の最大の課題である空間解像度の限界に関する研究とナノデバイスや放射線治療への貢献を目指した高エネルギーイオンによるナノ構造体形成についての研究の2つを紹介する。

2. 日本における加速器利用の現状

(1) 加速器利用の拡大と多様化

加速器は加速された粒子及びその粒子からの2次ビームを利用する分野の発展とともに進歩してきた。加速器は物質構造を探るという人間にとって最も強い知的関心に対して、桁外れに強力な研究手段として登場した。加速器を用いた研究から多くのノーベル賞受賞者が出ていることも周知の事実である。初期の加速器の進展には核物理学研究者が最も大きな貢献をしてきた。加速器の医学利用もかなり早い時期から行われ、多大な成果を挙げてきた。

第2次世界大戦後、放射線利用は飛躍的に拡大し、加速器利用分野も広がっていった。

現在も核物理学から高エネルギー物理学に引き継がれた高エネルギーフロンティアの研究が最先端の加速器開発を先導しているが、建設されるまでの期間と建設費用の増加のため、国際協力が不可欠になりつつある。また、加速器は現在、高エネルギー物理学分野以外の医療分野、非破壊検査、照射処理、材料改質、分析、微細加工、エネルギー分野など、様々の用途に広く利用されている。

国内の加速器を取り巻く状況の変化もいくつか見られる。一つは、大型加速器が高エネルギー物理学以外の分野にも利用できることを最初から考慮して建設されるようになった点と建設後に外部の広い研究分野の研究者に解放されている例が増えた点である。このため、加速器利用研究の裾野が広がり、研究者数も非常に増加した。高エネルギー研究所のフォトンファクトリーから日本原子力研究所・理研が協力して建設したSpring8に至る多くの放射光施設、現在建設中の日本原子力研究所・高エネルギー研究所が協力して建設中の大強度陽子加速器(JPARC)に代表される中性子利用などの分野では加速器利用者の数が飛躍的に増加している。また、日本原子力研究所高崎研究所の種々のイオン加速器(TIARA)などが日本原子力研究所外の多くの研究者に開放さ

れ、新しい加速器利用者の数が大きく増加している。放射線医学総合研究所の重イオン加速器は炭素イオンによる重粒子線がん治療のための装置であるが夜間は広い関連分野の研究者の利用へ開放している。理化学研究所の加速器研究施設でも原子核物理学だけでなく、化学、生物、材料、医学等の幅広い基礎・応用分野の研究が行われている。このように、大型加速器施設では主目的と同時に多様な用途にも利用でき、利用分野も広がり、利用者も多くなってきている。2つ目は、加速器で加速した粒子が生成する2次ビームも含め、利用できる放射線の種類が最近急激に増加し、その中には加速器は使用するが実際に使用するビームはミリ波領域のコヒーレント放射光や赤外自由電子レーザーのように狭い意味の放射線の範疇に入れられないものもある。3つ目は、利用分野の拡大に伴い、加速器への要望も多様化し、研究者からも産業界からも小型で安価で利用目的に特化した性能を持つ専用加速器が強く求められはじめた点である。4つ目は国立大学法人化や原子力2法人の統合などの社会情勢の急激な変化により、研究者への十分な検討期間と適切な評価を行わないうちに、一度停止してしまうと二度と立ち上げにくい加速器施設が閉鎖せざるえない状況が生まれ、研究と人材教育に大きな支障が出るのが危惧されている。

(2) 最近の日本の加速器台数の変遷

現在、国内では、物質構造や宇宙創生などを探る最先端の大型加速器建設に大部分の加速器関係の公的な予算が使用されている。加速器全体の台数に占める大型加速器の割合は小さいが、多くの大型加速器が共同利用等のシステムで多くの利用者に供されている。日本アイソトープ協会で発行している放射線利用統計で、2003年3月の時点で、国内には1194台の使用許可を受けている放射線発生装置が稼働している。最も多い使用許可を受けている加速器は線形加速器で898台で加速器全体の76%になる。線形加速器は医療用のみでも764台となっている。ただし、1MeV以下の工業用電子線加速器やイオン注入用加速器はこの放射線利用統計の放射線発生装置には含まれていない。1MeV未満の工業用電子加速器やイオン注入装置を含めるといわゆる加速器の台数は放射線利用統計よりもっと多くなる。

機関別では使用許可を受けている1,194台の放射線発生装置のうち、医療機関に837台(70.1%)、教育機関に65台(5.4%)、研究機関(国公立、各種法人、大学、民間の研究所および大学の附属研究所・試験所・研究施設の研究機関)に133台(11.1%)、民間企業に140台(11.7%)、その他19台(1.6%)となっている。

1980年以降の放射線発生装置の使用許可台数の変遷を調べてみた。総数は1980年の426台から順調に増加し、2003年には1,194台と2.8倍になっている。数で最も多い医療機関の伸びが大きく、220台から837台と3.8倍になり、その年度の総数に対する比率も51.7%から70.1%に増加している。国公立、各種法人、大学、民間の研究機関では1980年の99台(23.2%)から1999年に184台まで増加したがその後、急激に減少に転じ2003年には133台まで減少した。1980年は総数に対して23.2%あった比率は2003年には11.1%と半減している。民間は1980年の66台から1997年の162台まで増加し、その後減少し、2003年には140台になっている。その年度の総数に対する比率も1980年の15.5%は2003年には11.7%まで減少している。教育機関の台数は1980年の40台から2003年の65台まで少しずつ増加しているが、その年度の放射線発生装置の台数に対する比率

は 9.4%から 5.4%まで減少している。

2000 年 3 月 31 日と 2003 年 3 月 31 日の最近の 3 年間の動向を少し詳しく見てみると、日本全体では使用許可を受けている放射線発生装置は 1,136 台から 1,194 台へと 58 台増加している。細かい内訳を見ると、医療機関では 767 台から 837 台へと 70 台増加している。その中でも、ライナックとサイクロトロンが増加が大きく、ライナックが 709 台から 764 台へと 55 台の増加、サイクロトロンが 25 台から 44 台へと倍増しそうな勢いである。増加しているサイクロトロンは主に PET 用の RI 生産のための小型サイクロトロンである。逆に減少しているのは国公立、各種法人、大学、民間の研究所の加速器で、163 台から 133 台へと 30 台減少している。特に、中小型加速器で、ライナックが 47 台から 37 台へ、コッククロフト・ワルトン型が 33 台から 25 台へ変圧器型加速装置が 19 台から 9 台へと急激に減少している。一方、研究所の加速器でも大型なシンクロトロンとサイクロトロンの合計は 37 台が 36 台へとほとんど変化していない。民間企業では 141 台から減少したがまた盛り返して 140 台とほとんど変わっていない。教育機関では 58 台から 65 台へと 7 台増加しているがその内の 5 台はライナックである。

(3) 加速器の分野別の現状

(A) 研究機関・教育機関の加速器の現状

国公立、各種法人、大学、民間の研究所および大学付属の研究所・試験所・研究施設の研究機関では 1980 年の 99 台 (23.2%) から 1999 年に 184 台まで増加したがその後、急激に減少に転じ 2003 年には 133 台と 4 年間で台数で 51 台、3 割も減少した。特に、最近の 4 年間でライナック、コッククロフト・ワルトン型、変圧器型加速装置などの中小型加速器が大幅に減少したのに対して、大型なシンクロトロンとサイクロトロンの合計はほとんど変化していない。大型加速器の減少がないのは、高エネルギー研究所、日本原子力研究所、理研、SPring 8、放医研などの大研究所の加速器に原子力予算等、国の大部分の加速器予算が集中していることによると思われる。

教育機関の台数は 1980 年の 40 台から 2003 年の 65 台まで少しづつ増加し、2000 年 3 月以降の 3 年間でも 58 台から 65 台へと 7 台も増加している。その内の 5 台はライナックである。

国立大学や特殊法人等の独立行政法人化に伴って、研究・教育機関での加速器の維持が厳しくなると予想されているが、前述のように、研究所では既に独立行政法人化前でも中小型加速器の大幅な減少が始まっている。教育機関の加速器や研究所の大型加速器には減少は見られていないが、国立大学法人化後には教育機関の加速器の維持には厳しい状況が予想される。

日本アイソトープ協会・量子ビーム専門委員会の日本の主として研究・教育機関(一部、医療機関を含む)に存在する加速器施設に対して行われたアンケート調査(文献)によると、研究機関、教育機関の加速器施設の 84%が公募型の共同利用を行っていることと公募型の 85%が全国共同利用の形態をとっている。また、加速器・放射線を取り巻く研究・施設維持の環境が厳しくなっている現状の中で、加速器利用への強い要望があること、個々の加速器施設での新しい意欲的な活動が盛んであること、よく稼動している加速器施設は形式上ほとんどの施設が共同利用可能であることなどが分かった。

高エネルギー研究所、SPring 8、日本原子力研究所、理研、放医研などの大型加速器施設は高エネルギー研究所と SPring 8 は全国共同利用型、日本原子力研究所は施設共用、理研は連携研究、放医研は夜間、週末の利用という形で大学等の外部の研究者に開放され、世界最先端の研究成果が出ている。統合後の原子力新法人の加速器も業務の中に施設共用が取り込まれ、外部の研究者への利用が行われることになっている。一方、研究・教育用の中・小加速器は大学を中心に設置され、多くの加速器は工夫して非常に広範な分野で活発に利用されているが、予算的には加速器建設への手当てがこの二十年ぐらいは得にくくなっている。その上に既設の加速器の維持費もほとんど打ち切られているので、国立大学法人化後、運営交付金が各施設でなく、大学本部に渡されるので、大学での研究・教育用加速器施設の維持・保守管理が今まで以上に厳しくなってくると予想される。最近では、小型や手作りの小型加速器やビーム発生器のように、制作費も維持費も安い放射線発生装置として許可を受ける必要のない装置による特徴のある研究が、大学などでは盛んに行われている。

(B) 工業用加速器の現状

医療用を除く、民間企業での放射線発生装置の台数は 1980 年の 66 台から 1997 年の 162 台まで増加し、その後減少し、2000 年に 141 台、2002 年には 134 台まで減少したが 2003 年には、少し盛り返して 140 台となっている。産業用加速器を議論する時に重要な点は、工業用加速器としては電子線加速器だけでも、放射線発生装置として届ける必要のない 1MeV 未満のエネルギーの工業用電子加速器が 200 台以上も国内で稼働しているし、届出を必要としない数百 keV のイオン注入用加速器も多数稼働している。

(C) 医療・医学診断用加速器

2000 年 3 月 31 日からの 3 年間で、国内の放射線発生装置として大きく増加しているのは医療・医学診断分野のライナックとサイクロトロンだけである。医療用のライナックが 709 台から 764 台へと 55 台の増加、PET 等の医学診断用のアイソトープ製造に用いられているサイクロトロンが 25 台から 44 台へと倍増しそうな勢いである。国内での放射線発生装置の設置台数で、最も伸びている医療用加速器の分野から最近国内の加速器メーカーがすべて撤退してしまったことは非常に残念なことである。

(4) 加速器の社会への貢献

(A) 知的貢献

加速器・放射線の社会への貢献としては、学校教育を中心に我々の世界観形成の上で、加速器・放射線もしくはその関連分野で、ノーベル賞受賞者をはじめとする多くの先人の業績が如何に役立っているかは明白であろう。また、少し矮小化されるが、最近の日本における最先端の加速器施設の建設による利用開放を含む世界への貢献が、日本人研究者の世界での活躍に、間接効果を含めて大いに役立っていることも重要であろう。同様に、I A E A や日本原子力研究所等の開発途上国への支援事業も経済効果だけでなく、知的貢献も大きいと思われる。

(B) 経済効果

現在では放射線利用は非常に広範な分野に広がり、最近の文部科学省（旧科学技術庁）の委託を受けて、日本原子力研究所の放射線利用経済評価専門部会が行った本格的な調査で（文献）日本では放射線利用の経済効果は原子力発電に並ぶ、非常に大きな経済規模になっていることが分かった。日本の調査の少し前に行われた米国の調査（文献）でも同様な結果が報告されていたが、根拠の点で不明な点があったので、資料と評価基準が明確に調べられる工業、農業及び医学・医療分野の主項目について、改めて専門家が一年間かけて詳細な日米比較を行った。この調査結果（文献）でも、調査した項目については、先に報告されていた米国の放射線利用の経済規模の値が正しいことが再確認された。

これらの調査結果の要点は平成 11 年度に我が国の工業、農業及び医学・医療分野における放射線利用の経済規模、平成 12 年度に原子力先進国である米国における放射線利用の経済規模を、工業、農業及び医学・医療面からの把握を目的とする調査を、企業アンケートや各種公開統計資料等の系統的な調査を、専門家がそれぞれ一年間かけて評価基準をよく検討して行った初めての本格的な調査であった点である。工業利用を例にとると、(1) 照射設備、(2) RI 放射線応用計測機器、(3) 放射線による非破壊検査、(4) 放射線滅菌、(5) 放射線加工、(6) 半導体加工というように各項目ごとに調査・整理し、その結果を踏まえて、工業利用全体について検討している。放射線利用の経済効果は、図 4 に示すように、従来の原子力の業界団体による調査や漠然と考えられていた規模に比較すると、はるかに大きな規模（GDP の 1.7%）であることが分かってきた。

加速器・放射線利用の経済効果が大きいのに対して、表 2 に示すように加速器を含む照射設備本体の経済効果は 4600 万円程度である。経済効果でみると加速器の本体の寄与はそれ程大きくないが、加速器を用いた応用分野の経済効果は大きい。また、表 3 に加速器を含む照射設備の日米比較を示す。合計だけを見ると、米国より日本が大きくなっているが、米国では未調査の項目があるためである。両国で調査結果がある項目だけを積算すると、米国 220 台に対して、日本が 143 台となり、日米の放射線利用の経済規模の比率とだいたいよく対応している。しかし、米国では滅菌・食品関連の台数が多いことなど、詳細をみると日米で違いがある。これは米国では食肉の照射が許可され、食肉だけでなく包装材の滅菌など、この分野では放射線を利用できる範囲が米国の方がはるかに広いためである。

(C) 国民生活への寄与

半導体、自動車などの産業、医学・医療分野などのように、経済規模も大きく、国民生活にも密接している分野の放射線利用もあるが、経済規模は小さいが、医療をはじめとする国民生活に密接した分野でも非常に広範に放射線は利用されている。日本では診断に比較して、放射線治療の割合が小さい。また、米国に比較すると癌患者に対する放射線治療の割合が半分程度に止まっている。

最近では、新聞やテレビで報道されることも多く、茶の間での話題にも出るほど、放射線もずいぶん身近になった。放射線の性質を最大限に利用して豊かで、快適な生活を確保するために、今後のもっと放射線利用の高度化を考える必要がある。また、放射線利用の高度化とともに小型で安価で利用目的に特化した性能を持つ専用加速器の開発が重要であろう。

(5) 共同利用

日本アイソトープ協会・量子ビーム専門委員会の日本の主として研究・教育機関（一部、医療機関を含む）に存在する加速器施設に対して行われたアンケート調査（文献）によると、研究機関、教育機関の加速器施設の83%が公募型の共同利用を行っていることと公募型の85%が全国共同利用の形態をとっている。また、加速器・放射線を取り巻く研究・施設維持の環境が厳しくなっている現状の中で、加速器利用への強い要望があること、個々の加速器施設での新しい意欲的な活動が盛んであること、よく稼動している加速器施設は形式上ほとんどの施設が共同利用可能であることなどが分かった。図6に各研究・教育機関の加速器施設の共同利用に関する結果をしめす。高エネルギー研究所、SPring 8、日本原子力研究所、理研、放医研などの大型加速器施設は高エネルギー研究所とSPring 8は全国共同利用型、日本原子力研究所は施設共用、理研は連携研究、放医研は夜間、週末の利用という形で大学等の外部の研究者に開放され、世界最先端の研究成果が出ている。統合後の原子力新法人の加速器も業務の中に施設共用が取り込まれ、外部の研究者への利用が行われることになっている。一方、研究・教育用の中・小加速器は大学を中心に設置され、多くの加速器は工夫して非常に広範な分野で活発に利用されているが、予算的には加速器建設への手当てがこの二、三十年得にくくなっている。その上に既設の加速器の維持費もほとんど打ち切られているので、国立大学法人化後、大学での研究・教育用加速器の維持・保守管理が今まで以上に厳しくなってくると予想される。

3. 加速器の先端科学技術への応用例

研究室で行っている加速器の先端科学技術への応用例を2つ紹介する。

(1) 次世代の半導体デバイス量産プロセスの空間分解能の限界

現在、次世代の半導体デバイスの製造技術では、量産技術における空間解像度の限界、特に空間解像度の精度、いわゆるラインエッジラフネスの問題が最大の課題になっている。この問題に関して、従来から問題になっていた微細加工を行うビーム径、ビームの散乱、2次電子の飛程、加工される分子の大きさ、酸の拡散長などに加え、エネルギーの付与分布と実際に反応が起こっている反応空間分布にずれがあることが最近の我々の研究で明確になってきている。この現象は半導体デバイスの量産技術としての超微細加工の限界になる。したがって、この問題を克服することが重要であり、そのための最も強力な研究手段が加速器を用いた時間空間現象の解明を行う高時間分解能を有するパルスラジオリシス法である。

(2) 単一高エネルギーイオンによるナノ構造体の形成

高エネルギーイオンが形成するナノ構造体形成の研究は、ナノワイヤーを用いたナノデバイスの作成、イオンを用いた放射線治療のための基礎データ等、多くの利用分野が考えられる基礎・基盤研究である。ここでは、単一高エネルギーイオンが種々の高分子薄膜中で形成するナノワイヤーの長さ、太さなどの制御方法について紹介する。

各研究機関における加速器に関わる研究開発

日本原子力研究所における加速器に関わる研究開発

原研東海 水本元治

M. Mizumoto (Tokai Research Establishment, JAERI)

1. 原研加速器施設の現状

原研が所有している、あるいは計画中の加速器施設は、表1に示すとおりである^(*)。従来、原子力エネルギー研究開発では、原子炉設計に不可欠な核データ(原子核反応・核構造データ)の取得、原子炉材料や核燃料の開発と試験、原子炉の運転管理や放射線管理に必要な放射線計測・測定技術開発などの研究基盤として加速器が利用されてきた。特に、放射線利用研究では、加速器は重要な放射線源として、新材料の創製や改質、排煙・排水中の有害物質の除去技術、半導体素子等の耐放射線性評価、短寿命 RI 製造等に幅広く利用されてきた。また、重イオンが加速できる東海研のタンデム・超伝導ブースターや複数のイオンビームを同時に利用できる高崎研の TIARA 等では、国内

加速器	所在地	エネルギー (MeV)	用途
タンデム・超伝導ブースター (短寿命核加速実験装置: 建設中)	東海	C: 250, Au: 910	重イオン原子核、超アクチノイド核化学、物質科学
核融合中性子源FNS	東海	d: 0.4	核融合中性子工学 (d-t中性子)
中性子校正場用ベトロロン	東海	p, d: 4	中性子測定器開発・校正
負イオン源試験装置	那珂	H ⁻ : 0.4	1 A級NBI開発
930AVFサイクロトロン	高崎	p: 90, Xe: 450	耐宇宙線材料、核融合炉材料、バイオ技術
3MVタンデム	高崎	p: 6, Ni: 15	機能材料開発等
3MVシングルエンド	高崎	p: 3	多重照射等の複合ビーム利用
400KVシングルエンド	高崎	Ar: 0.4	イオン注入装置
コッククロフト電子線加速器	高崎	e: 2	高分子材料改質、排ガス処理、耐放射線
フォトカソードマイクロトロン	関西研	e: 150	量子科学研究
タンデトロン	むつ	HI: 3	加速器質量分析
超伝導リニアック	東海駐在 (関西研)	e: 38	FEL
J-PARC (建設中)	東海	p: 600, p: 3000	中性子科学 (生命科学、物質科学、産業利用) 核変換技術開発等
IFMIF (計画: 共同チーム)	那珂	d: 40	核融合材料研究

表1 日本原子力研究所の主な加速器施設

^(*)資料提供 竹内末広(加速器管理室): タンデム加速器(ブースター)、西谷建夫(核融合中性子工学研究室): 核融合中性子工学用中性子源(FNS)、吉澤道夫(線量管理課): 単色中性子校正場、荒川和夫(放射線高度利用センター): TIARA (AVFサイクロ、タンデム、シングルエンド加速器を含む)、木村豊秋(量子科学研究センター): フォトカソードマイクロトロン、峰原英介(自由電子レーザー研究グループ): 自由電子レーザー、大山幸夫(大強度陽子加速器施設開発センター): 大強度陽子加速器施設、杉本昌義(核融合炉材料開発推進室): 国際核融合炉材料照射施設(IFMIF)

でもユニークな性能を有する加速器であることから、大学・研究機関などの基礎研究や産業分野への利用にも広く開放されている。さらに、電子を加速し放射光やレーザーなどを発生する加速器についても、関西研を中心に新たに開発が進められ広く利用に供している。一方、東海研では、大型施設である大強度陽子加速器施設（J-PARC）の建設により、核破砕反応によって大量に発生する中性子を利用して、物質・生命科学の分野等で国際的な科学技術競争力強化のための基盤の整備が進められようとしている。

2. 各加速器施設

原研における放射線利用に係る研究開発は加速器を利用したもの他、原子炉を中心としたもの、ラジオアイソトープの利用を主体としたものがあり、それらが相補的な役割を担っている。本報告では、表1の上から順番に現在稼働中あるいは計画中の加速器について、施設の概要と課題について簡単に説明する。なお、これらの記述については、各施設の担当者からの資料を基に記載した⁽¹⁾。また、これらの施設の他に、那珂研の負イオン源試験装置、高崎研の材料照射用コッククロフト電子線加速器、むつ事業所のAMS（加速器質量分析）3MVのタンデトロンなどが使用されている。

2.1 タンデム加速器施設

タンデム加速器施設は重イオンによる原子核物理、核化学、固体物理、照射損傷、原子物理等の原子力の基礎研究を目的として建設された。1982年からタンデム加速器の利用が始まり、1994年からは後段加速器として超伝導のタンデムブースターの付置により加速エネルギーが2-4倍の重イオンビームの利用が可能となった。加速イオン種としては約40元素のイオンが加速でき、希ガスイオンは1998年に高電圧端子内に設置された小型の永久磁石型ECRイオン源から加速されている。

2001年からKEKの短寿命核加速実験装置（愛称TRIAC：1MeV/uのリニアック）をこの施設に移設し、2004年末から短寿命核及び安定核の加速が出来る予定である。短寿命核生成には、1次ビームとしてタンデムからのビームを使い重イオン核反応による生成に使用する外、TRIAC単独でも、36MV、3mAの陽子とウラン標的を用いた生成率の高い陽子誘起核分裂生成核を利用して中性子過剰核の生成・分離・加速を行う予定である。将来計画としてはTRIACからのビームをブースターに入射して5-8MeV/uまで再加速する計画を立案中である。この計画は、短寿命核ビームを核物理研究に役立つエネルギーまで加速することが出来るだけでなく、TRIACからは飛躍的に高強度のビームを加速できるので、安定核ビームを利用しているタンデムの他のユーザーにとっても有用となる。この計画を実現するための課題は、ブースターへビームを入射するには約2MeV/uのエネルギーが必要で、ブースターの前に1MeV/uから2MeV/uへ加速する前置ブースターが必要なことで、前置ブースターとしては、低速度イオン加速用の超伝導加速空洞を製作してブースターの初段部に設置する案を検討している。超伝導空洞の開発は始まったが、計画の実施の見通しには厳しいものがある。

施設の利用状況では、タンデムの運転時間は多い年で5000時間であるが、改造等で少なくなる年もあり、平均すると4500時間/年で、利用日数は185-230日/年、平均としては約210日である。利用形態は原研と大学等との協力研究、共同研究が全体の約8割を占めている。研究課題数は年間約40件であり、現在、外部だけで利用できる共同利用は行っていない。

2.2 核融合中性子源 FNS

世界最大級の中性子源用加速器で重水素ビームを加速しD-T反応により中性子を発生させる装置であり、運転を開始して23年目となる。この施設を用いて、核融合炉でのトリチウム増殖率、核発熱率、誘導放射能生成率、遮蔽性能などのD-T中性子核反応に起因する様々な量を求める実験を進めてきた。また、これらの結果を基に、核設計コード及び核データの精度評価の研究を行っている。加速器の主要な仕様は、端子電圧450kV、ビーム電流25mA、トリチウムターゲット回転数2000rpm、中性子強度 4×10^{12} n/s等である。この中性子源を用いた基礎的な研究は、14MeV中性子の断面積測定、14MeV中性子による断面積の積分実験、核融合ブランケット核特性の実験的研究、中性子測定法の開発、核融合材料・機器の中性子照射効果研究等である。今後の方針としては、ITERのテストブランケット開発に向けたブランケット核特性の実験的研究を実施していく。施設の共用化の可能性が今後検討されるが、現在は、施設利用型協力研究として年間約10テーマを実施している。

2.3 中性子校正場用ペレトロン

中性子線量計測の信頼性を確保するために、線量計のエネルギー特性試験を専門に行える単色中性子校正場の存在が必要とされる。これらの目的のために、原研では放射線標準施設棟を増設して4MVバンデグラフ型加速器(ペレトロン)を導入し、LiF、D₂ガス、トリチウム等のターゲットを用いた単色中性子校正場(8keV~20MeVの範囲で約10点)の技術開発を実施している。加速器は校正位置への漏洩線を減らすため、地下に設置されており、加速されたビームは90°に2回曲げられ、中性子照射室1階にあるターゲットまで導かれる。中性子照射室は、横11.5m×縦16.5m×高12.3mの大きさを有している。部屋を大きくするのは、壁、床などからの散乱線を極力減らすためである。1階にはアルミ製の格子状の床(グレーチング床)を設けて、散乱線を低減している。現在までに、144keV、565keV及び5.0MeVの3点について国家標準とのトレーサビリティを確立した。また、実際の作業場所の種々のスペクトルを模擬した校正場(スペクトル可変校正場)の開発も行っている。今後は、単色中性子校正場、スペクトル可変校正場の完成により、既存のRI中性子校正場と合わせて、我が国で唯一ともいえる総合的な中性子校正施設の実現を目指している。また、この施設では原研における研究開発のみならず、大学との共同研究、メーカー等の特性試験を通じて国内へ中性子の基準供給を広く進めていくとともに、アジア地区への基準供給を通じて、アジア諸国の放射線防護の発展に寄与したいと考えている。

2.4 TIARA

高崎研では、1987年にイオンビームの高度利用を目的として「放射線高度利用研究計画」が策定され、その計画を推進するための研究施設としてTIARA(イオン照射研究施設)の建設・整備が行われた。TIARAはAVFサイクロトロン、タンデム加速器、シングルエンド加速器、イオン注入装置から構成されており、この施設は1994年からフル稼働し、宇宙環境での情報・通信で用いられる半導体素子・材料の研究開発、エネルギーとしての核融合炉開発に必要な材料の研究開発、バイオ技術と新機能材料の基礎的・先端的研究などを目指した各種の研究が行われている。これまでの、

主な研究成果として、イオンビーム育種技術の開発（キク、カーネーション等新種開発、新しい紫外線感受性変異体の作出、遺伝子を同定、フリル遺伝子発見）、重イオンマイクロビームによる細胞局部照射技術の開発、ポジトロンイメージングによる養分の植物体内移行過程の画像化技術開発、宇宙用半導体・太陽電池の誤動作、劣化評価法の開発（「きく6号」や「かけはし」の太陽電池寿命評価、シングルイベント耐性評価技術）、新しい同位体¹²⁷Pr及び¹²⁵Prの発見、材料・バイオ科学研究用加速器・ビーム技術の開発（カクテルビーム加速技術、イオンマイクロビーム形成技術、シングルイオンヒット技術、大気マイクロPIXE分析技術、高エネルギー準単色中性子場）などが挙げられる。

また、TIARA施設利用運営の特徴として、開かれた利用運営、研究課題の公募、多様な利用形態（共同研究、協力研究、共同利用（有償）、連携重点研究（原研大学プロジェクト共同研究））などがあり、年間の利用時間は全体で9000～10000時間に及ぶ。今後の課題として、GeV級超伝導AVFサイクロトロンを導入による高エネルギー化、ビーム強度の向上による大強度化やポジトロン専用小型加速器の導入、マイクロ/ナノビームへ向けての高分解能化、高速クラスタービームの実現に向けての質量数増大等を計画している。これらは、植物育種、生命科学、半導体ナノテクノロジーなどの分野での広範な波及効果が期待される。

2.5 フォトカソードマイクロトロン

高出力のレーザービームを用いて粒子ビームを加速する研究のために、マイクロトロンが設置された。ビームを加速するためには横波であるレーザーを用いて縦波を発生させる必要があるが、本施設では、プラズマ中に極短波パルス高ピークレーザーを打ち込み、航跡場と呼ばれる粗密波を発生させる。この波は縦波としては高速で伝わるので、この波にマイクロトロンからの電子を乗せれば、高いエネルギーまでの加速が可能となる。このような加速が実現すると10km以上の長さの巨大な直線加速器が数10m程度に短縮される可能性がある。これまでの主な成果は、高品質ビームの実証、レーザー加速実験のための検出器の較正などである。

今後の課題として、ビームの安定化、高性能化（高輝度化、短パルス化、エネルギー可変性）などが挙げられており、また、将来の計画として、レーザー加速による追加速1GeV電子ビーム（高エネルギー電子の発生）、レーザー・電子ビーム相互作用研究（レーザープラズマアンジュレータによる短パルス・高輝度・準単色硬X線発生、非線形トムソン散乱、放射減衰効果の検証）などの研究を進めている。さらに、高強度超短パルスレーザー（100TW、20fs）と高エネルギー高品質電子ビームを組み合わせたユニークな実験を展開していく計画である。

2.6 超伝導リニアック

超伝導リニアック自由電子レーザー施設は、現在まで約11年間ほぼ連続運転されており、自由電子レーザー（FEL）では初めてフェムト秒領域の光パルスを安定に発生し、2000年には準連続波運転で世界最高出力の2.34kWを達成した。この状態は高輝度で高効率であり、高縮重度超放射と言ふべき発振状態であることが特性解析実験で明確となった。最高6-9%高効率、平均約2kW超、ピーク約1GW高出力、255フェムト秒/3サイクル発振光は、自由電子レーザーの元々持っていた原

理的優位性を実証し、さらに小数サイクル発振フェムト秒域の極短パルスを新たに実現した。これは、今までのどのレーザーでも実現できなかった高効率、高平均出力かつ高ピーク出力、波長可変、極短パルスを得たものであり、大規模産業応用に新しい手段と可能性を提供するものである。原子炉の応力腐食割れ防止技術開発、原子炉切断解体等の廃炉措置技術開発、光化学反応、豚心臓の切断、ステンレス薄膜/セラミック板の切断/穴あけ、環境有害物質の除害/分解、エネルギー伝送等に関して産業応用のための利用実験あるいは利用試行或いは技術検討を行った。

一方、これまで開発した通常の FEL と今後のエネルギー回収型超伝導リニアック (ERL) を用いる FEL 及び放射光源の開発に関する将来計画として、以下の4つの方向が計画されている。1番目は、既に実績のある kW から MW 級の超伝導リニアック照射装置、高周波変換ロスのない高効率の照射装置であり、2番目は、エネルギー回収と新発振モードを利用する kW から MW 級の産業用 FEL 装置である。既に非回収で回折損を含めると 5kW 以上電子ビームから光へ変換しており、1-20kW までを非回収で実証し、kW から MW 以上を回収で実現する。3番目は、ERL 放射光源 (ERLSR) で、近い将来の第4世代放射光源の研究開発はこの形式で進展すると考えられる。4番目は X 線 FEL で、技術的ハードルが高すぎるため、現在は基礎的な要素技術開発か低いエネルギーの真空紫外線域を目指し、水の窓領域から 1keV が次の 5-10 年の目標である。

2.7 J-PARC

東海研で進められている大強度陽子加速器施設 (J-PARC) の計画及び施設の内容は、既に多くの記述があり⁽¹⁾、本ワークショップでも、詳細な建設の現状が報告されている⁽²⁾。J-PARC では核破砕中性子反応を用いて大強度のパルス中性子を発生し、既存の原子炉からの定常中性子源とあわせて、二種類の中性子源を用いることの出来る生命・物質分野を中心とした総合的な研究センターを目指している。また、大強度陽子加速器は、原子力発電を長期・安定的に行う上での最大の課題である長寿命放射性廃棄物の核変換処理技術の研究開発にも利用される。

なお、大強度陽子加速器計画は、世界最大級の強度を持つ加速器施設を整備するものであり、その計画の達成には原研がこれまで蓄積してきた材料、熱流動、遮蔽、核データ、放射線管理、廃棄物処理、照射後試験技術等の知見と技術が極めて重要な役割を果たしている。

2.8 IFMIF

核融合炉の実現には DEMO 炉相当でも 10-15 MWy/m² の中性子に耐える材料が必要であり、炉材料開発を進めるには 14MeV 強力中性子源が不可欠である。国際核融合材料照射施設 (IFMIF) が必要であるとの国際認識のもと、重陽子-リチウム (D-Li) ストリッピング反応による加速器型中性子源が選択され、その実現に必要な大電流重陽子加速器、高速液体リチウムターゲット等の技術開発が国際協力により進められてきた。IFMIF 用の加速器は 2 台の加速モジュール (125mA / 1 台加速モジュール) により駆動され、合計で 250mA の重陽子ビームを 40MeV まで加速する。各加速モジュールは、入射器、175MHz の高周波四重極加速器 (RFQ)、175MHz のドリフトチューブ型線形加速器 (DTL)、高エネルギービーム輸送系 (HEBT) および高周波電力システムから構成される。入射器では、155mA-100keV の重陽子ビームが引出され、RFQ により 100keV から 5MeV まで加速される。さらに DTL

では、5MeV から 40MeV まで追加速され、HEBT により Li ターゲットへ導かれる。

この加速器の特徴は、各加速器モジュールで 125mA 以上の大電流を連続動作 (CW) で加速することにある。このため加速器としては、連続運転において安定動作が必要不可欠であり、長寿命化を目指した入射器開発や RFQ および DTL を駆動する RF 源の 1 MW 級出力における高信頼性が要求される。

3. 原研の役割

国が整備する加速器の中で、原研では以下の二通りの役割を有する加速器を整備してきた。(一つ目は、特定の目的をもった中小加速器施設：原子力開発研究としての目的を有する中小の加速器において、他の大学や研究機関と同様に、研究開発の基盤としての施設を整備し、有効な役割を担う。また、二つ目は、汎用目的の大型加速器施設：種々の原子力施設や加速器の建設、運転及び利用を通じて蓄積した技術や経験を生かして、SPRING-8 や J-PARC ような大型加速器の整備についての役割を担う。)

大型加速器を安全に運転・維持するためには、大型原子力施設の開発から廃止までの経験が重要である。特に、大強度の大型加速器では、それ自体が強力な放射線発生装置であり、相当量の放射性廃棄物を生成する。このため、大型加速器の建設、運転、維持には、原子力研究所として培ってきた放射線の管理、放射性物質の取扱、廃棄物の管理や処理処分に係る組織的な技術能力を活用することが必要とされる。国際的に見ても、多くの大強度の大型加速器は、原研のような原子力研究施設との協力の下で建設し、運転されている例が多い。

4. 今後の方向

平成 17 年度に予定されている原子力 2 法人の統合は、その基本的な考え方として、原子力研究開発を総合的・一体的に実施する研究開発機関として、科学技術水準の向上、原子力利用の高度化、多様化に貢献 (基礎・基盤研究等の総合的推進) するものとされている。また、その業務の目標として、放射線利用研究を推進し、原子力利用の可能性を開拓すること、荷電粒子線、中性子線、光子線等の放射線発生技術を高度化し、放射線を利用した新素材開発や分析評価技術を高度化することとされている。

さらに、原子力基盤研究施設の共用として、我が国の研究開発基盤として重要な施設・設備については、共用施設として運用し外部機関等の利用に積極的に供すること、利用者の意見が反映される利用システムを確立することが必要とされている。

参考文献

- (1) S. Nagamiya : “ J-PARC Project ”, Nucl. Instrum. Methods in Physics Research, B214(2004)216-222
- (2) 森義治 : “ J-PARC の現状 ”、原子力分野における加速器の研究開発 新たな展開を目指して -2004 年 8 月 10-11 日、京大原子炉実験所

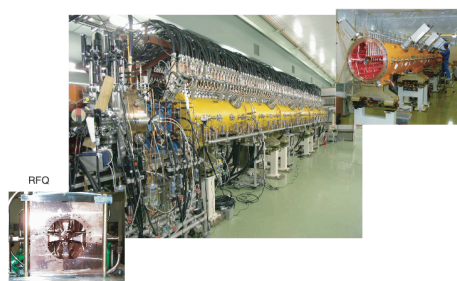
高エネルギー加速器研究機構における加速器開発

-J-PARC の現状-

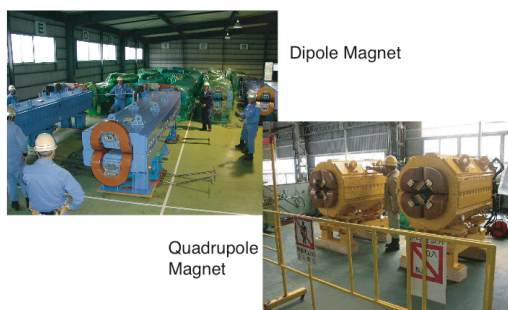
KEK 森 義治

Y. Mori (KEK)

高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所との共同事業である J-PARC 計画では、ビームパワーで 1MW を有する大強度陽子加速器の建設が東海研究所において進行している。加速器は、陽子リニアック (400MeV, スタート時では 180MeV)、3GeV 陽子シンクロトロン (RCS)、50GeV 陽子シンクロトロン (MR) から構成されている。RCS は Rapid Cycling Synchrotron の頭文字からとったもので、文字どおり加速繰り返し 25Hz の速い繰り返しのシンクロトロンである。これからのビームは主に核破砕中性子源 (Spallation Neutron Source)、ミューオン源として使われるもので、いずれもパルス状ビームを出力する。RCS で加速された陽子ビームの平均電流は 333 マイクロアンペアであり、ビーム出力は、したがって 1MW となる。MR では、2つの実験室 (ハドロン、ニュートリノ) にビームを供給する。ハドロン実験室へはいわゆる遅いビーム取り出しにより約 0.7 秒の間連続ビームを供給する。ニュートリノ実験室では、リング全ビームを 1 ターンですべて取り出す速いビーム取り出しを行う。ビームパワーは遅い取り出し (50GeV) で約 0.75MW である。現在、加速器の各種機器の約 70% 以上は発注済みであり、2007 年の commissioning を目指している。



リニアック前段部



50GeV MR マグネット

理化学研究所における加速器に関わる研究

理研 後藤 彰

A. Goto (RIKEN)

1. はじめに

理化学研究所（理研）は現施設の拡張計画として、「RI ビームファクトリー計画」という次世代の国際的な重イオン科学研究センターの建設計画を推進している。このファクトリーは、全元素にわたる RI ビームを種類と強度において現在の世界水準をはるかに凌ぐ性能で発生し、これを利用して究極の原子核モデルの構築、元素の起源の解明などの基礎研究から RI の新利用といった広範な科学技術分野に新たなブレークスルーをもたらそうというものである。

RI ビームファクトリーでは、現有のリングサイクロトロンの後段に3台のリングサイクロトロン（fRC、IRC、SRC）を設置する予定で、現在それらを製作・据付け中である。SRCからのビームの最高エネルギーは炭素などの軽い元素イオンで核子当り 400 MeV、ウランなどの重いイオンで核子当り 350 MeV に達し、そのビーム強度は 1 pμA となることを目指している。RI ビームは、SRC のビームを RI ビーム生成装置（BigRIPS）に導きそこで入射核破砕反応とウランの核分裂反応を使って生成される。

ここでは、当計画における加速器の概要と建設の現状について述べる。

2. 複合加速器システム

図1にRI ビームファクトリーの鳥瞰図を示す。現有の加速器システム（入射器：RILACまたはAVF、主加速器：RRC）の後ろにさらに fRC、IRC および SRC という3台のリングサイクロトロンを据え、BigRIPSでRI ビームを生成するという構成になっている。

図2にこれらの複合加速器システムの構成模式図を示す。図に示されているように、1) RILAC+RRC+IRC+SRC、2) RILAC+RRC+fRC+IRC+SRC、3) AVF+RRC+SRC の3通りの加速モードを計画している。これらの加速モードによって得られるビームの加速エネルギーを図3に示す。1)のモードによって、炭素などの軽い元素イオンを核子当り 400 MeV のエネルギーまで加速できる。2)のモードで用いられる fRC は固定周波数のリングサイクロトロンで、これを援用することによってウランまでの重い元素のイオンを核子当り 350 MeV まで加速することが可能となる。3)は偏極重陽子を核子当り 440 MeV まで加速するモードである。

fRC、IRC および SRC の仕様を表1に示す。SRCは最大ギャップ間隙磁場が 3.8 T、K 値が 2500 MeV という世界に例のない超電導リングサイクロトロンである。

3. BigRIPS

BigRIPS は、第1ステージでRI ビームを生成分離し、第2ステージではRI ビームの同位体

核種のタグ付けをする、というように2つのステージで構成される。全長77mで、14台の大口径超電導四重極電磁石(STQ)と6台の常電導偏向電磁石から成る。大口径超電導四重極電磁石を用いる理由は、ウランの核分裂(in-flight fission)で生成されるエミッタンスの大きな核分裂片ビームをできるだけ多く収集するためである。第1ステージの5台のSTQ(STQ1-5)は大型の液体ヘリウム冷凍機システムで冷却し、残りのSTQ(STQ6-14)はそれぞれに搭載した小型の冷却システムで冷却する。BigRIPSは、最大磁気剛性が9 Tm、角度アクセプタンスが水平方向80 mrad、垂直方向100 mrad、運動量アクセプタンスが6%の性能を有する。

4. 実験装置

RIビームを用いた実験装置としてこれまで設計を進めてきたMUSESとよばれる多目的実験用ストレージリング群は最終的にとりやめることとし、それに代わるものとして現在不安定核の電子散乱実験のための新しい方法(SCRIT法:電子リング中に不安定核イオンをトラップし、ターゲットとして使用する)の開発を行っている。この方法によって従来のコライダー方式に比較して安価でかつ容易に電子散乱実験が可能となることが期待される。その他実験装置として、超精密質量測定用等時性リング、大立体角スペクトロメータ、ゼロ度スペクトロメータ、気体捕捉型超低速RIビーム発生装置などの設計・開発を行っている。

5. 建設スケジュール

IRC、SRC、BigRIPSを収容する加速器棟は2003年3月に完成し、現在これらの装置の搬入・据付が行われているところである。2004年9月現在では、1) fRCはメーカーの工場で作成中(セクター電磁石は4台とも完成)、2) IRCは据付けが完了し、真空引きや電磁石の励磁が近々行われる予定、3) SRCは6台の超電導セクター電磁石の下ヨークと極低温部が据え付けられているところ、4) BigRIPSはSTQと偏向電磁石がすべて搬入され(第1ステージ部分は据付け済み)、STQは近々冷却する予定、である。IRCとSRCの写真(2004年夏撮影)をそれぞれ図4および5に示す。2004-2006年度のこれらの建設スケジュールを図6に示す。SRCのセクター電磁石の冷却・励磁試験は2005年の夏を予定している。

実験装置が収容される実験棟は2005年5月に完成する予定である。そして、ファーストビーム(ウランビーム)を2006年の末に得ることを予定している。なお、実験装置については、今年(2004年)の11月にRIBF基幹実験設備建設計画国際評価委員会(IAC)を開催しそこでピアレビューを受ける予定である。

Table 1. Specifications of the fRC, IRC and SRC.

	fRC	IRC	SRC
K-value (MeV)	570	980	2,500
No. of sector magnets	4	4	6
Sector angle (deg)	58	53	25
Mean injection radius (m)	1.55	2.77	3.56
Mean extraction radius (m)	3.30	4.15	5.36
Maximum magnetic field (T)	1.68	1.9	3.8
Total weight of magnets (t)	1,480	2,720	8,100
No. of RF resonators			
Main	2	2	4
Flattop	1	1	1
RF frequency (MHz)	55	18-38	18-38
Acceleration harmonics	12	7	6

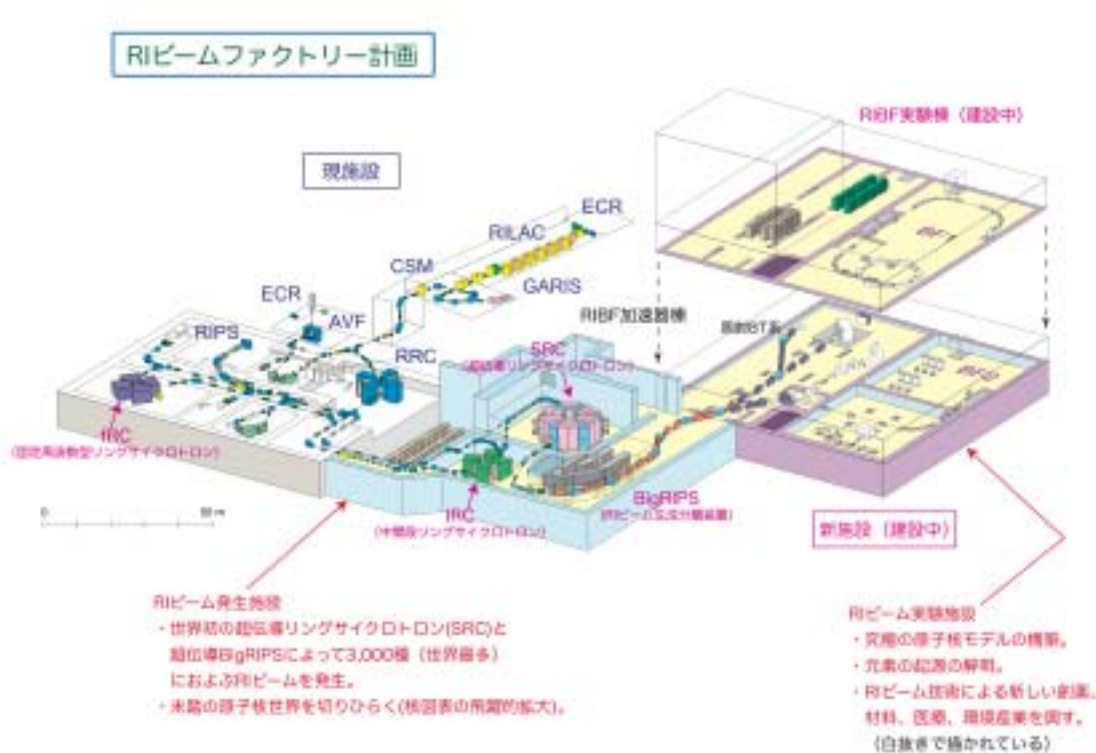


Fig. 1. Bird's-eye view of the RIKEN RI Beam Factory

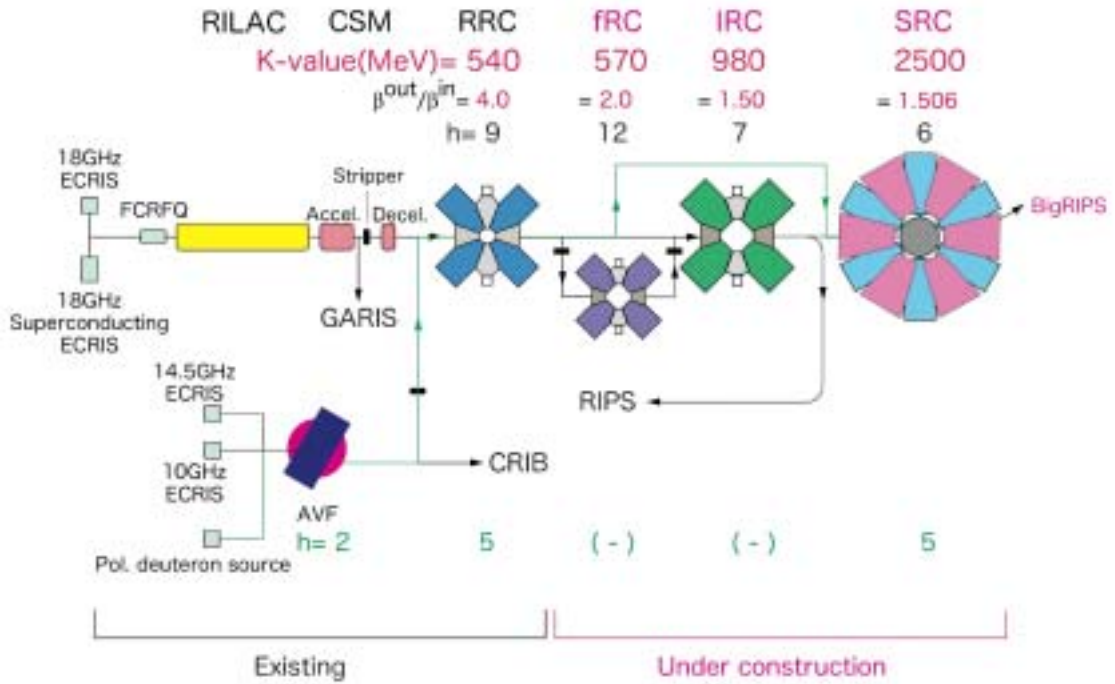


Fig.2. Accelerator complex at RIBF.

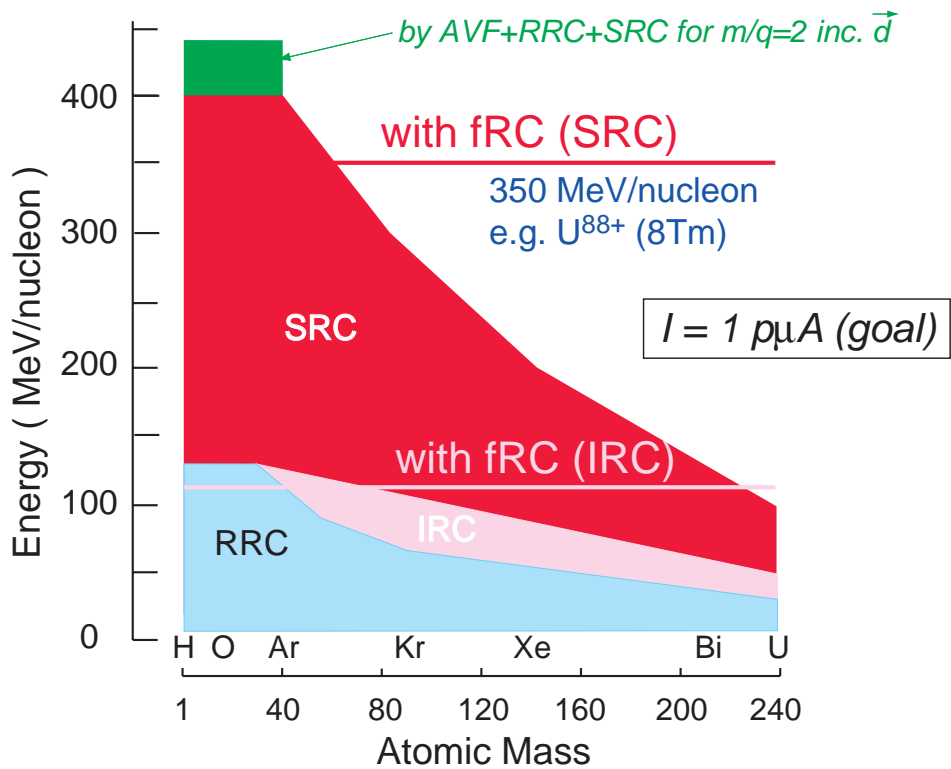


Fig. 3. Acceleration performance at RIBF.

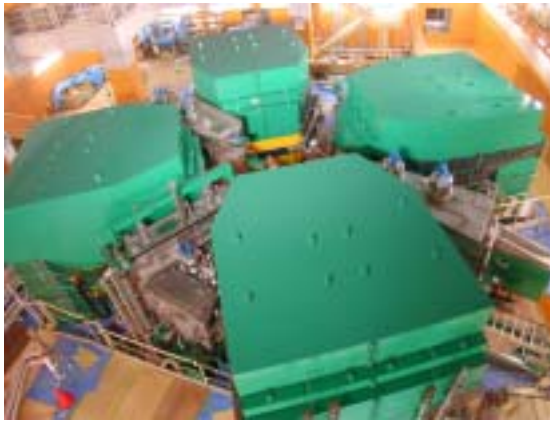


Fig. 4. Photograph of the IRC.



Fig. 5. Photograph of the SRC.

	2004 年度		2005 年度		2006 年度	
	4	10	4	10	4	10
fRC	電磁石、RF 共振器、真空系、診断系製作		組立、磁場測定、RF 共振器パワー試験			
IRC	電磁石配線、冷却水配管、真空系組立 励磁試験、真空排気		RF 系配線、診断系組立 RF 共振器パワー試験			
SRC	電磁石組立		冷却励磁試験 磁場測定		真空系、RF 系組立	
BigRIPS	STQ1-5 の冷却試験 STQ6-14 冷却 焦点面チェンバー、診断系、真空系製作		磁場測定 電磁石組・配線 放射線シールド製作・組立 ビームダンプ、生成ターゲット製作		制御系、検出器、DAQ 製作	
RI ビーム 配送ライン	焦点面チェンバー、診断系、真空系、放射線シールド製作		電磁石製作・組立・配線		制御系、検出器、DAQ 製作	
BT 系	電磁石、チェンバー、診断系、真空系製作		組立・配線			
備考	★ イオン源でのウラン イオン取扱許可		★ 実験棟完成		★ ファースト ビーム 総合調整運転	

Fig. 6. Construction schedule of RIBF.

放医研における加速器に関わる研究

放医研 野田耕司

K. Noda (National Institute of Radiological Sciences)

1. はじめに

HIMACによる炭素線がん治療は、200年6月でちょうど10年が経過し、これまで約2000名を超える治療を行った。その治療成績はほぼ外科手術に匹敵している[1]。このような好成績を支えてきたものとしてHIMAC加速器の技術開発と維持管理[2]が挙げられる。HIMAC加速器の技術開発は、粒子線がん治療における治療照射精度と効率の向上を図り、また、その基礎となる生物、物理等の実験の幅を広げるために、以下のようなテーマについて行われてきた。

- (1) 治療照射の高精度化：(a) 呼吸同期照射法の開発、(b) 取出しビームのリップル改善、(c) ビーム強度制御。
- (2) 治療照射の効率化：(a) ビーム輸送系の自動ビーム軸出しシステムの開発、(b) ガントリーの小型のための多極磁場を用いた均一照射野の生成法の開発。
- (3) 基礎科学実験の利用向上：(a) 入射器からのビームのエネルギーの多段階化、(b) 加速イオン種の増大とイオン源改良によるビーム強度増強、(c) 電子ビーム冷却法によるビームの高品質化。
- (4) 要素技術開発：(a) ビームリップル及び強度を連続監視するための2次電子モニター、(b) リング内のビームプロファイルを観測するための非破壊型モニター、(c) 非破壊型チューンモニター、(d) PI機能付プロファイルモニター、(e) 広帯域RFキャビティ、(f) 確率冷却用ピックアップモニターの開発研究。

本報告では、10年間のHIMAC加速器の主だった研究開発について述べる。

2. HIMAC

HIMACは、3台のイオン源（10GHz-ECR、18GHz-ECR、PIG）とRFQ、DTL線形加速器からなる入射器系と2台のシンクロトロンからなる主加速器系と3つの治療室と生物、物理汎用および2次ビーム実験室からなるビーム利用系で構成されている。HIMACの鳥瞰図をFig.1に示す。HIMACでは、入射器により6 MeV/uまでに加速されたイオンをシンクロトロンに入射し最大800MeV/uまで加速する。加速されたビームは3次共鳴を用いた遅いビーム取り出し法によりビームを取り出し、治療および実験に供給している。がん治療では、290、350、400MeV/uの3種類のエネルギーの炭素イオンを火曜日から金曜日の昼間に供給し、月曜日から金曜日の夜間および土曜日は、基礎科学実験のために種々の重イオンを供給している。



Fig. 1 : Bird's eye view of HIMAC

3 . 加速器の技術開発

3-1 呼吸同期照射法[3]

呼吸と共に移動する肺がんや肝臓がん等の治療照射では、標的が治療計画での照射位置からずれた時に照射すると正常細胞に損傷を与える事になる。そこでビーム供給および停止に対して高速応答性を有する RF-KO 取出し法を開発し[4]、照射可能条件を満たした場合だけにビームを照射する事を可能にした。また、呼吸同期照射では照射エネルギーまで加速したビームを捨てなければならない場合もあり、そのために引き起こされる機器の放射線損傷を最小限に留めるために取り残されたビームを入射エネルギーまで減速し捨てる方式を開発した。呼吸同期照射法は 1996 年 6 月より臨床試行で用いられており、HIMAC でのがん治療の約 1/3 に適用されている。

3-2 スポットスキニング法の開発[5]

HIMACでは横方向線量分布を均一にするためにワブラー法を用いているが、重要臓器近傍の腫瘍ではより精密な照射が必要になる。これに対応するために、3次元原体照射法の一つであるスポットスキニング法を開発を行った。HIMACのスポットスキニングは、 ^{11}C などのポジトロン放出核を照射し、PETカメラあるいはガンマカメラによりビーム停止位置を測定する事により、治療後の照射野確認や飛程の精密測定を目指したシステムである。Fig. 2に実験結果の一例を示す。この図から判るように、ワブラー法での均一線量分布の確保が難しい凹型の照射野も精度良く形成できることが判る。この照射法を応用して一次ビームにより短時間の3次元原体照射を実現するためには、シンクロトロンからの取出しビームのリップルを10%程度に抑える必要がある。またビーム位置やエネルギーを変更する際にビーム供給を即座に停止する必要があるた

めにRF-KO法を用いる必要がある。そこでRF-KO法による取出しビームのリップルを抑制する研究を続けてきた[6-10]。これまでの研究開発により、セパトリティクス内でのビームの拡散に用いる帯域を持ったRFとセパトリティクスからの取出しのための単一周波数RFの2種類を印加する方法によって、リップルを $\pm 10\%$ 程度に抑える事に成功した。さらに、クロマティシティーを大きくすることでさらにリップルを低減できることを示し、残存するリップルの主成分がシンクロトロン振動によるものであることも判った。また、これまで $500\mu\text{s}$ 程度であったビーム停止時間を、加速用RFを同時にOFFすることでビーム停止時間を $60\mu\text{s}$ まで短縮する事に成功した。最後に、スピルの低周波数成分をRF-KOの振幅変調関数を最適化した状態でフィードバックする事により、Fig.3に示すような擬似DCビームを実現した。これによりスポットキャン法での照射精度が大きく向上できることが期待される。

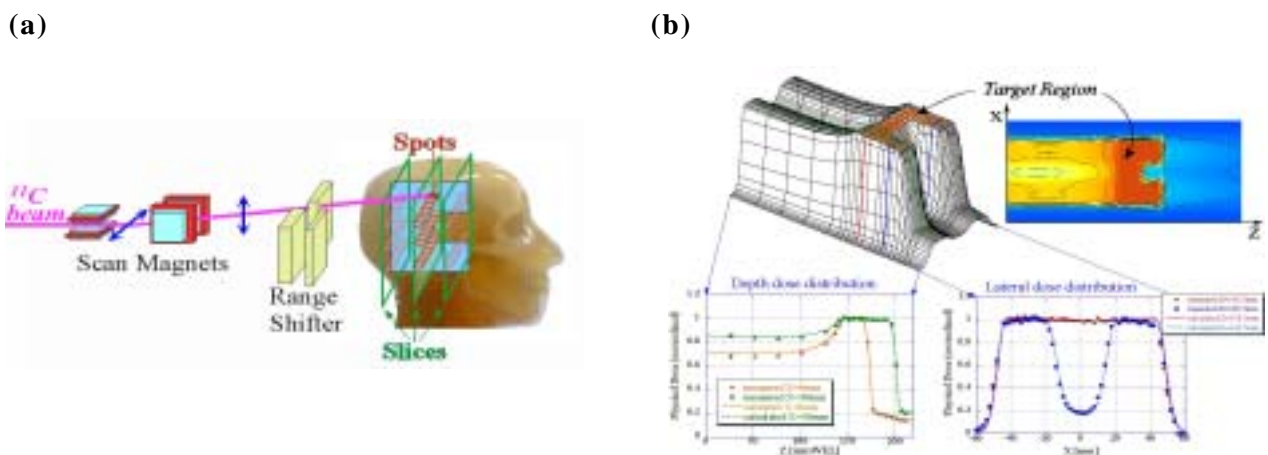


Fig.2 : Spot-scanning method at HIMAC.

(a) Schematic figure of spot-scanning method.

(b) Experimental result of spot-scanning in concave phantom.

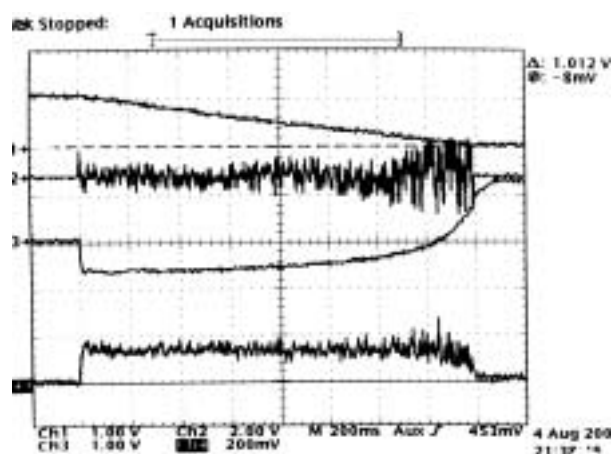


Fig. 3: Time-structure of slowly extracted beam from HIMAC synchrotron by RF-KO method.

3-3 電子ビーム冷却[11,12]

ビーム品質を大幅に向上させるために電子ビーム冷却装置を導入し、6MeV/uのC、Arビームを使って以下のようなビーム試験を行っている。

運動量幅 2×10^{-3} 程度(FWHM)の入射ビームを電子ビーム冷却により 4×10^{-5} まで運動量幅を圧縮する事に成功した。この値は電子ビーム加速電圧の安定度を考慮すれば妥当な値である。また、電子電流が120mAの場合、 10^{-4} までの冷却時間は1秒以下で、それ以後では9秒であった。

多重入射したビームを冷却することにより生じた位相空間の空きスペースに再び多重入射することによりビーム強度を増大させる冷却蓄積を行っている。強度利得はビーム寿命と冷却時間によるが20倍以上のビームを蓄積する事に成功した。また、ビーム密度が増大するとビーム不安定性により大きくビーム損失を起こす現象も観測された[13]。これらの様子をFig. 4に示す。Fig. 4の左は、多重入射4秒後の実空間のビームを示しており、右は入射20秒後のビームである。図中の線はビーム軸の傾きを知るために参考として引いてある。図から、ビーム密度の上昇と共にビームの傾きが変わる様子が判る。これは、空間電荷効果によるチューンの拡がりと移動のために Q_x - $Q_y = 1$ の結合共鳴の影響を受けるためと考えられる。

これらの図に示す2次元プロファイルは、HIMACで開発された非破壊型プロファイルモニターSBPM (Oxygen Gas-Sheet Beam Profile Monitor) [14]によって測定された。その原理は、周回ビームが約1mm厚さ(約 10^{-6} Torr)の酸素ガスシートを通過した際に生じた2次イオンを平行電場で収集し、MCPで電子に変換・増幅後、スクリーンを発光させて撮るものである。この場合、シャッタースピードはビーム周回時間に等しい $4\mu\text{s}$ である。

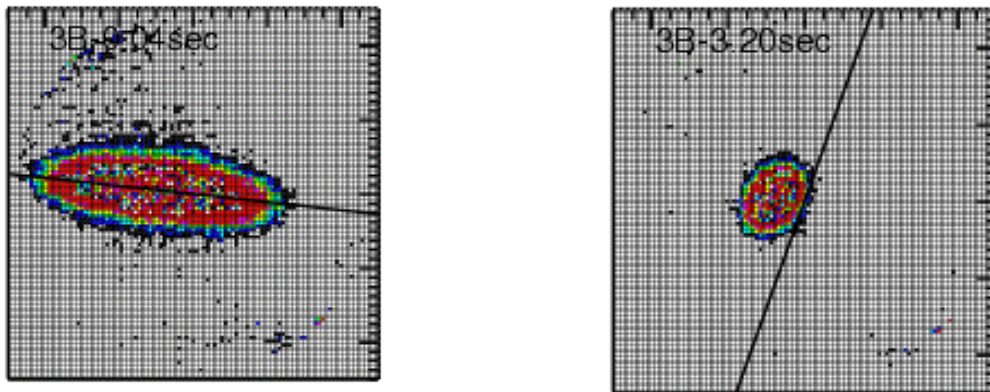


Fig. 4: Electron beam cooling and coupling resonance.

(Left): 4 s after multiturn injection, (Right): 20 s after multiturn injection.

3-4 入射器系の開発

(1) 入射器系のタイムシェアリング運転

入射器系ではイオン源以降の電磁石をパルス対応に変更しタイムシェアリング運転を可能とした。それにより上下リングおよび中エネルギー照射室の3コースに異なるイオンを同時に供給できるようになった。

(2) 入射ビームのエネルギーの多段階化

3台のDTLタンクを順じoffにすることで0.8、2.6、4.2、6.0MeV/nのエネルギーのビームを供給可能とした。特に、4.2MeV/nのビームは通常の6MeV/nのビームと同程度の性能でリングでも加速・取出しができることが確認された。

(3) イオン源の開発

これまでのPIGイオン源や10GHz・ECRに加え、18GHz・ECRイオン源[15]を開発し、Xeまでの新たなイオン種の開発を行うと共に、宇宙空間での放射線被曝のリスク評価のためのFe、Ni等の金属イオンの供給が可能となった。さらに、普及型炭素線がん治療装置の開発のために、図5に示すような永久磁石型ECRイオン源を開発した[16]。そのビーム強度は C^{4+} で300 μA を超え、十分、実用に耐えうる性能を有している。



Fig. 5: Compact ECR ion source with permanent magnet.

4. まとめ

1993年11月からのビーム・コミッショニング以来、HIMAC加速器の技術開発が精力的に続けられ、呼吸同期照射法を始めとして世界に先駆けた研究成果を挙げてきた。これらの研究はHIMACに限らず、粒子線がん治療加速器全般における治療照射精度と効率の向上に多大な貢献をなすものと信じる。

最後に、本研究での加速器の運転・維持管理および技術開発そのものにも協力して戴いた加速器エンジニアリングの皆さんに深く感謝いたします。

参考文献

- [1] URL: <http://www.nirs.go.jp/report.htm>
- [2] K. Narita, *et al.*, 第一回日本加速器学会年会報告書、日大理工学部、2004年8月、pp.251
- [3] S. Minohara, *et al.*, *Int. J. rad. Oncol. Bio. Phys.* 2000; **47**: 1097-1103.
- [4] K. Noda, *et al.*, *Nucl. Instrum. Meth* **A374** (1996) 269-277.
- [5] E. Urakabe, *et al.*, *Jpn. J. Appl. Phys.* **40** (2001) 2540-2548.
- [6] K. Noda, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth* **A492** (2002) 253-263.
- [7] T. Furukawa and K. Noda, *Nucl. Instr. Meth* **A489** (2002) 59-67.
- [8] T. Furukawa, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth* **A503** (2003) 485-495.
- [9] T. Furukawa, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth* **A515** (2003) 861-869.
- [10] T. Furukawa, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth* **A522** (2004) 196-204.
- [11] K. Noda, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth* **A441** (2000) 159-166.
- [12] K. Noda, *et al.*, *Proc. 8th EPAC, Paris, 2002*, pp.1380-1382.
- [13] T. Uesugi, *et al.*, *Proc. 9th EPAC, Lucerne, July 2004*, pp.1321-1323.
- [14] Y. Hashimoto, *et al.*, *Nucl. Instr. Meth* **A527** (2004) 289-300.
- [15] A. Kitagawa, *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* **69**, 674 (1998).
- [16] M. Muramatsu, *et al.*, *Rev. Sci. Instr.* **75**, 1925 (2004).

産総研における加速器に関わる研究

産総研 豊川弘之

H. Toyokawa (Research Institute of Instrumentation Frontier, AIST)

1. 施設の概要

産総研つくば中央地区には、電子加速器施設(図-1)、およびイオン加速器施設(図-2)がある。前者はリニアックTELL、低速陽電子施設、蓄積リングTERAS、NIJI-II、NIJI-IVより構成される。後者はペレット型加速器、コッククロフト型加速器から成る。TELLの電子銃は熱陰極であり、DC 80 kVを印加している。加速管は内径約8 cmの純銅パイプの内部に3.5cmおきにローディングディスクをはめ込んだ導波管で、2.856 GHzのS-bandマイクロ波を使用する。電子ビーム取り出しは、低エネルギー部(～75 MeV)、中エネルギー部(～150 MeV)、高エネルギー部(～310 MeV)で行い、それぞれ低速陽電子施設、NIJI-II、NIJI-IVとTERASに振分けられる。電子蓄積リングTERASには11本のビームラインがあり、それぞれのラインで異なる波長範囲・波長分解能の光源が利用できる。産総研つくば中央地区の加速装置、およびTERASビームラインの主な仕様を、表-1、表-2にそれぞれ示す。

表-1 産総研電子加速装置の主な仕様

1 .	電子直線加速器 TELL	
	全長	77 m
	加速管形式	定勾配ディスク口径型 (2856 MHz)
	加速管構成	2 m × 4本 + 3 m × 16本
	マイクロ波電力	25 MW (ピーク) × 8
	ビームエネルギー	350 MeV (ピーク電流100 mA時)
	ビームパルス幅	1 - 4 μsec
	ビームパルスくり返し	0.5 - 300 pps
	主用途	各施設への入射器
2 .	低速陽電子発生施設	
	入射電子エネルギー	75 MeV
	低速陽電子収量	10 ⁹ 個 / s
	パルス幅	150 ps
	主用途	陽電子を用いた表面、および薄膜の物性研究

- 3 . 電子蓄積リング NIJI-II
- | | |
|------------|-------------------|
| 入射ビームエネルギー | 150 MeV |
| 偏向部曲率半径 | 1.4 m |
| 蓄積電流 | 350 mA |
| 蓄積電子エネルギー | 150 - 600 MeV |
| 特色 | 1.3 m 偏光可変アンジュレータ |
| 主用途 | 測光標準研究、有機薄膜の研究 |
- 4 . 電子蓄積リング NIJI-IV
- | | |
|------------|--|
| 入射ビームエネルギー | 310 MeV |
| 偏向部曲率半径 | 1.2 m |
| 蓄積電流 | 250 mA |
| 蓄積電子エネルギー | 250 - 500 MeV |
| 特色 | UV/VUV用 6.3 m 光クライストロン(ETLOK-II)
IR用 3.5 m光クライストロン(ETLOK-III) |
| 主用途 | 自由電子レーザードライバ |
- 5 . 電子蓄積リング TERAS
- | | |
|------------|-----------------|
| 入射ビームエネルギー | 310 MeV |
| 偏向部曲率半径 | 2.0 m |
| 蓄積電流 | 300 mA |
| 蓄積電子エネルギー | 300 - 800 MeV |
| 臨界波長 | 26.5 Å @750 MeV |
| 特色 | 汎用型 |
| 主用途 | 放射光源、光源開発、標準研究 |
- 6 . ペレットロン型加速器
- | | |
|---------|---------------------------------|
| 加速粒子 | p, d, α , H ⁻ |
| 加速エネルギー | 4 MeV |
| 加速電流 | 50 μ A (p) |
| 建設年度 | 1982 |
| 用途 | 単色中性子標準、分析 |
- 7 . コッククロフト型加速器
- | | |
|---------|---------------------------------|
| 加速粒子 | p, d, α , H ⁻ |
| 加速エネルギー | 0.3 MeV |
| 加速電流 | 1 mA (p) |
| 建設年度 | 1986 |
| 用途 | 単色中性子標準 |

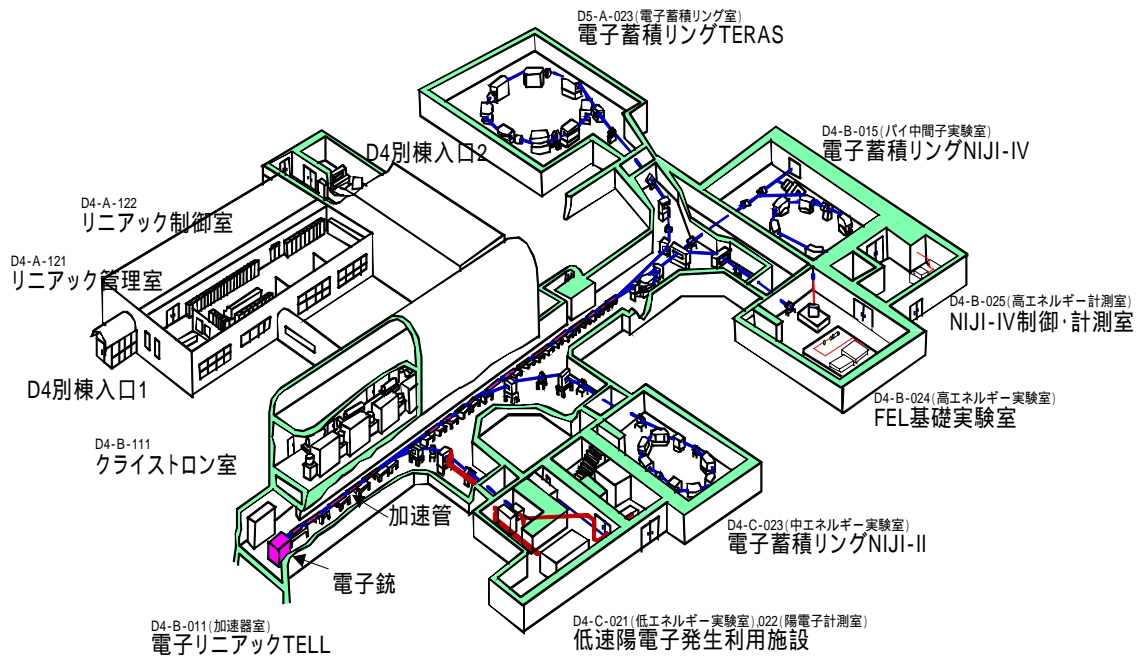


図-1. 産総研電子加速器施設

表-2 TERASビームライン

	分光器	波長範囲 (nm)	分解能 (nm)	備考
1A	2m Grasshopper	1-25	0.03	原子分子 (TOF)
1B	Seya-Namioka	50-300	0.1	原子分子
2A	ラミナー格子	2-8	0.01	蛍光X線微量分析
2B	1mトロイダル格子	10-60	0.03	固体分光
2C	0.3m直入射	110-300	0.05	検出器
3A	1mトロイダル格子	10-60	0.03	標準検出器
3B	1m直入射	30-600	0.03	光源校正
4		30-40		偏光可変アンジュレータ
B1	鉛コリメータ	1-40 MeV	>1%	逆コンプトン散乱

ペレトロン本体室
A - 127 - 1

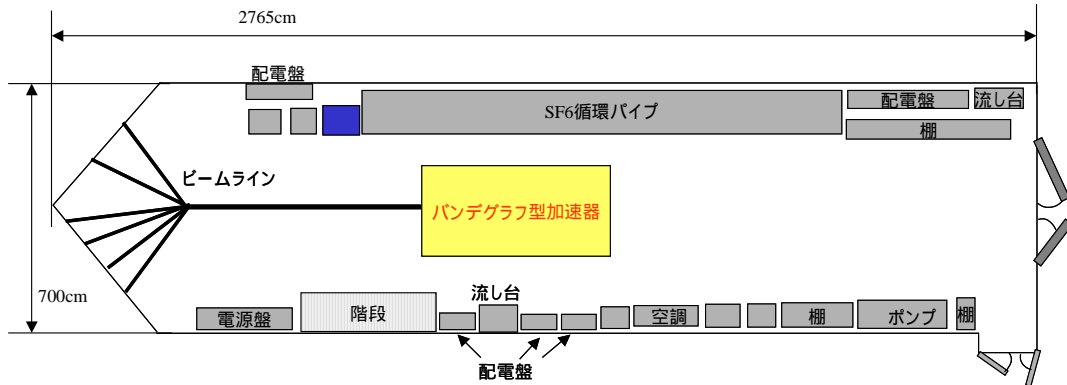


図-2.産総研ペレトロン型加速器施設

2. 利用研究

産総研加速器群を用いて行われている主な利用研究としては、下記のようなものがある。

- エネルギー可変陽電子寿命測定による次世代LSI用low-k膜の空孔評価
- ナノ空孔計測標準物質と普及型ナノ空孔計測装置の開発
- 高分子薄膜の自由体積及び表面近傍の微視的構造評価
- 陽電子消滅励起オージェ電子分光法による固体最表面の研究
- イオンビーム及び陽電子ビームによる半導体中の極微欠陥評価
- 斜め入射ゾーンプレートの作製と放射光X線の集光
- 放射光を用いたDeep X-ray Lithographyとその応用
- 軟X線フルエンス標準確立
- 4周期直交遅延磁場型偏光アンジュレータによる真空紫外円二色性測定
- 超伝導エネルギー分散分光装置(Super-EDX)の開発
- 二次元X線光電変換素子の開発
- レーザー逆コンプトン線による高エネルギー線CT
- UV/VUV FELとPEEMを組合わせた金属触媒表面反応の実時間観測
- 中性子フルエンス標準供給
- 中性子フルエンス標準の高度化に関する研究
- マイクロビーム
- イオンリソグラフ、イオン注入
- RBS、ERD等による表面分析

SPring-8 における加速器に関わる研究開発

JASRI/SPring-8 米原 博人

H. Yonehara (JASRI/SPring-8)

1. SPring-8 概要

SPring-8 は放射光専用施設であり、1-GeV リナック、8-GeV ブースタシンクロトロン及び放射光源である 8-GeV 蓄積リング(100mA)から構成されている。各加速器のパラメータを表 1 に示す。リナックとブースタはリングの外周に設置されている。リング外周に配置された放射光実験装置との干渉を避けるため、ブースタからリングへのビーム輸送設備は、リングを地下で横切って一度周内に入ってから同レベルに立ち上がり、内周からリングにビーム入射を行なう。リナックはニューズバル(NS)にもビームを供給しており、コース選択用偏向電磁石をパターン励磁化し、リングへトップアップ入射する間に、NSへビーム供給する方向で検討が進んでいる。

利用運転が開始されてから、7年が経過しビームライン(BL)は46となり、計画された利用運転時間を順調にこなしている。現在、4週間を運転の1サイクルとし、マシンスタディ;2日(8時間×6シフト)BLスタディ;1日を加速器及び実験装置の研究時間に当てている。これらの時間は、機器等の緊急性を要する手当てを行なう作業に当てられることもある。加速器運転時間は1999年から5,000時間に達しており、現在実施している1サイクル/4週間連続運転と夏期・冬期長期停止期間を定期点検と改善・改良に当てていることを考慮すると、ほぼ限界に達している。この限界を実質的に超えるためトップアップ運転が計画され最近実用運転化に成功しており、後程、紹介する。

SPring-8では1997年に利用者に放射光供給を開始して以来、蓄積リング低エミッタンス化、単バンチビーム運転、リナックのビーム安定化[1]、蓄積リング4箇所30m長直線部[2]、蓄積リング・ビーム振動の抑制[3]、バンチ・バイ・バンチ帰還装置[4]などを実現してきた。SPring-8蓄積リングのラティスは、運転当初から現在に至るまで、目的に応じて組換えを行なってきた。1997年3月から始めた初期ビーム調整及びその後2年間に渡る利用運転時には、Hybrid Opticsと称する、挿入光源設置予定の直線部に水平方向ベータ関数 β_x の大小が交互に並ぶラティス構造が採用され、大きい方の直線部にアンデュレータ、小さい方にウィグラーが計画されていた。また、RF空洞も小さいところに置くことができ、安定な運転を期待した。その後、挿入光源として、ウィグラーの需要よりアンデュレータの方が主力となりアンデュレータに対する知見、RF空洞に対する知見も得られ、低エミッタンス化が進められ、HHLV Opticsが採用された。2000年夏期停止期間に蓄積リング4箇所に、約30mの長直線部を作り出すためのラティス電磁石の配置換えを行なった[2]。1箇所に付き、2セル分(約60m)の四極、六極電磁石の配置換えを行い、各々の長直線部の中央を対称点に電磁石を対にし、励磁電源を独立させた。このラティスをAcromat Opticsと呼んでおり、HHLV Opticsに比べ、 β_y が幾分高くなっているが、 β_x は同程度に抑えられている。4箇所のうち、Bゾーン(LSS-B)に、このラティス変更と同時に約25mのアンデュレータが設置され、現在稼動中である。この変更により、エミッタンスは幾分劣化した。分散関数を幾分漏らす(Low-Emittance Optics)ことにより、エミッタンスの改善を図り、低エミッタンスを実現することができた[5]。しかし、Low-Emittance Opticsでは、ビームを緊急停止する場合に入射部チェンバの薄肉部付近を電子ビームが直撃するという重大な支障が生じることが判明したため、Low-Emittance Optics運転を中断しAcromat Optics

で運転を行なっている。新規入射部チェンバ設計、緊急時ビーム停止対策などを検討中であり、対策が取れ次第、Low-Emittance Optics 運転を再開する予定である。

単バンチビームはブースタで成形され、蓄積リングの任意のバケットに入射する。ブースタによる単バンチビーム成形は、蓄積リング運転当初のビーム調整時に必要性を予測し実施した。当初はビーム不純度が問題ではなく、主バンチビームと近隣のバンチビームとは2桁程度の差があれば良かった。しかし、タイミング設備は加速周波数をベースにしたデジタル回路で構成していたこと、基準信号伝送路を高安定な光通信網で構築していたことなどと相まって、利用実験が開始された直後に、不純度は 10^{-6} 程度に達した。その後、タイミング設備の安定化[6]、RF-KOシステムの改善[7]などを経て、現在、トップアップ運転時に 10^{-9} 以下の不純度を達成している[8]。特に、検出器の出力応答波形の影響が無い前方のバケットの不純度はポッケルセルを2段組み合わせた現光子計測装置の観測限界以下となっている。しかし、トップアップ運転で約1週間に亘り単バンチビームを追加入射した場合、幾分不純度の増大が認められるので、今後長期トップアップ運転に対応するため、さらなる安定化を追求する必要がある。

リナック・ビームは、運転当初の不安定な状態が続いていたが、RFシステムの温調安定化、ECS導入、RF周波数同期化など、ビームの電流値及びエネルギーの安定化が実現されている。

SPring-8では放射光源の安定化だけではなく、偏向電磁石・挿入光源による放射光以外の光源開発も行っており、超伝導ウィグラ(SCW; 10 T)のビーム試験運転(Critical Photon-Energy; 430 keV)、Backward Compton Scattering (BCS)による高エネルギー線(2.4 GeV)の生成も行い(33LEP)、ペンタクォーク生成などの素粒子物理実験も行われている[9]。この他、電子銃の研究開発[10]、BCSによるMeV線生成実験[11]、長直線部におけるGeV線の高エネルギー化・強度増強計画、ブースタビーム照射利用検討も積極的に行なわれている。この中で、SCWから得られる高エネルギー放射光の特徴を利用した天体核物理、原子核物理への応用、磁気コンプトン散乱実験を現在の数倍高い光子エネルギーで実施する計画を検討しており、これについても紹介する。

2. トップアップ運転 [12]

低エミッタンス運転を行なう場合あるいは現状の年間予定で運転時間がほぼ限界に達しつつある現状、利用できる放射光の時間積算量を増加させ、実質的に運転時間延長を狙い、トップアップ運転が1999年頃から計画された。Fig. 1左図は、トップアップ運転開始前の蓄積ビーム電流の減衰、右図はトップアップ運転による蓄積ビーム電流の安定性を示す。左図に示されるように、単バンチビーム運転時に定格蓄積電流値100mA (0.5 mA/バンチ)のビーム寿命時間は33時間であり、70 mA程度まで減衰してから、一日2回追加入射を行っている。右図は1分間隔のトップアップ運転を実施した場合ビーム電流値が0.1 mA程度(0.1%)に安定化されていることを示す。12時間間隔で蓄積電流値が低下しているのは、NS入射のため、トップアップ運転を中断していることを示す。図中の拡大図は蓄積電流値0.1%が達成されていることを示している。ブースタのビーム電流値に換算して、0.1 mA/1single bunchが入射され、5~7分毎に2回連続に入射されている。入射時に放射光利用者から放射光の変化は報告されておらず、ブースタは1 ppsで運転しているので、原理的には電流値をさらに一定化することは可能であるが、ブースタの最大定格電流値計測に各種ビームモニタが整備されている現状では、これ以下の電流値をモニタすることは困難である。

蓄積電流値を定格電流値に一定にすることにより放射光の時間積分量を増加させることができたが、実験装置の光学素子に対する熱負荷が一定になったことにより、熱変形による長時間ドリフトが低減されるという効果も報告されており、トップアップ運転の必要性が増している。

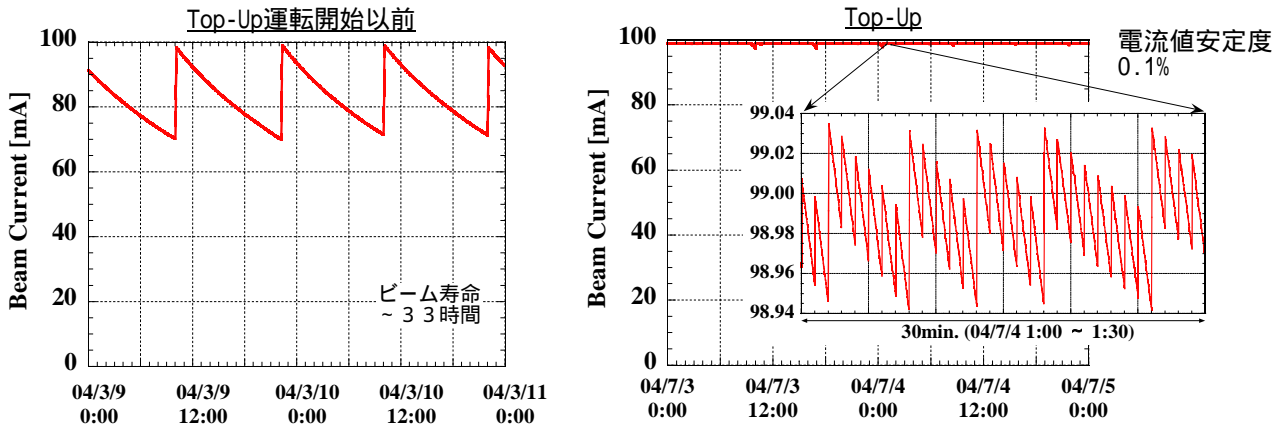


Fig. 1; TopUp Operation. The beam current of the SPring-8 storage ring during 4 days are shown with twice injections per day before the top-up operation-mode (left) and the top-up injection (right). In the scaled-up window of the right figure, the stored-beam current is kept to be a constant value within 0.1 %. A bunch is occupied by 1.5×10^{10} electrons and the beam lifetime of 33 hours mainly depends on the Touschek effect.

トップアップ運転実施で蓄積リングへのビーム入射量は多くなるので、入射に伴うビーム損失を抑制しなくてはならない。このため、ブースタ出射後、ビーム輸送系にスリットを入れ、ビーム分布の裾野をカットしている[13]。スリット両側で切られている電子ビームの OTR 光を観測し、両側スリットの分布からビーム中心を求め、約 2 週間のトップアップ運転でビーム中心の変位を観測すると、ビームの大きさ σ が 0.6 mm であるのに対して、ビーム中心が 0.1 mm 程度変位している。これは長期トップアップ運転に支障を与える可能性があるため、原因追求を始めている。

3. 10 T 超伝導ウイグラ (SCW) 放射光の実用化 [14, 16]

1999 年 Russia の Budker INP で製作され、2000 年に SPring-8 に搬入されていた 10-T SCW を蓄積リングに 2002 年 8 月に設置し、実際に、9 月、11 月にビーム試験を実施した[14]。蓄積リング収納部遮蔽壁の制約、熱負荷による制約などがあり、ビーム電流は 1 mA 以下の低電流であったが、10 T 励磁のまま入射・蓄積できることが確認された。予期されたことではあるが、SCW 放射光利用者以外の利用者との共存を行なう上で、エミッタンスが大きくなることが重要な検討事項になりそうであり、電流設定値に対する磁場再現性に 1~2 % の差異が生じること、また、SCW 放射光の発散角が ± 25 mrad と大きいことから BL に通して使用できるのは 5 % 程度であり、残り 95 % は捨てる。このため、100 mA 蓄積電流時の除熱、放射線防護機能を持つ真空槽を新たに検討しなくてはならないこと、液体ヘリウム消費量が大きい等々の問題が改めて確認された。

8-GeV 電子ビームと 10-T SCW の組み合わせにより得られる放射光スペクトルを Fig.2 に示す。Critical Photon-Energy は 426 keV となり、2 MeV 光子数は 3×10^{11} Photons/s/mrad/keV/100mA, 7 MeV では 1×10^6 Photons/s/mrad/keV/100mA となる。

SCW 励磁量を変えた場合の分布は Fig.3 に示すようにプランク分布と良く似ているため、天体核物理・光核反応実験への応用が期待されている。SCW 光は強度が強だけでなく、偏光特性を持っており、水平面内においては直線偏光しているが、この面から外れると上下で逆の円偏光性を示すため、原子核の励起レベル研究に利用することが出来る (Fig. 4)。

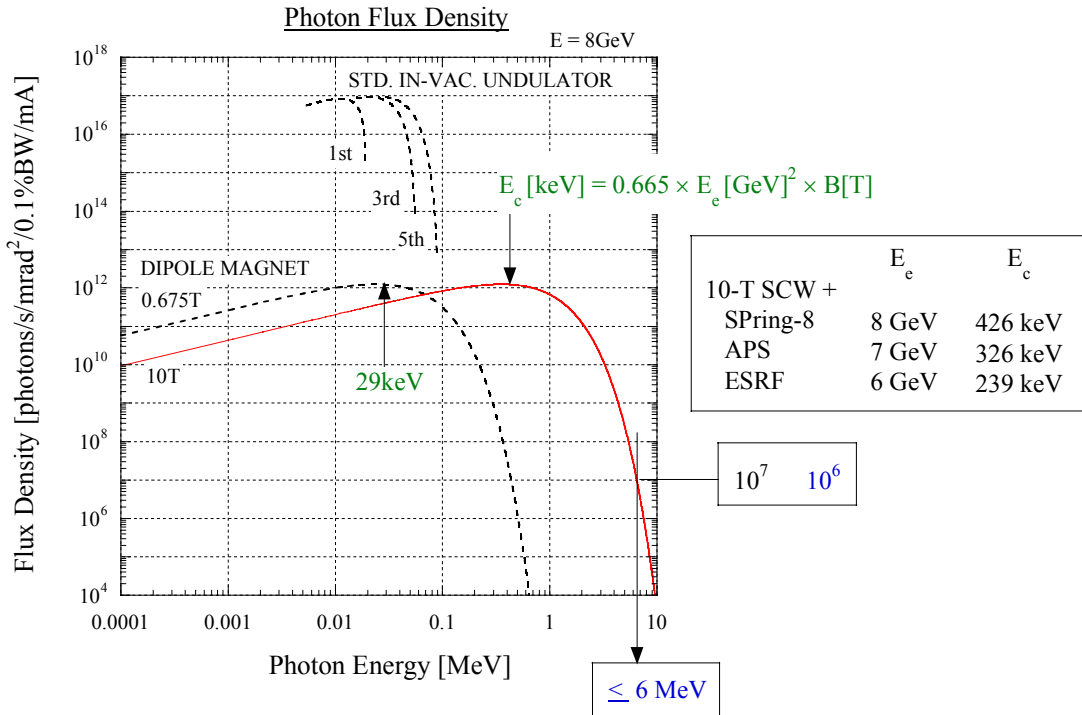


Fig.2; Photon Flux Density of 10-T SCW Synchrotron Radiation. The synchrotron radiations generated by the SPring-8 8-GeV electron beam of 1 mA are shown with broken lines and the solid line shows that of the 10-T SCW.

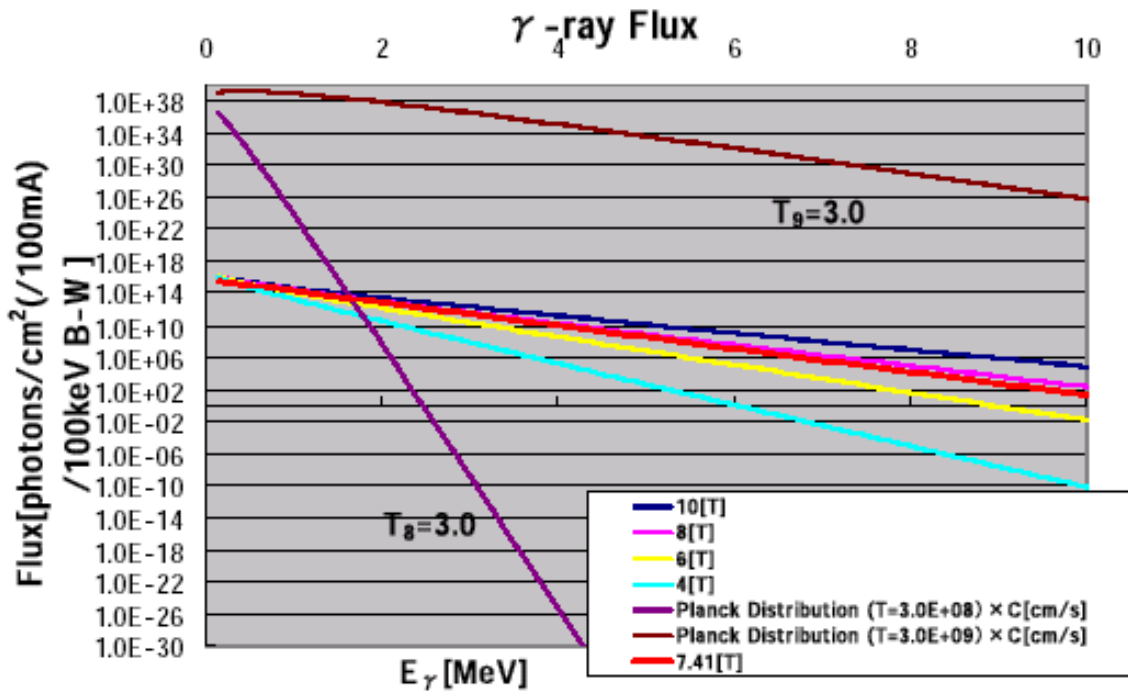


Fig. 3; γ -ray Distribution. The photon fluxes of the synchrotron radiations due to the magnetic field-strengths of 4, 6, 8, 10, and 7.41 T are shown. Also shown are the Plank distributions of $T_9=3$ and $T_8=3$. Photons at around 7.41 T is expected to be used for the γ -dissociation experiment at $T_9=3$.

Polarization of Photons

$$E = 8\text{GeV}, B = 10\text{T}, \omega/\omega_c = 3 \ (1/\gamma = 64\mu\text{rad}, \varepsilon_c = \hbar\omega_c = 0.43\text{MeV})$$

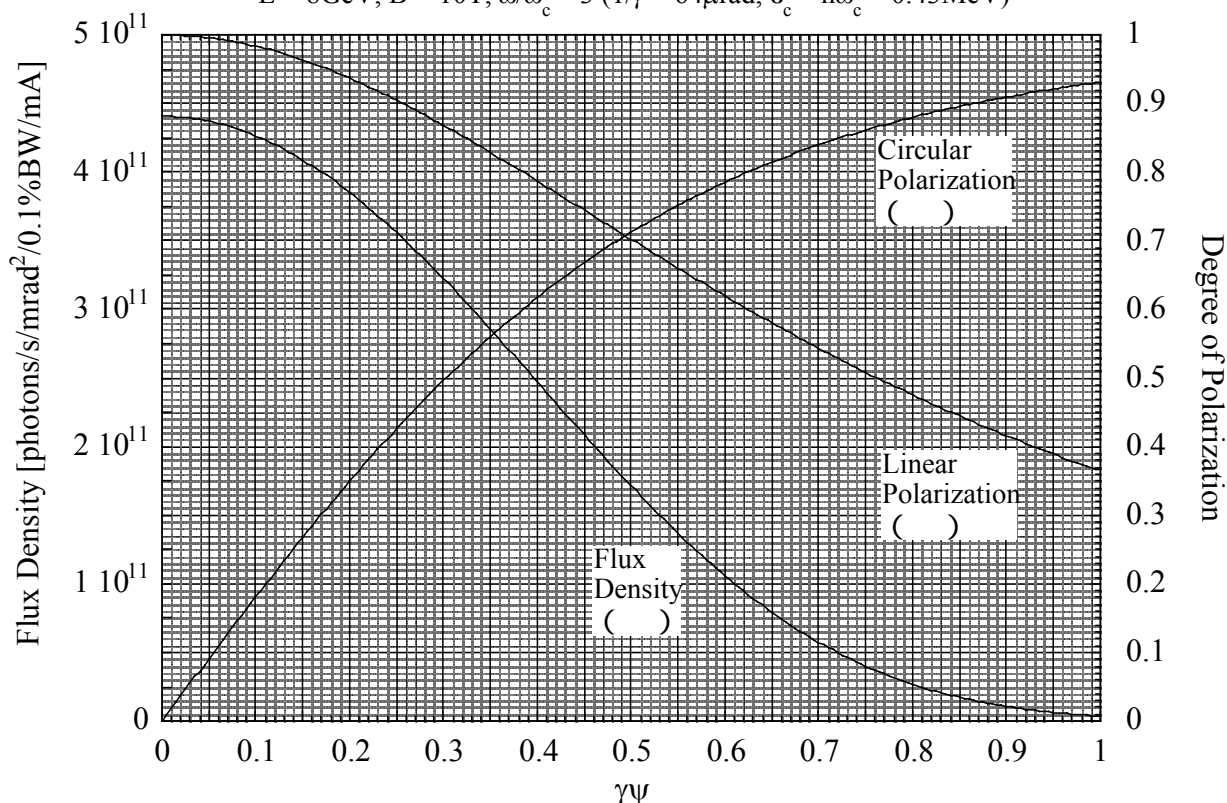


Fig. 4; Polarization of SCW Photon. Circular and linear polarization, and Flux density of 1.3-MeV photons due to the SCW in the SPring-8 are plotted as a function of the angle ψ from the mid-plane.

このような光子エネルギー領域に適当な光源が少ないこと、特徴的なスペクトルあるいは偏光特性を持つことなどから、既存の放射光利用実験者と共存した SCW 放射光の本格利用を目指すことは価値があると思われる。当面は、特異なスペクトル分布を利用した天体核物理・光核反応実験、偏光特性に着目した原子核構造研究、従来の放射光より高いエネルギー成分を用いた磁気コンプトン散乱実験など、光子をそのまま使用する方向で、利用実現に向けた検討を進める[16]。当然、このような高エネルギー放射光により陽電子、中性子の生成が期待でき、陽電子は $10^{12}/\text{s}$ (Fig.5) 同様に中性子は $10^{12}/\text{s}$ (Fig. 6) と評価できる[15]。

このような従来の放射光分野に留まらない分野へ利用の幅を広げることは、SPring-8 の持つ潜在的能力を引き出すことであり、また、従来に無い光源を提供することは新しい研究分野を開くことである。本報告では触れなかったが、このような新たな光源を開発している延長上に、High-Flux Ring 計画があるものと確信している[17]。

陽電子生成条件

【SCW : 10T, Window: Al 3mm,
SR Aperture : +1.69mrad, -0.69mrad】

ソレノイド

【磁場 : 0.1T, 直径 : 100mm】

陽電子数

【輸送前 : 1.6×10^{10} [e⁺/s/mA],
輸送後 : 6.1×10^9 [e⁺/s/mA】

効率 : 38%

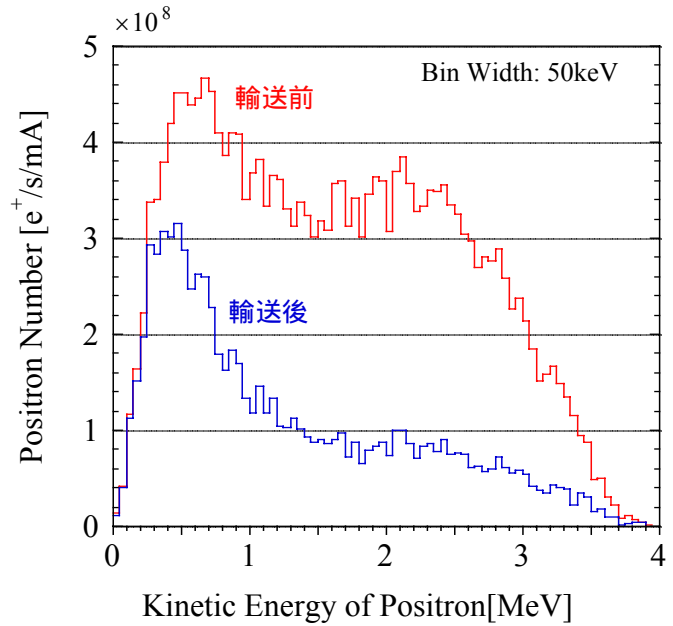


Fig. 5; Estimated positron number produced with the 10-T SCW synchrotron radiation in the SPring-8. Produced positrons on Al target of 3 mm thick (red line) are transported to the experimental area with a solenoid magnet (blue line). The efficiency before and after transportation is evaluated as 38 %.

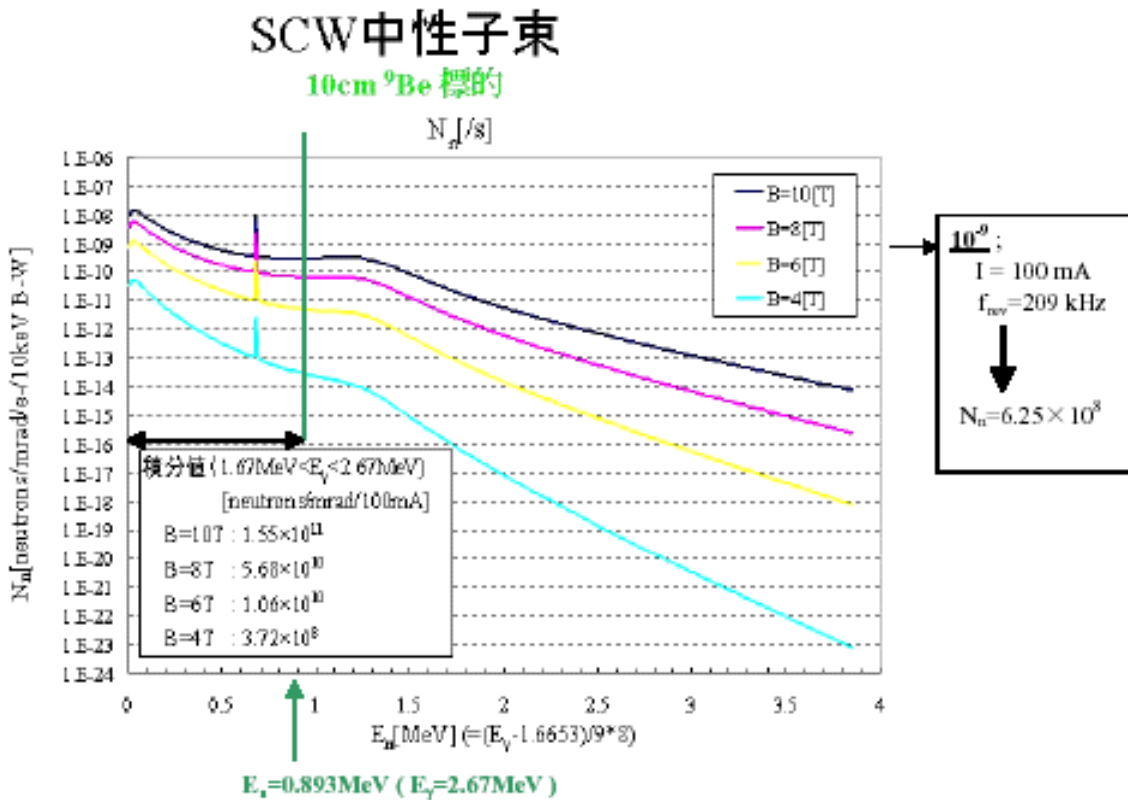


Fig. 6; Expected neutron numbers produced by ⁹Be(γ, n) reaction are shown for the synchrotron radiations of 10-, 8-, 6- and 4-T magnetic fields.

本報告に使った資料の多くは、当加速器部門の人達から提供された。ここに感謝の意を表したい。

References;

- [1] T.Asaka et al; Nucl. Instr. Meth. **A516** 249-269 (2004).
- [2] H.Tanaka et al; Nucl. Instr. Meth. **A486** 521-538 (2002).
- [3] S.Matsui et al; Jpn. J. Appl. Phys. **42** L338-L341 (2003).
- [4] T.Nakanura et al ; “TRANSVERSE BUNCH-BY-BUNCH FEEDBACK SYSTEM FOR THE SPRING-8 STORAGE RING”, EPAC2004, Lucerne, July 5-9, 2004.
- [5] M.Takao et al; “Progress toward Brightness Improvements at the SPring-8 Storage Ring”, APAC2004, Gyeongju, Korea, Mar. 22-26, 2004.
- [6] N.Hosoda et al; “RECONFIGURABLE TIMING CONTROLLER USING PLDS”, ICALEPCS2003, Gyeongju, Korea, Oct.13-17, 2003.
- [7] T.Aoki et al; PAC’03, Portland, May 2003, p.2551.
- [8] K.Tamura and T.Aoki, “SINGLE BUNCH PURITY DURING SPRING-8 STORAGE RING TOP-UP OPERATION”, 第1回日本加速器学会年会・第29回リニアック技術研究会, 船橋, August 4-5, 2004.
- [9] T.Nakano et. al., Phy. Rev. Lett. **91** 012002 (2003).
- [10] H.Dewa et al; “PHOTOCATHODE RF GUN DESIGNED AS A SINGLE CELL CAVITY”, EPAC2004, Lucerne, July 5-9, 2004.
- [11] H.Ohkuma et al; “Production of 10 MeV γ -ray by the Backward Compton Scattering Using an Optically-Pumped FIR Laser at SPring-8”, IRMMW2004, Karlsruhe, Sep.27-Oct. 1, 2004.
- [12] H.Tanaka et al; “TOP-UP OPERATION AT SPRING-8 – TOWARDS MAXIMIZING THE POTENTIAL OF A 3RD GENERATION LIGHT SOURCE”, EPAC2004, Lucerne, July 5-9, 2004.
- [13] K.Fukami et al; “BEAM COLLIMATION SYSTEM FOR THE SPRING-8 TOP-UP OPERATION”, APAC2004, Gyeongju, Korea, Mar. 22-26, 2004.
- [14] K.Soutome et al; PAC’03, Portland, May 2003, p.250..
- [15] D.A.Gryaznykh et al; Nucl. Instr. Meth. **A448** 106-108 (2000).
- [16] H.Yonehara et al; SPring-8 Internal Report B2004-001 (in Japanese).
- [17] H.Yonehara et. al; SPring-8 Internal Report 2003-001(in Japanese).

<u>SPring-8 linac</u>		Repetition time	1 sec
Beam parameter		Natural emittance (8 GeV)	230 nm•rad
Pulse width	40 nsec 1 nsec	Momentum spread (8 GeV)	1.26×10^{-3}
Peak current	140 mA 2 A	Number of cells / periodicity	40 / 2
Beam energy (maximum)	1.2 GeV	Nominal tune (ν_x/ν_y)	11.71/8.81
Energy spread	$\pm 0.9\%$ $\pm 0.3\%$	Natural chromaticity (ξ_x/ξ_y)	-14.4/-11.5
Emittance x (90%)	65π nm•rad 31π nm•rad	Radio frequency	508.58 MHz
Emittance y (90%)	43π nm•rad 58π nm•rad	Harmonic number	672
Pre-buncher		Radiation loss (8 GeV)	12.27 MeV/turn
Type	Standing wave		
Operation frequency	2,856 MHz	<u>SPring-8 Storage Ring</u>	
Shunt impedance	24 M Ω /m	<u>HHLV Optics</u>	<u>Low-Emittance</u>
Unloaded Q	6,400	<u>Optics</u>	
Input power (usual operation)	7 kW	Energy [GeV]	8 8
Buncher		Circumference[m]	1,436 1,436
Type	Standing wave	Harmonic number	2,436 2,436
Operation frequency	2,856 MHz	Tunes(ν_x/ν_y)	40.15/18.35 40.15/18.35
Number of cells	13	Current[mA]:	
Shunt impedance	103 M Ω /m	single bunch	13 10
Unloaded Q	13,400	multi bunch	100(120) 100
Input power (usual operation)	3 MW	Bunch Length	32 34
Accelerating structure		(FWHM)[psec]	
Type	Travelling wave	Emittance[nm•rad]:	
Electric field distribution	Constant gradient	Horizontal	6.3/6.6 3.1
Total number	25	Vertical	16.9×10^{-3} $8.7/3.9 \times 10^{-3}$
Operation frequency	2,856 MHz	Coupling[%]	0.26 0.28/0.13
Phase shift/cell	$2\pi / 3$	Chromaticity (ξ_x/ξ_y) (Operation);	
Number of cells	81		+7/+6 (+2/+2) +8/+8
Shunt impedance	54 M Ω /m	Lifetime[hr]:	
Unloaded Q	13,500	100mA(multi)	~ 150 ~ 97
Effective length	2.88 m	1mA(single)	~ 24 ~ 9
Filling time	610 ns	Dispersion distortion[mm]	
Input power (usual operation)	35 MW	Horizontal(rms)	4 9.3
		Vertical(rms)	1.1 1.1
<u>SPring-8 Booster Synchrotron</u>		Orbit stability(tune harmonics)[μ m]:	
Injection energy	1 GeV	Horizontal(rms)	0.7 1.3
Maximum energy	8 GeV	Vertical(rms)	0.35 0.35
Circumference	396.124 m		

Table 1; Parameters of SPring-8 Accelerators

分子科学研究所における加速器に関わる研究

分子研 加藤政博

M. Katoh (Institute for Molecular Science, National Institutes of Natural Sciences)

1. はじめに

2004年4月より、国立天文台、核融合科学研究所、岡崎国立共同研究機構（分子科学研究所、基礎生物学研究所、生理学研究所）は大学共同利用機関法人自然科学研究機構に統合された。自然科学研究機構における加速器に関わる唯一の研究活動は分子科学研究所の極端紫外光研究施設（UVSOR）で行われている。

UVSORは750MeVの電子蓄積リングを中核とする全国共同利用の放射光源である[1]。1983年にビーム蓄積に成功して以来およそ20年にわたって我が国における主要な放射光源のひとつとして順調に稼動を続けてきた。極端紫外光に重点を置き、また、分子科学研究に専用化している放射光施設というのは世界的に見てもユニークなものである。

周長53m、ビームエネルギー750MeVという比較的小型の放射光リングであるが、15MeVラインナック、600MeVシンクロトロンで構成される専用の入射器を有する。20本の放射光ビームラインが稼動しており、その約半数は共同利用に供されている。ビームラインの多くでは光子エネルギーにして数eVから数100eVの紫外から軟X線領域の光を利用している。また、遠赤外線・ミリ波領域の放射光利用を世界に先駆けて開始したことはよく知られており、現在も活発に利用されている。

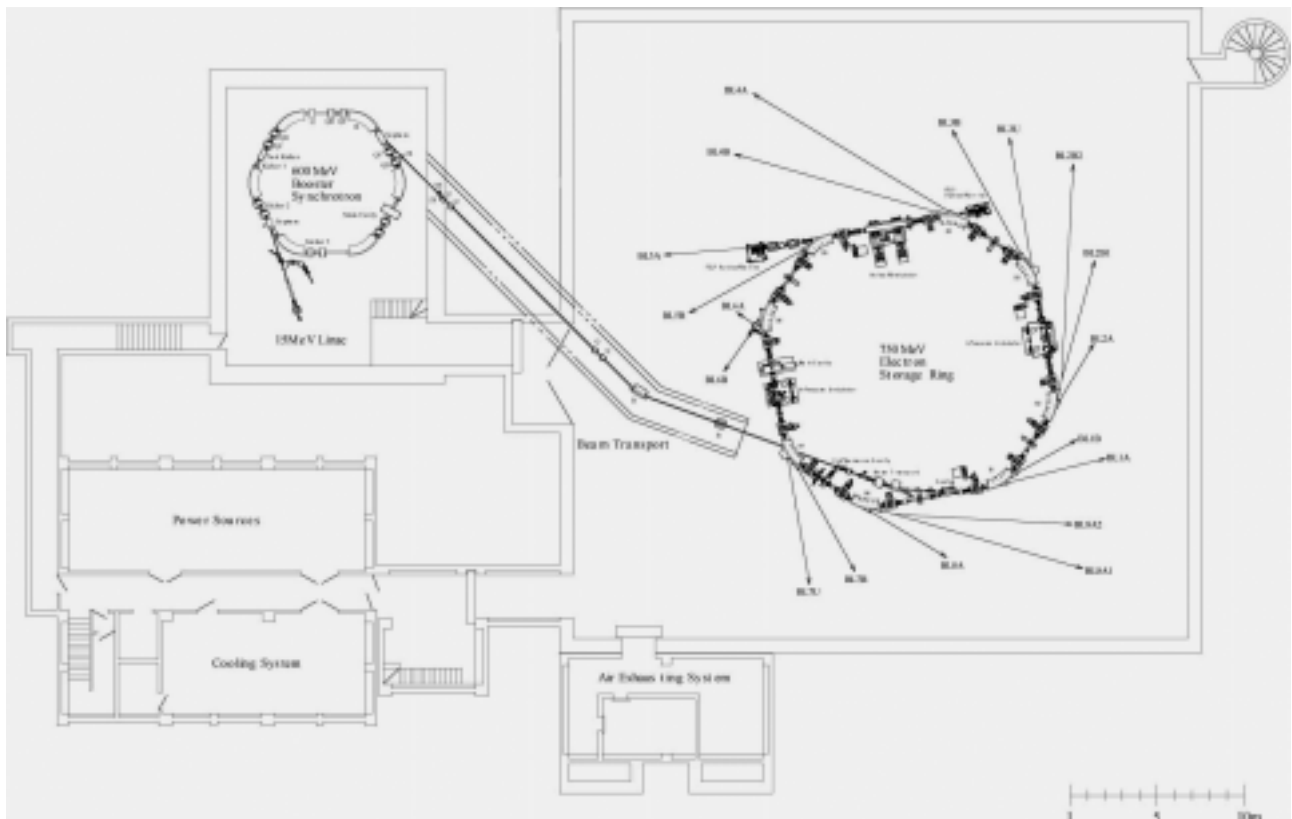


Fig 1 . UVSOR-II Accelerator Complex

Table 1. Main Parameters of UVSOR-II

Electron Beam Energy	750 MeV
Circumference	53.2 m
Straight Sections	4m x 4, 1.5m x 4
Emittance (non-achromat)	27 nm-rad
Emittance (achromat)	60 nm-rad
Energy Spread	4.2×10^{-4}
Betatron Tunes	(3.75, 3.20)
Natural Chromaticity	(-8.1, -7.3)
XY Coupling (presumed)	10%
RF accelerating voltage	55 kV
RF Frequency	90.1 MHz



Fig. 2 UVSOR-II Storage Ring and SR Beam-lines



Fig. 3 UVSOR-II Electron Storage Ring

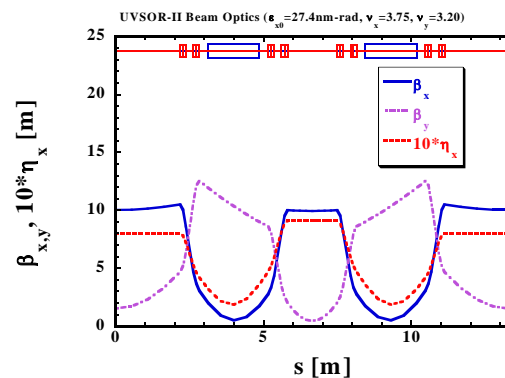


Fig. 4 Beam Optics of UVSOR-II

2. UVSOR高度化

建設後20年近くが経過し、UVSORの放射光源としての競争力の低下、加速器及びビームライン各部の老朽化の進行は著しく、早急な対応が求められていた。我々は2000年度からUVSOR高度化計画を立案し、提案してきたが[2, 3]、さいわい2002年度に予算化された。高度化計画は、(1)挿入光源設置可能な直線部の増設、(2)低エミッタンス化による放射光高輝度化、(3)既設挿入光源およびビームラインの更新による高性能化、(4)加速器各部の更新による高性能化、信頼性向上、を実現することで、UVSORを最新の第3世代光源と競争可能な放射光源に転換し、この先10年以上、最先端の放射光利用実験が行える施設として、現在の地位を維持・強化していこうとするものであった。加速器及びビームラインの改造は2003年4月から6月にかけての3ヶ月という短い期間で行った。また7月から立ち上げ調整を開始し8月末までの2ヶ月間で調整運転を完了、9月初めよりユーザー運転を再開した[4]。

高度化後のUVSORはUVSOR-IIと命名された。UVSOR-IIでは従来3箇所であった挿入型光源用スペースが6箇所と倍増されており、そのうち3箇所には既にアンジュレータが設置されている。このうち2台は、高度化の一環として導入された真空封止型アンジュレータであり、従来のUVSORでは困難であった100eVを超えるエネルギー領域で高輝度準単色光を発生できる[5]。残り1台は可変偏光アンジュレータであり、自由電子レーザー発振にも使用されている。これら3台のアンジュレータ用ビームラインも高度化の一環として更新され、高性能化された[6, 7, 8]。また赤外ビームラインも更新され[9]、最近、遠赤外・ミリ波領域の放射光ビームラインとしては世界最高の強度が得られていることが確認された。

3. UVSOR-II運転の現状

2004年7月現在、エミッタンスは高度化前の約1/3の60nm-radで運転されている。マシンスタディ段階では27nm-radでの運転条件も確立できているが、Touschek効果のために寿命が短く、ユーザー運転への導入は2005年春に予定されている高周波加速系の増強の後となる予定である。ビーム電流値は、マシンスタディ段階では放射線申請の上限である500mAに達しているが、ユーザー

運転ではビーム寿命などを考慮して350mAにとどめている。

UVSOR-IIは年間40週以上運転され、年平均900名ほどの利用者を受け入れている。半年毎に利用申し込みを受け付け、審査し、ビームタイムを配分している。1年間の運転スケジュールは、春に加速器やビームライン改造作業のため1ないし2ヶ月、9月末に保守作業のために1週間、年末年始に2週間、停止する以外は運転するというのが通例である。1週間のうち、月曜日は加速器の調整および開発研究に割り当てられており、火曜日から金曜日までがユーザー運転である。朝9時から夜9時までの一日12時間運転され、ビーム入射は朝9時と午後3時の2回である。1回の入射は約15分で終了する。

UVSOR-IIは1GeV以下の放射光リングとしては世界的にも最高レベルの低エミッタンスが実現できており、また、比較的小型でありながら最大6台までの挿入光源が設置可能である。アンジュレータ利用を中心とする高輝度光源としての地位の早期の確立、大学等の保有する同程度のビームエネルギーの光源との差別化のために、現在空いている3箇所直線部へのアンジュレータの導入とビームラインの建設をできるだけ早く実現したいと考えている。UVSOR-IIの性能面での改善すべき当面の問題はTouschek効果によるビーム寿命の短縮であるが、対応の第一段階として、先に述べたように、高周波加速系の増強を予定しており、また、将来的にはトップアップ運転の可能性も検討していく予定である。このように低エネルギー放射光リングとして世界最高水準の性能を維持しつつ、10年後を睨んで、次期計画の検討も進めていきたいと考えている。

4. 光源開発研究の現状と展望

本施設で行われている加速器・光源開発研究は、放射光源としてのビーム性能の向上に向けた研究開発と新しいタイプの光源の開発、の2つに大別できる。現在取り組んでいるものとしては、前者の例では、軌道安定化[10]、イオン捕獲現象[11]など、後者の例では自由電子レーザー[12, 13]、遠赤外コヒーレント放射光[14]などがあげられる。自由電子レーザー研究では、UVSOR-IIの低エミッタンスビームを用いることでより短波長域での発振が視野に入ってきた。現在は波長200・300nmの領域での安定な発振を実現し、利用に供することを目指して研究を進めている。コヒーレント放射光の研究は、電子バンチの内部に1ミリメートル前後の密度変調を形成することで遠赤外・ミリ波領域での大強度放射光を生成しようとするものである。既にシングルバンチ100mAを超える大電流域でコヒーレント放射光と思われる大強度放射の発生が確認されており、現在、精力的に研究を進めているところである。

参考文献

- [1] <http://www.uvsor.ims.ac.jp/>
- [2] 加藤政博、放射光, Vol.14, No.3 (2001), 27-33
- [3] M. Katoh, K. Hayashi, T. Honda, Y. Hori, M. Hosaka, T. Kinoshita, S. Kouda, Y. Takashima, and J. Yamazaki, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 467-468 (2001), 68-71
- [4] 加藤政博、放射光, Vol.17, No.1 (2004), 10-16
- [5] A. Mochihashi, M. Katoh, M. Hosaka, K. Hayashi, J. Yamazaki, Y. Takashima, Y. Hori, H. Kitamura, T. Hara, T. Tanaka, AIP Conference Proceedings 705(2003), 259-262
- [6] Y. Nonogaki, M. Katoh, E. Shigemasa, K. Matsushita, M. Suzui, T. Urisu, AIP Conference Proceedings 705(2003), 368-371
- [7] T. Hatsui, E. Shigemasa, N. Kosugi, AIP Conference Proceedings 705(2003), 921-924
- [8] S. Kimura, K. Takahashi, T. Ito, K. Soda, T. Takeuchi, K. Shinba, T. Kondo, T. Nakagawa, N. Kosugi, UVSOR-30, UVSOR Activity Report 2002 (2003), 75-76
- [9] S. Kimura, E. Nakamura, J. Yamazaki, M. Katoh, T. Nishi, H. Okamura, M. Matsunami, L. Chen, T. Nanba, AIP Conference Proceedings 705(2003), 416-419
- [10] K. Hayashi, M. Katoh, M. Hosaka, A. Mochihashi, J. Yamazaki, UVSOR-30, UVSOR Activity Report 2002 (2003), 50-51
- [11] A. Mochihashi, K. Hayashi, M. Hosaka, M. Katoh, J. Yamazaki, Y. Takashima, UVSOR-30, UVSOR Activity Report 2002 (2003), 58-61
- [12] M. Hosaka, S. Koda, M. Katoh, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Takashima, T. Gejo, H. Hama, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A, 483 (2002), 146-151
- [13] M. Hosaka, M. Katoh, A. Mochihashi, J. Yamazaki, K. Hayashi, Y. Takashima, H. Hama, UVSOR-30, UVSOR Activity Report 2002 (2003), 54-55
- [14] Y. Takashima, M. Katoh, M. Hosaka, A. Mochihashi, UVSOR-30, UVSOR Activity Report 2002 (2003), 56-57

東京大学における原子力大学院改革と加速器研究・共同利用

東大院工原施 上坂 充

M.Uesaka (Nuclear Engineering Research Lab., The Univ. of Tokyo)

1. 学内原子力研究機関を再編

原子力発電の成熟期にあるわが国において、ほとんどの大学において原子力と冠する学科・専攻はなくなり、システム工学、量子工学、エネルギー工学へと分野を広げていった。反面核たる原子力の教育は薄まっていかざるを得なかった。

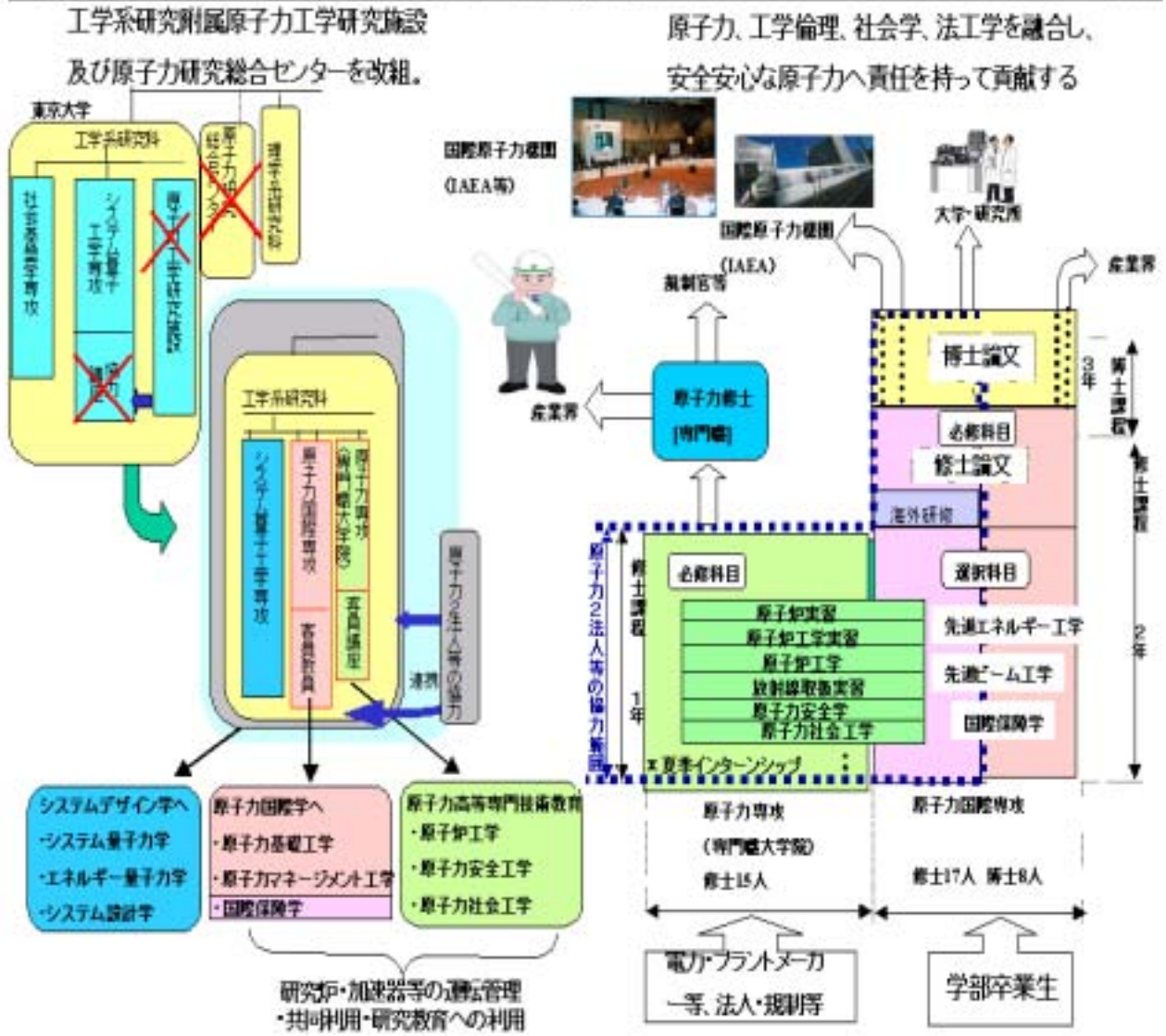
しかしながら50基以上の発電炉の稼働と放射線応用の広がりの中で、より高い専門実務知識を持った技術者の育成のニーズが高まりつつある。そのような情勢の中で、東京大学は平成17年度に原子力を冠する2つの機関を改組し、日本原子力研究所、核燃料サイクル開発機構と共同で、原子力の専門職大学院を設置することとした。東海村にある原子力工学研究施設を母体として専門職大学院である原子力専攻（専門職大学院）を、浅野キャンパスにある原子力研究総合センターを母体として原子力国際専攻を設置し、一体運営する（図1参照）。

わが国初の工学系の専門職大学院の誕生となる。法科大学院の形態を参考にし、前・後者はそれぞれ専門職・一般大学院であり、専門職大学院教官は全員原子力国際専攻を兼担し、教育と研究が両立できるようにする。

原子力専攻（専門職大学院）では東海村にて日本原子力研究所、核燃料サイクル開発機構と協力し、修士論文なしの講義・実習のみの1年の原子力専門技術者コースで原子力修士（専門職）を授与させる。

原子力国際専攻では、原子力イノベーションコースと国際エンジニアコースを設け、博士課程も当然設ける。前者では高度な原子力・放射線・加速器・社会工学の研究教育を実施する。さらに後者は将来のIAEAの幹部職員を育成するべく、国際保障学の教育研究コースである。両者はネットワーク講義システムによって遠隔連結される。教育研究は産官学連携のもとに実行するべく、日本原子力研究所、核燃料サイクル開発機構、他研究所、官庁、民間企業から多数の客員教員と非常勤講師を得る。このように東京大学に少数精鋭高度原子力教育研究 Complex が誕生する。

図1. 東京大学・工学系研究科「原子力専攻(専門職大学院)」及び「原子力国際専攻」の新設



2. 原子炉・加速器等の共同利用

これら2専攻は、研究炉弥生、電子ライナック・レーザー、タンデム加速器、重照射加速器、RAPIDなどのイオン加速器など大型原子力設備を有し、その共同利用も継続実施する。基本的に、従来原子力研究総合センターと原子力工学研究施設が行ってきたものをそのまま引き継ぐ。現状の各共同利用運営委員会を更新しながら継続し、利用者グループの要望と自主性を尊重して運営を行う。学内措置として、弥生とライナック・レーザーが全国共同利用に供しているが、他は学内共同利用である。平成17年度から学内措置として、それら全国共同利用運用する新制度を作り、民間企業を含めた学外ユーザーにも正式に開放する。体制案を図2に示す。

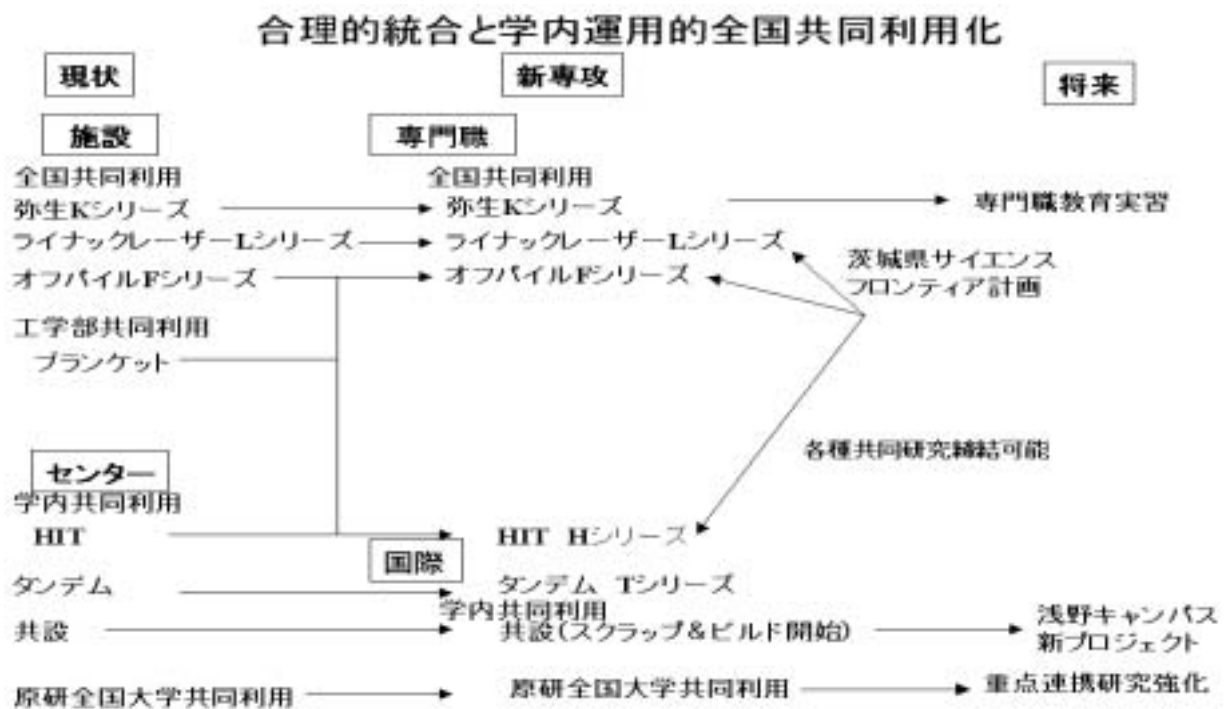


図2、共同利用の考え方

3. 化学放射線治療科学展開

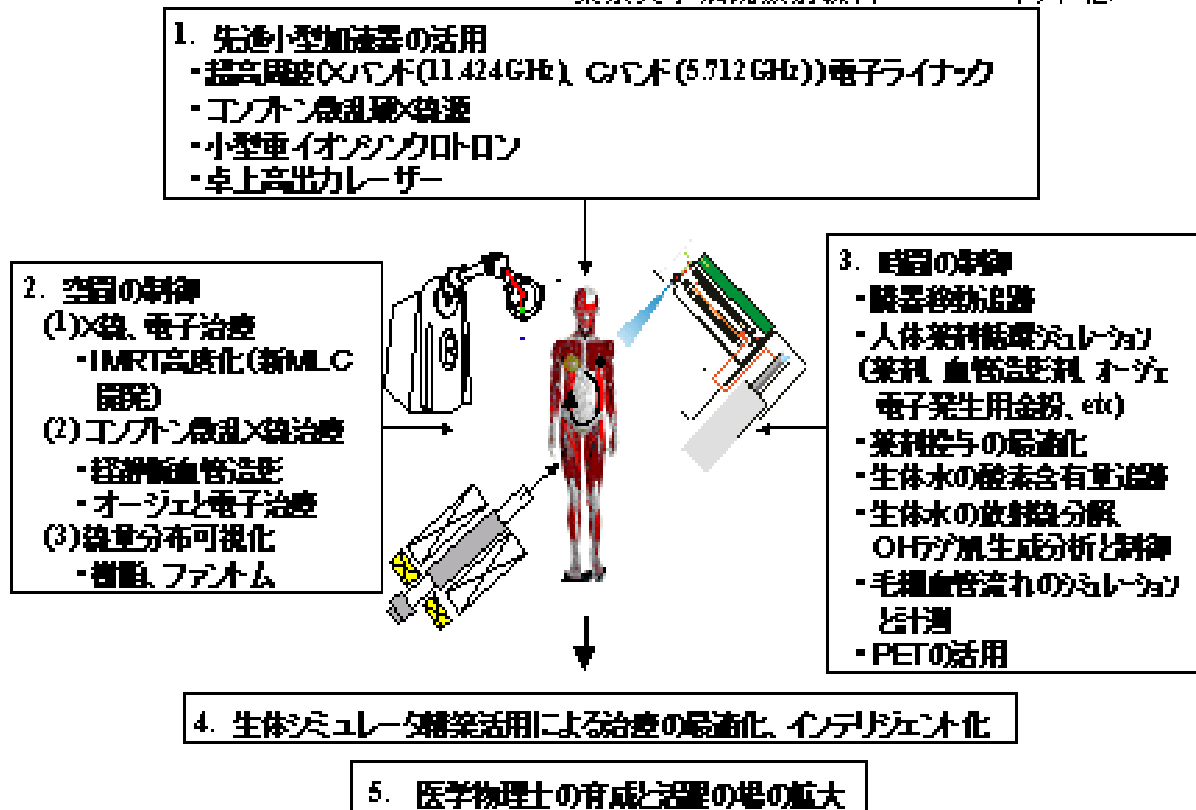
東大では医工連携放射線医療グループ（中沢 江里口中性子捕捉治療、上坂 中川 X線診断治療）を形成し、研究協力を行っている。活動に一環として化学放射線治療科学研究会を発足運営している（第1回平成15年12月16, 17日、第2回平成16年7月24, 25日、於東大病院講堂、市民講座8月5日東京ビッグサイト）。また放医研先進小型加速器開発プロジェクトに参画し、Xバンドライナック型単色エネルギー可変硬X線源とレーザープラズマビーム源を開発している。現在第1期（平成13・17年度）要素技術開発ステージの4年目で、第2期システムインテグレーションステージを立案中である。また茨城県サイエンスフロンティア計画の中で医療用小型加速器開発委員会が採用発足活動している。これは単色エネルギー可変硬X線源の利用と、それを基軸にした地域振興計画を模索する。これらの活動を包括するのが、図3の化学放射線治療科学研究会と位置付けている。原子力国際専攻では、客員教員や非常勤講師の協力を得ながら、医学物理成教育も行い、過剰照射問題解決など安全面を掌れる欧米型学位付き医学物理士の育成も行っていく。

上記研究指向以外にもレーザーフォトカソードRFガンを活用した放射線化学研究、環境調和型高機能材料開発、脳磁場計測触覚センサー開発などの研究プロジェクトも、科研費や県地域振興費から取得し活発に行っている。このように法人化後の加

速器研究は、外部資金の大幅導入が不可欠である。それを効率的に推進運用できる体制を構築していきたい。

図3、化学放射線治療の時空制御

東京大学 原子力工学研究施設 上坂 充
 東京大学 病院放射線科 中川 恵一



東京大学原子力研究総合センターにおける加速器に関わる研究開発

東大原総センター 松崎浩之、岩井岳夫

H. Matuzaki and T. Iwai (RCNST, The Univ. of Tokyo)

1. はじめに

東京大学原子力研究総合センターでは、以下に掲げる 4 台の静電加速器を維持・管理・運用している。

3.75MV バン・デ・グラーフ加速器 (HVE KN-3750)

1.0MV タンデトロン加速器 (GIC)

1.7MV タンデトロン加速器 (HVE4117-HC)

5.0MV ペレトロン式タンデム加速器 (NEC Pelletron 5UD)

と は、茨城県東海村の東京大学原子力工学研究施設内に設置され、東京大学原子力研究総合センター重照射研究設備 (HIT = High Fluence Irradiation Facility, The University of Tokyo) として維持・管理され、昭和 60 年より学内共同利用に供されている。軽・重イオンによる大電流のイオン照射が行なえる特色がある。 は平成 5 年東京大学浅野キャンパスに設置され、東京大学原子力研究総合センター共用設備管理部門により維持・管理され、平成 7 年度より学内共同利用に供されている。RBS、PIXE といった分析と、イオン・インプランテーション実験のために設計されており、RAPID (Rutherford Backscattering Spectroscopic Analyzer with Particle Induced X-ray Emission and Ion Implantation Devices) の愛称を持つ。 は同じく平成 3 年東京大学浅野キャンパスに設置され、設置にともない東京大学原子力研究総合センター内に新設されたタンデム加速器研究部門 (MALT = Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo) により維持・管理され、平成 7 年より学内共同利用に供されている。こちら、AMS、PIXE、NRA 等、イオンビームを用いた分析をメインとしている。

これらの概要については、別表にまとめた通りである。

2. 加速器の現状

2.1. HIT バン・デ・グラーフ加速器

HIT バン・デ・グラーフ加速器では、RF イオン源または PIG イオン源により、 H^+ 、 He^+ 、 C^+ 、 O^+ 、 D^+ 、 N^+ やこれらの分子イオンを加速し、

- 1) 原子力材料研究 (核融合炉のブランケット増殖材や構造材料の照射効果研究)
- 2) 機能性材料研究 (輝尽性発光材料やシンチレータの照射効果研究)

3) 放射線計測技術開発 (d-d 反応を利用した中性子検出器開発やプロトン検出器の開発)

4) 地球科学研究 (鉱物の放射線損傷に関する研究)

に利用されている。また、微粒子加速用イオン源に交換すれば、1 ミクロン程度の導電性微粒子を超高速に加速することができる。微粒子加速用加速器としては世界最高電圧を誇り、

5) 微粒子加速実験 (探査衛星搭載用宇宙塵検出器開発や宇宙用コーティング材の微粒子衝突実験) に利用されている。

2.2. HIT タンデトロン

現在では、4MeV の Ni^{3+} イオン、3MeV の Cu^{2+} や Zr^{2+} 、2.8MeV の Fe^{2+} 、1MeV の H^+ イオンがよく利用されているが、研究分野としては、まず、

1) 原子力材料研究 (核融合炉材料照射実験、軽水炉の炉内構造物、压力容器鋼材、燃料被覆管など各コンポーネントの照射効果研究

への利用が半分以上をしめる。なお、HIT の大きな特徴として、バン・デ・グラーフ加速器によるイオンビームとタンデトロンによるイオンビームの二重照射機能があり、これを生かした研究も行なわれている。ついで、

2) 機能性材料研究 (固体内での超微粒子生成の基礎研究や高分子材料の照射効果研究)

が行なわれている。さらに、

3) マイクロビームコースの開発・研究

も行なわれている。

2.3.1.7MV タンデトロン加速器 (RAPID)

RAPID (Rutherford Backscattering Spectroscopic Analyzer with Particle Induced X-ray Emission and Ion Implantation Devices) の愛称通り、RBS 分析装置、PIXE 分析装置、イオンインプラネーション装置をそれぞれ備える3本の分析ビームコースを備える。最近では、イオンインプラネーションの利用による、材料改質の研究が増えているが、環境中の微量分析のための PIXE 分析技術の高度化に関する開発研究もスタッフを中心として行なわれている。

2.4.5.0MV ペレトロン式タンデム加速器

タンデム加速器研究部門 (MALT=Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator, The University of Tokyo) で維持・管理・運用している 5.0MV ペレトロン式タンデム加速器は、イオンビームを用いた各種微量分析 (元素・同位体) を行う学内共同利用研究施設として計画され、1991 年 (平成 3 年) ~ 1993 年 (平成 5 年) にかけて建設された。加速器は、米国 NEC 社製のペレトロン 5UD という形式のタンデム型で、ペレットチェーンと呼ばれるチェーンによって、チャージを持ち上げる (最大加速電圧は 5MV)。この加速器を中心に、40 サンプル同時装填可能な Cs スパッター型固体イオン源を 2 台、異なる質量のイオンを交互に加速器に入射可能とするシーケンシャルインジェクションシステム、マル

チ・ファラデーカップシステム等を備えており、加速器質量分析 (AMS=Accelerator Mass Spectrometry) を強く意識した設計となっている。実際、MALT のマシンタイムの 7 割近くを AMS 利用がしめている。MALT における AMS 利用は、 ^{14}C だけでなく、 ^{10}Be 、 ^{26}Al 、 ^{36}Cl 、 ^{129}I など複数核種にわたっているのが特徴である。また、それぞれの核種に応じた検出器や、サンプル前処理の化学等の開発も行っている。AMS を利用する共同利用研究課題が毎年 40 件近く申請・採択されていて、そのおおまかなカテゴリーは、

- 1) ^{14}C -AMS の考古学への応用、
 - 2) ^{14}C -AMS を用いた地球環境科学、
 - 3) Meteoric (大気中で生成する) ^{10}Be の応用、
 - 4) in situ (地表の岩石に宇宙線が直接生成する) 核種の AMS (^{10}Be -AMS、 ^{26}Al -AMS) による地形形成プロセスに関する研究、
 - 5) ^{36}Cl -AMS、 ^{129}I -AMS 等の新システムの開発
- 等である。 ^{14}C 以外の AMS をルーティンでこなす加速器は日本には他になく、様々な分野で特色のある研究成果をあげている。

この他に、

- 6) $\text{H}(^{15}\text{N}, \quad)^{12}\text{C}$ 共鳴反応の NRA (Nuclear Reaction Analysis) を利用した機能性材料の研究も活発に行われており、コンスタントな研究成果をあげている。

また、PIXE (Particle Induced X-ray Emission) の検出装置も開発されている。PIXE は極めて汎用性の高い元素分析法であり、今後利用者の増大が予想される。

平成 13 年度には、加速管のリークというトラブルがあったが、これを除けば、加速器運転時間は、近年の利用の活発化を反映して増加傾向にある。

3. 将来展望

東京大学原子力研究総合センターは、東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設とともに平成 17 年度に改組され、東京大学大学院工学系研究科原子力専攻となり、教育ミッションに強くコミットすることとなるが、一方でこれまで営んできた共同利用とそのアクティビティを堅持する方針である。加速器を利用する研究の一つの大きな流れは、小型加速器により高度に制御されたイオンビームを利用した分析や材料創造・改質の研究であり、それはまさに東京大学原子力研究総合センターにおいて展開されてきたものである。これまでは、加速器ごとの管理・運用体制を敷いてきたが、新専攻のもとでは、原総センター加速器群と原子力工学研究施設加速器群を統一的に管理・維持する仕組みをつくり、限りある金銭的・人的資源を有効に活用して、なお一層小型加速器を利用した研究分野の開拓と発展に大きく貢献していきたいと考えている。

表. 東京大学原子力研究総合センターの静電加速器群サマリ

加速器	HITバン・デ・グラフ	HITタンデロン	タンデロン(RAPID)	ペレトロン式タンデム
加速電圧 [MV]	0.2 ~ 3.75	1.0	0.1 ~ 1.7	1.0 ~ 5.0
メーカー・型	HVE KN-3750	GIC Tandetron	HVE Tandetron4117-HC	NEC Pelletron 5UD
設置年	1984		1993	1993
設置場所	茨城県東海村 (東京大学原子力工学研究施設内)		東京都文京区 (東京大学浅野地区)	東京都文京区 (東京大学浅野地区)
管理	重照射管理部門(HIT)		共用設備管理部門	タンデム加速器研究部門
昇圧方式	絶縁ベルト シングルエンド	コッククロフトワルトン タンデム型	コッククロフトワルトン タンデム型	ペレットチェーン タンデム型
イオン源	RF イオン源・PIG イオン源 微粒子加速用イオン源	Ionex 860A セシウムスパ ッター型固体イオン源	Ionex 358A デュオプラズ マトロン気体イオン源 Ionex 860A セシウムスパ ッター型固体イオン源	MC-SNICS セシウムスパ ッター型固体イオン源 1 MC-SNICS セシウムスパ ッター型固体イオン源 2
加速イオン	H ⁺ , He ⁺ , C ⁺ , O ⁺ , D ⁺ , N ⁺ , 分子 イオン 1ミクロン程度の微粒子	Ni ³⁺ , Cu ²⁺ , Zr ²⁺ , Fe ²⁺ , H ⁺	H ⁺ , He ²⁺ , Si ²⁺ , Au ²⁺	H ⁺ , ¹⁵ N ²⁺ , C ⁴⁺ , Be ³⁺ , Al ³⁺ , Cl ⁷⁺ , I ⁷⁺
使用状況	二重照射(原子力材料研究) 照射実験(原子力材料 研究・機能性材料研究) 微粒子加速実験	照射実験(原子力材料 研究・機能性材料研究) マイクロビーム	RBS PIXE イオン・インプランテーシ ョン	AMS(加速器質量分析) (¹⁰ Be, ¹⁴ C, ²⁶ Al, ³⁶ Cl, ¹²⁹ I) PIXE NRA (¹⁵ N (p, αγ) ¹² C)
加速器運転要員	助手 1、外注要員 1		技術員 2、非常勤 1	助教授 1、技術員 1
加速器稼働時間				
H12 年度	774	869	963	3,686
H13 年度	882	719	872	3,338
H14 年度	756	566	605	4,363
H15 年度	745	635	873	5,600
現在の開発状況	ビーム技術・照射技術・放射線計測開発		PIXE バックグラウンドの 低減、PIXE による水中微 量重金属類の定量	AMS の高度化(特に ³⁶ Cl-AMS、 ¹²⁹ I-AMS)と応用 分野の開拓

赤外自由電子レーザーによる光科学とその利用技術

東理大 中井浩二

K. Nakai (FEL-SUT, Tokyo Univ. of Science)

1. はじめに

赤外自由電子レーザー研究は4半世紀に亘る歴史を持つが、研究の動機は加速器技術の開発が主であって、その技術が開く光科学の豊かな可能性に注目した人はほとんどなかった。また、光科学は放射光施設の出現によって目覚ましい発展を遂げたが、その分野の研究者の興味は、短波長領域に集中し、赤外領域に注目する人は少なかった。FELによる赤外領域の光科学はいわば盲点のようであった。東京理科大学では、故黒田晴雄先生に導かれてこの分野の開拓が始った。

黒田先生によってFEL-SUT(Free Electron Laser at Science University of Tokyo)と名付けられた理科大の赤外自由電子レーザーは5~10 μ mの範囲をカバーする波長可変のレーザー光源である。この領域は狭いように思われるが、実はほとんどの分子結合の振動励起による吸収がおり、化学者が「指紋領域」と呼んでいるように各分子固有の特性吸収スペクトルが見られるところである。この領域で電子線線形加速器とアンジュレーター光発振器による赤外FEL光を用いると、 10^{14} ~ 10^{15} (光子/ps)という極めて高い光子密度が得られるので、特に分子結合の振動励起状態を多光子吸収で高い選択性をもって励起して分子結合を解離し、或は分子を加熱できる。これは、新しい化学反応の可能性を開くものであり、分子・高分子化学を中心に広い利用分野の展開が期待できる。また、医療・産業まで可能性が広がると期待される。

2. 「FEL-SUT」光源の特性

「FEL-SUT」光源の特徴はビームの時間構造にある。電子線形加速器を用いているので光子ビームはFig. 1のように幅が2 μ secで10Hzのパルス構造を持ち、そのマクロパルスは更に幅が1~2psecで間隔が350psecのマイクロパルス群から成っている。

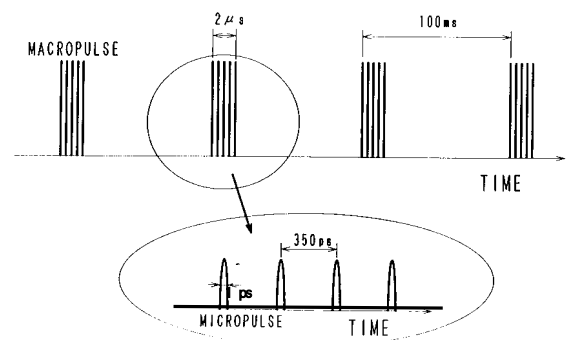


Fig. 1 Time Structure of the beam

このビームの時間構造を巧みに利用して、光化学反応過程の動的な解析など興味深い基礎研究が進行している。一方、利用技術という観点に立ってみると、この光ビームの重要な特徴は、そのマイクロパルスのエネルギー密度である。1~2psec 幅のパルスに 8~25 μ Joule のエネルギーが蓄えられている。これは、1psec 当たり 10^{14} ~ 10^{15} 個の光子密度に相当する。振動励起状態は等間隔になっているから、このレーザー光を用いると複数個の光子で分子の振動励起状態を一気に梯子をかけ登るように励起することができる。多光子励起と呼ばれるこの過程は、高い選択性を持って分子を励起し或は解離することができる。

3. 多光子励起による分子の選択的解離・励起の例

異性体分離:多光子励起による選択的解離

化学的・物理的性質が類似している為はその分別が容易でない異性体も、赤外吸収スペクトルの差を利用すれば赤外 FEL による選択的多光子解離で分離できる。Fig. 2 は、ビス・トリフルオロベンゼンのパラ異性体とメタ異性体の混合物にメタ異性体固有の振動に対応する波長の FEL 光を照射するとメタ異性体が分解され、その赤外スペクトルが時間と共に減少し、パラ異性体のみが残る様子を示している。シス/トランス関係にある異性体についても同様の結果を得た。

ここでは、異性体の分別解離を例に上げたが、多光子励起による選択的解離の応用範囲は広く、例えば従来酵素反応等を使って苦勞していた化学反応にとって代る新手段を提供する可能性は大きい。

同位体分離:多光子励起による選択的励起

波長の可変性と多光子励起の特徴を活かして成功した Si 同位体の分離実験は、「FEL-SUT」の目玉のように言われた。

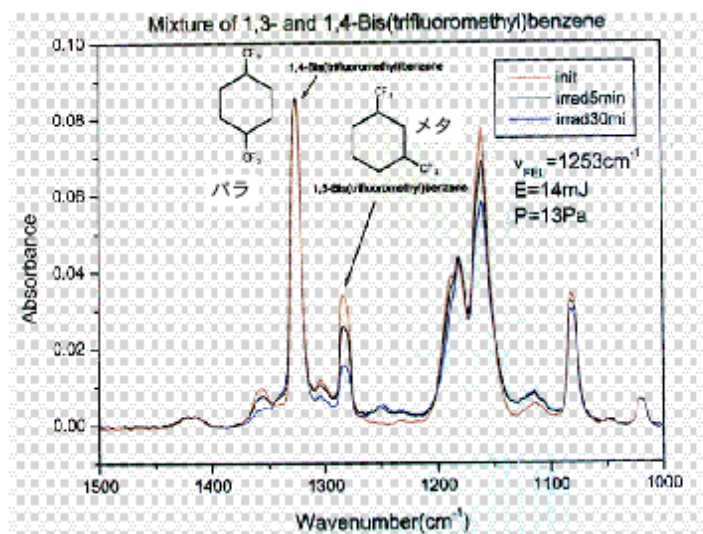


Fig.2 Separation of the para-isomer.

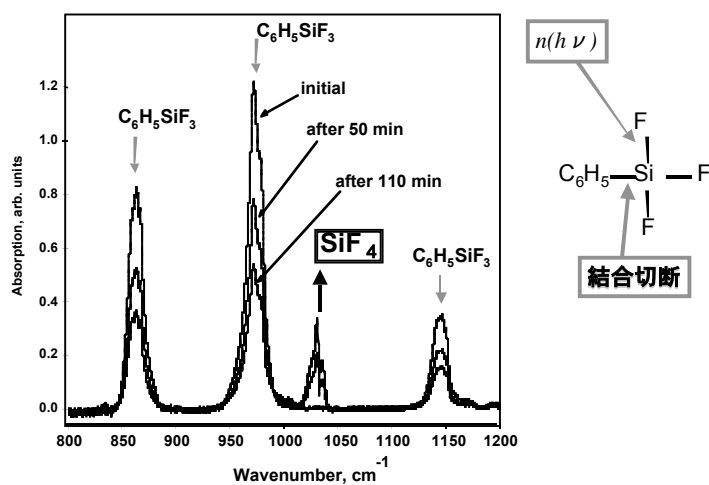


Fig. 3 Isotope separation of the ^{28}Si

Si には ^{28}Si (92.2%), ^{29}Si (4.7%), ^{30}Si (3.1%)の3つの同位体がある。各同位体を含む分子の赤外スペクトル線には同位体シフトが生じる。 ^{28}Si のシフトに対応した波長の FEL 光を用いて ^{28}Si 同位体の分離に成功した。

^{28}Si 同位体の分離にはフェニールフルオロシランのガスが用いられた。分子構造は Fig.3 の挿入図に示されている。この分子 $\text{C}_6\text{H}_5\text{SiF}_3$ の ^{28}Si -F 結合に対応する波長の光を当てると、この結合の振動が分子を励起し Si-F 結合よりも弱い Si-(C_6H_5)間の結合が切れる。Fig. 3 では $\text{C}_6\text{H}_5\text{SiF}_3$ のスペクトル線が時間と共に減少し、 SiF_4 の線が次第に増えてくる様子が見られる。この生成物は質量スペクトルの測定により $^{28}\text{SiF}_4$ であることが確かめられた。

この実験は振動励起をした結合が切断されるのではなく ^{28}Si を含む分子を選択的に加熱し、その分子の弱いところが切断されたという点で、上に述べた異性体分別解離実験とは大いに異なっている。

4. 「FEL-SUT」光源利用において注目される4つの特徴

前節に紹介した二つの例は多光子励起による選択的な励起や解離を利用した分子操作の可能性を示している。その利用技術の展開には大きな夢が持てる。特に、分子・高分子・生体分子を対象とした研究を通じて生命科学・医療に役立つ利用技術の開発には大きな期待が持てる。「FEL-SUT」でも生命科学分野の研究が広がりつつある。

「FEL-SUT」では、多光子励起の他にも光ビームの特性を活かした光利用実験を始めている。特に次の4つの特徴が注目される。

- (1)波長が連続的に可変である。
- (2)psec~msec に亘る時間変化が観測できる。
- (3)高い光子密度により、多光子励起ができる。
- (4)指紋波長による分子マッピングができる。

「FEL-SUT」では、これらの特徴の組み合わせを活かして

- ・ポンプ・プローブ実験による光化学反応過程の動的な解析
- ・多光子励起を利用した異性体・同位体分離など選別的な化学反応の利用
- ・近接場顕微鏡による細胞レベルの物質マッピングとミクロな加工技術の開発
- ・FT-ICRMS(サイクロトロン共鳴型質量分析器)と組み合わせた糖鎖蛋白の研究

等のユニークな研究実験が進行中である。

「FEL-SUT」研究の創始者の黒田先生は、赤外 FEL 光源の特徴を活かした実験の推進を強調された。ここで赤外 FEL 実験と放射光実験を比較して考えると、放射光実験は分析的要素に重点があるのに対し、赤外 FEL 実験は分子操作など加工的要素に特徴がある。放射光実験に適した研究を赤外 FEL で試みることについては黒田先生は厳しく戒められた。

5. 赤外 FEL 利用技術普及の為の小型加速器開発と運転保守体制の確立

前節までに論じたように、赤外 FEL 光源による光科学の展開に大きな期待が持てるが、赤外 FEL の利用技術を普及させるには、先ず加速器の負担を軽減することが必要である。理科大に設置された FEL-SUT は小型の加速器であるが、それでも、大学の研究室や病院などに設けるには規模が大きく運転・保守が容易でない。さらに小型化を進め運転・保守が容易な体制を作らないと利用技術の普及は期待できない。理科大では KEK との協力の下にこの問題に対する解決策を探っている。

その一は、C バンド FEL の開発である。KEK がリニアコライダー技術の開発の一つとして進めてきた C バンドの技術を加速器の小型化に利用すると、いまの S バンド FEL の 1/2 のサイズにできる。小型化により放射線遮蔽の負担も軽減できる。さらに使用後電子ビームの減速器もつけビームダンプを簡素化する。こうすれば、病院の一室に置けるような装置が作れる。もちろん、高周波源も小さくしないと意味が無い。

その二は、加速器の運転・保守の負担を軽減する支援体制を作ることである。加速器については製造業者のアフターサービスでカバーできる範囲を超えている。例えば、一基が 2 千万円もするクライストロンの予備を全ての大学や病院が持つことは容易でない、またそれは無駄である。支援センターにプールする体制を作ることが必要である。

赤外 FEL 光源の利用科学、利用技術に関する基礎的な研究を大学で進め、加速器周辺の開発と支援を中核的研究所が担当するという形を提案したい。この体制ができれば、利用者機関のネットワークを形成し全国の大学・病院などに利用技術を浸透させることができるであろう。新しいタイプの共同利用研究体制を提案したい。

これまで、素粒子・原子核研究を中心に発展してきた加速器科学は、大型研究所に集中して効率良く研究を進める体制を築き上げて来た。放射光科学もその道を辿って来た。その結果、国際的競争力のある研究活力を育てることができたが、一方で集中することの問題点もしばしば指摘されて来た。

ここに紹介した赤外 FEL 光源による研究は、小型加速器が中心となって地域的な集中を必要とせず、むしろ、各地に分散し基礎科学から産業・医療まで、幅広く分布する体制が望まれる。しかし、上に述べたように小型加速器でもその補修は容易でない。利用は分散するが、補修は集中して効率的に行える体制を作ることが望ましい。かつて、物性研究者が提案していた「国分寺計画」構想の理念をもう一度呼び戻したいと思う。

参考文献

黒田晴雄編；科研費報告書「赤外自由電子レーザーの高性能化とそれを用いた光科学」
東京理科大学総合研究所附属赤外自由電子レーザー研究センター(2004.5)

[加速器] 加速器名：FEL-SUT
加速粒子：電子
最高エネルギー：40(MeV)
平均電流：8(μ A)
ピーク電流：1000(mA)
マイクロパルス幅：1~2(ps)
マクロパルス幅：2(μ s)
繰り返し：10(Hz)
赤外 FEL 光波長：5~16(μ m)
光子密度： 10^{14} ~ 10^{15} (光子/ps)
主な用途：赤外自由電子レーザー光源

3. 研究開発課題

W-MAST を利用して、以下の様な課題について実験研究が実施されている。

- (医療研究) 陽子線によるがん治療臨床研究
陽子線によるがん治療高度化研究
- (材料開発) 工業材料の放射線照射影響評価
- (分析) 加速器を用いた新しい分析技術の開発、工業材料中の元素分布評価、文化財等の微量元素分析
- (品種改良) イオンビームによる突然変異を利用した環境浄化植物等の品種改良研究
- (放射線測定技術開発) 放射線検出器開発
- (加速器利用高度化研究) イオン源開発、ビーム測定技術開発

研究開発は、地域の企業、公設試験研究機関、大学等の他、全国の大学、研究機関との協力で実施されている。

佐賀光源の建設

九州シンクロトロン光研究センター

冨增多喜夫、江田茂、岩崎能尊、高林雄一、吉田勝英

T. Tomimasu, S. Koda, Y. Iwasaki, Y. Takabayashi and K. Yoshida

(SAGA Light Source, Kyushu Synchrotron Light Research Center)

1. はじめに

佐賀県立九州シンクロトロン光研究センターの1.4GeVシンクロトロン光源(佐賀LS)は、地方自治体である佐賀県が設計し、運転する最初の光源であり、平成13年秋以来鳥栖市弥生が丘8丁目7番地に建設されている。光源は3本の固有ビームラインとともに平成16年度の共用開始を目指している。光源と建屋の設計は平成11年度から始められた。佐賀LS場合、予算とスペースの制約があり、250MeVリアックによる1.4GeVリングへの低エネルギー入射蓄積・加速方式を採用している。将来の入射器の活用の一つとして低エネルギー部の28~36MeV電子ビームを用いる二色(4~10 μ m、8~20 μ m)の赤外自由電子レーザー装置の設置も可能であり、リアックをリネキュレタの加速部に利用して500MeV入射器に改造することも可能である。

2. 1.4GeVリングの概要と建設状況

佐賀LSの周長は、既存の1.5GeV級光源の約2/3にした低コスト設計であるが、ビームサイズを小さくして光源輝度を高くするように設計されている。このためリングの長直線部での電子ビームのエネルギー分散を零とせず、0.3~0.62の有限の値にしている。ビームサイズとエミッタンスはエネルギー分散値0.62で最小になる。蓄積電子の最高エネルギーを1.5GeVとせずに1.4GeVにしたのは、光源の消費電力を夏季でも1400kW、施設全体でも2000kW以下に抑え、光源の運転に必要な光熱水料をガス冷房費も含めて毎時5万円以下に下げためである。施設の建設費は、建屋が約11億円、光源装置が19.3億円である[1,2,3,4]。

リングは周長75.6mの8回対称DB(Double Bend)型の電磁石配列であり、長直線部には6台の挿入光源(2.4m \times 5、1.5m \times 1)が設置可能で、ビームポート数は20である。実験ホールには最長38mのビームラインの設置が可能であるが、現在佐賀大学の30m長ビームラインが設置されている。電子ビーム・エミッタンスは挿入光源なしで、25nm \cdot rad(目標値は15nm \cdot mrاد)、7.5Tウイグラーの挿入時には45nm \cdot radに増加する。電子ビームのサイズ(x 、 y)は偏向電磁石4度偏向発光点で水平・垂直それぞれ0.18mm、0.12mm(カップリング10%)、長直線部中央で挿入光源なしで0.58mm、0.13mm、ウイグラー挿入時は0.7mm、0.26mmに増加する。偏向電磁石($L=3.2$ m、 $B=1.46$ T、励磁電流530A)と7.5Tウイグラーからの放射光の臨界エネルギーは、それぞれ1.9keVと9.8keVである。

平成15年9月から12月にはリング室、リアック室、実験ホールの基準点設置、光源装置の温度制御冷却水装置、1.4GeVリングの電磁石と架台の据付、測量、基準点調整を行った。電磁石の架台にはロッドエンド・ベアリングによる電磁石位置微調整機構が我が国では最初に採用されている。電磁石の磁場データをもとに軌道安定性も検討されている[5]。16年1月から3月にはリング用アルミ合金製真空槽をプレハブ後に電磁石に挿入し6月に 10^{-10} Torr台の真空度を得ている。リング加速空洞(499.8MHz)はKEK-PF型で、高周波源[6]とともに6月に設置され、90kWのRF供給できるようにRFIシステムが続けられている。表1にリングの主なパラメータを示す。図1に佐賀LSで使用する高周波電力と電子リアックの構成を示す。

3. 250MeVリニアックの概要と建設状況

電子リニアックの主要部の構成は前FEL研(大阪大学大学院に移管)のものとはほぼ同じである。長寿命(千時間以上)の熱陰極電子銃からの600psパルス長で1.2nC以上の電子パルスを適切な集束レンズ系により低エミッタンスを保ちながら約10psパルスで0.6nCパルスに短パルス化できる6MeVパルサー[7]、10 μ s長で出力平坦度0.1%以下の自由電子レーザー用の2856MHzパルス高周波源[8]の他にリング入射時には高エネルギー加速が可能のように2 μ sパルス長で、出力平坦度0.2%以下の2856MHzパルス高周波源を設置している。2 μ sパルス高周波源にはクライストロンE3712(2 μ s-88MW)を使用する。使用する進行波型加速管は旧電総研と三菱電機で開発したもので、長さは2.92mで、filling timeは約1 μ sであるからマイクロパルス長1 μ sの電子ビームを加速するには加速管に2 μ s長の高周波を供給する必要がある。毎秒1パルス入射で、1 μ sパルス中のマイクロパルス数は22(44.8ns間隔)の多パルス入射(約13nC)である。

リサキュレクタとしての活用については〔4〕を参照されたい。スペクトル幅の狭い電子ビームを加速するには、電子ビームが加速管の中心を通るようにし、さらに各加速管に供給する高周波の位相を選択する必要がある。加速管の中心を通すために蛍光板を用いたビーム位置モニターを各加速管の入口に設置している〔9〕。蛍光板には2mmの孔が開けられていて、加速管中心に合わせて設置される。各加速管の間には4極電磁石(ダブレット)と舵取りコイル(X-Y)設置してビーム位置モニターを見ながら電子ビームが加速管の中心を通るように調整する。

4月から5月には250MeV電子リニアックの6MeVパルサーからリングまでの電子入射系の各種電磁石と真空系の他に、リング長直線部の真空系も立上げた。6月から7月には250MeVリニアックの高周波源(E3729,E3712)〔4〕とリングの高周波源(E3774)が設置された〔6〕。7月-8月には電子リニアックの高周波源とリング加速空洞のRFエージング、リニアックと入射系のビーム位置モニターと制御系の調整、各種インフラの整備を行った。8月25日には6MeVパルサーによるビーム加速に成功し、9月下旬には250MeVリニアックによるリングへのビーム入射・蓄積を行う。当初の目標は蓄積電流100mAで1/e寿命1時間、最終目標は300mAで1/e寿命5時間である。

光源装置の設計は平成11年から始められ、装置を構成する部品は平成12年から13年にわたって国内外の三十数社の協力を得て19億3千万円の予算枠内で発注され、組立て調整が進められている。御協力頂いている佐賀県庁はじめ関係企業の皆様にお礼を申し上げます。

参考文献

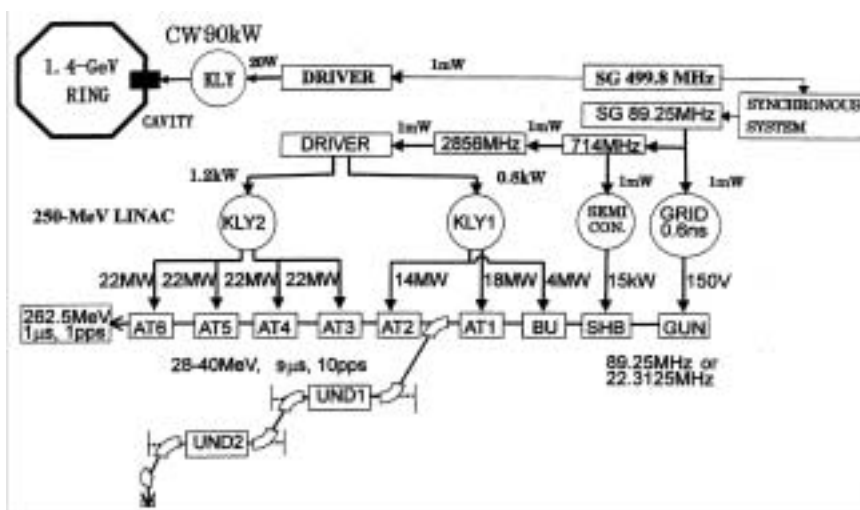
- [1] T.Tomimasu, et al., "The SAGA SYNCHROTRON LIGHT SOURCE IN 2003" Proc.PAC '03 p.902.
- [2] Y.Iwasaki.et al., "LATTICE DESIGN OF SAGA SYNCHROTRON LIGHT SOURCE" Proc.PAC '03 p.3270.
- [3] H.Ohgaki,et al., "DESIGN CONTROL SYSTEM FOR SAGA SYNCHROTRON LIGHT SOURCE" Proc.PAC '03 p.2387.
- [4] 富增多喜夫、江田茂、岩崎能尊、安本正人、木塚俊博、山津善直、光武亨剛、落合裕二. "佐賀県シンクロトロン光応用研究施設電子リニアック2003年(部品発注現状)", Proceedings of the 28th Linear Accelerator Meeting in Japan, URL: <http://lam28.tokai.jaeri.go.jp>.
- [5] Y. Iwasaki, et al., "Beam-dynamics study based on measured magnets data of SAGA Light Source", Proceedings of the first Particle Accelerator Society of Japan Meeting, Funabashi, Aug. 4-6, 2004.

- [6] S. Koda, et al., "Construction of RF cavity system for storage ring at SAGA-LS", Proceedings of the First Particle Accelerator Society of Japan Meeting, Funabashi, Aug. 4-6, 2004.
- [7] T. Tomimasu, et al., "Strong focusing system of FELI 6-MeV injector used for ultraviolet range FEL oscillation" Nucl. Instr. Meth. A407(1998), p. 370.
- [8] E.Oshita et al., "24-MW, 24- μ s PULSE POWER SUPPLY LINAC-BASED FELs" Proc.PAC '95, p.1608.
- [9] Y. Takabayashi, et al., "Beam profile monitors at SAGA Light Source", Proceedings of the first Particle Accelerator Society of Japan Meeting, Funabashi, Aug. 4-6, 2004.

表 1 佐賀1.4GeVリング、電子ビーム等の主なパラメータ(目標値)

Electron beam energy	0.2 ~ 1.4 GeV	RF frequency (MHz)	499.8
Beam current & life	300 mA & 5 hrs at 1.4 GeV	Harmonic number	126
Circumference	75.6 m	Momentum compaction	0.008074
Lattice	DB \times 8	Injection energy (MeV)	262
Straight sections	2.93m \times 8	Dipole & number	11.25 $^\circ$ edge focusing & 16
Emittance (nm \cdot rad)	15 [35(7.5 T wiggler)]	Radius & field	3.2 m & 1.459 T
Tunes	6.796, 1.825 [6.796, 1.825]	Number of quadrupoles	40 (16QF1, 16QD1, 8QF2)
Energy spread	0.000672 [0.00079]	Length (m)	0.2 0.2 0.3
Radiation loss (keV)	106 [123]	Max. gradient (T/m)	27 27 25
Bunch length (mm)	8.8 [10.35]	Number of sextupoles	32 (16SF 16SD)
Beam size at straight section (coupling=0.01 at = 0.62)		Length (m)	0.1 0.14
x (mm)	0.58 [0.68]	Max. gradient (T/m ²)	150 150
y (mm)	0.034 [0.052]		

図1. 佐賀LSで使用される高周波電力と電子リアックの構成



京都大学における加速器に関わる研究開発

京大院工 伊藤秋男

A. Itoh (Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)

1. はじめに

京都大学全体としては、原子力研究整備委員会の下部組織である共用加速器小員会（委員長：今井憲一教授）が中心となり、京都大学としてふさわしい加速器科学のポリシー、研究分野、研究課題、加速器の性能・機能などについて総合的に検討を行っている。関係する部局等は理学研究科（物理学専攻）、工学研究科（量子理工学研究実験センター、原子核工学専攻、等）、医学研究科、化学研究所（先端ビームナノ科学センター）、エネルギー理工学研究所、原子炉実験所にわたっており、基礎的・萌芽的かつ創造的な教育研究の遂行するための基盤組織の確立を目指している。以下では、宇治キャンパスに施設のある工学研究科、化学研究所における現況について報告する。

2. イオン加速器の現状とその利用研究

京都大学各部局における加速器施設および装置性能に関しては前回シンポジウムでの報告内容とほぼ同様であり、表1に示した通りである。一部を除き、工学研究科に代表されるような MeV 級のイオン加速器はいずれも老朽化の波に揺られており、ハード的に新規な機能はあまり付加されていないのが現状である。

Table 1 . Accelerator Facilities at Kyoto University

部 局	加速器
工学研究科 量子理工学研究実験センター	1.7MV タンデトロン、 2.5MV バンデグラーフ(イオン) 2.0MV バンデグラーフ(電子) 250kV 負イオン注入器
化学研究所 粒子ビーム科学研究領域	7MV 陽子線形加速器 100MV 電子線形加速器 300MV 電子蓄積リング(KSR)
エネルギー理工学研究所 量子放射エネルギー・研究分野 複合機能変換過程研究分野	FEL 施設 1.7MV タンデトロン 1MV シングルエンド
理学研究科	7.5MV タンデム型(ペレトロン)
理学研究科	サイクロトロン

これら既存の施設でこれまで行われている研究は以下の通りである。

- @基礎過程：ビームと物質との相互作用、ナノ領域・フェムト秒～ピコ秒での素過程
- @物質科学および材料開発への応用：分析・評価：RBS、PIXE、ERDA、NRA、ISS、等
- @プロセス利用：イオン注入、ミキシング、照射効果、エッチング、材料照射、等
- @イオン散乱法による表面1原子層ごとの構造解析
- @電子デバイス等の材料開発、ナノ結晶の作成と光学デバイスへの応用、
- @原子炉・核融合炉材料、
- @ポリマーの特性の改質、薄膜材料界面の原子ミキシング、表面加工・表面機能化
- @医療、生物・生命科学への応用：PET、魚類の生態系、樹木による環境分析、など
- @AMSの開発、AMSによる活断層評価、可視化、環境エアロゾル分析、
- @マイクロイオンビーム、同時照射技術、測定器の開発など
- @加速器開発：小型医療用加速器、クーラーリング、自由電子レーザー。

(1) 工学研究科附属量子理工学研究実験センター・原子核工学専攻

本センターの加速器施設では工学研究科諸専攻の研究グループがユーザーの大部分を担っており、イオン注入の他、主に材料の元素分析・結晶構造解析の手段として加速器ビームが用いられている(RBS, PIXE)。また、他の分析手法では困難な材料中の水素濃度分布を知る測定法として核反応法($D(^3\text{He}, p)^4\text{He}$)が利用されている。イオン・物質相互作用の基礎研究は多岐にわたっており、二次イオン・二次電子・光(紫外・可視)放出過程に関する精密測定がなされている。気体標的や固体標的に加えて昨年より液体分子線を標的とした新しい研究が始まっており、当該分野での新たな研究の展開を画策している。特記事項としては、ビーム技術の向上以上に周辺測定技術が多様化しており、種々の同時測定法が採用されている事をあげることができる。例えば、高速イオンと多原子分子衝突において生成される複数の二次粒子(イオン、電離電子個数)と散乱イオンとの多重同時測定により、従来型の測定法等では知ることができなかった高分子の多重電離・解離過程の詳細を明らかにしている。

大学法人化の中で今後の予算獲得は更に厳しいものとなることが予想されるが、MeV級のイオンビーム加速器を利用した教育研究は人材育成や技術開発・シード開発を主要業務とする大学の場に極めて相応しいものであり、基礎研究のみならず様々な物質科学先端分野において今後益々重要視されることは確実である。量子理工学研究実験センターでは本来の教育研究活動に加えて、イオンビーム利用研究支援を前面に打ち出し、学内における物質科学研究を推進するための1拠点の役割を担う予定にしている。また、ハード面での新機能として量子理工学研究実験センターではマイクロイオンビームの導入を計画している。陽子線などの軽イオンではなく炭素イオン等の重イオンビームを対象とし応用面での研究拡大を目指している。マイクロビームは原研高崎研等が先行しているが、それら国研には無い特色を持つ装置開発を計画している。周辺技術としては、フェムト秒級のイオン衝突現象の測定手法の開発も計画しており、超高速・過渡的物性の解明を目指している。また、将来計画としては、基礎過程の研究のみならず材料分析および細胞照射を目的としたマイクロイオンビーム装置を導入を目指している。

(2) 化学研究所附属先端ビームナノ科学センター(野田章教授より頂いた原稿)

京都大学化学研究所附属原子核科学研究施設は平成16年4月1日を持って化学研究所附属先端ビームナノ科学センターに改組された。現在、イオン線形加速器実験棟の7MeV陽子線形加速器、100MeV電子線形加速器、300MeV電子蓄積リングKSRの加速器施設が稼働している。これに加えて当領域では、放射線医学総合研究所を取りまとめ機関とする文部科学省の「先進小型加速器の普及のための要素技術開発事業」において、日本原子力研究所・関西研究所および高エネルギー加速器研究機構と連携し、「小型陽子・重イオンシンクロトロン」の製作に携わり、中でも「ビーム蓄積・冷却リング(内側リング)」に関して、責任を持って開発の推進に当たってきた。平成13年の事業開始以来、既に原研・関西研、放医研、東大工学部、広大との共同研究により、大電力パルスレーザーの生成するイオンビームの特性についての観測を行った(Phys. Rev. Lett. 91(2003)215001)。これに加えて、100%にも及ぶ生成イオンビームのエネルギー拡がりの縮減を図るために、パルスレーザーと位相同期した高周波電場により位相空間内でイオンビームを回転させる「位相回転」を提案し、そのための位相回転空洞の実機を製作し、原研・関西研の100TW,20fsレーザーを用いた本年9月の実験に備えて待機している。位相回転後のイオンビームのエネルギー幅の更なる縮減の実現のため、電子ビーム冷却を用いる可能性について注目し、イオンと電子ビームの相対速度を掃引することにより、冷却時間の縮減を図る手法を提案し、その原理実証をドイツハイデルベルグのマックスプランク原子核研究所に既設のイオン蓄積・冷却リングTSRを用いて行い、手法そのものは十分な効果を有するという見通しを得ている(NIM, A517(2004)1-8)。今後、実際のレーザー生成イオンビームを用いた位相回転及び電子ビーム冷却実験に進む予定で、レーザー物質科学研究領域の協力も得て、原研関西研との協力研究によりレーザーイオン源に関する見通しを得る予定である。この目的のため、放医研との共同研究により、イオン線形加速器実験棟の中にイオン蓄積・冷却リングS-LSRの建設を進めてきており、平成17年春からのビームコミッションを予定している。ビーム調整の初期の段階は7MeV陽子線形加速器からのビームを用いて行うことを考えており、このビームは電子ビーム冷却を行った後早い取出しにより短バンチビームを取り出し、イオンビームを用いたパルスラジオリシスに供することも計画している。

こうした取り組みに加えて、炭素線治療の有効性が最近の放医研のHIMACにおける臨床試験やドイツのGSIでの成果で明らかになってきた。ドイツではハイデルベルグのがん研究センターにガントリーを有する炭素治療施設の建設が始まっており、フランスも同様の計画を検討している。こうした状況を受け、我国でも放医研により従来のRF加速器の技術をベースとしたがん治療用加速器の小型化を目指す「普及小型加速器開発」がスタートしている。我々はこうした状況を考慮して、更に長期的な視野に立ってよりいっそうの小型化をレーザー加速によって実現する可能性に挑戦することも目指している。

3. おわりに

イオンと物質との間で起こる衝突反応過程並びにその応用技術・方法などを図1に

示す。現状では、イオンビームを用いた利用研究は広義の放射線物理を始め、元素分析・構造解析・物質改質などを目的とする多岐にわたる応用分野において基盤技術のひとつとして定着しており、今後もその必要性は拡大するであろう。小型加速器イオンビームの特質を思いつくままに列挙すると、

- @クーロン力が主体であり、多数の電子や原子自身を瞬時に動かすことができる
- @運動エネルギーのみならずポテンシャルエネルギー（多価イオン）が利用できる
- @電磁場により容易に運動を制御できるため、超微小径ナノビームの利用が可能
- @相互作用時間が超高速（アト～フェムト秒）
- @物質内での飛程の制御が可能
- @超重イオン（クラスター、微粒子、生体高分子）の利用が可能

等であり、多くは高エネルギー用大型加速器では得られないものである。研究の方向としては、

- @ナノスケール領域での衝突反応めかにかにズムの解明と制御技術の開発
- @上記の特長を最大限活かしたビーム技術開発
- @新奇技術/道具（他に無い、何百倍も明るい・速い・高精度・・・）の地域社会への提供

などであり、特に大学内においてはその存続価値を高める努力を、外部的には施設間のネットワーク化・広報宣伝活動が必須であろう。

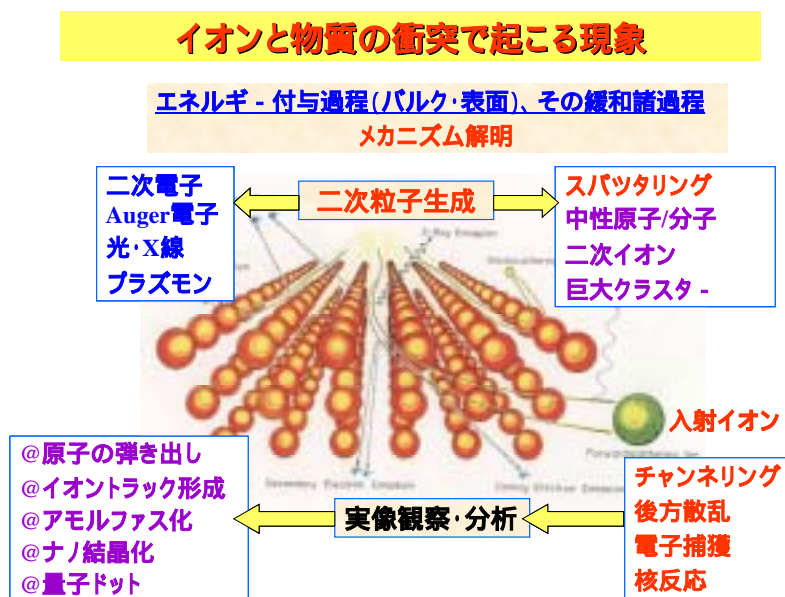


Fig.1 Overview of ion-materials collision interactions and their application techniques

加速器駆動未臨界炉研究のための FFAG 加速器の建設

京大原子炉、KEK¹、三菱電機²、立命館大SLLS³

谷垣 実、三島嘉一郎、代谷誠治、森 義治¹、町田慎二¹、
石 禎浩²、福本信太郎²、井上 信³

M. Tanigaki, K. Mishima, S. Shiroya, Y. Mori¹, S. Machida¹, Y. Ishi²,
S. Fukumoto² and M. Inoue³

(Research Reactor Institute, Kyoto Univ., ¹KEK,

²Mitsubishi Electric Corporation, ³SLLS, Ritsumeikan Univ.)

1. はじめに

現在京都大学で稼働中の5 MW原子炉の後継中性子源として、1996年に加速器駆動未臨界炉による中性子源が提案された[1]。MCNPXを用いた加速器駆動未臨界炉の概念設計を進めたところ、未臨界炉の実効増倍係数 k_{eff} を十分精度よく決定するには特に陽子エネルギーが20~150 MeVの領域で k_{eff} の見積に必要な核データや計算コードの精度が十分でない事が明らかになってきた。従来より京大原子炉実験所では実験所の臨界集合体(KUCA)と300 kVコッククロフト型加速器で基礎実験を行ってきた[2, 3]が、ここでは14 MeVの単色中性子しか得られず、必要なデータや計算コードの精度向上の妨げになっていた。一方、加速器駆動未臨界炉のための陽子ビーム源には1) 高いビーム強度 2) 省電力 3) 高い安定性が求められる。大河によって40年前に提唱されたFFAG原理に基づく加速器[4]は、時間的に一定の磁場で強集束の集束系を持つ加速器であり、これらの条件をクリアする可能性を秘めている。しかしながら、加速用電場を発生させるために必要な広帯域・高電圧の加速空洞がないこと、電磁石の形状からビームの入出射に必要なスペースが確保できない事が妨げとなり、この原理による陽子加速の成功例はなかった。最近になって森らがFINEMETを用いた広帯域高電圧加速空洞を開発[5]し、500 keVのFFAG実証器で陽子加速に成功[6]した。またヨークフリー型マグネットの開発も行われ、これを用いた陽子150 MeV FFAG加速器の製作が進行中[7]である。このようにFFAG加速器が加速器駆動未臨界炉の陽子ビーム源として実用化できる素地が整ってきた事をうけ、KARTプロジェクトが文部科学省によって採用され2002年より開始された。このプロジェクトでは最近の技術開発を元にして150 MeV陽子FFAG加速器の開発をすること、及びこの加速器とKUCAを組み合わせ陽子エネルギー20~150 MeVの領域での k_{eff} 決定に必要な核データや炉物理の実験を行う事である。ここではKARTプロジェクトで現在製作中のFFAG加速器の現状を紹介する。

2. FFAG加速器の構成と各部の概要

今回のKARTプロジェクトでは、入射器、ブースタ、主加速器の3段構成となり、その全て

がFFAG加速器である。うち入射器が誘導加速を採用したスパイラルセクタ型FFAG、残りがRF加速によるラディアルセクタ型FFAGである。今回のFFAG加速器群の構成と配置をFig. 1に、仕様をTable 1 にまとめる。

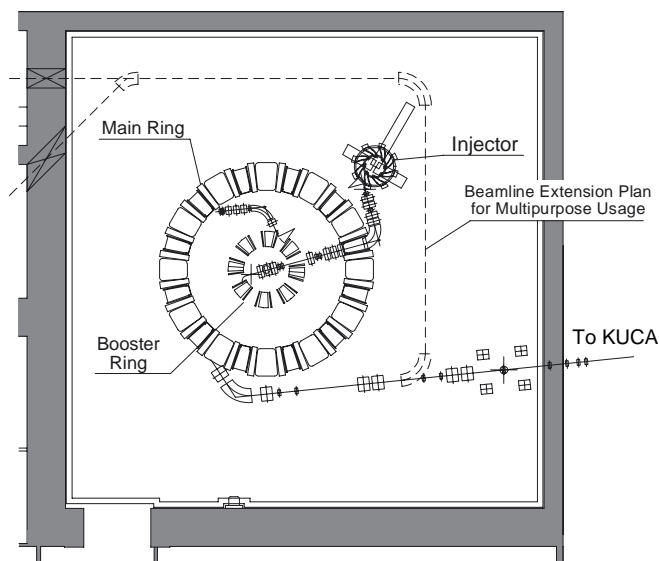


Fig. 1 FFAG complex at KURRI.

Table 1 Specification of the FFAG complex at KURRI

	Injector	Booster	Main
Focusing	Spiral	Radial	Radial
Acceleration	Induction	RF	RF
<i>k</i>	2.5	4.5	7.6
<i>E_{inj}</i>	100 keV	2.5 MeV	20 MeV
<i>E_{ext}</i>	2.5 MeV	20 MeV	150 MeV
<i>p_{ext} / p_{inj}</i>	5.00	2.84	2.83
<i>r_{inj}</i>	0.60 m	1.42 m	4.54 m
<i>r_{ext}</i>	0.99 m	1.71 m	5.12 m

イオン源は典型的な体積カスプ型イオン源を採用している。ここで発生させたH⁺イオンは100 keVまで加速され入射器へと向かう。今回のFFAG加速器はパルスモードで動くため、イオン源のアーチ電圧も10 %のデューティでパルスして効率化をはかっている。入射器への輸送ビームラインの途中には静電チョップが置かれ、このチョップで~50 μs にパルスを整えた上で次段に入射させる。入射器には2.5 MeVの誘導加速型FFAG加速器を採用する。FFAG磁場は12個のスパイラル型電磁石（スパイラル角42度）で作られる。FFAG磁場の*k*値はスパイラル型電磁石一台あたり32個取り付けられているコイルによって決定される。このFFAG加速器

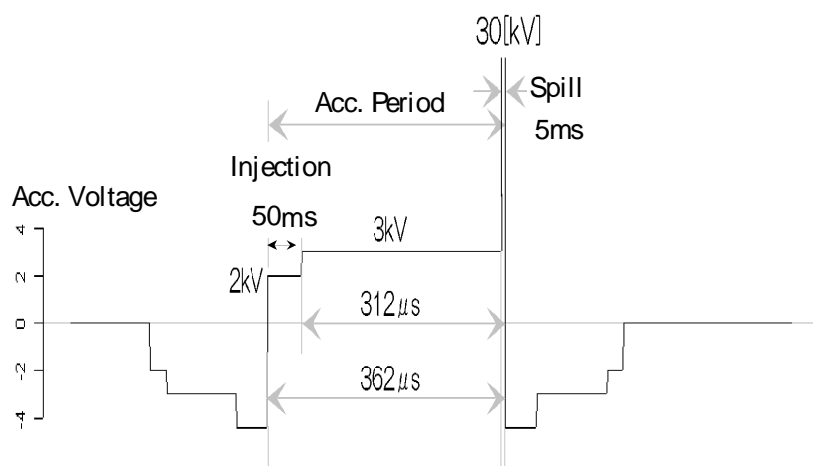


Fig. 2 Acceleration scheme of FFAG injector.

の誘導電圧のパターン (Fig. 2) に示すとおり、イオン源からの $50 \mu\text{s}$ のパルスビームは $5 \mu\text{s}$ に圧縮されて次段へ出射される。

入射段から入射した陽子ビームは、このブースター段の FFAG 加速器で最大 20 MeV まで加速される。この FFAG 加速器はラディアルセクタ型で、8 組の発散 - 収束 - 発散電磁石からなる。この FFAG のラティスの構成を Fig. 3 に示す。これらの電磁石は全てヨークフリータイプである。FFAG 磁場の k 値はトリムコイルを使って設定されるため、この段での加速エネルギーを可変が可能になる。

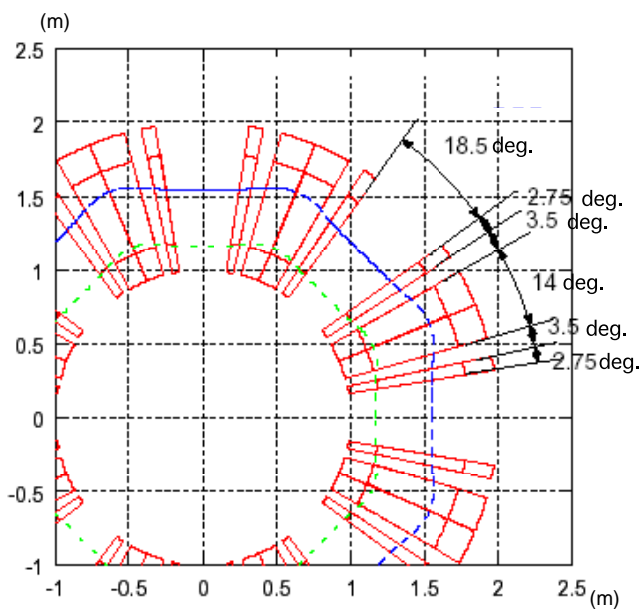


Fig. 3 Lattice structure of FFAG booster ring.

最終段の FFAG 加速器は RF 加速でラディアルセクタ型の FFAG 加速器である。基本的に KEK で開発中の 150 MeV 陽子 FFAG 加速器と同一である。詳細は[7]などを参照頂きたい。ただ、現状の FINEMET による加速空洞の出力電圧は~10 kV 程度であり、加速の繰り返し周期をあげる際には加速電圧が不足する。そのため、将来的には高周波加速空洞を 2 つに増やせる設計になっている。また電磁石も 200 MeV まで加速可能な磁場出力を得られるように、より透磁率の高い鉄をヨークに使っている。この加速器の電磁石もヨークフリータイプであるが、入射段やブースター段と異なり FFAG 磁場の k 値は磁極の形状によって決定されている。

3. 現状と今後の予定

FFAG 加速器を収める“イノベーションリサーチラボ”が 2004 年 3 月末 KUCA に隣接する場所に完成した。この建物は FFAG 加速器の設置の他に、加速器からのビームを物理、化学、医学、材料その他の分野で利用する多目的利用のための拠点となる予定である。

加速器本体については、イオン源本体等が三菱電機工場内で試験調整中である。2004 年の秋にイノベーションリサーチラボに搬入され、組立と必要な放管手続きが完了した時点で運転試験を行う予定である。現在終段加速器とブースター段の電磁石の設計製作が進んでおり、2005 年前半に搬入・組立が行われる予定である。2005 年秋以降に KUCA とビームラインで結ばれて加速器駆動未臨界炉に関する基礎研究を開始する予定である。

参考文献

- [1] K. Kawase and M. Inoue, "Neutron Factory Project at KURRI", APAC 1998, Tsukuba, Japan, p. 104
- [2] S. Shiroya, H. Unesaki et al., "Neutronics of Future Neutron Source Based on Accelerator Driven Subcritical Reactor Concept in Kyoto University Research Reactor Institute (KURRI)", Int. Seminar on Advanced Nucl. Energy Systems toward Zero Release of Radioactive Wastes, 2nd Fujiwara Int. Seminar, Nov. 6-9, 2000, Shizuoka, Japan, $\text{\textit{Abstracts}}$ p. 58.
- [3] S. Shiroya, H. Unesaki et al., Trans. Am. Nucl. Soc., 2001 Annu. Mtg., June 17-21, 2001, Milwaukee, Wisconsin, p. 78.
- [4] T. Ohkawa, Proc. of annual meeting of JPS(1953)
- [5] Y. Mori et al., "A new type of rf cavity for high intensity proton synchrotron using high permeability magnetic alloy", EPAC 1998, p. 299.
- [6] M. Aiba et al., "DEVELOPMENT OF A FFAG PROTON SYNCHROTRON", Proceeding of EPAC 2000, Vienna, Austria, p. 581.
- [7] T. Adachi et al., "A 150MeV FFAG SYNCHROTRON WITH "RETURN-YOKE FREE" MAGNET", PAC 2001, Chicago, the United States, p. 3254 - 3256
- [8] M. Aiba et al., "Beam Injection and Extraction in 150 MeV FFAG", Proceeding of EPAC 2002, Paris, France, p. 1076.

大阪大学核物理研究センターにおける加速器に関わる研究

阪大核物理研センター 二宮史郎

S. Ninomiya (RCNP, Osaka Univ.)

大阪大学核物理研究センター（以下、RCNP）は、主加速器として K=400 のリングサイクロトロンを、前段加速器として K=140 の AVF サイクロトロンを持ち、全国共同利用研究センターとして、主として核物理の実験的研究のために、24 時間、週 7 日体制で運転している。

RCNP サイクロトロンは可変エネルギー、可変粒子の加速器である。エネルギーについては、例えば陽子の場合、100MeV・416MeV までリングサイクロトロンでの加速実績がある。それより低いエネルギーは AVF サイクロトロンのみでの加速によって供給するが、低エネルギー側では 10MeV までの加速実績がある。粒子については、軽イオンを中心に、酸素 18 までの軽い重イオンの加速実績がある。また、それぞれのマシンタイムは比較的長時間（数日・2 週間）であり、そのための加速調整時間は 1・1.5 日程度である。

RCNP サイクロトロンの特徴として、リングサイクロトロンのフラットトップ高周波加速空洞によって、超高品質ビームの生成が可能であることが挙げられる。例えば、300MeV 陽子のエネルギー幅 (ΔE) は 35keV を達成しており、ヘリウム 4 までの軽イオンにおいては要求されたほとんどすべてのエネルギーにおいて、その $\Delta E/E$ は 2×10^{-4} 以下を実現している。

このような超高品質ビームを安定に供給するためには、一度実現した状態を保持し続けることが必要である。サイクロトロンの場合、その実現には磁場の安定化が本質的であることがわかってきた。我々の測定によると 10^{-6} オーダーの磁場変化でビーム品質に大きな影響があることがわかっている。サイクロトロンの磁極全体に渡る磁場安定化を実現するためには、コイル電流値はもとより、鉄心の幾何学的形状や磁化率も固定化しなければいけない。言い換えれば、磁場測定点またはビーム位置等を基準とするコイル電流値のフィードバック制御のみでは、超高品質ビームの長時間安定供給は不可能である。実際、我々の測定結果はこの主張を裏付けている。ところで、鉄心の幾何学的形状も磁化率も温度の関数であるので、サイクロトロンにおいては、鉄心温度の安定化が重要である。ここで注意すべきは鉄心の温度変化の時定数は数十 数百時間のオーダーであり、温度変化を検知してのフィードバック制御は事実上不可能であることである。従って、鉄心温度自身を常に一定に保持する必要がある。

我々は冷却水温度の安定化、室内温度の安定化により、鉄心温度の超安定化を実現し、その結果、磁場の超安定化に成功した。一例を挙げれば、60 時間にわたり ± 0.06 以内に鉄心温度を安定化し、磁場を $\pm 2.5 \times 10^{-6}$ 以内に安定化することができた。ビーム品質の測定はそのうちの 18 時間行われ、サイクロトロンパラメータを一切調整することなしに、その $\Delta E/E$ は 4×10^{-4} 以内を保持し続けた。これらの温度安定化の成果は、マシンタイムごとのビーム品質の再現性の向上にも寄与している。

ビーム品質向上のための開発作業は現在も続行中であり、磁場微調整用の one-turn コイルの導入等種々の細かな要素開発、運転制御性向上を行っている。

なお、本年度、前段加速器の AVF サイクロトロン改良を行う。具体的内容は、高周波アンプ更新による主高周波加速電場の増強、デー電極の更新、フラットトッピング高周波加速系の追加、超伝導 ECR 型重イオン源の導入、制御系更新、ビーム品質診断コースの導入、老朽化機器の更新などである。特に高周波加速系の更新により、AVF サイクロトロンからのシングルターン取り出しが実現でき、ビーム品質の更なる向上が期待できる。また、超伝導 ECR 型重イオン源の導入は、RCNP リングサイクロトロンにおける Kr 程度までの重イオン加速を可能にする。

加速器の仕様

加速器名； 主加速器：リングサイクロトロン

前段加速器：AVF サイクロトロン

加速粒子； 陽子、重陽子、ヘリウム 3、ヘリウム 4、軽い重イオン（酸素まで）

最高エネルギー； 400MeV（陽子）

200MeV（重陽子）

510MeV（ヘリウム 3）

400MeV（ヘリウム 4）

$400 \cdot Q^2 / A$ MeV（軽い重イオン）

電流；1 μ A

運転；DC 運転

主な用途；核物理研究

その他特記事項；超高品質ビームを長時間安定に供給している。

E / E 1×10^{-4}

大阪大学産業科学研究所の加速器施設

阪大産研 田川精一

S. Tagawa (The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.)

大阪大学産業科学研究所では現在、Lバンド、Sバンド、及びレーザーフォトカソード電子銃を有するSバンドライナックの3台の加速器が稼動している。平成14年度にナノテクノロジー関連の研究を充実発展させるために、加速器関係の組織の改組が行われた。この時期の前後に、LバンドとSバンドライナックの改良、レーザーフォトカソード電子銃を有するSバンドの新設、冷却水や空調温度制御等の加速器本体周辺の環境整備等の加速器利用研究を行う上での抜本的な整備が行われた。また、同時に電子線露光装置や収束イオンビーム等のビームを用いた微細加工やトップダウン型のナノテクノロジーの整備も行われ、ビーム工学とナノテクノロジーの融合研究を推進する研究環境が飛躍的に整備された。この時に、従来、研究支援を本務とする放射線実験所のメンバーの研究部門への配置換えがあり、研究設備だけでなく、研究体制も大いに充実した。

本報告では大阪大学に設置されている産研及び核物理センター以外の工学研究科付の「自由電子レーザー研究施設」と旧原子力原子力工学専攻核エネルギー工学講座(原子核機器学領域)に設置されたオクタビアン(強力14MeV中性工学実験装置)についても報告する。

北大における加速器に関わる研究

北大院工 鬼柳善明

Y. Kiyanagi (Quantum Energy Engineering, Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ.)

1. はじめに

北海道大学においては医学診断治療以外に使用できる加速器は、工学研究科の瞬間強力パルス状放射線発生装置施設の、電子線型加速器だけである。この他にバンデグラフ型加速器があったが現在は使われていない。電子線型加速器は最大加速エネルギー45MeVで、パワーは3kWである。中性子は約 10^{12} n/sec発生できる。この加速器は、パルスラジオリシス、加速器中性子源工学、中性子分光器開発などに使われてきた。加速器完成後すでに30年を経過しているが、いまでも有効に使用されており、最近は、J-PARC中性子源の設計のための実験データの取得、また、中性子デバイス・検出器の開発にその用途を拡大している。さらに、パラメトリックエックス線の生成と応用にも使われるようになった。

ここでは、中性子源や中性子ビーム集束デバイスの開発、パラメトリックエックス線に関する話を紹介する。

2. パルス中性子源開発

北大加速器では初期の頃に固体メタン冷中性子源を開発し、それを高エネルギー研中性子源KENSへ移出した。今回J-PARCに大強度核破砕中性子源JSNSを建設するに当たり、どのような減速材を設置するかが問題となった。このような大型加速器中性子源ではメタンが放射線損傷のために使用できなくなるので、効率がおとる水素減速材を使用せざるを得なくなった。水素にしたときに、性能を向上させる方法がないかと言うことで、結合型液体水素減速材を開発した。従来型との強度比較を図1に示す。この方法で、約6倍の強度増が得られている。この結果は、ノーマル水素(パラ水素25%、オルソ水素75%)に近い成分の測定結果であった。その後、性能を向上させる方法として、パラ水素の成分を増やし、厚さを厚くしていくことが発見された。

その場合の結果も図1に合わせて示してある。この方法でさらに約1.5倍の強度増が得られることが計算で示された。この結果は、数値シミュレーションであり、水素の中性子散乱断面積は、断面積モデルの精度が十分検証されていない。そのため、実験によって、パラ水素減速材の特性が計算と同じ傾向を示すかどうかを、検証する必要がある。そのための実験を北大で行った。J-PARCは全ての減速材が水素であり、結合型の1台と非結合型2台を設置することになっている。そのため実験は、結合型と非結合型の両方について行っ

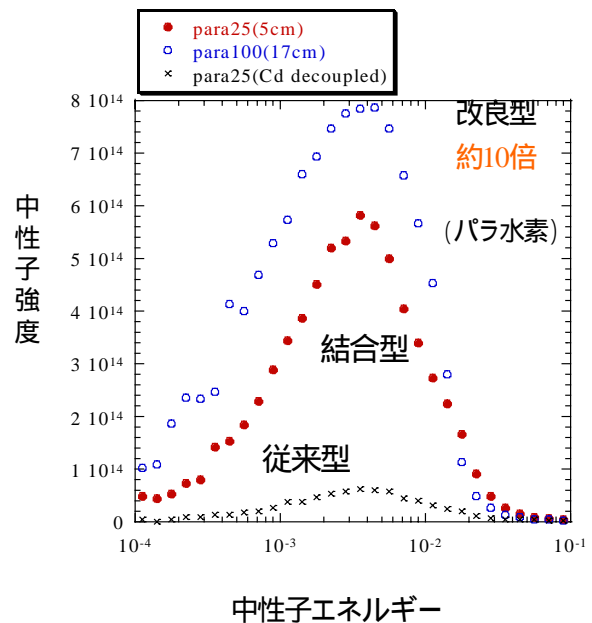


図1 新型減速材の中性子スペクトル強度

た。図2に結合型（カップルド）のエネルギースペクトルを示す。左が実験値で、右が計算値である。実験値と計算値はパラ水素濃度によるスペクトルの変化の様子はほぼ同じである。比を見てみると、計算値の方が変化の度合いが大きくなっているが、傾向は合っているのがこれからも分かる。この実験から、シミュレーション計算はパラ水素濃度による、スペクトル強度変化の傾向を十分表していることが分かる。次に、図

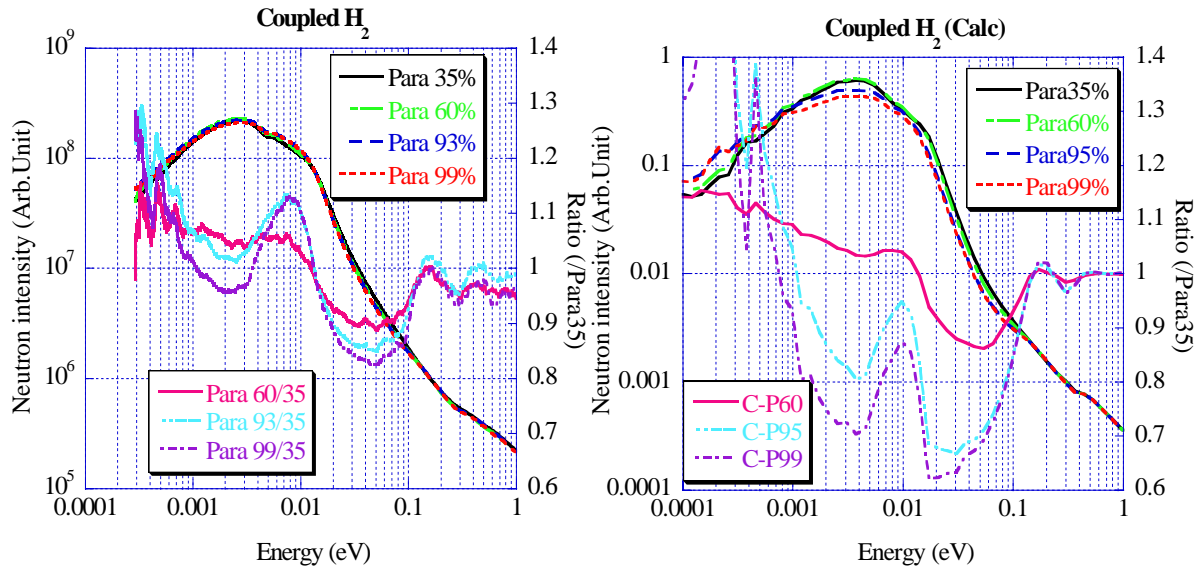


図2 実験と計算のエネルギースペクトルと強度比の比較

3に結合型（カップルド）と非結合型（デカップルド）の場合の中性子放出時間分布を示す。これも左が実験値で、右が計算値である。パラ水素濃度が高くなると、パルスピークが高くなり、減衰が早くなっていくことが示された。これは計算でも同じ傾向を示しており、パラ水素を使うことによって、中性子源の特性が良くなることを示している。このような結果をもとにJSNSでは100パラ水素を使用することに決定した。

3. 中性子磁気レンズによるビーム集束

中性子源で発生した中性子を有効に利用するためには、中性子ビーム制御メソッドの開発が重要なものとなる。定常磁場による中性子集束については、既に

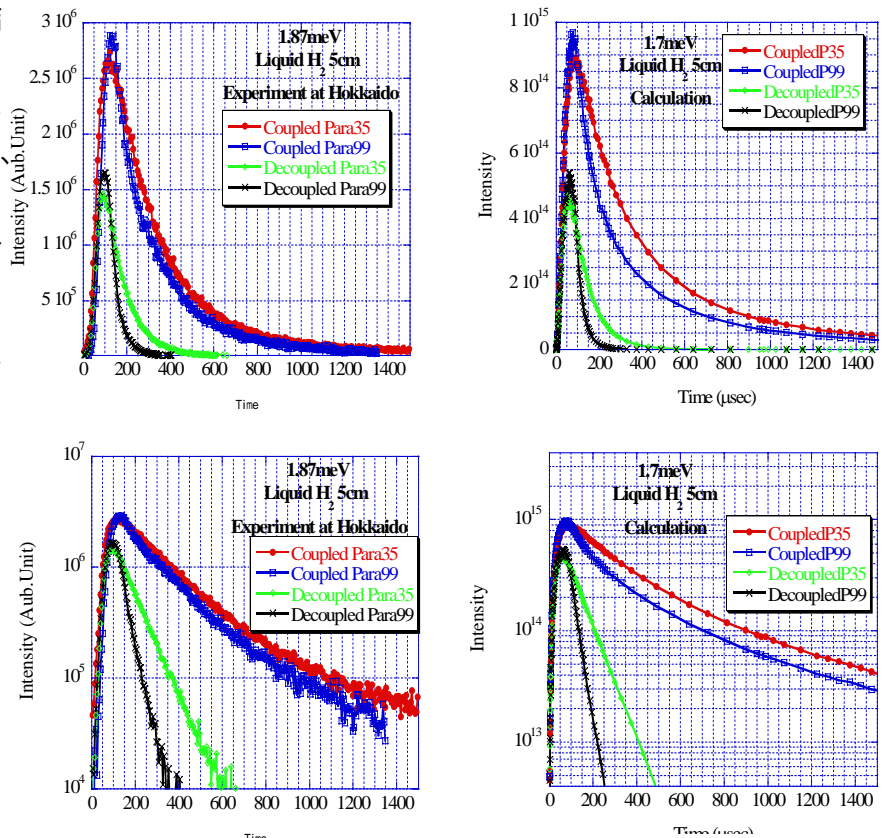


図3 オルソ・パラ比による放出時間分布の変化

実証した。(図4参照) JSNS のようなパルス中性子源では、中性子エネルギー(波長)の広い範囲で集束・コントロールできることが望まれる。そのためのパルス磁気レンズ装置を原研・理研グループと共同で設置した。これは中性子光学素子開発の科学振興調整費 NOP プロジェクトの一つとして行われたものである。ある範囲の波長領域で集束させるためには、磁場は時間の2乗に反比例しなければならない。中性子集束実験を行う場合、入射中性子ビームが発散が大きいと集束状況をうまく観測できないことになる、そこで、ビームスリットの大きさについての検討を行った。磁気レンズの内径は22mmである。磁気レンズの手前にスリットを設置し、コリメートの仕方による磁気レンズを透過したビームの空間分布をシミュレーションし、磁場のあるなしで強度比をとった。入射中性子波長は12Åである。検出器はレンズのビーム出口から39cmの位置に設置した。結果を図5に示す。スリット径がレンズ径と異なる場合(2mm、26mm)では、強度は殆ど同じであるが、スリット径がレンズ径と同じ22mmでは、大きな強度増が得られていることが分かる。波長によってどう変わって行くかさらに検討が必要であるが、この方法でも集束の違いが観測できることが分かった。

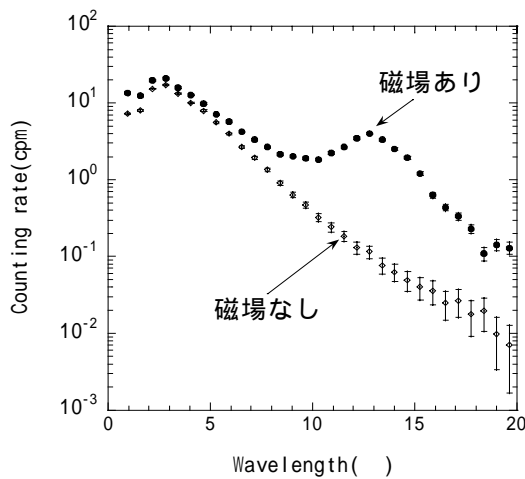


図4 永久六極磁石を用いた中性子集束の実験結果

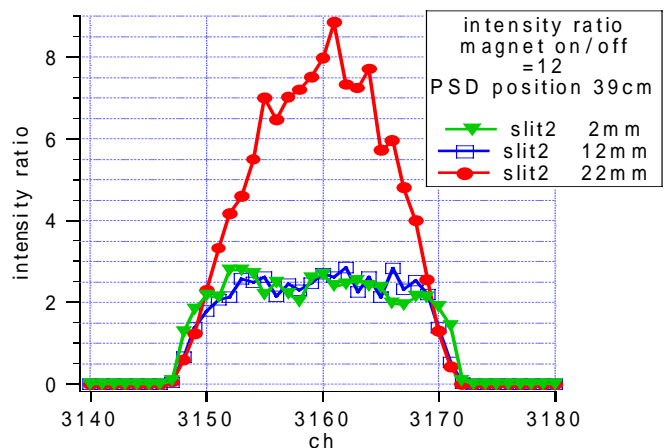


図5 パルス磁場を用いた場合の中性子集束のスリットによる影響(空間分布強度比)

4. パラメトリックエックス線

相対論的な速度を持つ荷電粒子が、結晶構造を持つ媒質に入射すると、荷電粒子の電磁場により、結晶原子が分極し、その分極が回転、消滅する際に光子を発生する。これが結晶構造により回折し、Bragg条件を満たす方向に回折X線が観測される。これをパラメトリックエックス線という。パラメトリックエックス線は、電子線ターゲットとエックス線発生、エックス線の単色化が同じ場所で行われるため、単色エックス線の発生効率が良いと考えられる。このような性質のため、パラメトリックエックス線には、エネルギー連続可変の単色硬エックス線源としての用途が期待できる。ブラッグ散乱を用いるため、結晶の角度によってエネルギーを変化させられる。エネルギーの変化の様子を図6に示す。エネルギーが可変なため、K吸収端の吸収係数の測定、あるいはK吸収端での透過率の差を利用した医療診断撮影などへの応用が考えられる。応用例の一つとして、NiのK吸収端付近での質量吸収係数の測定結果を図7に示す。これまでのデータと非常によく一致しており、本装置を用いてK吸収端付近の様子が正確に計られていることが分かる。

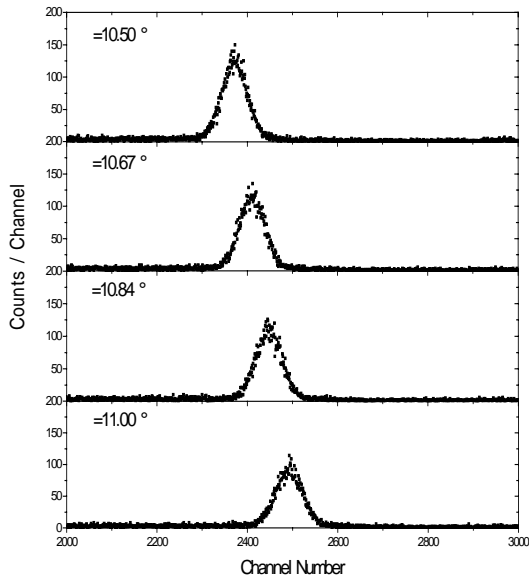


図6 角度によるパラメトリックエクス線のエネルギーの変化（秋本氏より提供）

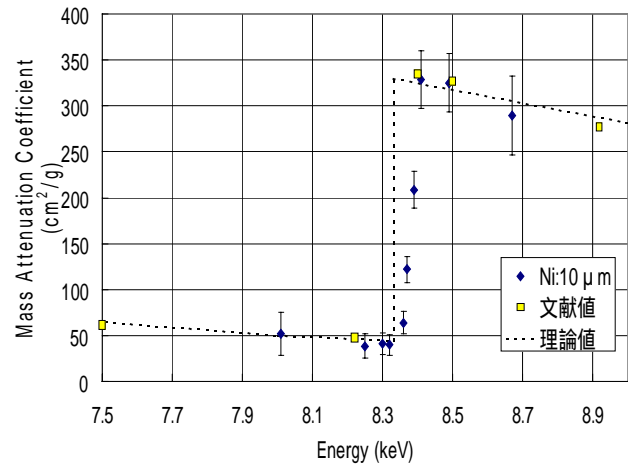


図7 Ni のK 吸収端における線吸収係数の測定結果（秋本氏より提供）

5. まとめ

北大電子加速器はパルスラジオリシス、中性子工学の分野で大きな成果を上げてきたという歴史がある。中性子科学に関しては、現在、J-PARC が建設中であり、日本の加速器中性子源は世界のトップレベルのものになる。中性子散乱実験等においては、精密な測定が大型施設で行われていくことは間違いない。そんな中で、小型加速器を用いた研究は、よりオリジナリティーの高い開発研究に進んでいかなければならない。発生した中性子の有効利用を考えた場合、今後、益々中性子デバイス開発の重要性が増して行くであろう。中性子以外にも、ここで紹介したパラメトリックエクス線の応用など、新しい展開が起きてきている。パラメトリックエクス線は新しい応用分野を開拓できるものとして期待出来るものである。

北大加速器は完成後30年を経過し、老朽化が進んでいるが、それほど大きなトラブルもなく順調に運転されており、今後も中性子科学を中心にしながら、新しい分野への進出を図っていきたいと考えている。

東北大学における加速器実験施設を用いた原子力研究教育

東北大院工 石井 慶造

K.Ishii(Graduate School of Engineering, Tohoku Univ)

東北大学には、9台の加速器が設置されているが、本学工学研究科量子エネルギー工学専攻の研究教育に主に利用しているのは5台である。特に、工学研究科のダイナミトロンは、本専攻が利用している主力実験装置で PIXE 研究・応用研究、材料照射、核データ測定、検出器開発等を通じた研究教育が活発に行われている。また、本研究科の Cockcroft-Walton 加速器を用いて、量子エネルギー工学科 3 年生の加速器工学実験研修を行っており、本装置は学部教育において重要なものともなっている。

一方、学内の加速器施設の利用による教育研究も盛んであり、サイクロトロン RI センターの AVF サイクロトロンを用いた核データ測定、検出器開発、材料照射、粒子線治療基礎開発、PIXE 研究・応用研究が、小型サイクロトロンを用いた PET 開発、保健物理の研究が行われている。更に、金属材料研究所のタンデム加速器を用いた材料分析等の研究も本専攻の研究教育に使われている。

東北大学における加速器

加速器 (導入時期)	所属	粒子エネルギー 加速電圧	加速粒子	ビーム電流	ビーム ライン		将来計画
AFV サイクロトロン (K=130MeV)、 (1998)	サイクロトロン・ ラジオアイソト ープ センター	10-90 MeV(H ⁺) 20-130 MeV(He ⁺)	H, D, He, C, N, O, Ne, S, Ar, Kr, Xe等	50μA(H ⁺ , D ⁺ , He ⁺) 300μA(H ⁺ , D ⁺)	10	原子核物理学	1998年 加速器更新 1999年 μライン・ 測定器関連 整備
AVF サイクロトロン (K=12MeV)、(1998)	サイクロトロン・ラジオ アイソトープ センター	12 MeV(H) 6 MeV(D)	H, D	50μA(H, D)	2ポート	核医学	-
300MeV電子ライナック (1966) + ストレッチャー・ ブースターリング (1999)	理学研究科附属 原子核理学 研究施設	30-300 MeV 0.62-1.2 GeV	電子	10μA(220MeV) 120μA(65MeV) 20mA(周回電流)	3 4	原子核物理学、 加速器科学、 放射・核化学、 RI利用	放射光施設 計画
ダイナミトロン加速器 (SE)、(1974)	大学院工学 研究科(量子エネ ルギー工学専攻)	0.7-4.5 MV (Terminal)	H, D, He	3mA(H)	6	元素分析 (生物、環境、考 古学)、材料 研究、中性子 工学	多目的マイクロ ビーム研究 施設計画
コッククロフト・ ウォルトン型 加速器(SE)、 (1965)	大学院工学 研究科(量子エネ ルギー工学専攻)	80-600 kV (Terminal)	H, D, He	1mA(H)	1	量子エネルギー 工学教育	-
バンデグラーフ 加速器(SE)、 (1981)	電気通信 研究所	1-2.5 MV (Terminal)	H, He	150μA(H) 25μA(He)	2	半導体研究	-
タンデトロン加速器 (TANDEM)、 (1990)	金属材料研究所	0.1-1.7 MV (Terminal)	H, He, Li, C, O, Al, Si, Cl, Cu, A g, Au等	0.1μA(He) 1-10μA(He以外)	3		-

筑波大学における加速器に関わる研究開発

筑波大研究基盤総合センター、筑波大陽子線医学利用研究センター¹

笹 公和、榮 武二¹

K. Sasa and T. Sakae¹

(Research Facility Center for Science and Technology, Univ. of Tsukuba,

¹Proton Medical Research Center, Univ. of Tsukuba)

筑波大学では、陽子線によるがん治療専用 250MeV シンクロトロン加速器を有する陽子線医学利用研究センターと 2 台の静電加速器を所有する研究基盤総合センター応用加速器部門の 2 つの部局が、加速器に関連した研究を行っている。

[1] 筑波大学 研究基盤総合センター応用加速器部門 (UTTAC)

(UTTAC: University of Tsukuba, Tandem Accelerator Complex) <http://www.tac.tsukuba.ac.jp/>

UTTAC (旧加速器センター: 2004 年 4 月改組)では、12UD ペレトロンタンデム加速器と 1MV タンデトロン加速器の 2 台の静電加速器から得られる各種イオンビームを用いて、物理学、工学、化学、生物学、地球科学、環境科学、新機能素材開発、並びにこれらの境界領域を含む広い分野の基礎研究を行っている。Table1 に UTTAC の所有する 2 台の静電加速器の仕様と利用項目について示す。また Fig.1 に UTTAC の施設概略図を示す。学内共同利用施設であるが、他の研究機関からの利用も共同研究という形で積極的に受け入れている。つくば地区研究機関からは、共同研究契約に基づく利用が行える体制となっている。現在、産業技術総合研究所との間で、「重イオンビームを用いた 3 次元ナノ精度加工に関する研究」が開始されている。大型タンデム加速器など 2 台の静電加速器を有する機関としてのメリットを活かし、産官学との効率的な連携を進めている。

本施設は大学の教育施設として、1974 年の設置以来 30 年間に 268 名の修士と 98 名の博士の学位取得に利用されている。最近では高校生などの施設見学を積極的に受け入れており、年間約 800 名の見学者を得ている。原子力・加速器関連分野などへの人材供給及び放射線利用の啓蒙活動に寄与している。

Table1 Performance and Application of Accelerators in UTTAC

加速器	12UD ペレトロンタンデム	1MV タンデトロン
導入時期	1976 年	1998 年
ターミナル電圧	2 – 11 MV	0.1 – 1.0 MV
加速粒子	H, He, Li, C, Mg, Al, Cl, Ca, Ti, Cu, Br, Nb, Ag, I 等	H, He, クラスター(C, Al)等
ビーム電流値	3 μ A (H, D)	3 μ A (H 等)
年間運転時間	2500 時間	350 時間
イオン源	3 台	2 台
ビームライン数	10	5
利用分野	新機能素材開発、原子核実験、AMS、地球科学、原子・物性研究等	元素分析、クラスター実験

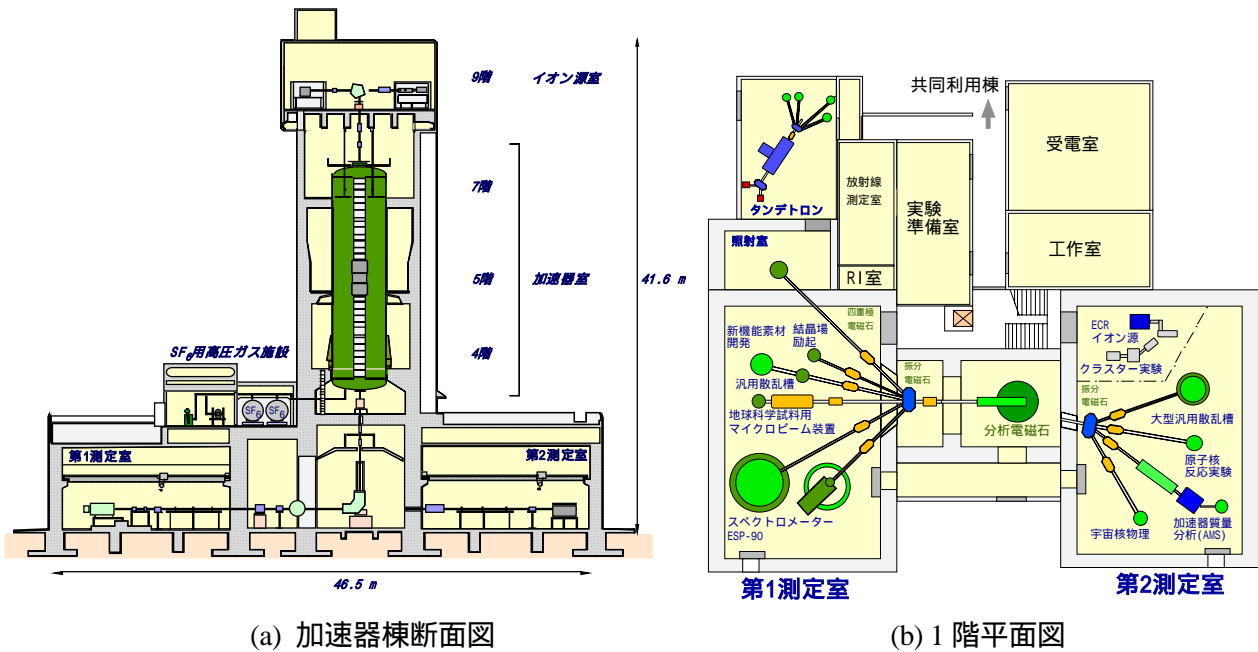


Fig.1 Layout of the Tandem Accelerator Complex in University of Tsukuba.

1-1 12UD ペレトロンタンデム加速器

米国 NEC 社製の 12UD ペレトロンタンデム加速器は、1976 年に完成して以来、最大使用ターミナル電圧 11MV の性能を維持している。スパッタ型重イオン源及び、独自開発によるラムシフト型偏極イオン源と加速器質量分析(AMS)専用イオン源が稼動しており、年間の加速器運転時間は 2500 時間程度である。陽子加速の割合が 30% 以上であるが、材料開発の為の重イオン照射で、Er や Au 等の重イオンビームも供給している。ターミナル電圧が 2MV から 11MV まで可変であり、周期表上のほとんど元素を広いエネルギー範囲で供給する事が可能である(Fig.2)。加速器科学研究としては、加速イオン種の拡大やビーム輸送技術開発、加速器工学上重要な荷電変換断面積の系統的研究を行っている。ビームコースは 10 本あり、利用分野の比重は、原子核研究から新機能素材開発や地球科学試料分析 (PIXE、水素分析)、³⁶Cl-AMS 等に移りつつある(Fig.3)。また最近では、短寿命核 ⁸Li を用いた研究が開始されている。

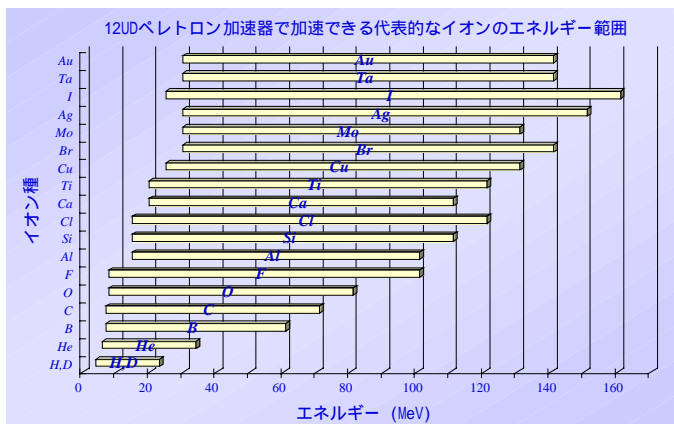


Fig.2 Typical beam energy range for accelerated ions.

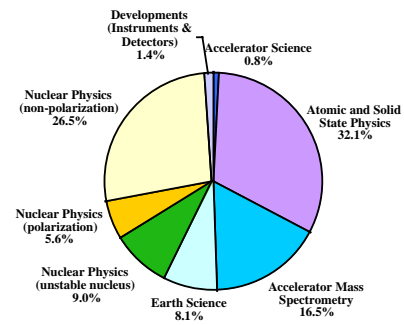


Fig.3 Percentage of beam times for research fields.

1-2 1MV タンデトロン加速器

1998年に導入された1MV タンデトロン加速器では、主にRBS, PIXEによる元素分析研究が行われている。2003年より新たに原子クラスター加速の研究プロジェクトが開始され、少数原子クラスター、例えば炭素クラスター: $C_n(n=1-8)$ を1原子あたり0.24MeV/atomで加速することに成功している。MeVエネルギーの高速原子クラスターと物質間相互作用の研究が目的である。現在、B、C、Al、Si、Cu、Niの原子クラスター加速に成功している。

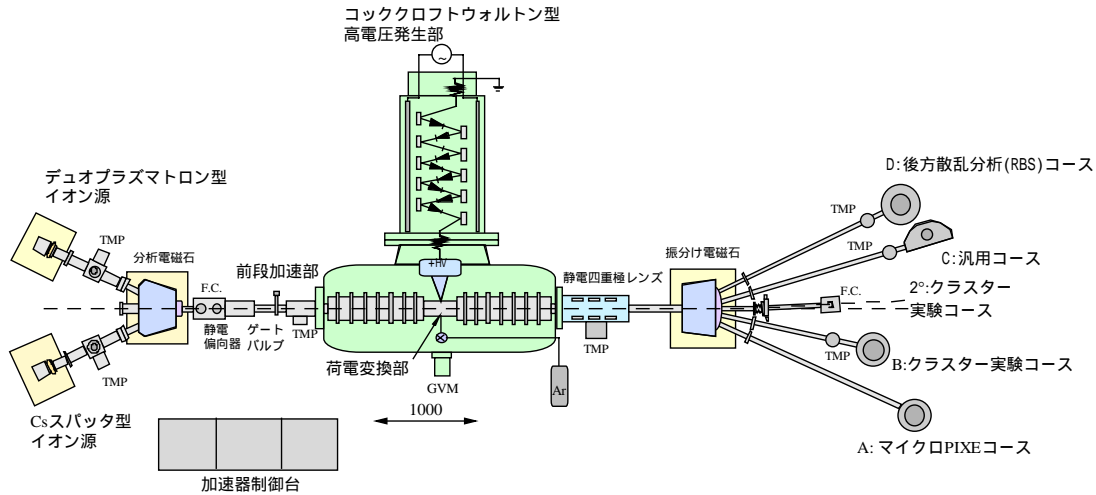


Fig.4 Layout of the 1MV Tandetron accelerator.

1-3 その他

理化学研究所と共同で14.5GHz液体Heフリー超伝導ECRイオン源(SHIVA)を開発した。 Xe^{32+} で5.7 μA 、 Xe^{33+} で3.8 μA のビーム引き出しに成功している。静電加速器とは独立に存在しており、多価イオンや微量元素分析研究に利用されている。

これらのUTTAC施設は、総勢10名の職員で管理運営されている。2004年4月の国立大学法人化に併せて、加速器センターから研究基盤総合センターの1部門へと改組となった。また今後は、人員削減や予算の段階的削減が予想されている。加速器の産業応用への展開や共同研究の積極的サポートなどを行いながら、既に設置後30年近くを経た大学としては大型の加速器装置を、どのように維持発展させていくか試行錯誤を続けている。

[2] 筑波大学 陽子線医学利用研究センター (PMRC)

(PMRC: Proton Medical Research Center) <http://www.pmrc.tsukuba.ac.jp/>

筑波大学陽子線医学利用研究センターは、陽子線がん治療のための専用施設として2001年9月から医学利用を開始している。Table2に加速器の仕様を示す。それ以前は高エネルギー加速器研究機構において専用ビームラインを使い臨床研究を行っていた。現施設は筑波大学附属病院に隣接しており、シンクロトロンから2つの回転ガントリー照射室にビームを導く(Fig.5、Fig.6)。動く臓器に対して呼吸に同期した効率の良い照射を実現するために、加速のタイミングを患者の呼吸に合わせる事ができる。ビーム位置の安定性と再現性が良く、照射室、エネルギーを変更後、調整なしで十分な精度のブロードビーム照射が実現できる。利用形態は臨床応用のみであり年間230日運転され、15年度実績で治療実施率は99%を超えている。

Table2 Performance and Application of Accelerator in PMRC

加速器	シンクロトロン
入射器	RFQ+DTL 7MeV、横方向多重入射
最高エネルギー	250 MeV
加速粒子	陽子
平均電流	7nA
ピーク電流	15 nC / 0.3 sec
パルス幅	0.3 s (遅い取り出し)
繰り返し	0.5 Hz (呼吸同期時可変)
用途	がん治療
平均線量率	2Gy/min



Fig.5 Layout of the proton therapy facility.

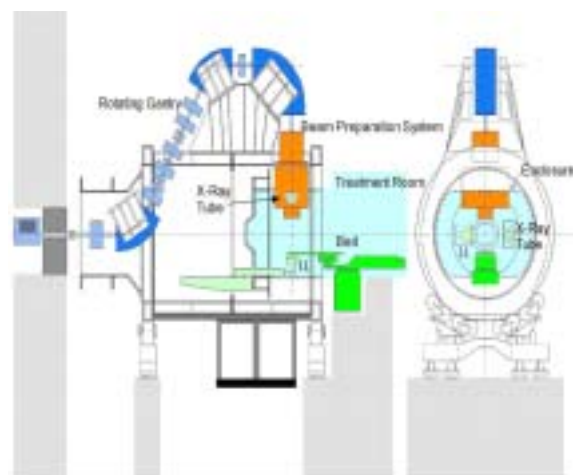


Fig.6 Schematic layout of the rotating gantry.

日本大学電子線利用研究施設における加速器に関わる研究開発

日大量子科研 田中俊成

T.Tanaka (Inst. Quantum Science, Nihon Univ)

日本大学における加速器開発の歴史は、1970年代に検討が開始された「中間子による癌治療」計画から始まっている。以来、日本大学においては原子力研究所(2002年3月に量子科学研究所と改名)が加速器開発の中心を担ってきた。1996年から日本大学と高エネルギー物理学研究所(当時、KEK)との間で電子加速器の高性能化とその高度利用に関する共同研究が開始され、可視～紫外領域の自由電子レーザー(FEL)の開発とその利用を目指すこととなった。これに基づいて KEK から Photon Factory の陽電子リニアック用入射器の1セクションを移設し125MeV リニアックが建設された。

1998年春に電子ビームの加速に成功して以来、FELの発振実験を繰り返したが、従来 KEK で使用してきた PV3030A1 クライストロンを用いて、パルス幅 20 μ s という長パルスでピーク 20MW の RF 出力を安定して得ることが大きな壁の一つであった。この問題は 2000年に RF 窓近傍での真空排気能力の強化を行うことにより解決できたが、それまでに不安定なビームを利用して FEL 発振実験を繰り返し、FEL ビームライン上に配したビームプロファイルモニターを挿入した状態でのビーム調整に多くの時間を費やした結果、アンジュレーター磁石が放射線照射により劣化し使用不能となった。ここで、当初目標としていた可視～紫外領域での発振を次期目標とし、赤外領域での発振と利用を当面の目標として放射線損傷の点でより安全なビームハンドリングを可能とするアンジュレーター磁石の構成に置き換えた。

RF 系の安定度の改善を始めとして、いくつかの深刻なビーム性能の悪化を招いていた問題を解決することにより、2001年春に初めて波長 1.5 μ m での FEL 発振に成功したが、FEL の安定発振にはさらに加速器各部の安定度の改善が大きな課題であった。

日大の FEL 装置は 2003 年後期から学内共同利用が開始された。開発の目標の一つであった波長可変性については、1 台のアンジュレーターを用いて磁極間隙と電子ビームエネルギーの組み合わせによりこれまで 885nm～6.5 μ m までの範囲で発振に成功している。これには、広い波長範囲にわたり高反射率の特性を持つ銅基板銀蒸着ミラーを FEL 光共振器に使用したことが寄与している。マクロパルス当たり数 mJ～50mJ 以上の光エネルギーが、共振器ミラーに開けられた光取り出し孔から得られていると推定されるが、現状ではユーザーの実験室までの間に設置されている光ビーム輸送系での損失が大きく、特に長波長側では輸送効率が 20% 以下まで落ち、ユーザー実験室ポートでの光エネルギーはマクロパルス当たり最大 20mJ 程度に留まっている。この損失は、ミラーの結合孔径を変えることで改善が可能であることが分かっており、今後の検討課題である。

2000 年には日本大学の加速器利用計画が学術フロンティア推進事業に採用され、FEL 計画と並行

して、100MeV の電子ビームをシリコン結晶に照射して発生するパラメトリックX線 (PXR) の実用化に向けた開発が開始された。PXR は、その性質上空間的なエネルギー分解能が高く、特徴的な利用方法の開拓が期待される。2004 年春には 100MeV 電子ビームをシリコンターゲットに照射して放射された PXR を実験室に導くことに成功し、その強度・振舞いともに理論的予測とは矛盾しない結果が得られている。PXR によるイメージングの基礎的な実験が現在行われており、今後グレーティングミラーを用いた集光ビームによるX線回折への利用を目指す。

東京工業大学原子炉工学研究所における加速器研究開発の20年

東工大原子炉研 服部 俊幸、林崎 規託

T. Hattori and N. Hayashizaki (Res. Lab. Nuclear Reactor, Tokyo Inst. Tech.)

東工大原子炉研の加速器開発はIH型線形加速器の研究から始まったので、IH型の話から始める。IH型線形加速器は低エネルギーでの加速電力効率が格段に優れていることは良く知られており、1960・70年代の旧ソ連とフランスで基礎研究がなされた。1970年代の末にミュンヘン工大の森永により、大型タンデム静電加速器の後段加速器として製作され、核物理研究に利用された。その後10年間に大型の静電加速器を持つ研究所のニュールスボーク研究所に2台、筑波大学に1台の小型のIH型線形加速器が製作されCW運転を行った。核子当たり数MeV領域でエネルギーを30%程度ブーストする装置として利用されたが、そのエネルギー領域の核物理研究が成されると相次いで運転は停止された。

一方旧東京大学原子核研究所のニューマトロンプロジェクトの主要線形加速器として、服部等を中心に技術開発が成され、入出射ゲインの大きい主要加速器と成り得るIH型加速空洞の加速電圧分布制御に成功し、10倍の入出射ゲインの有る核研型IH線形加速器の原理実証機を製作し、1983年加速に成功した。開発目的で有ったプロジェクトは瓦解したが、東工大原子炉研に移った服部は材料照射用の実用機を完成させた。IH型空洞の電極(ドリフトチューブ)に4重極電磁石を組み込んだ収束構造を持つ、核子当たり240keVから2.4MeVまで10倍加速をする主要線形加速器を建設し、陽子から塩素までの加速に1984年成功した。これはCW運転されている世界最大の7mのIH型線形加速器である。さらに3mの小型の核子当り2.4MeVから3.4MeVまで加速するIH型線形加速器を建設し、タンデム運転型のCW型線形加速器システムを完成させ1985年に加速に成功した。

さらに、収束構造として加速電極にフィンガーを取り付け高周波(RF)4重極(Q)型のIH加速空洞を開発し、0.8MeVから2MeVまで陽子を加速する原理実証機を完成させ、1988年に加速に成功した。このタイプをIHQ型と銘々し、IH型線形加速器の研究拠点は東工大原子炉研に移った。以下に東工大原子炉研における線形加速器及び関連研究の成果を表に示す。

表 東工大原子炉研における線形加速器関連技術開発の成果

1983年	核研型IH線形加速器原理実証機の加速成功
1984/85年	材料照射用IH型実用加速器で陽子から塩素までを加速に成功

1988 年	I H Q 型線形加速器の原理実証機の加速に成功
1993/94 年	高効率高強度重イオン F R Q 型線形加速器の加速に成功
1995 年	医療 P E T の R I 生産用 I H 型線形加速器の加速に成功。
1998 年	半導体用 I H Q 型線形加速器の加速に成功
2000 年	リッジトロン型電子加速器の原理実証機で電子の C W 加速に成功
2001 年	直接入射方式の R F Q 型線形加速器で炭素イオンの大強度加速を発見
2002 年	A P F - I H 型線形加速器の原理実証機の加速に成功
2003 年	半導体、医療用永久磁石型 E C R イオン源完成テスト
2004 年	100mA 加速直接入射型 R F Q 型線形加速器の完成後加速試験で 50mA 加速に成功
2004 年	2 MeV/u ガン治療用 APF-IH 型テスト線形加速器の完成後加速試験中

I H 型加速空洞の電力効率が低エネルギーで格段に高いことは図 1 で明らかであるが、加速空洞の入射エネルギーをより低くすることは、その収束構造に起因している。収束方法として、1984 年 4 重極電磁石構造で核子当たり 240 keV (240keV/u)、次にフィンガー付き高周波 4 重極 (RFQ) 構造により、1998 年に半導体利用加速器で 20 keV/u まで、そして A P F · I H 型収束、加速構造を取り入れることで、2002 年 A P F - I H 型線形加速器の原理実証機の加速で、空洞を小型化するだけでなく、入射エネルギーを 11keV/u まで低下させることに成功した。このことは 1 0 0 M H z の加速空洞では、30-40 k e V / u 入射を可能とした。

現在服部グループはガン治療用入射線形加速器の技術開発を行っており、 C^{4+} イオンを核子当たり 2MeV まで加速するテスト線形加速器を設計、製作し現在加速試験中である。また新しいタイプの加速器質量分析技術を既存の重イオン R F Q 型線形加速器を使って開発中である、そして小型重イオン APF-IH 型線形加速器を開発し、分析用加速器として開発している。

それ以前に I H 型空洞の高電力効率による C W 運転特性を利用して医療用具の滅菌用電子加速器を東芝と共同で開発した。原理実証機であるが 2.5MeV CW 運転で 2.8mA 加速することに 2000 年に成功した。この電子加速器はリッジトロンと銘々した新タイプの加速器である。

また 4 ベーン型 R F Q 線形加速器は 80MHz 運転、長さ 4.4m で、重イオンを 7mA 加速する高加速率のテスト機を 1993 年に完成し、加速に成功した。さらに 2001 年には理研と共同で、この R F Q 型線形加速器を使ったレーザーイオン源による直接入射方式を開発し、R F Q 型線形加速器による高強度加速に成功し、新加速方式を発見した。現在この新方式をもちいて、炭素イオンを 100mA 加速する 4 ロッド R F Q 型線形加速器を製作し加速試験中で、現在 50mA 加速に成功した。

以上が東工大における加速器研究の実績である。仮に研究実績をイオン線形加速器の台数で表すとすれば、世界の 17%、日本の 40% で、開発的研究線形加速器だけを取ると、日本では 67% を占めることになる。

東京工業大学原子炉工学研究所の加速器の表

加速器名	完成年度	加速粒子/入出エネルギー	使用内容
1. 核研 I H 型原理実証線形加速器	1983	H/15~160keV/u	加速器研究
2. I H 型重イオン線形加速器 (1)	1984	H~Cl/0.24~2.4MeV/u	材料研究
3. I H 型重イオン線形加速器 (2)	1985	H~Cl/2.4~3.4MeV/u	材料研究
4. I H Q 型原理実証線形加速器	1988	H / 0.8~2.0MeV	加速器研究
5. 高加速 R F Q 型線形加速器	1993	H~Xe/5~210keV/u	プラズマ、核融合、加速器研究
6. PET 用 I H 型線形加速器	1995	H,D/0.1~1.7MeV/u	医療 PET の RI 用
7. ファラレーン、クラスター加速装置	1997	Cn/0.3MeV	クラスター研究
8. 半導体用 I H Q 型線形加速器	1998	H~As/20~145keV/u	半導体生産
9. リッジトロン型原理実証電子加速器	2000	e /2.5MeV	加速器研究
10. A P F · I H 型原理実証線形加速器	1985	H~As/11~88keV/u	加速器研究
11. 100mA 加速用 4R-RFQ 型線形加速器	2003	C/20~200keV/u	加速器研究
12. ガン治療テスト APF-IH 型線形加速器	2004	H~C/0.04~2.0MeV/u	加速器研究
13. AMS 用 IH 型重イオン線形加速器	2004	H~Xe/35~350keV/u	分析研究

立命館大学における加速器に関わる研究

立命館大 / 光子研 山田廣成

H.Yamada (Ritsumeikan Univ. / Photon Production Laboratory Ltd.)

2001年のWS以来、立命館大学に於ける加速器研究には長足の発展があった。厳密に述べるならば、加速器開発は、(株)光子発生技術研究所(光子研)を主体に展開し、利用を立命館大学のCOE研究員が展開するという形である。光子研スタッフ7名、COEスタッフ10名という陣容で展開している。2001年に基盤研究Sを獲得してMIRRORCLE-6Xを完成させたことと、2002年に21世紀COEに採択されて、放射光生命科学センターが誕生したことが特筆すべき事である。

MIRRORCLE-6X (図1)

1/2共鳴入射による蓄積電流値は、入射直後で50A、寿命約20ms、繰り返し最大400Hzである。直径1~10ミクロンのターゲットを挿入してX線を出す。MIRRORCLE-6XはハードX線専用マシンであり、医療用イメージング、X線顕微鏡、タンパク質構造解析、重元素の蛍光X線分析、癌照射実験、新しい放射線発生機構の研究等を中心に展開している。最近計測した結果によれば、X線強度は、Brightnessにして 10^{11} 光子である。ピークブライトネスでは、 10^{13} を越える値である。放射角が85mradと広いために、波長当たり全光子数は、 10^{11} 光子と大型放射光を上回り、レントゲン写真を0.5秒で撮像できる。大型動物や人体の撮像が可能である。1ミクロンという光源点の大きさが特長で、SPRING-8より一桁小さな値である。その意味で、MIRRORCLE-6Xは、世界最高品質のX線を発生している。MIRRORCLE-6Xの特長は、拡大像を撮像できる事にも現れる。光源点小さく、発散角が大きいため可能で、現在10倍までは鮮明な拡大像が撮れる。

今後の改造は、Brightnessで 10^{13} 光子(ピークで 10^{15})を目指しており、時間の問題である。改造点は、現在の真空度 10^{-5} Paを 10^{-7} Paにすること。10kWの加速パワー投入に成功することである。現在は1kWである。また、遷移放射を含めた新しい放射線発生機構で、100倍ほどが期待できるので、様々な限界を突破出来ると考えている。

MIRRORCLE-20

一方、2000年に完成したMIRRORCLE-20は遠赤外線専用に転換して、大型放射光を凌ぐ遠赤外線の発生に成功した。理屈は簡単である。遠赤外線領域では、全周から出る放射光の波長当たり全光量は、電子エネルギーに依存しない。そこで、MIRRORCLE-20の電子軌道の回りに、環状ミラーを配置して光を集めた。分光しないで、冷却MCTで計測した結果、平均1mWが得られている。蓄積電流値は2.5Aで、寿命12msである、RF加速はしていない。寿命をさらに延ばすことができれば、寿命の分だけ平均パワーが大きくなる。

白色光は、或る意味で利用価値が高い。分光器を用いて、連続的に波長をスキャンできるからである。また、放射光はレーザーと違い、CWであり、安定している点で使いやすい。我々は、グレーチングを用いる分散型分光器と、FTIRを既に用意して、水・タンパク質のダイナミクス研究、

ガン細胞への効果、タンパク質触媒反応の遠赤外線応答研究、神経細胞への、赤外線効果研究をスタートした。生体化学反応を遠赤外線でコントロールするのが夢である。

MIRRORCLE-20SX

MIRRORCLE-20SX は軟 X 線専用マシンであり、X 線リソグラフを目的としている。遷移放射を用いて軟 X 線を発生する。光量は、 $100\text{mW}/\text{cm}^2$ を期待している。この値は、AURORA の 10 倍に相当する。これにより、産業界が X 線リソグラフを半導体生産に導入することを期待している。装置は、11 月に完成の予定で、立命館大学以外の場所に設置される。

MIRRORCLE-6S

将来計画として、MIRRORCLE-6X をさらに小型化して、医療専用マシンにする事を検討している。ガントリーに載せて、回転し、コーンビーム CT を行うことと、同時に、癌のスポット治療を行うことを目的としている。診断と治療を同じマシンで行うことが出来、患者を移動しないので、正確な癌治療が可能となる。MIRRORCLE-6X では、既に 1mm 以下の癌診断ができ、造影剤無しで、新生血管の撮像に成功している (図 2)。

[1] H. Yamada, Novel X-ray Source based on a tabletop synchrotron and its unique features, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research B199, 2003 pp.509-516.

[2] 立命館大学放射光生命科学センター <http://www.bkc.ritsumei.ac.jp/se/re/SLLS/>

[3] (株)光子発生技術研究所 <http://www.photon-production.co.jp/>

[4] 山田廣成、放射線産業 102 (2004) pp.18-27

[5] Ed. by H. Yamada, Proceedings of the Int. Sympo. on Portable Synchrotron Light Sources and Advanced Applications, American Institute of Physics (2004)

	みらくる 6X	みらくる 20	みらくる 20SX	みらくる 6S
マイクロトロン入射器エネルギー	6MeV	20MeV	20MeV	6MeV
最大ピーク電流値	100mA	23mA	100mA	100mA
パルス幅	1 μ s	1 μ s	1 μ s	1 μ s
入射繰り返し数	400Hz	100Hz	400Hz	400Hz
シンクロトロン電子エネルギー	6MeV	20MeV	20MeV	6MeV
完全円形シンクロトロン電磁石外径	60cm	120cm	80cm	< 40cm
軌道半径	15cm	15cm	15cm	< 10cm
蓄積電流値	50A	2.5A	50A	50A
放射スペクトル	10keV ~ 6MeV	臨界波長: 8 μ m	1 ~ 10keV	30 ~ 200keV
輝度/s, mrad ² , 0.1% band	10 ¹³ 光子 at 30keV	Average 60mW	100mW for 1keV	10 ¹⁵ 光子 at 30keV

図1 MIRRORCLE-6X synchrotron の外径 0.6m

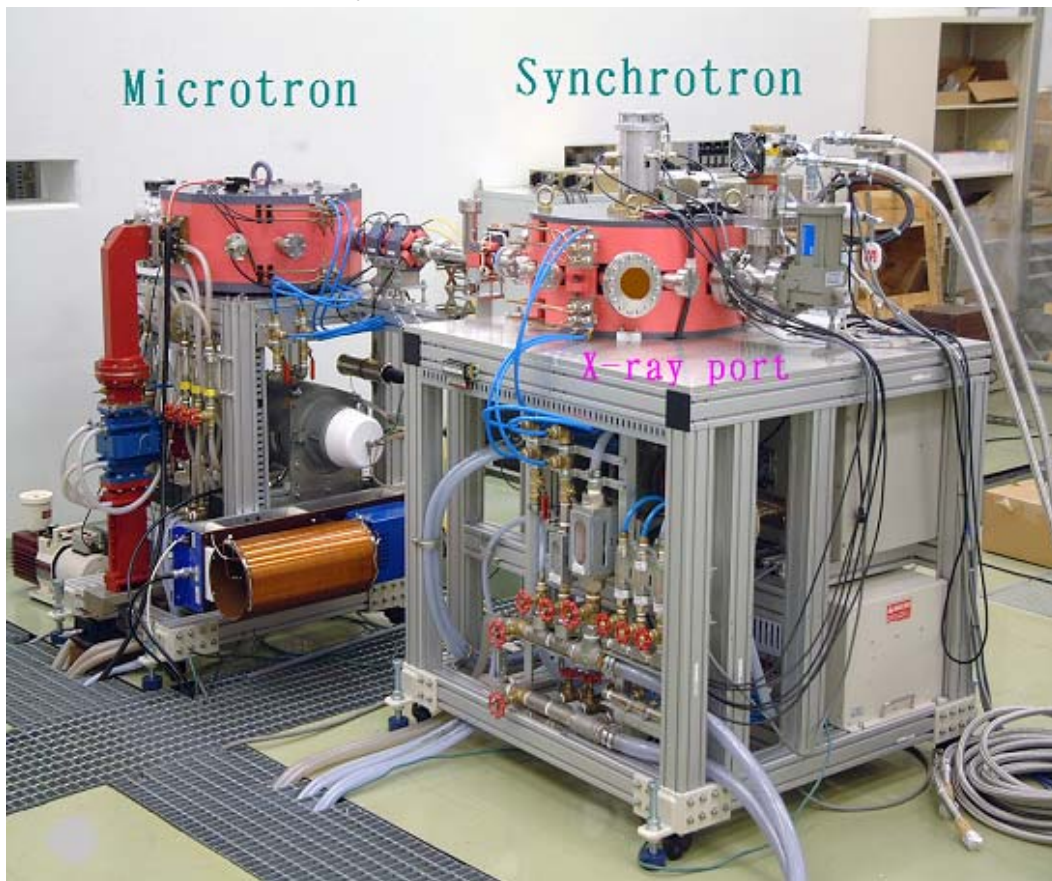
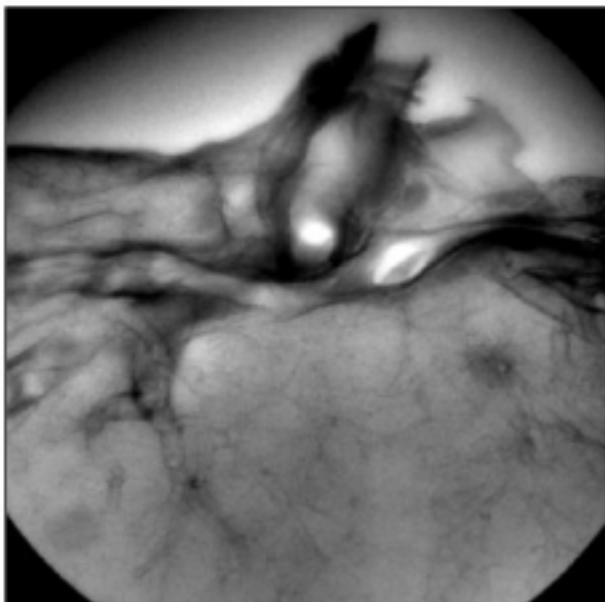


図2 MIRRORCLE-6X で撮像した人間の肺(滋賀医大村田研究室提供)気管支や血管の詳細が見える。



大阪府立大学先端科学研究所における加速器に関わる研究

阪府大先端研

奥田修一、谷口良一、松田八束、岡 喬、中村茂樹、小嶋崇夫、
伊藤憲男、岩瀬彰宏

S. Okuda, R. Taniguchi, Y. Matuda, T. Oka, S. Nakamura, T. Kojima,
N. Itoh and A. Iwase

(Research Institute for Advanced Science and Technology, Osaka Prefecture Univ.)

1. はじめに

大阪府立大学（OPU）先端科学研究所（先端研、<http://www.riast.osakafu-u.ac.jp/>）・放射線総合科学研究センターの18 MeV電子ライナックは大阪府立放射線中央研究所（大放研）に1962年に設置されて以来、40年余り稼働している。またそのほかに中・低エネルギーの電子およびイオン加速器があり、それぞれ特徴のある利用が行われてきた[1-4]。現在、装置の老朽化、維持費や人員の不足の問題があるが、平成17年度の法人化を期に、主としてOPU電子ライナックとイオン加速器の開発と整備を行い、他の小型加速器や大規模のガンマ線照射施設も合わせて種々の量子線の総合的利用施設としての展開をめざしている。

2. 主な加速器と利用の現状

主な加速器として、18 MeV OPU電子ライナック、600 keVコッククロフトウォルトン電子加速器、3 MeVタンデム型イオン加速器（陽子、He）のほか、100 keVトランス型電子加速器、30 keV重イオン加速器がある。これらの線源棟施設における設置状況を、大規模なコバルト60ガンマ線照射施設とともに図1に示す。タンデム型加速器は非管理区域の別棟にある。主な加速器の特性と利用分野は次のとおりである。

1) OPU 電子ライナック

[特性] エネルギー：最大18 MeV 平均電流：50 μ A パルス幅：50 ns-5 μ s
繰り返し：最大500 Hz

[利用] 照射、励起、放射、パルスラジオリシスなどの研究利用

2) コッククロフトウォルトン電子加速器

[特性] エネルギー：最大600 keV 平均電流：3 mA

[利用] 照射、励起、表面処理などの研究利用

3) タンデム型イオン加速器（陽子、He）

[特性] エネルギー：最高3 MeV

[利用] イオンビーム分析、PIXEなどの研究利用

OPU電子ライナックでは、学内共同利用研究、学外研究機関や民間との共同研究、民間への照射サービスが行われている。加速器室の地下にはコンベアーが設置され、偏向電磁石によりビームを左右に振りながら外部から多くの照射試料を送り込んで照射する。ビームは各照射室に輸送されて利用される。第3照射室には、パルスラジオリシスの実験系がある。ライナックは現在主に次のような研究課題で利用されている。

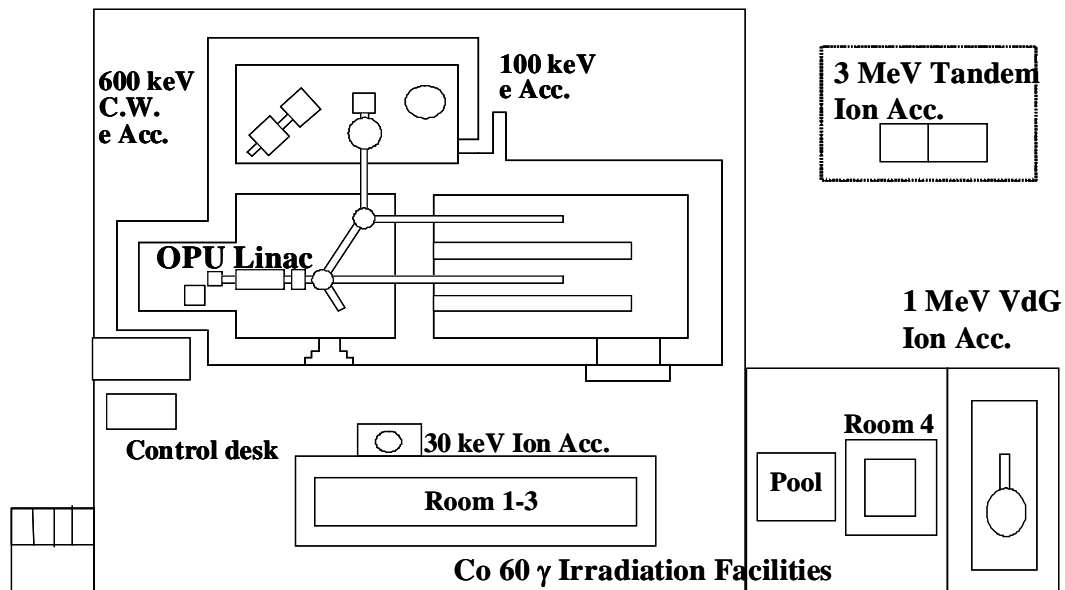


図1 大阪府立大学先端科学研究所の加速器、放射線照射施設の概念図

- 1) 超微弱電子ビームの発生と利用
- 2) 金属、半導体、複合材料、セラミックス、高分子化合物の照射
- 3) パルス放射線計測
- 4) 極微量ウランの分析
- 5) パルスラジオリシス

単純照射の実験では、10 MeV以下の比較的低いエネルギーの電子線を利用した単純な欠陥の生成について特徴ある利用研究が行われている。また超微弱ビームの利用では、電子線の強度を空間的な絞りとパルス幅の短縮により、電荷量3 fC/pulse以下まで弱めることに成功した。このビームの主な利用研究の課題は次のとおりである。

- 1) パルス電子線によるラジオグラフィ
- 2) 高感度線量計の電子線に対する特性測定
- 3) 制動放射X線のエネルギー分布測定
- 4) 細菌や微生物に対する照射効果の研究

2002年度に採択された大阪府立大の21世紀COEプログラム「水を反応場に用いる有機資源循環科学・工学」の研究の一分野として参画し、放射線を利用する反応の解析にパルスラジオリシス法を用いている。時間分解能は従来サブマイクロ秒程度であったが、今後要素開発により、1 nsからピコ秒を目標とする整備を計画している。

2003年3月、新たに寄附を受けた45 MeV電子ライナックは、旧ライナックとの組み合わせと、要素開発を加えて、新しい加速器利用系を構築する準備を行っている。現在電子銃部の開発と試験を開始している。将来のビーム利用の特徴として、高輝度、短パルス、超微弱電子線照射を中心とする。

コッククロフトウォルトン電子加速器の最大エネルギーは600 keVで、これまで主として、

物質の表面改質や、半導体の閾エネルギー付近での照射欠陥の研究に利用されてきた。このように比較的低いエネルギーで照射研究ができる加速器は全国にも数少なくなっている状況である。現在人工衛星に搭載する電子デバイスの照射試験などを進める予定で、ガンマ線と合わせて、総合的な放射線照射試験を可能にする計画である。関西の拠点となるようを準備している。

3 MeVタンデム型イオン加速器は水素とヘリウムイオンが利用でき、主としてPIXEやRBSによる固体表面分析に利用されている。現在、照射効果としての表面近傍の原子の拡散を調べる研究などが主要な研究課題である。

また1 MeVバンデグラフ加速器（陽子、重陽子）は、DT中性子源としての役割を終え、この加速器室を利用して新たに陽子サイクロトロンの開発計画がある。

3. まとめ

大阪府立大学先端科学研究所には、中・低エネルギーの電子およびイオン加速器があり、学内外の利用者が種々の研究や照射試験を行っている。大規模施設であるコバルト60ガンマ線源と合わせて、総合的な量子線利用施設としての展開をはかる。

参考文献

- [1] 大阪府立大学先端科学研究所年報.
- [2] S. Okabe, K. Tsumori, T. Tabata, K. Kawabata, K. Fukuda, R. Ito, S. Nakamura, T. Azuma and K. Kimura, Ann. Rept Radiat. Center Osaka Prefecture 3 (1962) 47.
- [3] 平成14年度大阪府立大学先端科学研究所放射線照射施設共同利用報告書, 2003.
- [4] 平成15年度大阪府立大学先端科学研究所放射線施設共同利用報告書, 2004.

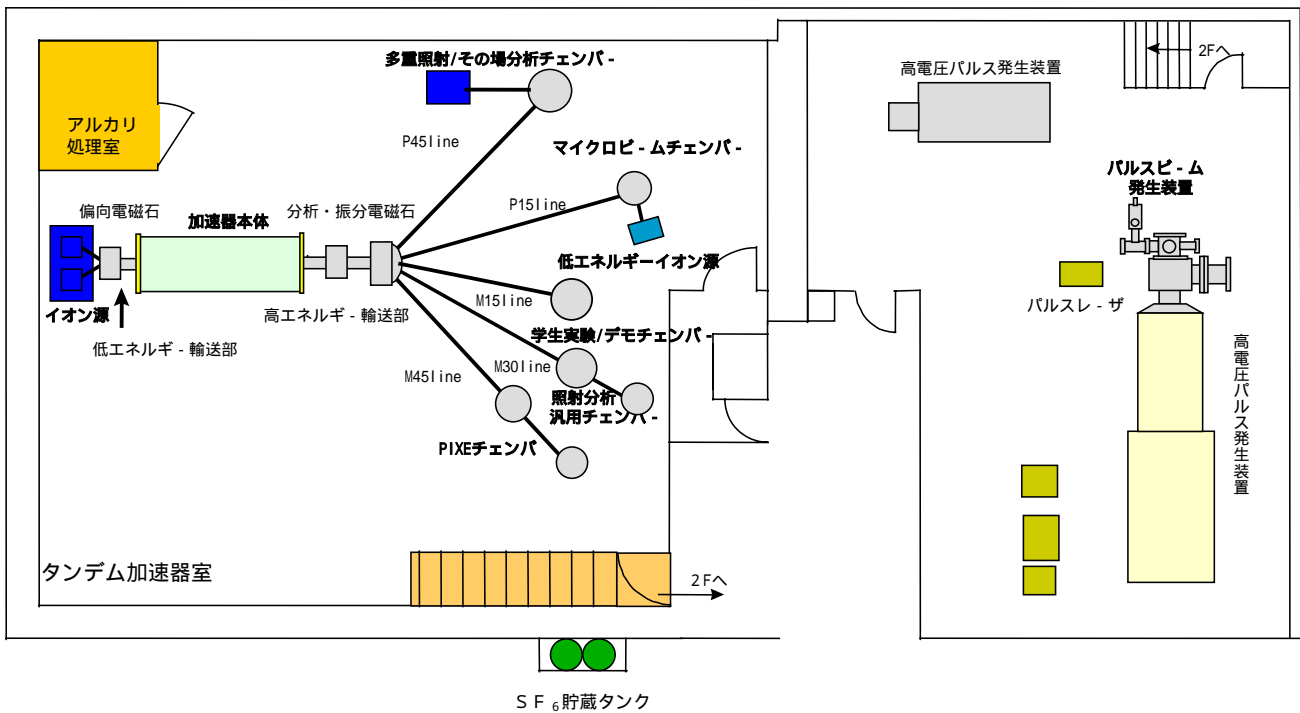
神戸大学における加速器に関わる研究

神大海事科学 北村 晃

A. Kitamura (Faculty of Maritime Sciences, Kobe Univ.)

1. はじめに

教育研究目的の加速器は、海事科学部の加速器・粒子線実験施設のみである。本施設は、海事科学部の前身である神戸商船大学の原子動力学科に、1980-81年の特別設備費で設置された核反応工学実験設備である。それは、核反応を応用する工学、原子核エネルギー利用上の工学的問題、そして海洋環境科学に関連する種々の問題を教育・研究することを目的としている。タンデムファンデグラフ型静電加速器ペレットロン5SDH2がその中核装置であり、パルスイオン注入装置を付属設備としている。1997年度の更新以降、学外共同利用設備として使用されてきた。



2. 加速器の仕様

加速器名	(A) タンデムペレットロン 5SDH2	(B) パルスビーム発生器 ER-2
加速粒子	P, He ²⁺ , C ⁴⁺ , 他各種重イオン(5 価程度以下)	p, C ⁺ , F ⁻
最高エネルギー	1.7 MV tandem	0.4 MV
平均電流	1 μA	---
ピーク電流	1 μA	陽子 20 kA、電子 130kA
パルス幅	---	60 ns
繰り返し	---	0.1 Hz

主な用途	核融合材料分析、環境試料分析、ナノスケール照射効果の研究、放射線検出器の研究、中性子の発生と応用	大強度ビーム発生、瞬間大強度ビーム照射効果の研究
その他特記事項	ビームライン 5 本	蓄積エネルギー5kJ

3. 近年の利用状況（加速器利用研究テーマ一覧）

- (A1) 分析利用：深部重水素分布の加速器分析法の開発、/ ERD分析法における試料表面の巨視的・微視的凹凸の影響と補正、/ H($^{19}\text{F}, \alpha\gamma$) ^{16}O 核反応分析の高精度化、/ 固体内核反応と軽元素のイオンビーム分析における同時検出法の応用、/ Ca/PdD_x試料における重水素ビーム誘起核反応の評価、/ コレクタプローブERDA-RBS法によるトカマクSOLプラズマの密度・温度・不純物計測、/ Tiの重水素保持に与えるHe照射効果の核反応分析、/ 核融合炉第一壁としてのLi薄膜の低エネルギー水素同位体との相互作用の研究、/ 核融合炉ブランケット材としてのLi化合物の分析、/ エアロゾル物質のPIXE分析による陸起源大気と海洋性大気の混合の研究、/ 海洋微生物と船底塗料中有機スズ化合物の相互作用の研究
- (A2) ビーム-固体相互作用・照射効果：その場吸蔵・照射・加速器分析体系を用いたAu/Pd内D(d,p)反応率の研究、/ ポリマへのイオンビーム照射効果、/ イオンビームグラフト重合による機能性ポリマの作製、/ イオン入射による飛跡形成機構の研究、/ イオンビーム誘起発光現象の研究、/ 半導体へのイオン照射におけるシングルイベント効果と複合効果、/ 半導体検出器内蔵ガスカウンタを用いた多粒子同時分析
- (A3) 二次粒子発生： $^{13}\text{C}(p,\gamma)^{14}\text{N}$ 反応生成 γ 線の共鳴吸収を利用した麻薬・火薬検査システムの概念設計/ 単色中性子の発生とブランケット材料研究への利用
- (A4) 学生実験・公開講座・デモ実験：Rutherford散乱の観測（3年学生実験）/ 環境関連試料のナノ分析技術講習（高度技術研修）/ 原子を操る（公開講座）/ ビームの可視化と磁場による荷電粒子偏向の観測（施設公開デモ実験）/ 大気照射PIXE分析（施設公開デモ実験）
- (B1) 瞬間大電力熱源：エネルギー密度1-10J/cm²のPIBによるアブレーション機構の研究、/ 核融合炉ブランケットの研究（模擬負荷）/ 大電力積源としての利用
- (B2) 二次粒子発生：パルス細管放電プラズマによるXUVレーザー発振

4. 今後の方向

国立大学法人化後、設備維持のために、学内外利用者の増加が一層重要になっている。利用者層の拡大のためには下記事項が必要であり、当面の課題としている。

(1) 設備の広報：

広範な分野に加速器設備の存在と有用性を認識してもらうことが第一義的に重要である。

(2) 機能の多様化：

複合照射設備の充実、*in-situ*分析・測定系の複合化の徹底、マイクロビームの高度利用など広範な需要に備えることが必要である。

(3) 利用分野の多様化：

上記(1)と(2)に関連して、粒子ビームの様々な用途を開発することが重要であり、われわれ自らも広く応用分野を模索している。

NewSUBARU における加速器に関わる研究

兵庫県立大高度研 安東愛之輔

A. Ando (NewSUBARU/LASTI, Univ. of Hyogo)

1. はじめに

ニュースバルは、放射光の産業利用により兵庫県下の企業の「ハイテク化」と新しい光源開発を目指して建設された。前者の目的からリングのエネルギーは、ミリメートル・オーダーの深さの微細加工(LIGA)が可能な $3 \sim 6$ keV の放射光が充分得られるように設定すると共に、時流の低エミッタンス化は重点から外した。産業利用では、全日本規模での共同研究が進捗しているだけでなく、具体的に商品の大量生産を念頭に置いた地元企業の進出があり、ほぼ初期目標を達成している。放射光産業利用の超微細加工分野では、世界的にも牽引車の役割を果たしている。光源開発では 15 m の長直線部を 2カ所設け、レーザーなど他ビームとの相互作用を自由に行えるようにすると共に、逆偏向電磁石を導入し、極短バンチ長電子ビームの生成を目指すことにした。また「Negative Alpha-p」運転において、ビーム物理学に新しい知見をもたらす可能性があるだけでなく、全バンチ長：1mm以下のビームを安定に蓄積し、コヒーレント・ミリ波を供給できる道が開けつつある。施設の平面図を図 1 に示す。

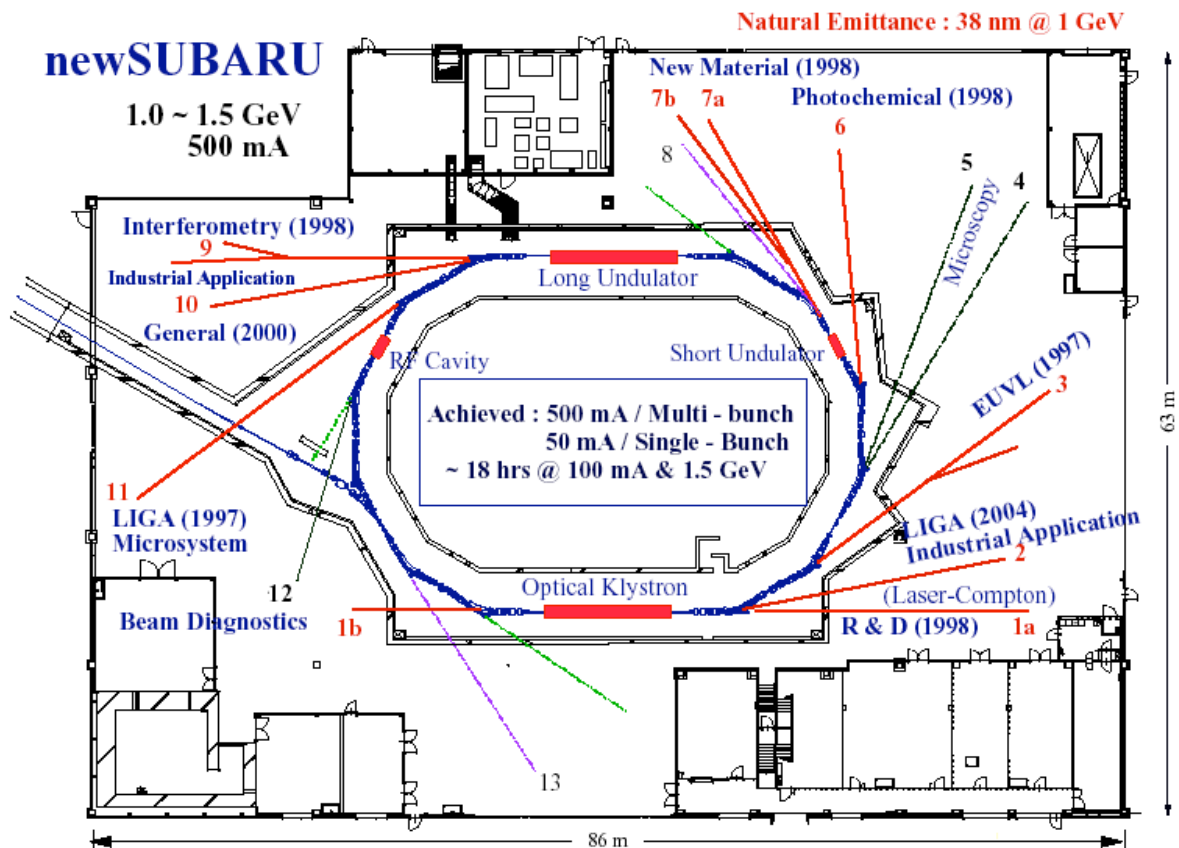


図 1 . NewSUBARU 施設平面図

2. NewSUBARU 蓄積リングの概要

NewSUBARU は SPring-8 の LINAC を入射器とする 1.5 GeV の放射光源蓄積リングを中心とする施設で、SPring-8 の協力の下建設され運営されている。リングは右表に主要パラメータを示すが、15 m -長直線部 2カ所と、6 台の逆偏向電磁石を持つ。逆偏向部での運動量分散をこの上下流にある 2 台の四極電磁石で調整し、momentum compaction factor (α_p) を正負自由に変更でき、サイクロトロンのように等時性運転ができる。

周長	118.731	m
入射エネルギー	1.0	GeV
最大エネルギー	1.5	GeV
自然エミッタンス	38 (86)	nm (1.5 GeV)
最大蓄積電流	500 (> 50)	mA (Single)
Tune	6.30 / 2.23	ν_x / ν_y
RF 周波数	499.95	MHz
最大 RF 出力	140	kW
挿入光源数	4	
ビームライン数	8 (11)	(含分岐)

電子のエネルギーや偏向電磁石の磁場の強さは、1.5 GeV にて光子の臨界エネルギーが ~ 3 keV (2.3 keV) となるようにした。電磁石の口径は COD を見込まないぎりぎり一杯に小さくした。(電子ビームに有効な内径：高さ±10 (14) mm/偏向(四極)電磁石、幅±34 mm)

3. 本格的産業利用

産業利用を目指した研究は大きく 3 分野に分かれる。(1) ビームライン (BL) BL-6, 7a&7b での表面改質を中心とする新素材開発。ここでは光化学反応と物性評価が不可欠であり、産業利用の基礎的知見を与えるものである。(2) BL - 3, 9, 10 での極端紫外光縮小投影露光による超 LSI 開発。ここでは光学素子の反射率絶対値測定や縮小光学系の歪み・精度測定・評価がともなう。(3) BL - 2 & 11での LIGA。ミクロン精度での大面積露光及び深さ 1 mm に迫るエッチングが基本であるが、更にマスク・パターン製作のみならず、金型への転写及び製品成形も重要である。

(1) に関しては図 2 に見られるように、KEK-PF 等では分離できていなかったスペクトルの Dip を明瞭に示すなど、非常に高分解能の BL-7b が BL-6 で種々の環境のもとで照射された材料表面の改質を理論的に明らかにしている。

(2) と (3) では、全日本規模での企業が共同して研究を精力的に進めており、極端紫外光縮小投影露光に関しては、ニュースバルは世界的な研究拠点の位置を築いている。

特に (3) では具体的に IT 機器に当面的を絞り、中小の企業も組織し、商品量産化の道を作りつつある。BL-2 本体はこれらの企業と県の共同出資で、また照射部は国のプロジェクト経費を得て建設され本格的に稼働を始めた。高度研では、放射光にてレジストの加工を行うのみならず、パターンの生成から、(樹脂)成形・大量生産に到るプロセスを一つのものとして研究を進めている。

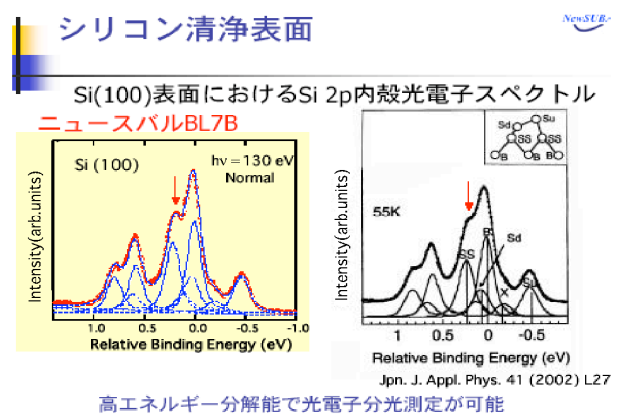


図 2. 高分解能ビームライン、BL-7b

4. 光源開発

4-1. レーザー・コンプトン後方散乱 γ 線

BL-1 にて波長1mmのレーザーを1GeV 電子ビームに衝突させ最大エネルギー~17 MeVの γ 線を発生させ、標的の透過率から断面積を既存他データと一致する結果を得ている。また γ 線 Radiography の試みとして金とアルミニウムの棒の束を通過後の映像を観測したところ、Al では γ 線 が収束した様な現象が見られる。

4-2. 極短パルス電子ビーム

逆偏向電磁石 (BI) での運動量分散を調整することにより、電子のエネルギー差による、周回時間のずれを任意に制御でき、パルス長を数ピコ秒まで短くできる。NewSUBARU蓄積リングはこれを正面に据えた世界初のリングであり、図3のように、現在半値全幅で~1 mm を達成している。これは実測データとしてはリングにおける世界最短電子ビームと言って良い。バンチ長を短くすると、電子の線密度或いはピーク電流が増大しビームが不安定になるため、蓄積電流は一般に微弱となる。しかしながらバンチ長と同程度の波長の放射光からみると、個々の電子は区別できず、バンチ全体が超電荷の1電子となる。即ちこの波長の放射光はコヒーレントで強度は電子数の2乗に比例する。NewSUBARUの蓄積電流は最大500mA : 1.2E12 electrons/sec であるが、超電荷電子ならば、6.0E6 個 : 2.4 μ A で同強度の放射光が得られる。(実際には~160個のバンチなので~6 μ Aとなる。)

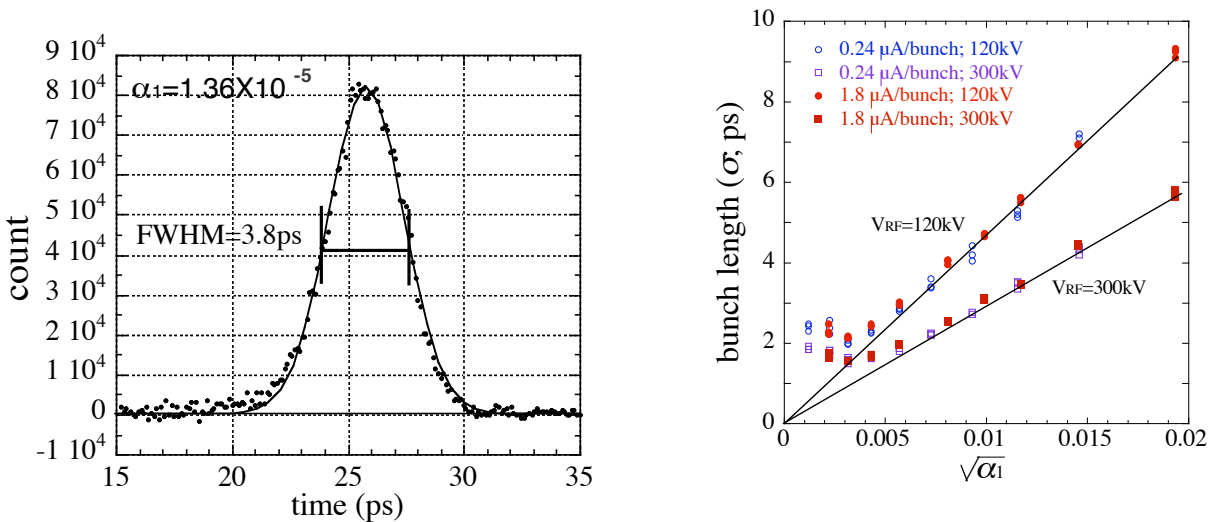


図3. 極短バンチ長電子ビーム

5. Negative Alpha - p の世界

通常の電子リングではエネルギーが大きい方にずれた電子は偏向電磁石で曲げられ難く外側の軌道を回る。即ち周回時間はエネルギーのずれに比例して大きくなる。これを α_p (momentum compaction factor) > 0 という。NewSUBARU蓄積リングでは、逆方向偏向電磁石の導入によりこの α_p を正負に自由に制御できる。 $\alpha_p < 0$ では $\alpha_p > 0$ より耐不安定

性に優れているという解析があり、極短バンチ運転に優れている可能性がある。

5-1. Fast Head Tail Instability

クロマティシティの大きさを1 或いはそれ以下に設定し、Fast Head Tail Instability (Transverse Mode Coupling Instability) を調べた。これはバンチの中で先頭から尻尾へと (NewSUBARU の場合) 垂直方向にいろいろなモードの振動が生じ、2つのモードの振動数が近づくと、振幅が増大しビーム損失に到る。m=0 モードはバンチ全体が、m=1 モードは先頭と尻尾が逆位相で、上下に振動する。データの比較から次のことが言える。

- 1) $\alpha_p > 0$ では~3mA/bunchで両モードの振動数の差が~0.001となり、これ以上蓄積できない。固有振動は明瞭に存在する。Bunch Lengthening を考慮した理論とよく一致。
- 2) $\alpha_p < 0$ ではバンチ長一定とした計算と良く合うが、両モードの振動数の差が~0.001でも安定で、50mA/bunch以上蓄積が可能である。

固有振動は~0.8mA/bunch で見えなくなり、高調波を伴う新たなコヒーレント振動があらわれる。

通常のHead Tail に対しても振動は続くがビーム損失にはつながらない。

- 3) 計算で得られる増大率は測定から予想される値よりも50~100倍大きい。

5-2. Microwave Instability

バンチ内の電子は放射励起のためいろいろな振動をしているが、通常は放射減衰している。しかしバンチ電流が増大すると、真空チェンバーや加速空洞との相互作用で或る振動が増大することがある。特に縦方向振動 (エネルギー振動) では、この時エネルギー拡がりやバンチ長が大きくなる。これらが大きくなると電子密度が下がり増大が鈍る。電子ビームはこの二つの機構が平衡するエネルギー広がりやバンチ長で安定化する。これを Microwave Instability と称す。従来は ESRF や SuperACOのデータから、 $\alpha_p < 0$ では、 $\alpha_p > 0$ に比べ、バンチ長増大は抑えられるが、エネルギー幅が極端に増大し、シンクロトロン振動の結果バンチ長も極端に増大する、と予想されていたが、NewSUBARUでは、図4のように、増大はともに I_b (Bunch Current) の1/3乗の理論通りの結果を示した。($\alpha_p < 0$ の方が増大が穏やかな理由は不明。)

理論解析では α_p 正負での唯一の差はバンチの時間的構造にあるが、これが実際の Beam Dynamics にどのように反映されるか、更に定量的に把握することは、ビーム物理学へ新たな知見を提供するであろう。

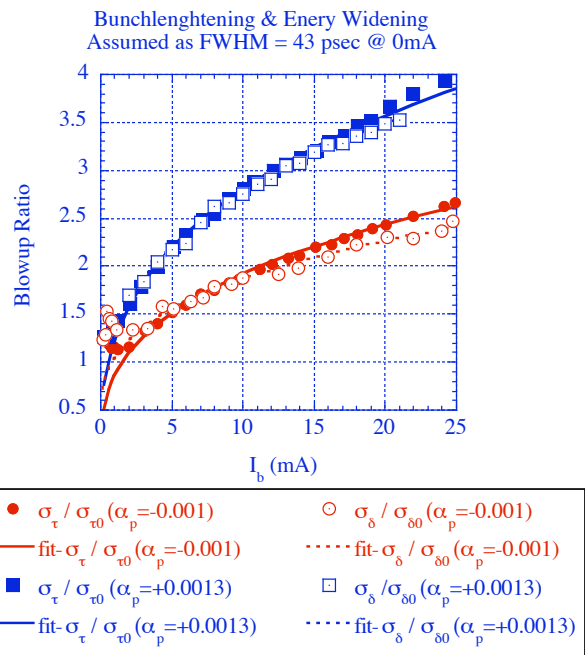


図4. Microwave Instabilityとバンチ長増大

6. 装置の運転・維持

6-1. 運転時間

通常の運転は、月（～火）は 1.5 GeV、火～金（土）は 1.0 GeV であり、利用運転は 11:00～21:00 である。2003年度は年間～2800時間運転されたがその内訳を図5に示す。1) 加速器をベースにしたActivityが非常に高い、2) 故障時間が無視できる、という特徴が読みとられる。

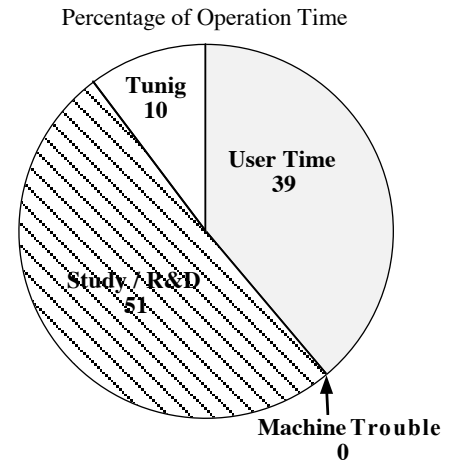


図5. 2003年間運転時間内数

6-2. 利用者

利用者は基本的に放射線従事者登録されるがその数は大略、高度研関係者：～20、外部：～90である。

民間（～25機関）の利用は大学との共同研究として実施されテイルが、EUVA など政府指導で組織された All Japan の半導体メーカー組織も含まれている。

6-3. 人員

NewSUBARU の運転は、JASRI (SPring-8)、原研、理研及び兵庫県との間の定期的な会議に基づく、JASRI - 大学共同立案の運転等計画、及びJASRI - 大学の運用等契約に従って、JASRI が責任を持つ体制となっている。運転専任人員としては、加速器オペレータ：2名枠、安全管理：2名枠、施設運転管理：3名を年間委託している。実際の運転ではSPring-8シフトリーダーのもとに、大学側から運転当番（対象者：高度研全教員＋客員等利用者：～20名）を配置している。実際には、緊急事態発生時に顕著となるが、SPring-8のスタッフが陰のスタッフとして支えている。

6-3. 終わりに

加速器装置の維持・運転には担当者が「楽しく」仕事に打ち込めることが重要である。製作時や購入時の性能のままで良いというのではなく、その加速器の個性を知り抜くことが、装置の性能を100%以上引き出すだけでなく、次期計画や将来として発展していく。電源や制御器でも当初のままではなく、科学技術の進捗に従い日々改良を加えていかなければ、その装置の明日は無いであろう。このことを通して加速器担当者も成長していく。その為には、加速器担当者が真の意味で「趣味的に楽しむ」ことを機関として保証することが重要である。又利用者はこの活動がより使いやすい且つ高性能な装置を生み出す基本的条件であるのご理解いただきたい。

ニュースバルでは、加速器担当者は困難且つ長期的なコミッションング時のみならず、昼夜を問わぬ、日常的な調整に従事しているのは、これが楽しいからであり、回りが理解しているからである。図5に於ける、故障時間：0はこの結果である。

広島大学における加速器に関わる研究開発

広大放射光科学研究センター 堀 利匡

T. Hori (Hiroshima Synchrotron Radiation Center, Hiroshima Univ.)

1. はじめに

広島大学には何種類かの加速器が存在する。これら施設の概要を以下に紹介する。基本的に、すべてビーム利用を目的としており、放射光源（HiSOR）を除いて特に加速器そのものの研究を推進する体制にはなっていない。各施設においては、装置の性能および利便性向上のための改善が、常に担当者によってなされている状況である。一部、電子周回装置（REFER）のように、専任スタッフのポストを持たず、ポスドクにその運転と維持改善業務が委ねられている施設もある。本格的な加速器の研究開発を目指すにはマンパワーが不足しており、その類の先進的研究は、むしろ施設を抱えていない学部・大学院の研究室において遂行されている。

2. 施設の概要

加速器施設は学内の4部局に分散配置されている。ただし、以下に示すように場所的には同居している装置もある。

a) 小型電子蓄積リング HiSOR^[1] (図1)

[所属：放射光科学研究センター]

主要仕様：E = 700 MeV, $I_{\text{stored}} = 350$ mA

$f_{\text{RF}} = 191$ MHz, 周長 L = 22 m, 臨界 $\lambda_c = 1.4$ nm

I.D. = リニヤ&ヘリカルアンジュレータ

BL = 16本まで可 (現 14、うちユーザー用 12)

HiSOR は挿入光源を有する世界最小の放射光源である。1996年に学内共同教育研究施設として設立された後、光源とBLの整備が進むにつれて外部ユーザーからの利用に対する要望が高まり、2002年度より全国共同利用施設となった。VUV~軟X線領域のSR光源として、固体物理をはじめとする物質科学ならびに関連分野における放射光利用研究に供されている。特に2基のアンジュレータ用BLは世界水準のエネルギー分解能 (≤ 1 meV) を有し、共同利用においても需要が高い。これまでに整備の完了したBL-1, -3, -7, -9Aが共同利用に開放されている。

リングの蓄積電流は仕様値300mAであるが、施設の放射線遮蔽能力等の事情により、当初は100mA、2000年より200mAで運転してきた経緯がある。2003年秋に高周波系の改善が実現し高調波の少ない改良型空洞を導入することができたので、現在は当初の仕様値を上回る350mA (注：施設利用許可申

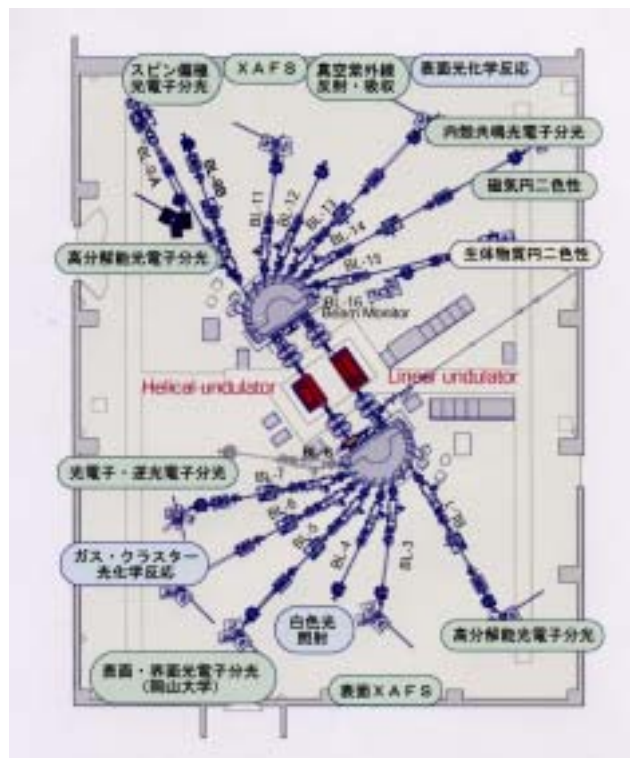


図1. HiSORの実験ホール (2004年8月)

請書の上限)で運転を行っている。将来的には500mAへの蓄積電流増強も視野に入れている。

b) 入射器マイクロトロン^[2](図2)

[所属:放射光科学研究センター]

主要仕様: $E = 150 \text{ MeV}$, $I_{\text{peak}} = 10 \text{ mA}$

繰返し&パルス幅 = $10\text{Hz} \times 0.2 \sim 3 \mu\text{sec}$

HiSORへの入射 = 1日1回(30分程度)

REFER(次項)への電子供給 ≤ 8 時間/日

シンクロトロンの入射器はライナックが一般的であり、このようにレーストラックマイクロトロンが採用された例は少ない。加速エネルギーに対してコンパクトな構造でスペースを節約できるのが最大の特徴である。本入射器は性格の異なる二つのリングHiSORとREFERに電子を供給する。1996年に完成したこれら設備のなかで、HiSORと入射器がセットになっており、REFERは予算・所属・目的等、すべてが別枠の構想で誕生したものである。

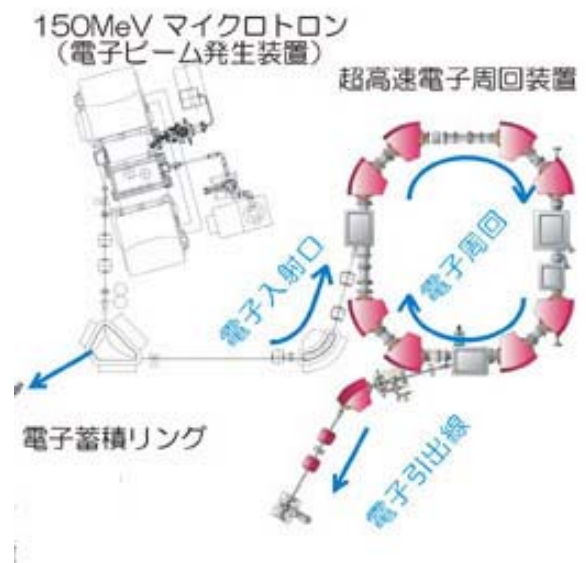


図2. 入射器マイクロトロンとREFER

c) 超高速電子周回装置REFER^[3](図2)

[所属:産学連携センター VBL Office]

主要仕様: $E = 150 \text{ MeV}$, $I_{\text{stored}} = 2 \text{ mA}$, 弱収束リング, $f_{\text{RF}} = 697.5 \text{ MHz}$ (2002年10月に空洞を追設)

周長 $L = 13.7 \text{ m}$, 引出ビームライン1本、内部標的用ポート4個

REFER (Relativistic Electron Facility for Education and Reserch)は、HiSORの入射器室に設置されている。上の入射器マイクロトロンの空き時間を有効活用してユニークな教育研究を行うことを目的に、ベンチャービジネスラボラトリ(現VBL Office)が1996年に設置した学内利用施設である。利用状況としては、内部標的実験と引出ビーム実験がほぼ半々である。ビーム強度は低いが高デューティファクターの電子ビームが利用できる特徴がある。これまでの代表的な研究として、パラメトリックX線の増大法、結晶内 e^+e^- 対創生断面積に関する研究、Be箔からの単色可変波長X線発生現象等の実験が挙げられる。



図3. バンドグラフAN2500の設備全景

d) バンドグラフAN2500^[4](図3)

[所属:大学院工学研究 科放射線総合実験室]

主要仕様: RF型およびPIG型イオン源

$V_{\text{terminal}} = 0.2 \sim 2.5 \text{ MV}$ (絶縁: $\text{SF}_6 / 7.5$ 気圧)

加速イオン種 = H , $^3, ^4\text{He}$, C , $^{14}, ^{15}\text{N}$, O , Ar 等

1982年、工学部の西条キャンパス移転に伴い、旧500kV コッククロフトの代替品として設置された。その後、PIXE や RBS など分析装置の内作による整備が進み、中四国地域唯一のルーチン分析が可能な施設となった。現在は、核反応法(NRA)・反跳粒子検出法(ERDA)や外部ビーム PIXE も加わり、守備範囲が更に広がっている。2001年3月の芸予地震において、後遺症が半年を経て顕在化したため復旧が難航(主に予算面)したが、2003年7月より運転を再開し性能も回復した。

e) 生物照射用中性子発生装置 HIRRAC^[5] (図4、5)

[所属：原爆放射線医科学研究所 放射線先端医学実験施設]

主要仕様： $V_{\text{terminal}} = 0.2 \sim 3.0 \text{ MV}$, 加速イオン種 = H, D, He

$I_{\text{beam}} = \text{max. } 1 \text{ mA (H, D), } 0.1 \text{ mA (He)}$

照射線量率(Dose rate) = max. 30 cGy/min

HIRRAC (Hiroshima University Radiobiological Research Accelerator) は1993年に完成した静電加速器であり、0.1~17 MeV の範囲で準単色中性子の発生が可能である。同施設には加速器に依らないRI等の放射線(X線・γ線・中性子)発生・照射装置も多く、国内でも数少ない放射線生物学のための放射線実験施設である。原爆の中性子の影響研究や中性子の生物効果のエネルギー依存性の研究の他に、微量元素分析(PIXE)や放射線ガン治療のための基礎実験、原子核物理実験にも利用される。

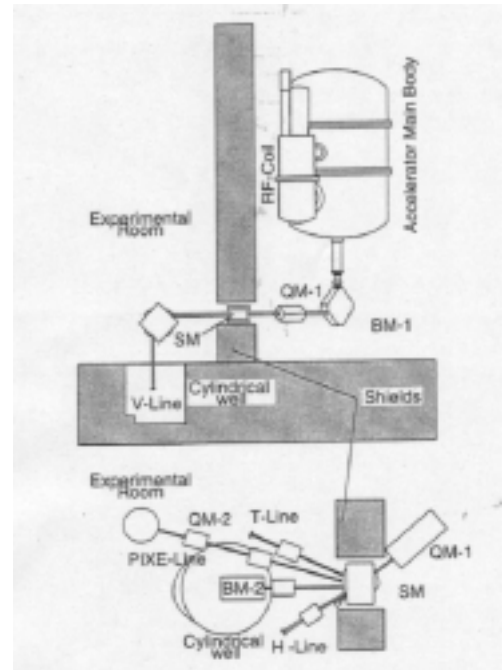


図4 . 3MV コッククロフト施設

3 . 終わりに

以上のように、4部局で5種類の加速器を保有している。これらのなかで最も規模の大きい全国共同利用施設 HiSOR といえども、ある意味でカタログ製品を購入して利用に専念するための装置と見なすことができる。勿論、加速器の高度化や性能向上および使い勝手を良くするための改善などは常に念頭にあるが、もう一步そこから踏み出すような新しい研究開発にまでは手が届かない(スタッフとマンパワーの絶対的不足)。

いずれ、放射光科学センター(HiSOR)においても次期計画を具体化すべき時期を迎えるであろう。そのような状況下では変化も期待できようが、当面は現有設備の円滑なる運営を心掛け、現行ユーザーに多大の成果を挙げてもらえるよう加速器(光源)をしっかりとサポートしてゆくのが最大の、そして手一杯の責務であると判断する。利用者の顕著なる研究成果なくして、これら加速器関連施設の将来に展望が開けないことは明らかである。



図5 . 3MV コッククロフト
(シェンケル型) 本体

研究開発という観点から見れば、上記施設とは直接の関わりを持たない学部/大学院において加速器に関連した基礎研究が実施されている。例えば、大学院先端物

質研究科にはビーム物理研究室があり、レーザープラズマ加速に関する研究とか、あるいは結晶ビームの基礎物性や生成法の理論的研究等がなされており、現在の広島大学における加速器の先端的研究開発の一端を知ることができる。詳しくは前回 2001 年の本ワークショップにおける報告がある^[6]。近い将来、学内関係者の総力を集結することができて加速器研究センター設立構想の類が実現すると理想的である。

謝 辞：

今回の発表および本報告書の作成にあたり、以下の方々より情報および資料を提供していただきました。ここに厚く感謝いたします。

- ・広島大学 大学院先端物質科学研究科 量子物質科学専攻：小方 厚 教授、遠藤 一太 教授
- ・広島大学 大学院工学研究科 機械システム工学専攻：西山 文隆 博士
- ・広島大学 原爆放射線医科学研究所 附属国際放射線情報センター：田中 憲一 博士

参考文献：

1. 堀 利匡 他、「小型放射光源 HiSOR の現状」、第 1 回日本加速器学会年会・第 29 回リニアック技術研究会、日大船橋、2004 年 8 月 4～6 日、pp.48-50
2. 堀 利匡、「小型放射光源用入射器マイクロトロンの研究開発」、総合研究大学院大学(2003 年度 学位論文)、http://www.kek.jp/sokendai/skd/degree/t/200303/09_hori_toshitada/thesis/thesis-j.pdf
3. 高橋 徹、「広島大学電子周回装置における教育研究」、高エネルギーニュース、Vol.21, No. 1, April/May, 2002, pp.21-26
4. 西山 文隆、「広島大 2.5 MV バンデグラフ加速器の現状」、第 17 回タンデム加速器及びその周辺技術の研究会、放射線医学総合研究所、2004 年 6 月 21～22 日
5. 遠藤 暁 他、「生物照射用中性子発生装置 (HIRRAC) について」、広島大学原爆放射能医学研究所年報、第 36 号、1995 年、pp.173-176
6. 小方 厚、「広島大学における加速器研究」、原子力分野における加速器の研究開発ワークショップ報告書 (KURRI-KR-68)、京都大学原子炉実験所、2001 年 8 月 7～8 日、pp.77-78

九州大学における加速器に関わる研究開発

九大院工 石橋健二

K.Ishibashi(Graduate School of Engineering, Kyushu Univ.)

九州大学には、次のように工学部コッククロフトワルトン加速器、理学部タンデム加速器、医学部附属病院小型サイクロトロンおよび応用力学研究所タンデトロンで研究が行われている。佐賀県シンクロトロン光応用研究施設との連携も進められており、さらにキャンパス移転に伴う新加速器の設置が計画されている。

九州大学工学部コッククロフトワルトン加速器

1. 加速器の仕様と設置年

高周波型コッククロフトワルトン加速器 500 kV 5mA 設置年: 1962年

2. これまでの研究成果を踏まえた今後の方向

T(d,n)⁴He 反応によって発生する 14 MeV 中性子を使用する施設であり、核融合炉等に関わる中性子原子核反応について、精力的に実験が行われてきた。さらに、中性子入射による光学ポテンシャルパラメータの系統性、変形パラメータ等の研究が行われた。現在は維持費が切れており加速器の運転を停止しており、高エネルギー加速器研究機構、大阪大学核物理研究センター、ロスアラモス中性子科学センター等の共同利用研究所において陽子または中性子入射による(p,nx), (p,p'x), (n,n'x)等の2重微分断面積の測定が行われている。

九州大学は、工学部を革きりに平成17年度から元岡地区へキャンパス移転が始まる予定である。新キャンパスでは、後述のように理学部と一緒に新加速器を設置・利用していく計画である。

九州大学理学部タンデム加速器

1. 加速器の仕様・設置年

10 MV タンデム静電加速器。1972年より4ヵ年計画で建設、1980年に最高電圧 11 MV を達成。電位勾配としては当時の水準を 50% 凌駕。加速粒子は原子番号 40 以下の原子イオン(主に H, D, Li, B, C, O, F, Si, S, Cl 等)。H, D に関しては偏極ビーム加速可能。加速ビーム強度は約 1 p·A (DC)。

2. これまでの研究成果を踏まえた今後の方向

本加速器は、原子核科学、工学、学際領域、放射線計測機器開発等の研究に幅広く活用されてきた。10 MeV 以上のイオンビーム加速能力を持つ装置としては関西以西で唯一のものであること、極めて安定性に優れた運転性能が維持されていることにより、理学部附属施設という制限にもかかわらず、近隣諸大学をはじめとして多くの大学の研究者に利用されてきた。

実験としては理学研究院原子核実験グループを中心とした原子核物理学の精密研究が主要であるが、原子力分野においても核データの系統的収集整備、炉材料の特性、鋳物資源熱履歴等、工学的研究にも幅広く活用されてきた。現在、加速器質量分析、天体核反応率直接測定、パルス中性子源等のプロジェクトが進行中である。

3. 元岡キャンパスにおける加速器計画

新キャンパス(元岡)では、工学部と協力して、次の2つの加速器を柱とする計画の実現に努力中である。

(1) 小型タンデム加速器(ターミナル電圧 5MV)を設置して、原子力研究だけでなく、学内からの要望の強い加速器質量分析を含む学際利用を行う。

(2) 小型 FFAF シンクロトロン(陽子 100MeV ~ 200MeV)を設置して、中間エネルギーの原子核研究をはじめ、原子力研究並びに材料科学、生物学、医学、薬学等の幅広い学問分野の研究を行う計画である。

佐賀県シンクロトロン光応用研究施設（九州大学関連研究分）

1．加速器の仕様と設置予定年

加速蓄積リング 最大電子エネルギー- 1.4GeV

蓄積電流値とビーム寿命

低エミッタンス(12nm-rad)モード 300mA/2.5 時間以下

高エミッタンス(73nm-rad)モード 300mA/5 時間以上

設置予定 2004 年度業務開始予定

2．原子力関連研究としての今後の方向

原子力関連分野として、今後、

(1) 入射器（電子リニアック）を利用した中エネルギー標識付き準単色中性子源

(2) レーザー逆コンプトン散乱による単色高エネルギーガンマ線源

による研究ができるように要望中である。

パネル討論の総括

研究会の最後に、前回と同様、パネル討論を開催した。最後まで多くの研究者が残られ、この分野のこれからについて熱心な討論が続いた。中心的な課題は、大学における加速器分野の研究の進め方であった。以下、座長の総括を記すが、これらは参加された方々の共通した認識といえる。

第二次大戦後の我が国の大学における加速器に関わる研究は順調ではなく、常に厳しい状況に置かれてきた。更に、2004年度の国立大学の法人化以降、経費がかかり、放射線管理など特殊な作業を要するこの分野は大学では生き残れないのではとも囁かれている。長年この分野の大学内の研究を支えてきた原子核・素粒子分野の研究者が、大学内でのこの分野の研究施設を必要としなくなっていることも事実である。現在でも、大学が多様な基礎・学際研究と人材育成を支えていることは言うまでもないが、多くの研究者からの発言は、大学内で今後どのようにこの使命を果たしていくかであった。

まず、大学における基礎研究の役割は今後とも重要であることは言うまでもない。筆者の身近な例として、加速粒子のスピン偏極技術がある。この技術は、我が国では1970年代に九州大学で初めて開発されたものであるが、九州大学の開発を基に実現した大阪大学核物理研究センターのサイクロトロンと、別方式の筑波大学と九州大学のタンデム型静電加速器に設置された3装置が長年使用され、世界に影響を与え、人材を輩出し続けてきた。大学の研究開発がなければ、この分野は我が国には育たなかったかもしれない。これは一例であり、多くの大学で「この技術は我々が支えている」という自負を持って研究が進められていると考えられる。

次に、大学が学際研究の宝庫であることを強調したい。材料照射・分析研究や加速器による年代測定など、近年話題を集めている研究は古く大学で始まったものであり、技術とともに関係する学術分野の研究者が周辺で活動していることが重要である。大学には加速器を支えている物理系の研究者以外に、化学、地球、天文、生命、材料、デバイス、システム、原子力、医学をはじめ、考古、美術史、地域環境などの人文系をも含む多様な分野の研究者が活動しており、第一線の研究と先端的研究装置が結びつけば、研究の発展は著しいものがある。

そして、人材育成がある。加速器に関する研究開発と多様な業務を支えているのは、大学などで学んだ研究者・技術者であること、このような人材の育成に実験や装置が重要なことは言うまでもない。現在、大研究所においても人材育成が行われるようになってきていることも事実であるが、学生は先生や先輩の背を見て育つものであり、教養時代から関係する学術の雰囲気が必要ならば、その分野の人材育成は健全とは言えない。

以上、パネル討論についての座長の総括である。時間は約30分であったが、多くの研究者から、今回はもう少し長い時間をとって議論を深めるべきであるとのご意見をいただいた。特に、今回を含めて2回のシンポジウムで、全国のこの分野の研究者が置かれている状況について互いのコンセンサスが出来つつあり、今後は新たな展開を目指す方向を探ることが肝要であろうとの認識からである。

パネル討論を実施するにあたって、京都大学原子炉実験所をはじめ多くの方々には様々なご協力いただいた。心からお礼申し上げる次第である。

(文責：九州産業大学 的場 優)

平成 16 年度京都大学原子炉実験所ワークショップ
「原子力分野における加速器の研究開発 -新たな展開を目指して-」

共催 京都大学原子炉実験所、日本原子力学会加速器・ビーム科学部会
後援 日本学術会議
協賛 日本加速器学会、日本原子力学会

平成 16 年 8 月 10 日 13:00-18:00

13:00~13:15 開会：的場 優

挨拶：代谷誠治（京大原子炉）、柴田徳思（日本学術会議）

（座長：北大・鬼柳善明）

13:15~13:40 原研：水本元治

13:40~14:05 KEK：森 義治

14:05~14:30 理研：後藤 彰

14:30~14:55 放医研：野田耕司

（座長：兵庫県立大・安東愛之輔）

15:10~15:35 産総研：豊川弘之

15:35~16:00 SPring8：米原博人

16:00~16:25 分子研：加藤政博

16:25~17:00 東京大学（共同利用研を含む）：上坂 充・松崎浩之

17:00~17:20 東京理科大学：中井浩二

（座長：原研・水本元治）

17:30~18:00 ワークショップに寄せて：木原元央（日本加速器学会会長）

平成 16 年 8 月 11 日 9:00-17:00

（座長：京大・今井憲一）

9:00~9:25 若狭湾エネルギー研：大谷暢夫

9:25~9:50 九州 SL 研：冨增多喜夫

9:50~10:25 京都大学（共同利用研を含む）：谷垣 実・伊藤秋男

（座長：KEK・柴田徳思）

10:35~11:10 大阪大学（共同利用研を含む）：二宮史郎・田川精一

11:10~11:30 北海道大学：鬼柳善明

11:30~12:00 講演「日本における加速器の現状と先端科学技術への応用例」：田川精一

（座長：東北大・馬場 護）

13:00~13:20 東北大学：石井慶造

13:20~13:40 筑波大学：笹 公和

13:40~14:00 日本大学：田中俊成

14:00~14:20 東京工業大学：服部俊幸

14:20~14:40 立命館大学：山田廣成/長谷川大祐

14:40~15:00 大阪府立大学：奥田修一

（座長：阪大・田川精一）

15:10~15:30 神戸大学：北村 晃

15:30~15:50 兵庫県立大学：安東愛之輔

15:50~16:10 広島大学：堀 利匡

16:10~16:30 九州大学：石橋健二

（座長：九産大・的場）

16:30~17:00 パネル討論会

閉会：川瀬洋一

平成 16 年度京都大学原子炉実験所ワークショップ
「原子力分野における加速器の研究開発 -新たな展開を目指して-」

出席者名簿（順不同敬称略）

鬼柳善明	北大院工	水本元治	原研東海研
松本高明	北大院工	荒川和夫	原研高崎研
石井慶造	東北大院工	南波秀樹	原研高崎研
馬場 護	東北大院工	後藤 彰	理研
笹 公和	筑波大研究基盤総合センター	野田耕司	放医研
松崎浩之	東大原研総センター	豊川弘之	産総研
上坂 充	東大院工	加藤政博	分子研
服部俊幸	東京工大原子炉工研	米原博人	SPring-8
中井浩二	東理大	大谷暢夫	若狭湾エネルギー研
田中俊成	日大量子科研	富增多喜夫	九州シンクロトロン光センター
山田廣成	立命館大放射光生命科学研究センター	木原元央	日本加速器学会会長
長谷川大祐	立命館大（光子発生技術研）	代谷誠治	京大原子炉
井上 信	立命館大	福永俊晴	京大原子炉
今井憲一	京大院理	義家敏正	京大原子炉
伊藤秋男	京大院工	小野公二	京大原子炉
柴田裕実	京大院工	川瀬洋一	京大原子炉
田川精一	阪大産研	大久保嘉高	京大原子炉
二宮史郎	阪大核物理研究センター	古林 徹	京大原子炉
奥田修一	大阪府立大先端研	谷口秋洋	京大原子炉
北村 晃	神大海事科学	谷垣 実	京大原子炉
安東愛之輔	兵庫県立大高度産業科学技術研	高橋俊晴	京大原子炉
堀 利匡	広大放射光科学研究センター	高宮幸一	京大原子炉
的場 優	九州産業大工	木村康洋	京大原子炉
池田伸夫	九大院工	高見 清	京大原子炉
石橋健二	九大院工	竹下智義	京大原子炉
森 義治	KEK	小松史道	京大原子炉
柴田徳思	KEK	阿部尚也	京大原子炉
		長内昭宏	京大原子炉

以上 55 名

日本における加速器一覧(2004年)

参考資料

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
北海道大学						
工学研究科	ライナック	e	45 MeV	60 μ A	1974	中性子発生
東北大学						
工学研究科	ダイナミトロン	p,d,	0.7- 4.5 MV	3 mA	1974	分析、材料、中性子
	コッククロフト	p,d,	0.08-0.6 MV	1 mA	1965	教育
核理研	ライナック	e	30-300 MeV	10 μ A(220MeV)	1966	核物理
	ストレッチャーリング	e	0.62-1.2 GeV	20 mA(周回電流)	1999	核物理
サイクロRIセンター	AVFサイクロトロン	p,d, ,HI	10- 90 MeV	50 μ A(p)300 μ A(H-)	1998	核物理
	AVFサイクロトロン	p,d	12 MeV	50 μ A(p)	1998	医学利用
大学病院	AVFサイクロトロン	p,d	18 MeV	70 μ A(p)	2003	医学利用
電気通信研究所	バンデグラーフ	p,	1- 2.5 MV	150 μ A(p)	1981	半導体研究
金属材料研究所	タンデトロン	p, ,HI	0.1-1.7 MV	1-10 μ A(以外)	1990	材料研究
筑波大学						
研究基盤総合センター	タンデムバンデグラフ	p,d, ,HI	11 MV	3 μ A(p)	1976	多目的
応用加速器	タンデトロン	p, ,HI, クラスター	1 MV	3 μ A(p)	1998	多目的
陽子線医学利用研究センター	シンクロトロン	p	70-250 MeV	7 nA	2001	医学利用
東京大学						
工学研究科	ライナック	e	35 MeV	200 mA(1 μ s, peak)	1977	フェムト秒解析
	ライナック	e	18 MeV	1 kA(1ps, peak)	1987	フェムト秒解析
原総センター(東海)	バンデグラーフ	p,d, ,HI, 微粒子	3.75 MV		1984	微粒子加速
	タンデトロン	p,HI	1 MV		1984	多目的
原総センター(東京)	タンデムバンデグラフ	p,d,HI	5 MV		1995	加速器質量分析
	タンデトロン	p, ,HI	1.7 MV		1995	分析
東京工業大学						
理工学研究科	バンデグラフ	p, ,HI	4.75 MV		1978	元素分析
	バンデグラフ	p,d,	3.2 MV		1976	中性子発生
	タンデムバンデグラフ	p,HI	1.6 MV		1983	元素分析
	ライナック	p,HI	0.24-2.4MeV/u		1984	材料研究
	ライナック	p,HI	2.4-3.4 MeV/u		1985	材料研究
	ライナック(IH)	p	1.7 MeV		1995	加速器開発
	ライナック(IHQ)	p,HI	2.2 MeV		1998	加速器開発
	ライナック(RFQ)	p,HI	0.22-44 MeV		1993	加速器開発
	ライナック(APF-IH)	p,HI	0.085-1.3 MeV		2000	加速器開発

日本における加速器一覧(2004年)

参考資料

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
日本大学						
原子力研究所	ライナック	e	125 MeV	200 mA(20 μs)	1998	自由電子レーザー
東京理科大学						
IR FEL研究センター	ライナック	e	40 MeV	200 mA(5 μs)	2000	赤外自由電子レーザー
名古屋大学						
工学研究科	バンデグラフ	p, d, ³ He	3.75 MV	0.1-100 μA	1967	中性子発生
	バンデグラフ	p, ³ He	2.0 MV	20 μA	1981	表面解析
	イオン注入装置	p, H ⁺	20-200 kV	10 mA	1980	材料研究
年代測定センター	タンデトロン	C	2.5 MV	30 μA(C)	1996	年代測定
	タンデトロン	Be(改造中)	1.8 MV	1.5 μA(BeO)	1980	年代測定
京都大学						
理学研究科	タンデムバンデグラフ	p, ³ He, H ⁺	7.5 MV			加速器質量分析
工学研究科	タンデトロン	p, ³ He, H ⁺	1.7 MV	50 μA max	1988	イオン物質相互作用
	バンデグラフ	p, ³ He, H ⁺	2.5 MV	50 μA	1967	重イオン核物性
	バンデグラフ	e	2 MV	250 μA	1967	X線照射
	コッククロフト	p, H ⁺	0.25 MV	100 μA	1978	金属イオン物性
化学研究所	ライナック(RFQ)	p	7 MeV	100 μA	1991	イオン物質相互作用
	ライナック	e	100 MeV	2 μA	1995	入射器、物質照射
	電子蓄積リング	e	300 MeV	100 mA(蓄積電流)	1999	放射光
エネルギー理工研	タンデトロン	H ⁺	1.7 MV			元素分析
	タンデトロン(SE)		1 MV			元素分析
原子炉実験所	ライナック	e	46 MeV	500 mA(4 μs)	1965	中性子発生
	変圧型静電加速器	d	300 kV	5 mA	1976	中性子発生
立命館大学						
S Rセンター	超伝導シンクロトロン	e	570 MeV	300 mA(蓄積電流)	1995	放射光
	マイクロトロン	e	150 MeV	3 mA	1995	入射器
放射光生命科学	常電導シンクロトロン	e	50MeV max	750 mA(蓄積電流値)	2000	赤外線放射光、FEL
研究センター	マイクロトロン	e	20 MeV	30 mA, 100Hz	1998	入射器
Synchrotron Light	常電導シンクロトロン	e	6 MeV	2.5 A(蓄積電流値)	2003	高輝度ハードX線源
Life Science Center	マイクロトロン	e	6 MeV	100 mA, 400 Hz	2003	入射器

日本における加速器一覧(2004年)

参考資料

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
大阪大学						
工学研究科	コッククロフト	d	300 kV	20 mA	1981	中性子発生
	ライナック	e	165 MeV	80 A(24 μs)		自由電子レーザー
	ライナック	e	20 MeV	40 A(11.2 μs)		自由電子レーザー
核物理研究センター	リングサイクロトロン	p, d, ³ He, ⁴ He	400 MeV(p)		1991	原子核物理
産業科学研究所	ライナック	e	38 MeV	91nC(ピコ秒単パルス)		フェムト秒分光
	ライナック	e	122 MeV	400 mA(2 μs)		陽電子発生
理学部原子核実験施設	バンデグラフ	p, d, ³ He, ⁴ He	4.8 MeV(p)	200 μA	1965	核物理・核物性
大阪府立大学						
	電子ライナック	e	18 MeV	1 mA	1962	照射、放射線科学
	コッククロフト	e	600 keV	3 μA	1969	照射、表面処理
	タンデム	p, ³ He, ⁴ He	3 MeV()	50 nA	1997	イオンビーム分析
近畿大学						
原子力研究所	コッククロフト	d	150 kV		1962	中性子発生
神戸大学						
海事科学部	タンデムバンデグラフ	p, ³ He, ⁴ He	1.7 MV	1 μA	1997	分析
	パルスビーム発生器	p, ³ He, ⁴ He	0.4 MV	20 kA(60ns)	1980	大強度パルス
兵庫県立大学						
高度研	リナック	e	16 MeV			光源開発
高度研	電子蓄積リング	e	1.5 GeV	500 mA(蓄積電流)	1998	放射光
広島大学						
工学研究科	バンデグラフ	p, ³ He, ⁴ He	0.2-2.5 MV	150 μA(p)	1983	元素分析、表面解析
放射光科学研究セ	電子蓄積リング	e	700 MeV	350 mA(蓄積電流)	1996	放射光
	マイクロトロン	e	150 MeV	10 mA	1996	入射器
産学連携センター	電子周回装置	e	150 MeV	2 mA	1996	教育研究
原爆放射線医科学研	コッククロフト	p, d, ³ He, ⁴ He	0.2-3.0 MV	1 mA	1993	中性子発生
九州大学						
工学研究科	コッククロフト	d	500 kV	5 mA	1962	中性子発生
理学研究科	タンデムバンデグラフ	p, d, ³ He, ⁴ He	10 MV	1 μA(p)	1980	核物理
応用力学研究所	タンデトロン	p, ³ He, ⁴ He	1 MV	1 μA(p)	1991	材料研究
アイソトープ協会						
仁科記念サイクロセンター	サイクロトロン	p, d	8.3MeV, 16.9MeV	50 μA	1990	医学利用

日本における加速器一覧(2004年)

参考資料

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
高エネルギー加速器研						
	シンクロトロン	p	12 GeV	0.6 μ A	1976	素粒子物理
	シンクロトロン	p	500 MeV	6 μ A	1975	入射器、中性子源
	ライナック	p	40 MeV	30 μ A	1974	入射器
	ライナック(RFQ)	p	4 MeV	600 μ A	2001	加速器開発
	ライナック	e	8 GeV	0.5 μ A	1982	入射器
	リング・コライダー	e, e ⁺	8 GeV, 3.5 GeV	800 mA(e), 1A(e ⁺)	1999	素粒子物理
	電子蓄積リング	e, e ⁺	3 GeV	450 mA (蓄積電流)	1982	放射光
	電子蓄積リング	e	6.5 GeV	100 mA (蓄積電流)	1987	単バンチ放射光
	ライナック	e	46 MeV	20 μ A	2001	陽電子生成
	ライナック	e	1.5 GeV	2 nA	1993	加速器開発
	ダンピングリング	e	1.5 GeV	2 nA	1996	加速器開発
日本原子力研究所						
東海研究所	タンデムバンデグラフ	p, ³ He	18 MV	3 μ A(p)	1982	核物理
	ライナック(超伝導)	e	20 MeV	4 mA	1993	自由電子レーザー
	変圧型静電加速器	d	450 kV	25 mA	1981	中性子発生
	バンデグラフ	p, d	4 MV	50 μ A	2000	中性子校正場
高崎研究所	AVFサイクロトロン	p, ³ He	5- 90 MeV((p)	30 μ A(p)	1993	多目的
	タンデムバンデグラフ	p, ³ He	3 MV	5 μ A(p)	1993	多目的
	コッククロフト	p, d, ³ He	3 MV	100 μ A(p)	1993	多目的
	イオン注入装置	³ He	400 kV	30 μ A(P)	1993	多目的
関西研究所	マイクロトロン	e	150MeV		2000	レーザー加速実験
むつ事業所	タンデトロン	³ He	3MV		1997	加速器質量分析
放射線医学総合研究所						
	シンクロトロン	³ He, ³ He	800 MeV/u	2x10 ⁹ pps	1994	医学利用
	サイクロトロン	p, d, ³ He	70 MeV (p)	50 μ A(p)	1974	医学利用
	タンデトロン	p, d	3.4 MeV	5 μ A(p)	1999	元素分析
産業技術総合研究所						
	ライナック	e	350 MeV	100 mA (ピーク電流)	1980	陽電子生成
	電子蓄積リング (TERAS)	e	300-800 MeV	300 mA (蓄積電流)	1981	放射光
	電子蓄積リング (NIJI-III)	e	150-600 MeV	200 mA (蓄積電流)	1989	放射光
	電子蓄積リング (NIJI-IV)	e	250-500 MeV	250 mA (蓄積電流)	1990	自由電子レーザー
	ペレット型加速器	p, d, ³ He	4 MeV	50 μ A(p)	1982	単色中性子標準、分析
	コッククロフト型加速器	p, d, ³ He	0.3 MeV	1 mA(p)	1986	単色中性子標準

日本における加速器一覧(2004年)

参考資料

研究機関	加速器の種類	加速粒子	加速エネルギー	ビーム電流	設置年	主な使用目的
理化学研究所	リングサイクロトロン	p, H ⁺	540 MeV		1986	核物理
分子科学研究所	電子蓄積リング	e	750 MeV	350 mA (蓄積電流)	1983	放射光
若狭湾エネルギー研究セ	シェンケル型タンデム	p, ³ He, H ⁺	5MV	100 μA(p)	2000	多目的
	シンクロトロン	p, ³ He, H ⁺	200 MeV	10 nA(p)	2000	多目的
SPring-8	電子蓄積リング	e	8 GeV	100 mA (蓄積電流)	1996	放射光
佐賀SL施設	電子蓄積リング	e	1.4 GeV	300 mA (蓄積電流)	建設中	放射光