

原子力分野における加速器の研究開発ワークショップ
21世紀における加速器・ビーム科学の研究開発の在り方

Proceedings of the Workshop on
Research and Development of Accelerators in Atomic Energy Field
- Perspective of the R&D of Accelerator・Beam Science in the 21 Century -

開催日時 平成 13 年 8 月 7 日、8 日
(August 7- 8, 2001)

主 催 京都大学原子炉実験所
日本学会議
(核科学総合研究連絡委員会原子力基礎研究専門委員会)
協 賛 日本原子力学会及び同加速器・ビーム科学部会

編集 的場 優、池田伸夫、川瀬洋一
Edited by M. MATOBA, N. IKEDA and Y. KAWASE

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

はじめに

加速器は古く 1900 年代の前半に素粒子・原子核分野の研究用装置として発明されました。その後、その開発・利用は大きく広がり、現在は学術に加えて、医療・産業分野などでの利用の広がり目覚ましいものがあります。さらに、今年度から KEK・原研の大強度加速器統合計画や理化学研究所の RI ビーム加速器計画の実施が決まり、建設が始まっており、同時に多くの研究機関において建設と運用が続いています。また京都大学原子炉実験所では、次期計画として加速器駆動未臨界炉に関する基礎研究の推進が期待されています。

このような加速器に関わる分野の広がりについて、加速器自体の問題からその利用まで、研究開発の現状とこれからについて学術的に考えることを目的にワークショップ「原子力分野における加速器の研究開発」が開催されました。平成 13 年 8 月 7-8 日、夏の真っ盛りに、全国の 23 の研究機関から 50 人以上の関係者が集まり、熱のこもった報告と議論が行われ、最新の情報を共有するとともに、お互いの認識を新たにすることが出来ました。

ここにこのワークショップの報告をまとめましたのでお届けします。ご活用いただければ幸いです。会議中に開催されたパネル討論では、数年後に向けてまた新しい話題を準備して開いてはとの声が沸きあがっていました。

このワークショップは、京都大学原子炉実験所および日本学術会議の共催、日本原子力学会および同加速器・ビーム科学部会の協賛により開催されましたが、関係者各位には大変お世話になりました。この場を借りて、心よりお礼申し上げます。

平成 13 年 12 月

九州大学大学院工学研究院 的場 優
九州大学大学院工学研究院 池田 伸夫
京都大学原子炉実験所 川瀬 洋一

P r e f a c e

The accelerator was invented in first period of the 20 century to provide a powerful tool to investigate 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. In this year, the JAERI-KEK Joint Project on High-Intensity Proton Accelerator and the RIKEN RI-Beam Factory have been approved by Japanese Government. In the Research Reactor Institute (RRI), Kyoto University, an anticipated project of accelerator-driven subcritical reactor has been proposed as a next generation neutron source.

In order to discuss the present status and the future plan in the R & D on accelerator itself and their applications, in accordance with these remarkable progresses in accelerator related fields, a work-shop on “research and development of accelerators in atomic energy field” was held on August 7-8, 2001, in hot summer days. Over 50 participants from 23 research laboratories in Japan joined together in the RRI, Kyoto University, and new data of all the participated facilities were reported and hot discussions were performed. The information on recent status of facilities and problems to be resolved have been made clear commonly in participants.

Here, the proceedings of the work-shop are presented. We hope that this report will contribute to the great progress in related research fields. The next work-shop on this field was desired by many participants, in the session of panel-discussion, to be held again in near future with new fruitful topics.

This work-shop was co-sponsored by the RRI, Kyoto University and Science Council of Japan with supports of the Atomic Energy Society of Japan and its division of Accelerator and Beam Applications. We would like to express many thanks to these organizations and supporting staffs for holding this nice meeting.

December, 2001

M. Matoba (Faculty of Engineering, Kyushu University)

N. Ikeda (Faculty of Engineering, Kyushu University)

Y. Kawase (Research Reactor Institute, Kyoto University)

Editors

目 次

あいさつ：「加速器・ビーム科学の進展とその果たす役割」…………… (1)	
的場 優(九大院工)	
M. Matoba (Graduate School of Engineering, Kyushu Univ.)	

ワーキンググループ「原子力分野における加速器開発」の趣旨…………… (4)	
柴田徳思 (KEK 加速器 放射線科学センター)	
T. Shibata (Radiation Science Center, KEK)	

ビーム利用の広がりとその経済効果…………… (6)	
田川精一 (阪大産研)	
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) 北大における加速器に関わる研究…………… (11)	
住吉孝、鬼柳善明(北大院工)	
T. Sumiyoshi and Y. Kiyonagi (Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ.)	

2) 東北大学工学研究科における加速器の利用状況と将来計画…………… (14)	
石井 慶造 松山 成男 (東北大院工)	
K. Ishii and S. Matsuyama (Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)	

3) 筑波大学における加速器に関わる研究…………… (19)	
古野興平 (筑波大学加速器センター) 榮 武二 (筑波大陽子線医学利用研究センター)	
K. Furuno (Tandem Accelerator Center, Univ. of Tsukuba) and S. Takeji (Proton Medical Research Center, Univ. of Tsukuba)	

4) 東京大学工学部の加速器利用…………… (21)	
中沢正治 (東大院工)	
M. Nakazawa (Graduate School of Engineering, Univ. of Tokyo)	

5) 東大原施の現状報告および将来計画…………… (23)	
渡部貴宏、勝村庸介、上坂 充(東大院工原施)	
T. Watanabe, Y. Katamura and M. Uesaka (Nuclear Engineering Research Laboratory, The Univ. of Tokyo)	

6) 東大原総センターにおける加速器による研究…………… (27)	
岩井岳夫、柴田裕実、松崎浩之 (東大原総センター)	
T. Iwai, H. Shibata and H. Matuzaki (Research Center for Nuclear Science and Technology (RCNST), The Univ. of Tokyo)	

7) 東京工業大学における加速器に関わる研究…………… (30)	
服部俊幸、林崎規託 (東工大 原子炉工学研究所)	
T. Hattori and N. Hayashizaki (Res. Lab. Nuclear Reactor, Tokyo Inst. of Tech.)	

8) 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…………… (32)	
早川建 (日大原研)	
K. Hayakawa (Atomic Energy Research Institute, Nihon Univ.)	

- 9)名古屋大学の加速器利用施設の現状と名古屋大学 超小型放射光利用研究センター (NSSR) 計画…… (36)
 曾田 一雄、山本 洋、山根 義宏(名大院 工学研究科)、中村俊夫(名大年代測定総合研究センター)
 K. Soda, H. Yamamoto and Y. Yamane (Graduate School of Engineering, Nagoya Univ.),
 T. Nakamura (Center for Chronological Research, Nagoya Univ.)
- 10)京都大学における加速器に関わる研究開発 (I) …………… (42)
 今西信嗣 (京大院工)
 N. Imanishi (Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)
- 11)京都大学における加速器に関わる研究開発 () …………… (45)
 —大学における加速器・ビーム物理学の研究・教育のあり方—
 野田章(京大化研)
 A. Noda (Institute for Chemical Research, Kyoto Univ.)
- 12)京都大学原子炉実験所における加速器に関わる研究…………… (49)
 市原千博、高見 清、川瀬洋一 (京大原子炉)
 T. Ichihara, K. Takami and Y. Kawase (Research Reactor Institute, Kyoto Univ.)
- 13)立命館大学における加速器研究…………… (55)
 山田廣成 (立命館大理工)
 H. Yamada (Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.)
- 14)大阪大学の加速器施設…………… (59)
 田川精一 (阪大産研)
 S. Tagawa (The Institute of Scientific and Industrial Research, Osaka Univ.)
- 15)今更「オクタピアン」…………… (63)
 高橋亮人(阪大院工)
 A. Takahashi (Graduate School of Engineering, Osaka Univ.)
- 16)近畿大学における小型加速器の利用…………… (67)
 近藤嘉秀 (近大原研)
 Y. Kondo (Atomic Energy Research Institute, Kinki Univ.)
- 17)神戸商船大学における加速器に関わる研究…………… (68)
 北村 晃(神船大原子力)
 A. Kitamura (Department of Nuclear Engineering, Kobe University of Mercantile Marine)
- 18)newSUBARU での加速器研究…………… (72)
 安東 愛之輔 (姫工大高度研)
 A. Ando (Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry,
 Himeji Institute of Technology)
- 19)広島大学における加速器研究…………… (77)
 小方 厚 (広大院先端)
 A. Ogata (Graduate School of Advanced Sci. of Matter, Hiroshima Univ.)
- 20)九州大学における加速器に関わる研究…………… (79)
 石橋健二(九大院工)
 K. Ishibashi (Graduate School of Engineering, Kyushu Univ.)

- 21) KEKにおける加速器に関わる研究例の紹介…………… (84)
 伴 秀一 (KEK 加速器放射線科学センター)
 S. Ban (Radiation Research Center, KEK)
- 22) 原研東海研究所における加速器の現状と今後の計画…………… (87)
 横溝英明 (原研東海)
 H. Yokomizo (Center for Neutron Science, JAERI)
- 23) 原研高崎研究所における加速器の現状と今後の計画…………… (90)
 小原祥裕、西堂雅博 (原研高崎)
 Y. Ohara and M. Saidoh (Advanced Radiation Technology Center, JAERI)
- 24) 重粒子がん治療における加速器に関わる研究…………… (95)
 曾我文宣 (放医研)
 F. Soga (National Institute of Radiological Sciences)
- 25) 産総研電子加速器施設の現状と将来計画…………… (98)
 豊川弘之、大垣英明、三角智久、山田家和勝、清紀弘、大平俊之、鈴木良一、安本正人、
 小川博嗣、野口勉 (産業技術総合研究所)
 H. Toyokawa, H. Ohgaki, T. Mikado, K. Yamada, N. Sei, T. Ohdaira, R. Suzuki,
 M. Yasumoto, H. Ogawa, and T. Noguchi (National Institute of Advanced Industrial
 Science and Technology (AIST-Tsukuba))
- 26) 理化学研究所 R I ビームファクトリー計画…………… (103)
 矢野安重 (理研)
 Y. Yano (The Institute of Physical and Chemical Research)
- 27) 分子研 UVSOR における加速器に関わる研究…………… (107)
 加藤政博 (分子研)
 M. Katoh (Institute for Molecular Science)
- 28) (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…………… (110)
 大谷暢夫 (若狭湾エネルギー研究所)
 N. Otani (The Wakasa Wan Energy Research Center)
- 29) SPring -8 における加速器に関わる研究…………… (112)
 宮原義一 (高輝度光科学研究センター)
 Y. Miyahara (Japan Synchrotron Radiation Research Institute)
- 30) 佐賀県におけるシンクロトロン光応用研究施設 (仮称) 整備事業計画…………… (116)
 小川 博司 (佐賀大理)
 H. Ogawa (Faculty of Science, Saga Univ.)

パネル討論：

- 「加速器分野の広がり」と大学の役割」…………… (122)

参考資料

- ・ 日本における加速器一覧
- ・ 日本における加速器研究施設と利用研究

あいさつ： 「加速器・ビーム科学の進展とその果たす役割」

九州大学 的場 優

加速器は、原子核物理学分野の研究用装置として発明され、その後素粒子物理学分野の研究用装置として大きな発展を遂げた。現在は、非常に幅広い基礎・応用分野の研究用装置として利用され、さらに医学および産業用としての利用も目覚ましい。加速器自体の利用とともに、加速器の要素として開発された様々な技術の波及も大きな影響を与えている。これらの状況を整理すると、次のようになっていることが見てとれる。

まず第一に、ある分野のための加速器（目的加速器）としての発展であり、物理学、医学、放射光、・・・など「のための加速器」として、現在も極めて重要な位置を占めている。我が国の多くの国家プロジェクトから大学や企業の小型の装置まで、様々な加速器がこの目的で建設され、利用され、また計画されている。この分野は、古く素粒子や原子核実験に始まり、利用の目的毎に多数のグループが形成され、討論が活発に行われている。

第二に、加速器の種類（個別加速器）として独特の発展を遂げていることである。例えば、

- 電子加速器、電子線形加速器
- 静電加速器、タンデム型静電加速器
- サイクロトロン、等時性サイクロトロン
- シンクロトロン、弱収束・強収束シンクロトロン
- 蓄積・衝突加速器

などのような各種類の加速器に関して、それぞれ独自の分野を形成している。それぞれの発展について、研究会などが組織化され、活発に活動がなされている。

第三に、加速器とビームに関する学術（ビーム物理）と言うべき概念である。例えば

- ビームの発生、加速、収束、輸送、蓄積
- ビームの性質の制御、スピン偏極、位相、時間構造
- 磁界、真空、精密加工、表面、制御
- ビームと電磁場・物質場との相互作用
- 超伝導、高周波、極低温、レーザー

など様々なテーマから構成される学問分野として、重要な役割を果たしている。近年、強力な研究グループが組織化され、活発に活動している。

第四に、加速器とビームの利用（ビーム利用）の大きな広がりである。この中には、

- 学際利用、イオンビーム、電子ビーム、放射光、FEL、エネルギー、核融合
- 産業利用、X線照射、電子照射、イオン照射、RI製造、材料、微細加工
- 医学利用、診断、治療、RI製造・利用
- 基礎科学研究、素粒子・原子核・物性・宇宙・地球・材料・生命
- ビーム加速要素技術の波及

など基礎から応用までの極めて幅広い分野が関係している。この分野は、利用の目的毎に、

様々な学会の組織や研究会で幅広く議論されている。

第五に、加速器・施設の基盤技術の問題がある。加速器の利用の広がり、基盤、コスト、あるいは安全の視点から支えるものである。例えば、

- 放射線遮蔽、線量計測
- システム制御、信頼性の確保
- 運転管理、省エネルギー
- 施設建設、環境制御
- 放射線管理、安全一般

などの分野が考えられる。この分野は、加速器の利用をバランスよく進めるには不可欠な分野である。地味であるが、熱心に活動が続けられている。

以上のような状況を反映して、現在我国だけでも十指を越える研究者・技術者の団体(＊)が活動している。これらの団体の活動は、それぞれ上記の5つの概念のどれか、あるいはいくつかに当てはめることが出来よう。

最近の動きをみると、原研・K E K統合プロジェクトあるいは理研R Iビームプロジェクトなど、我国の国家予算が極めて困難な状態になっているにもかかわらず推進が決まっており、これらは加速器の他の様々な経常的な国家プロジェクトの実施とともに我国の社会に大きな影響を与えている。

原子力発電分野では、核燃料サイクルの確立と核廃棄物の処分、高速炉、プルサーマルなどの問題がいずれも困難な状況にある中で、加速器と原子炉を組み合わせた加速器駆動型原子炉の開発が注目されており、21世紀の半ばにおける核廃棄物の核変換処理と新エネルギー生産システムのオプション実現に向けて、様々な議論が始まっている。

医療や産業への放射線利用では、その経済規模がGDPにして4～8兆円と原子力発電のそれを越える規模になっており、社会に大きな影響を及ぼし始めていることが指摘されている。

このような多様な活動を支えているのは多く大学で学んだ研究者・技術者である。また、小型の装置からも様々な分野で多様な成果が得られていることを忘れてはいけない。しかし、大学のこの分野の研究環境が極めて厳しい状況になっていることが指摘されている。

以上のような状況から、これからの加速器やビームを利用する分野の役割は次のようにまとめることが出来よう。(第1図)

- (1) 国家的大型プロジェクトの推進
未来の人類、あるいは国民の負託に応える。
- (2) 産業・医療応用の広がり
現代社会からの要請に応える。
- (3) 加速器基盤科学技術
新しいビームの物理と安全・遮蔽に関する研究を推進する。
- (4) 地域の産業と文化の振興
地域の人々の期待に応える。

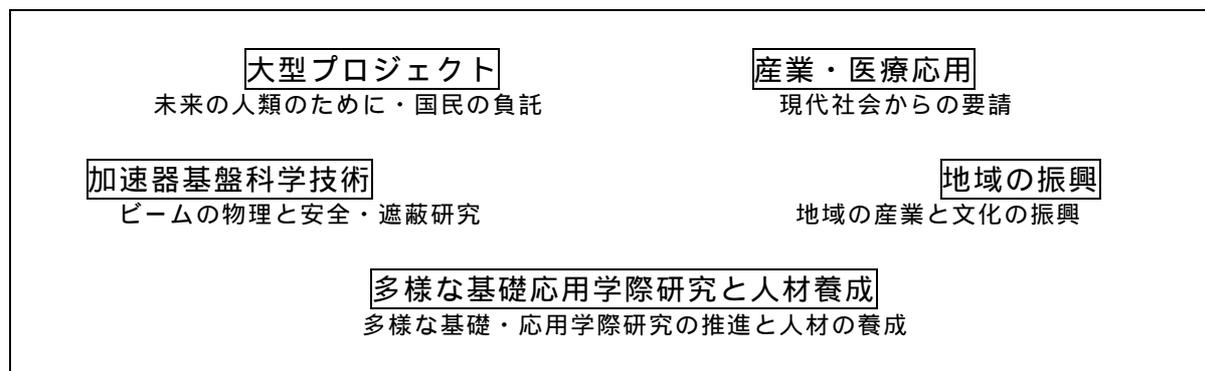
(5) 多様な基礎科学研究と人材養成

多様な基礎・応用学際研究を推進し、人材を養成する。

本ワークショップでは、従来の縦割りのあるいは分断された状況を克服すべく、出来るだけ多くの関連研究機関からの参加を期待し、幸いにも20以上の研究機関からの参加と報告を実現することが出来た。特に、加速器自体を研究している研究者、加速器および関連施設の利用の拡がりを支えている研究者、および加速器を幅広く利用している研究者が一堂に会し議論したことは、我が国では最初のことかと思われる。この点で本ワークショップの意義は大きい。逆に、講演時間がタイトになって個々の機関の問題が十分には議論できないという結果にもなってしまったが、参加者各位のご協力で、実のある議論が行われ、最初としては十分な成果が得られたと考えている。

本報告書は、2日間にわたる熱心な報告と議論の成果をまとめたものである。我が国の加速器に関わる研究開発を鳥瞰することが出来よう。この成果は、我々の活動の終結点ではなく、出発点であることを確認したい。

最後に、このワークショップを実施するにわたって、参加者はもちろん、京都大学原子炉実験所および日本学術会議の関係者を始め、様々な方々にお世話になった。ここに世話人を代表して心からお礼を申し上げたい。



第1図 これからの加速器・ビーム科学の役割

(*) (団体名は公式のものでない場合がある。) 日本物理学会原子核物理(実験)分科(原子核談話会)、日本物理学会高エネルギー物理学分科(高エネルギー同好会)、ビーム物理研究会、加速器同好会、静電(タンデム)加速器研究会、線形加速器研究会、日本放射光学会、日本原子力学会加速器・ビーム科学部会、電気化学会応用加速器及び関連技術研究会、医学物理学会、自由電子レーザー研究会など。

ワーキンググループ「原子力分野における加速器開発」の趣旨

柴田徳思（KEK 加速器 放射線科学センター）

T. Shibata (Radiation Science Center, KEK)

第 17 期 日本学術会議 核科学総合研究連絡委員会 原子力基礎研究専門委員会（委員長 柴田徳思）では、原子力分野における加速器を用いた研究の重要性を明らかにし今後の研究推進方策を検討すべくワーキンググループ（委員長 的場優）を設置し検討を開始した。ワーキンググループの立ち上げが 17 期途中であったことから検討時間が十分になく、18 期（委員長 田川精一）でも引き続き検討をすることとした。

大学における原子力研究における加速器の役割についての調査によると、小型加速器で特徴のある研究がなされていること、大学院教育に大きな役割を果たしていることなどが明らかになり、研究環境を整備することは将来の原子力分野の人材を育てる上で重要であることが分かる。一方、それぞれの施設が老朽化し維持費や研究費が十分でないこと、将来計画の実現性が明らかでないことなどの課題があることも示されている 1]。

原子力分野における研究教育環境は、各大学における施設や共同利用に供されている研究用原子炉の状況を見ても明らかなように、十分でないことが分かる。若手研究者及び大学院生が実験研究を進めることのできる環境を整備することは、将来の我国における原子力利用にとって不可欠で緊急な課題である。加速器を用いた研究は、若手研究者や大学院生が自ら課題を設定し実験設備を用意し、実験データの取得及び解析から研究成果を得るまでの全てをほとんど独自に経験できることから、研究者を養成する上で最良の研究環境といえる。また、大学における加速器を用いたユニークな研究が、新しいビーム利用という形で新分野を開いているという研究面からも重要な貢献がなされている。このように加速器を用いた原子力分野の研究の重要性は大きいものの、これまであまり重要性が強調されてこなかったために研究環境の整備が進んでいない面がある。

日本学術会議 核科学総合研究連絡委員会 原子力基礎研究専門委員会ではこのような研究環境を改善する方策を検討すべくワーキンググループを設置し検討を進めているところであり、原子力分野の加速器を用いる研究環境を整備する上で、現在我国における加速器施設の状況を把握し、今後の動向をつかむために今回の京大原子炉実験所におけるワークショップを開催することとした。

加速器の開発はこれまで素粒子・原子核の研究を目的になされてきたが、今回のワークショップに見られるように加速器の小型化といろいろな分野における利用が進んできている。加速器小型化及び広い分野における利用を目指した加速器開発を進めるには原子力分野の研究者の参加が望まれる。また、文部科学省の科学研究費補助金では、キーワード「加速器」は分科「物理学」の中の細目「素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理」に含まれているが、ビーム利用を含む広い分野に対応するために細目「量子ビーム科学」を設けてこの

分野の研究進展をはかる必要なども考えられる。

今後、加速器開発を含む原子力分野の研究環境の整備に向けて現状の分析を含めた検討を進め、特徴的な将来計画を提示するなど具体的にその推進方策を示し、その重要性を訴えて行くことが望まれる。ワーキンググループではこれらの検討を踏まえ原子力基礎研究専門委員会の対外報告としてとりまとめることを考えている。

参考文献

- 1 . T. Shibata, Proceeding of the 1998 Symposium on Nuclear Data, Nov. 19-20, JAERI, Tokai, Japan

ビーム利用の広がりとその経済効果

田川精一（阪大産研）

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

1. はじめに

放射線は19世紀の末に発見された当初より、素粒子、原子核、原子・分子などの物質構造を知るための必要な研究手段として用いられ、多大の貢献をしてきた。このことは現代科学の歩みの中で、重要な研究や多くのノーベル受賞者の研究に放射線が大きく関与していることから明らかだと思います。放射線の医療分野などへの応用は放射線（X線）発見直後から始まっています。その後の基礎研究分野での放射線利用の進展には自然界にある放射性元素や宇宙線の寄与もありますが、やはり加速器の貢献が大きいと思います。放射線の広い分野への応用が飛躍的に進展したのは、第2次世界大戦後で、現在、エネルギー利用、医療分野での診断や癌治療、非破壊検査、照射処理、材料改質、分析、微細加工など、様々の用途に広く利用されています。

2. 放射線利用の転換点

放射線利用という観点から、放射線の発見、加速器の出現、第2次世界大戦での原子炉などの飛躍的な技術の進歩の3つの大きな発展期に継ぐ、非常に大きな転換点が20世紀末から21世紀初頭に起こってきていると思います。従来の転換点はすべて飛躍的な発展でしたが、今回の転換点は複雑で、大発展への転換点か、減衰への転換点か、いずれの道に向かうのかということに対してはいろいろな意見が述べられています。この点をもう少し考えて見ることは重要な点だと思いますので、この大きな転換点の原因となっているいくつかの最近急激に変化している事項について述べます。

- (1) 大型加速器の建設費：放射線利用の最も強力な手段である加速器に関して、大型加速器の建設費の規模が国全体をみて決めないといけないうビッグプロジェクトになってきたということで、国全体としてなぜ大型加速器の建設を他のプロジェクトより先駆けて行わなければならないのかという問題が出てきました。
- (2) 新規なビームの質量両面での拡大：加速器からの1次の放射線が生成する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電離放射線の範疇に入れられないものも多数含まれていますし、この傾向は小型な加速器もしくはビーム発生器などではより顕著になっています。利用できるビームの広がりに関しては、放射線と言わず、量子ビームとかビームとかでまとめたらという意見もあります。
- (3) 放射線利用推進の動機の変化：大型加速器にしる、小型加速器にしる、放射線利用全体に放射線利用を推進してゆく動機が質的にも量的にも大きく変わってきたと思われることです。
- (4) 放射線利用の経済効果の規模が判明：最近の日米での本格的な調査により、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ました。

(5) 古い放射線の技術や知識の延長上にある利用が多く、かつ産業別の縦割り構造で分けられ、相互の連携は必ずしもよくありません。最近のビーム科学の発展をうまく取り入れた放射線利用の革新的な利用への要望が強くなっています。しかし、研究者の老齢化が進み、退職も含め研究開発能力が急激に落ち始めているため、対応は難しくなっています。

(6) 産業界では、放射線や加速器を用いていることを積極的に宣伝しなかったし、非常に閉鎖的な体質であったが、革新的な利用とか、合理的な放射線管理などをめざすなら、産官学が本当の意味で協力してゆけるオープンな共通基盤を構築できる体質に変換しないとやれないし、これからの放射線利用は閉鎖的では世の中に受け入れられないと思います。特に、革新的な放射線利用のための基盤研究を産官学で行うためには研究開発センターのような基盤研究が本当にいっしょに行える開かれた受け皿が不可欠で、かつこのような研究開発センターを本当の意味で機能的に運営することが望まれていると思われまます。研究者の老齢化や退職による研究開発能力の急落が起こる前に、対策が為されなければならないと思います。

3. 加速器・放射線利用の広がり

巻末に添付した日本における加速器研究施設と利用に関する図(巻末図)に国内の研究用加速器施設の分布図を示してあります。ここでは、病院などで診療に用いている膨大な数にのぼる医療用X線発生装置としてのライナック及び非破壊検査用のX線発生用ライナックは除いてあります¹。また、工業利用分野における電子線加速器やイオン注入用の加速器も除いてあります。表1に日本と米国における工業利用分野における電子線加速器の設置台数だけは示しておきます²。こうしてみると世の中にどれだけ多くの加速器があるかということが分かります。放射線の経済規模と同じで予想よりはるかに多くの加速器があることとその全体像がほとんど知られていないことが分かります。

巻末図に示すように研究用加速器だけでも東京近辺、関西を中心に膨大な数になります。大規模なも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に集中しており、予算も大研究所に集中しています。一方、中・小加速器については大学を中心に国内には膨大な数にのぼり、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上に既設の加速器の維持費もほとんど打ち切られています。多くの加速器が非常に広範な分野で活発に利用されています。最近では、巻末図にも載せられていない小型や手作りの小型加速器やビーム発生器による研究も大学などでは盛んに行われています。

表1. 1970年～1998年における日本と北米での電子加速器設置台数

利用分野	低エネルギー		中エネルギー		高エネルギー		合計	
	～300 kV		300 kV～3 MV		3 MV～10 MV			
	日本	北米	日本	北米	日本	北米	日本	北米
電線	1	5	50	49	0	0	51	54
発泡体	2	0	12	7	0	0	14	7
熱収縮	10	24	17	202	1	1	28	227
タイヤ	3	1	20	35	0	0	23	36
放射線硬化	44	150	2	7	0	0	46	157
排煙、排水処理	0	0	4	5	0	0	4	5
滅菌	3	8	2	1	6	5	11	14
受託、その他	3	18	10	16	3	10	16	44
研究開発	112	100	2	2	1	2	115	104
合計	178	306	119	324	11	18	308	648

4. 放射線利用の経済規模

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では、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³と平成 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¹を、工業、農業及び医学・医療につき把握すること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に基づいて、専門家が一年間評価基準をよく検討した結果を公表した。報告書は、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も検討しています。

図 1 に示すように放射線利用の経済規模は平成 9 年度で GDP の 1.7% で、図 2 から分かるように原子力発電によるエネルギー利用 (GDP の 1.5%) とほぼ同規模で、原子力利用全体では GDP の 3.2% となっています。

図 3 に工業分野における放射線の経済効果を、図 4 に半導体を除く工業分野における放射線の経済効果を示します。

図 1、3、4 を見ると半導体、自動車などの大きな産業規模の分野や医学・医療分野での放射線利用の経済規模が大きくなっています。

放射線利用の経済効果としても、最近の日米での本格的な調査により、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日本でもはるかに大きな規模 (GDP の 1.7%) であることが分かってきましたし、日米で調査方法が異なっていたので、いくつかの項目について日米における放射線の経済効果を同一の手法で評価しても、日本に比較して米国の規模が少し大きいと言う結果が出ました。これまでの日本における原子力関係の調査に比較するとずいぶん大きな数字ですが、米国のこれまでの調査とはよく対応します。理由としては、原子力産業の方々の調査だったので、半導体産業や自動車産業などへの放射線利用は原子力産業における放射線利用の範疇には含まれなかったのかも知れません。

図1 我が国の放射線利用経済規模(平成9年度)
- 各分野の割合 -

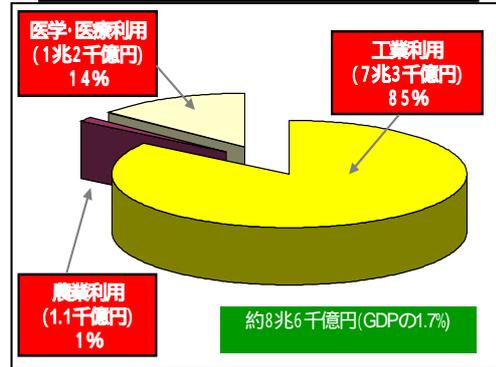


図2 原子力利用(放射線利用+エネルギー利用)
の経済規模
GDP 49.4兆円の3.2%に相当

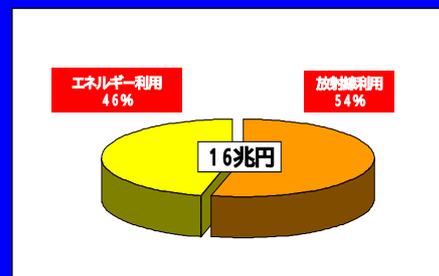


図3 放射線利用の経済規模:工業利用
(半導体を含んだ場合)

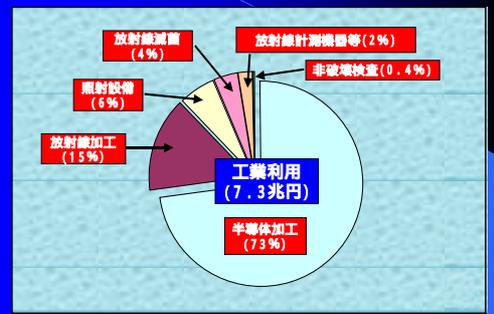
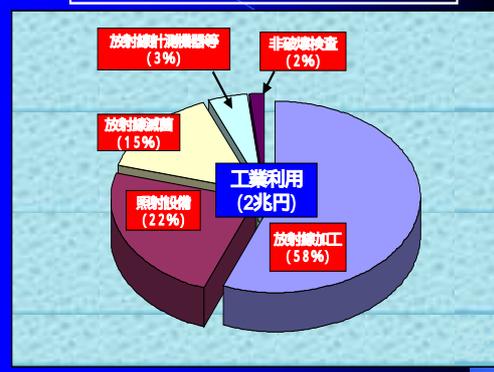


図4 放射線利用の経済規模:工業利用
(半導体5.4兆円を除外した場合)

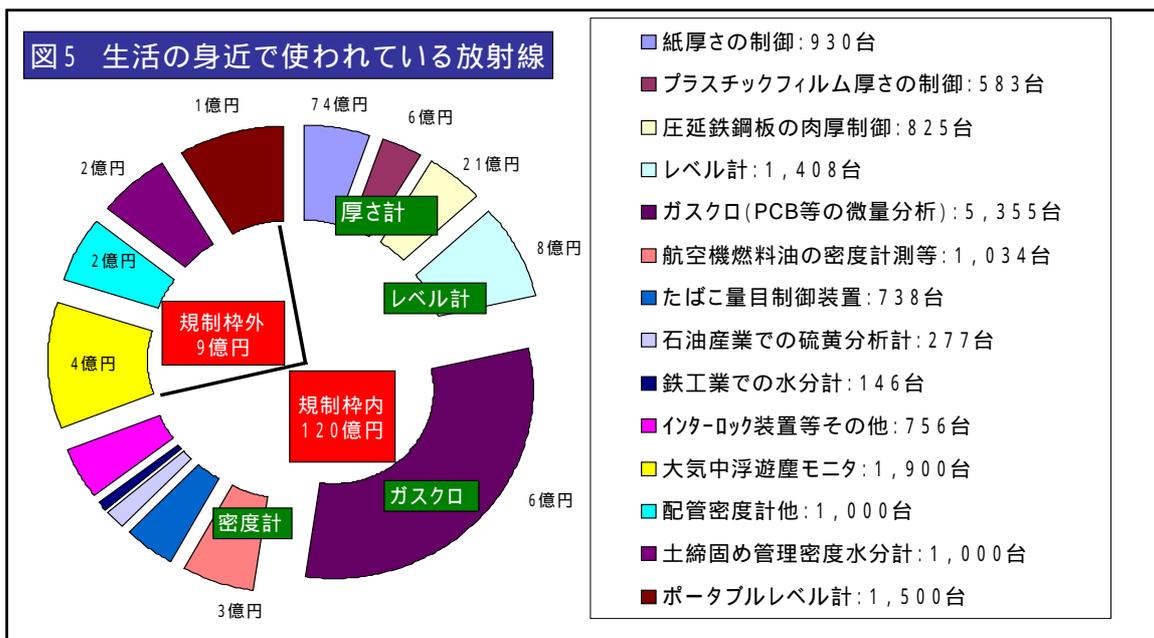


それ以外に、無意識的に放射線を使用していることに気がついていないケースも多いと思います。学問的には電離放射線である数百 keV の半導体への注入イオンや電子線露光装置からの数十 keV の電子線でも、利用している人には放射線という意識はほとんどなかったと思います。まして、このことは、産業界だけでなく、学問の世界でも同じだと思えます。放射線を用いて研究している研究者でも、立派な電離放射線である X 線を利用していても、シンクロトロン放射光の利用者は自分たちが放射線を利用している研究者であるという意識はほとんどないと思います。これは学問分野ごとに縦割りになっているため、産業界と似ていると思えます。

5 . 加速器・放射線利用の社会貢献

図 2 , 4、5 で示したように半導体、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放射線利用の分野もあるが、図 6 からわかるように経済規模は小さいが、国民生活には密接した非常に広範な放射線利用の分野が存在しています。

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ようになり、放射線もずいぶん身近なものになってきています。それにもかかわらず、放射線に関しては誤解だらけのことも多く、放射線の定義、放射線の単位、放射線被曝の単位など基本的なことについて原子力関係者でも知らない人が多いというような現実もあります。我々は日常的に、宇宙からの高エネルギー放射線だけでも毎秒何百個、全自然放射線では毎秒何万個も浴びていますし、ジェット機に乗れば放射線による被曝量は一桁以上多くなります。このように、我々は日常的に放射線をあびる世界に住んでいるので、まったく放射線のない世界が本当に最適な生活環境であると断定することはできないと思えます。放射線と仲良く、安全に、共生することが非常に重要だと思えます。そういう観点からは、決して放射線の機能を十分に活用しているとはとても思えない気がします。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と思われま



6. まとめ

加速器・放射線利用が大きな経済規模と深く国民生活に関与していることは確認されました。また、この分野の問題点のようなものもご理解いただけたと思います。今後は、急激に進展してきた新しい放射線・ビームを如何に新しい革新的な利用に結びつけてゆくかということが大事だと思います。また、世の中に放射線利用を正しく理解していただくことが重要だと思います。さらに、研究開発センターとか、小型加速器の開発、放射線管理の合理化など解決すべき問題も多いと思いますが⁴、急激に進展してきている新しい放射線や知識に基づいて夢のある研究や応用を生み出してゆくためには意欲ある優秀な若い世代の研究者の育成ができるシステムを構築することが非常に重要だと思います。

謝辞

我が国の放射線利用の経済規模に関する部分は文部科学省研究振興局量子放射線研究課からの委託による日本原子力研究所の放射線利用経済評価専門部会の調査による資料を利用させて頂いた。関係者に感謝します。特に、私が部会長をしていた工業利用作業部会の委員の方々と全体のとりまとめをして頂いた柳澤氏には感謝します。加速器の分布図については2つの委員会の作業に基づいたので、私が委員長をしているアイソトープ協会量子ビーム専門委員会の委員の方々と日本学術会議原子力基礎研究専門委員会委員長としての場先生に取りまとめをお願いしている原子力分野における加速器研究開発WGのメンバーの方々に感謝します。

参考

1. 平成 12 年度 放射線利用の国民生活に与える影響に関する研究 () 調査報告書「放射線の経済規模」日本原子力研究所放射線利用経済評価専門部会編、(2000)
2. アイソトープ協会量子ビーム専門委員会と日本学術会議原子力基礎研究専門委員会原子力分野における加速器研究開発WGの調査に基づいて作成
3. 平成 11 年度 報告書「放射線利用の国民生活に与える影響に関する研究」日本原子力研究所放射線利用経済評価専門部会編、(2001)
4. アイソトープ・放射線研究の過去・現在・未来 ISOTOPE NEWS(創立 50 周年記念号) No571(2001)

北大における加速器に関わる研究

住吉孝、鬼柳善明(北大院工)

T. Sumiyoshi and Y. Kiyanagi

(Graduate School of Engineering, Hokkaido Univ.)

1. 瞬間パルス状放射線発生装置

本装置は最大 45MeV の電子線型加速器である。性能は次の通りである。

項目	仕様	性能	
1.電子線エネルギー 最大(尖頭電流値 1mA のとき) 定常(尖頭電流値 100mA のとき)	45MeV 以上 30MeV 以上	3 μ sec 46MeV (50mA) 31.5MeV (210mA)	0.01 μ s 46MeV 46MeV
2.電子線電流 最大尖頭ビーム電流 最大平均ビーム電流	100mA 以上 60 μ A 以上	Center 140 μ A Right 100 μ A Left 90 μ A	4.5 μ A
3.電子線パルス パルス幅 繰り返し	0.01 ~ 3 μ s 10 ~ 200pps, 単発	同 左	
4.ビーム直径	15mm 以下	10mm	5mm

これを用いて、電子線・X線・中性子線を発生できる。中性子強度は最大約 6×10^{12} n/s である。本装置は昭和 36 年に完成した 4 MeV LINAC を母体として、原子工学科のみならず幅広い研究者を対象に各種の放射線の発生・計測・利用に関する研究及び教育に必要となる、強力な中性子線・ベータ線・ガンマ線の発生を目的として、昭和 49 年 3 月に完成した線型電子加速器である。その後、大きなトラブルもなく、25 年を過ぎた今でも順調に稼働しており、年間 2000 時間以上の利用実績がある。本加速器は一次放射線として電子線を、二次放射線としてガンマ線・中性子線を発生出来る小規模ながらパルスの強力な線源として、1.冷中性子準弾性散乱スペクトル測定、2.高速中性子スペクトル測定、3.中性子回折実験、4.パルスラジオリシス法による研究、5.放射化分析、6.放射線計測、7.パラメトリック X 線に関する研究、8.ビームモニタの開発等、種々の研究に利用されている。更に昭和 57 年度には地下実験室の増設が行われ、中性子飛行時間の測定をはじめ、各種の実験に使用されている。

現在、加速器のビーム強度の増大(約 2 倍)、短パルス化のための概算要求を出しているが、まだ認められていない。また、工学研究科全体としては附属施設に関連する組織の見直しが現在進められており、将来的にはその中で施設の更新が図られる可能性もある。

2. 加速器を利用した研究例

2.1 パルス中性子の発生と利用

北大加速器を用いて、大強度陽子加速器施設のための中性子源開発と中性子ビーム制御研究が主として行われている。中性子源開発の一つとして、液体水素減速材の開発を行っている。これまで、ノーマル水素について設計を行ってきたが、パラ水素を使うことによってさらに強度が 50%増やせることが分かった。エネルギースペクトルを図 1 に示す。

磁気レンズを用いた凸レンズと凹レンズを組み合わせた、中性子ビームの収束平行化装置の基礎実験を行なった。このためには中性子スピンの両レンズの間で反転させる必要がある。スピン反転なしでは収束傾向が、反転ありでは発散傾向が見られるはずである。図 2 に示すように、予想される傾向が見られ、装置が原理的には働いていることが実証された。

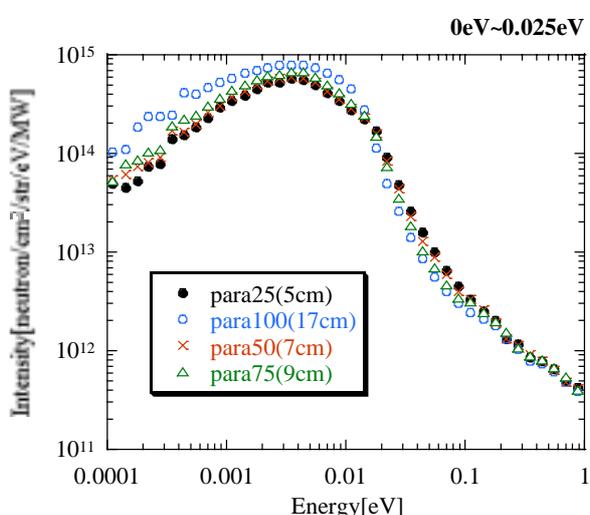


Fig.1 Neutron spectra emitted from hydrogen moderators, indicating superiority of para hydrogen.

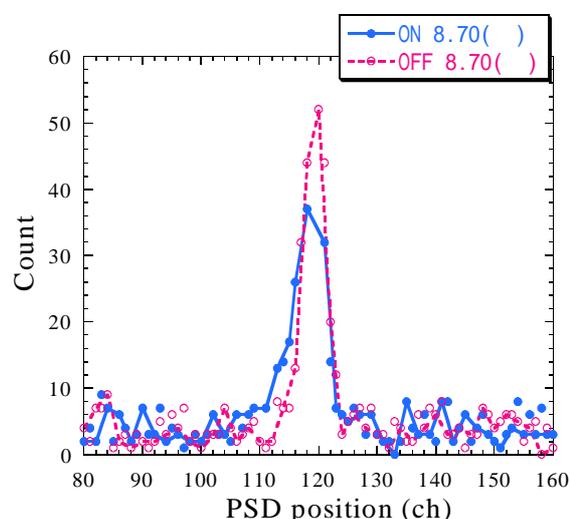


Fig.2 Spatial distributions of neutron beams focused and defocused by a magnetic neutron lens.

2.2 電子線型加速器によるパラメトリック X 線の発生とその利用

相対論的速度の荷電粒子を結晶に入射すると、X 線回折におけるブラッグ条件を満たす角度方向にパラメトリック X 線 (PXR) と呼ばれる単色の回折 X 線が発生する。電子線型加速器による PXR の発生と物性研究や他の分野への応用のための良質で波長可変の単色硬 X 線場の作成を目的に実験を行っている。標的には 200 ~ 600 μm 厚のシリコン単結晶を用い、15 ~ 30 keV の単色の PXR が観測されている。強度は $10^{-5} \sim 10^{-6}$ photon/electron 程度である。

PXR の単色性が良い、指向性がある、結晶の回転によりエネルギー連続可変であるなどの優れた特徴を考慮し、利用法として 2 つのことが考えられる。1 つは、発生した PXR を単色 X 線源として利用することである。もう 1 つは、発生した PXR そのものの特徴から、試料として用いた結晶の特性を求めるこ

とである。前者の例として、PXR のエネルギー範囲に K 吸収端を持つ物質の減衰係数の測定を、後者の例として半導体ウェーハのポリッシュ面の精度よいオフ角の決定法の開発を行っている。

2. 3 高・中速中性子スペクトル測定

高速炉材料などの核データの積分実験による評価の視点から、原子炉材料体系の高・中速中性子スペクトル測定を行っている。その一環として鉄・ポリエチレン多重層中性子遮蔽体の最適遮蔽配列を中性子スペクトルを指標として評価する実験を進めている。多重層遮蔽体の内部の中性子スペクトルを求めることにより、より合理的な遮蔽設計が期待できる。また電子線形加速器を使用した飛行時間法による中性子スペクトル測定のために、ドウェルタイムが 10ns の M C S ボードを T T L 素子を使って多相クロックサンプリング方式で開発している。

2. 4 パルスラジオリシスによる短寿命化学種の研究

短寿命のイオンやフリーラジカルの研究は、10ns の時間分解能のパルスラジオリシス装置と微細構造パルスとチェレンコフ光を分析光に利用した 30ps の時間分解能のストロボスコープ法パルスラジオリシス装置を用いて行なわれてきた。最近では、レーザーフラッシュフォトリシスと組み合わせて短寿命化学種の励起状態の反応の解明が行なわれている。

図 3 は八口カーボン中のキサントニルラジカルの電子線照射で生成するキサントニルラジカルの生成とレーザー照射によるブリーチを示している。酸素がないと溶媒からの塩素原子引き抜き反応が起こりパーマネントなブリーチが観測されるが、酸素存在下ではキサントニルラジカルとパーオキシラジカルの間の平衡反応によりキサントニルラジカルの回復が観測される。実線はコンプレックスを経由するキサントニルラジカルの生成や酸素存在下での平衡を考慮したシミュレーションにより求めた吸光度の時間変化である。

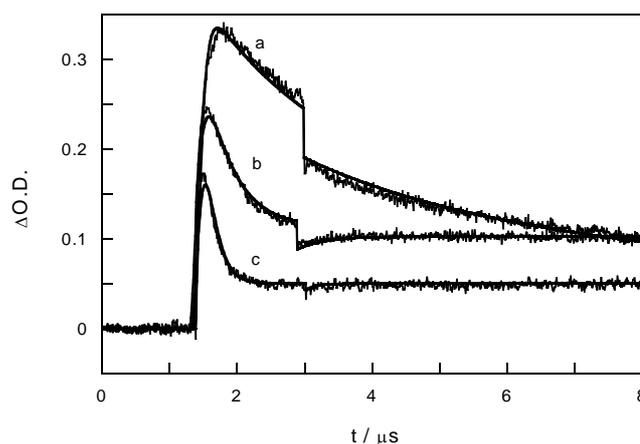


Fig.3 Pulse radiolysis-laser flash photolysis of xanthene in Ar(a), air(b), and oxygen(c) saturated CCl₄.

酸素存在下ではキサントニルラジカルとパーオキシラジカルの間の平衡反応によりキサントニルラジカルの回復が観測される。実線はコンプレックスを経由するキサントニルラジカルの生成や酸素存在下での平衡を考慮したシミュレーションにより求めた吸光度の時間変化である。

東北大学工学研究科における加速器の利用状況と将来計画

石井 慶造、松山 成男 (東北大院工)

K. Ishii and S. Matsuyama

(Graduate School of Engineering, Tohoku Univ.)

1. はじめに

携帯電話、インターネットの普及により、多くの人々の関心は IT に集中している。その一方で、未来社会の人類にとって最も重大な関心事である、人類の増加によるエネルギーと食料の確保の問題、および人類の生活活動による地球の温暖化と食料確保のための耕地化とそれらに伴う地球全体の自然環境の破壊の問題が深刻化している。環境破壊に直接的に関わる化石燃料によるエネルギー及び水力発電に比べて、原子力エネルギーは地球温暖化を伴わず、安全で安定に供給できるエネルギー源である。使用済み高濃度放射性廃棄物の処分方法についてはまだ懸案とされる問題もあるが、環境にやさしい他のエネルギー源の能力を考えれば、原子力はこの 21 世紀も主力であるにちがいない。

東北大学では、昭和 33 年に原子核工学専攻が、ついで昭和 37 年に原子核工学科が設立され、4.5MV ダイナミトロン静電型加速器、500kV コックロフトウォルトン静電型加速器を中性子発生装置として、また放射線照射効果および使用済み核燃料処理等の研究のためのコバルト 60 照射装置、R I 実験室などを用いて原子力研究教育を行ってきた。平成 8 年には、量子エネルギー工学専攻・学科への大学院重点化改組を行い、原子力エネルギー・放射線利用のより広い応用をめざした専攻として改組された。以来、本専攻は核分裂炉および核融合炉の研究に加えて、加速器を用いた材料、環境保全、医療診断の研究を展開している。ここでは、本専攻の加速器の利用状況と将来計画について紹介する。

2. 高速中性子実験室の利用状況

本実験室は、4.5MV ダイナミトロン加速器を用いて核分裂炉開発のための中性子データ測定を目的として昭和 48 年に設置された。すでに 27 年も経過し、維持費もついていない状況であるが、現在も年に 2000 時間稼働している。Fig.1 は本装置の昭和 49 年からの稼働状況を示す。昭和 58 年から平成 2 年まで運転時間が多なのは、この期間昼夜運転を行っていたためである。平成 2 年までは、本装置は中性子核データ収集研究にだけ使用されてきた。本装置は、低エネルギーから高エネルギーまでの単色中性子を発生することができ、これによる核データの収集が長い間行われ、これらデータは内外で高い評価を得ている。平成 9 年には、これらの研究成果が認められ日本原子力学会より最優秀論文賞を受賞している。この 10 年間に於いては、中性子生成 2 重微分断面積に関する研究が活発に行われており、先進原子力システムに不可欠な核データの収集への貢献が期待される。

本施設では、主として中性子による核データ収集実験が行われてきたが、平成 3 年に核融合炉材料の研究を目的として材料照射コースが設置され、現在まで核融合炉用低放射化構造材料におけるヘリウムの影響や、軽水炉炉内構造材料の照射効果等に関して民間との共同研究も含め成果を挙げ、国際共同研究、国際ワークショップ主催など活発な研究活動を繰り広げている。特に、ヘリウムイオンを用いた難加工材料の表面微細加工・改質は材料加工の新しい

技術として注目されている。

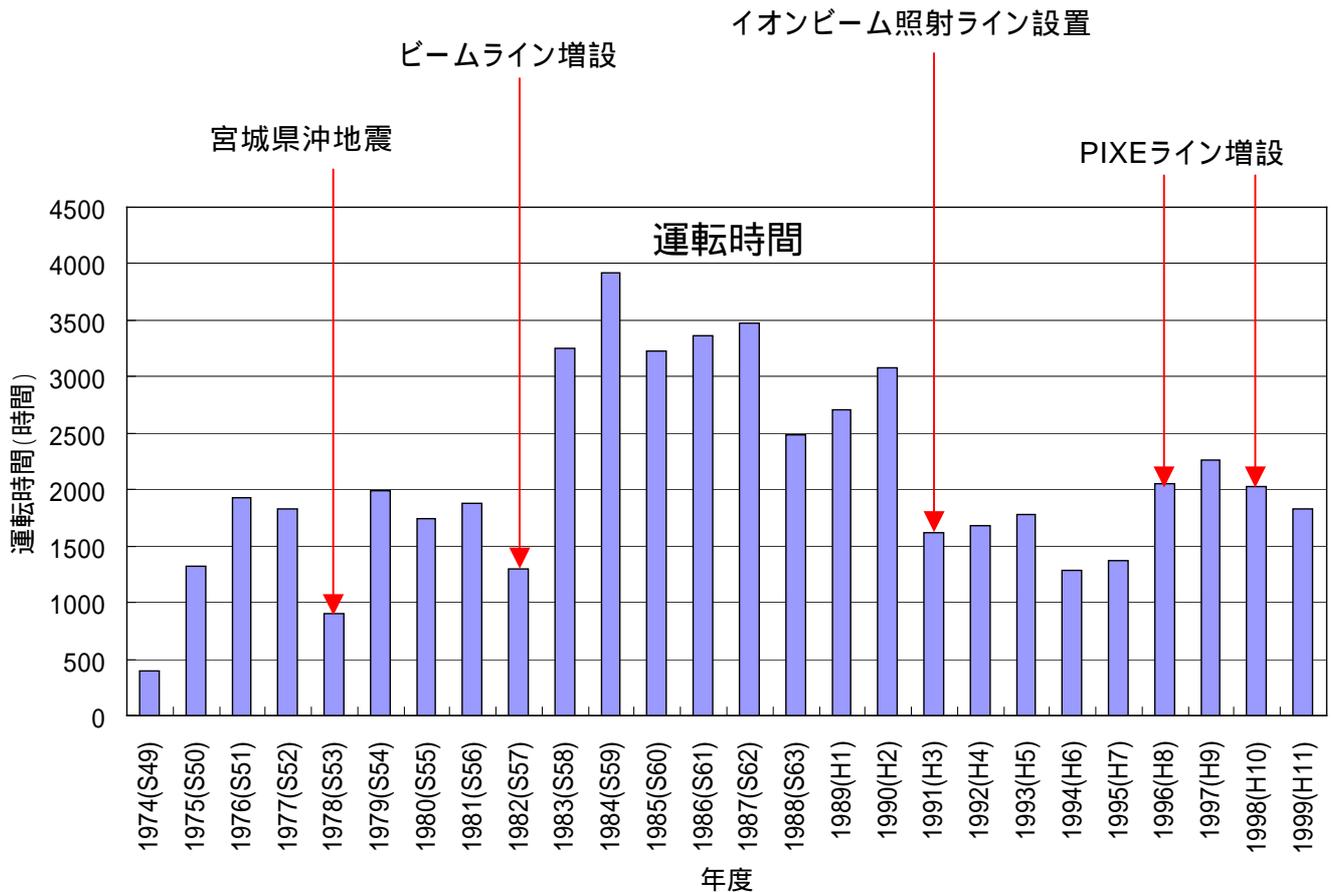


Fig.1 Dynamitron Operation since 1974

材料照射コースに加えて、平成 8 年度に粒子ビーム衝撃によって発生する特性 X 線を利用する超微量元素分析 (PIXE) コースが、サイクロトロン RI センターとの共同研究のもとに増設された。PIXE 分析を用いた大気汚染監視システムおよび河川汚染監視システムの開発、元素の空間分布を画像として与える PIXE カメラの開発を行ない、生物学・医学、農学、考古学等への応用研究が現在活発に行われている。Fig.2 は、サブミリ PIXE カメラで撮影した縄文時代の人面土器の鉄の分布画像である。写真と比べると人面の目の周りに赤の色彩飾がされていたことが良く分かる。このような加速器を用いた画像技術開発は、応用または利用者層の幅を広げるものである。平成 12 年 10 月には、「考古学における色の分析への科学技術の応用に関する日仏コロキウム」を本研究科で開催するなど、国際交流を行っている。また、PIXE 法による元素分析の一般公開実験 (小中高を対象) を毎夏開催し、原子力科学技術の社会へのアピールを行なっている。

Fig.3 は、平成 3 年からの共同利用の状況を示す。現在、中性子測定、材料照射、PIXE がほぼ 3 分の 1 ずつの割合で利用している。本施設は、当初、原子核工学科内の専用研究施設であったが、現在は工学研究科共同利用設備として使用され、さらに工学研究科に留まらず、学内他学部・研究所さらに他大学・国立研究所・民間の研究者に広く開放されている。

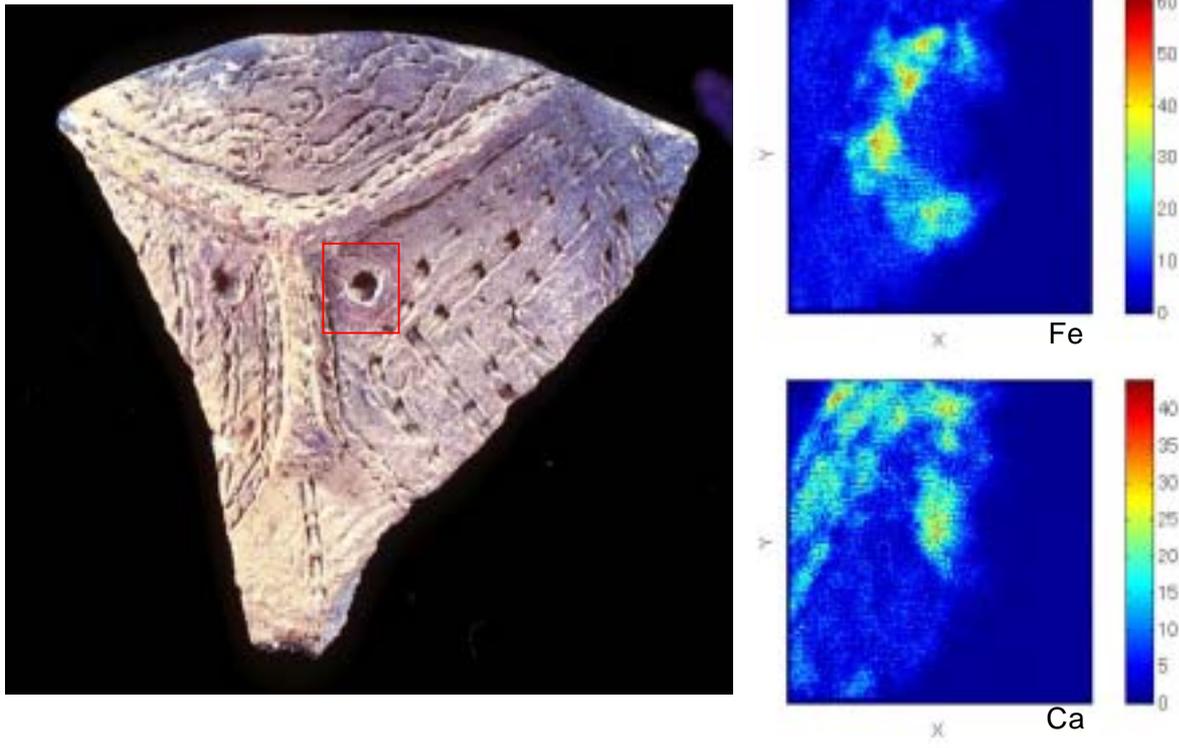


Fig.2 Elemental maps of pottery of early Jomon with a human face being painted by red pigment

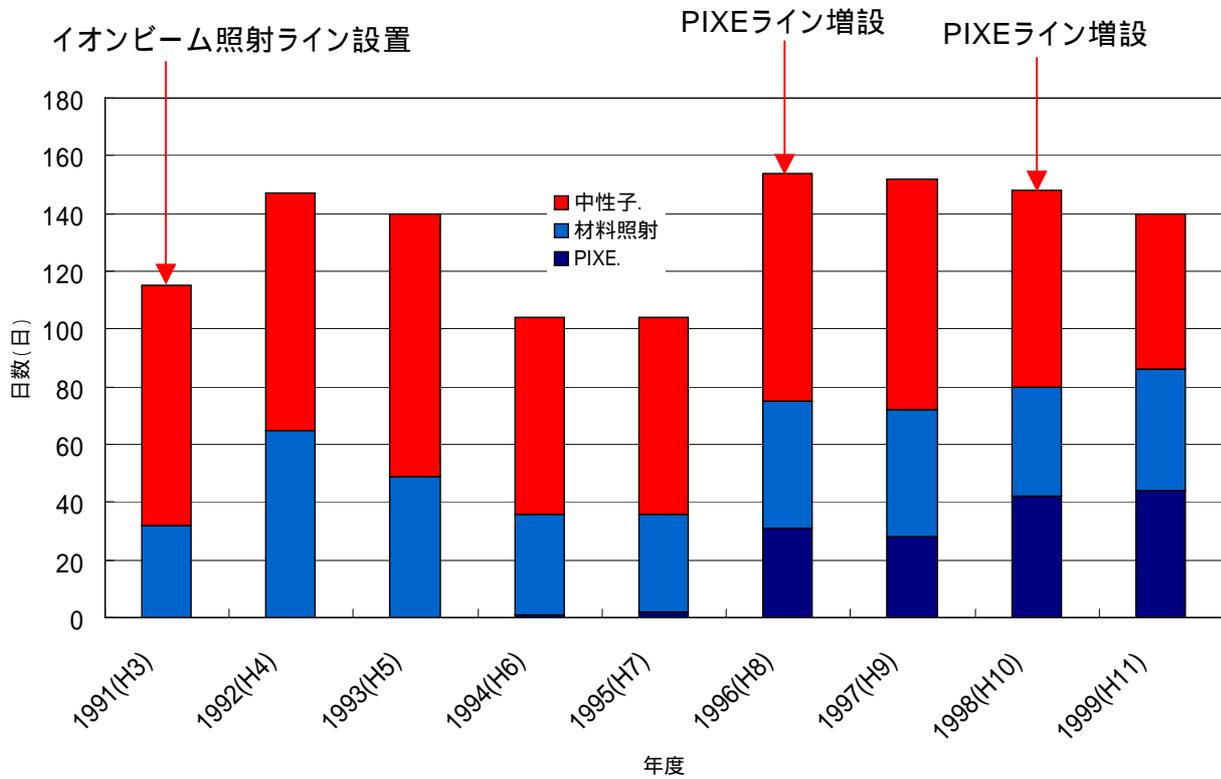


Fig.3 Dynamitron Operation since 1991

3. 将来計画

本専攻では上記に掲げるように、これまで粒子ビームと物質との相互作用を積極的に利用していく視点より、研究・教育を行ってきた。すなわち、格子欠陥と異種原子配列を制御して新しい機能を有する材料の創成やマイクロ加工技術、医学、生物学あるいは環境科学に応用される X 線超微量分析法 (PIXE) や陽電子断層撮影法 (PET)、物質界面近傍に発現する溶融、蒸発、スパッターなどの熱現象を体系づける境界物理工学、中性子核反応にかかわる中性子デバイス工学、およびこれらの技術をシステムに組み上げる中枢の情報処理技術等の研究を進展させている。

本専攻では、さらに粒子ビームをミクロン単位の強力な加工および分析機械として、つまりエンジニアリング量子ビームとして利用する“産業に向けた新しい先端工学”の創成を目指している。エンジニアリング量子ビームが生み出す 3 次元機能素子、細胞サイズの分析技術は、量子バイオテクノロジーのみならず持続的なエネルギー源における極限材料開発、高度な知的システムの開発、地球規模の環境監視・汚染診断システムを可能にし高度化される未来社会ニーズに対応できるものと考えられる。

この目的のために、本専攻に 5MV タンデム加速器 + 数ラインのマイクロビームシステムからなる実験施設を設置する計画を進めている。平成 9 年の大学院重点化に伴い、本マイクロビームシステム設立構想が本専攻を含めた 4 専攻の間で考えられ、この構想を本研究科内の計画として実現するために、工学部加速器検討会が平成 9 年に立ち上げられ、その実現に向けて努力している。

4. おわりに

ここでは、本専攻においてこれまで行なってきた粒子ビーム工学のさらなる展開について述べた。一方、本専攻では粒子ビームを用いた学部教育の研究も活発に行なっている。本研究科には、ダイナミトロン加速器の他に、500kV コックロフトウォルトン静電型加速器を有している。当初は、トリチウムターゲットによる高速中性子源として活発に利用されていたが、十数年前よりほとんど利用されなくなった。そこで、最近、本装置を、本学科の学部 3 年生を対象にした粒子ビーム工学教育の教材として、また低学年の工学部学生の体験実験などに頻繁に利用している。

東北大学は、工学研究科 (ダイナミトロン加速器、コックロフトウォルトン加速器)、サイクロトロン R I センター (K = 100 A V F サイクロトロン、16 MeV 小型サイクロトロン)、核理学研究施設 (300 MeV 電子ライナック、1.2 GeV ストレッチャー・ブースターリング)、金属材料研究所 (タンデム型加速器)、電気通信研究所 (ヴァンデグラフ加速器) など種々の加速器を有している。表 1 にこれら加速器の性能と使用状況および各施設の将来計画構想を示す。これらの加速器の利用をネットワーク化して、民間も自由に利用できる加速器ネットラボを作り、加速器の有効利用およびこれらの加速器を連携することによる加速器利用の新たな展開が期待される。さらに、このネットワークを全国に張り、「全国小型加速器利用ネットワークシステム」を構築することを提案する。これにより、全国の加速器施設が、民間も含めて自由に利用できる体制が築かれ、加速器工学のより一層の発展が期待できるものと思われる。

Table 1. Accelerators at Tohoku University

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	主な利用分野	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	50 μ A(H ⁺ ,D ⁺ ,He ⁺) 300 μ A(H ⁺ ,D ⁺)	10	原子核物理学	1998年 加速器更新 1999年 ビームライン・ 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	50 μ A(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)	理学研究科付属 原子核理学 研究施設	30-300 MeV 0.62-1.2 GeV	電子	10 μ A(220MeV) 120 μ A(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	150 μ A(H) 25 μ A(He)	2	半導体研究	-
タンデム加速器 (TANDEM)、(1990)	金属材料研究所	0.1-1.7 MV (Terminal)	H,He,Li,C,O, Al,Si,Cl,Cu,Ag, Au 等	0.1 μ A(He) 1-10 μ A(He 以外)	3	材料研究	-

筑波大学における加速器に関わる研究

古野興平 (筑波大加速器センター)、榮 武二 (筑波大陽子線医学利用研究センター)

K. Furuno (Tandem Accelerator Center, Univ. of Tsukuba) and

S. Takeji (Proton Medical Research Center, Univ. of Tsukuba)

I. 筑波大学加速器センター

1. 設置目的

タンデム型静電加速器から得られる各種のイオンビームを用いて、物理学、工学、化学、生物学、医学、地球・環境科学、並びにこれらの境界領域を含む広い分野の基礎研究、及び大学院教育を行う学内共同利用施設として機能すること。

2. 沿革

1975年、筑波大学の発足と殆ど同時に建設が開始され、1976年に加速器が所期の性能に達して完成した。それに続く5年間、筑波大学独自の組織である特別プロジェクト研究組織が設置され、そこにおいて「加速ビームによる核物性の研究」が行われ、原子核物理学をはじめ、広く加速イオンビーム応用研究が行われた。これはその後の教育・研究活動の基礎となり、今日、様々な分野の研究が行われている。

3. 加速器

本センターの加速器は、米国 NEC 社製のベレトロン 12UD タンデム加速器と、1 MV のタンデトロン加速器の2台である。ベレトロン加速器は建設後 25 年の歳月を経ているが、現在でもターミナル電圧 11 MV まで安定に発生することができる。陽子及び重陽子のエネルギーは 22 MeV、軽い重イオンでは核子あたり 4~5 MeV で原子核反応実験に使われる。Br や I のような重イオンは原子衝突実験や材料照射実験に使われる。2000 年度の総ビーム加速時間は 2783 時間であり、年度によって少し差があるが平均 2500~2700 時間の実験時間が確保されている。

また、スパッタ型重イオン源、偏極イオン源、並びに加速器質量分析 (AMS) 専用イオン源の3種類のイオン源が稼働しており、2000 年度のイオン種別加速時間の百分率を表-1 に示す。また、種々の研究分野におけるビーム使用時間の割合を表-2 に示す。

表-2. 研究分野毎のイオン加速時間 (百分率)

原子核物理学	68.0
核反応 (無偏極) = 20.0	
核反応 (偏極) = 27.9	
核分光学 = 20.1	
地球科学 (元素分析)	18.1
AMS	6.8
原子及び物性物理学	6.7
その他	0.4

表-1. 各種イオン加速時間の百分率

偏極イオン源		25.3
	P^+	23.7
	d^+	1.2
	He	0.4
スパッタイオン源		67.4
	p	25.5
	d	8.3
	^7Li	1.9
	$^{10,11}\text{B}$	7.1
	$^{12,13}\text{C}$	2.8
	^{16}O	2.7
	^{19}F	7.7
	^{28}Si	0.2
	^{32}S	10.0
	^{64}Cu	0.7
	^{79}Br	0.1
	^{127}I	0.4
AMS イオン源		6.9
	^{36}Cl 分析	4.8
	^{129}I 分析	2.1

4. 主要測定器

主として原子核反応・構造研究用測定器として、磁気分析電磁石 (ESP-90)、直径約 1m の汎用散乱槽、QDQ 磁気分析器、及び全反応断面積測定装置 (建設中) がある。その他、結晶構造解析等、物性物理学専用の超高真空散乱槽、一般照射、テスト実験等に用いる小型散乱槽があり、地球・環境科学研究には陽子マイクロビーム PIXE 装置と AMS システムが稼働している。なお、2000 年度から科学研究費の補助を受けて、重イオンマイクロビームによる地球科学試料の水素・軽元素分析システムの建設が行われている。これに伴ない、重イオン後段加速器と核分光学用のクリスタルボール型ガンマ線検出器は近くシャットダウンされる予定である。

5. 利用方法

本センターは学内共同利用であるが、筑波大学教官との共同研究という形で、大学その他の研究機関に所属する外部研究者による利用も行われている。サポート体制が充分ではないので、事前に充分な協議が必要であるが、共同研究の申し込みは加速器センターのホームページを開いて、そこに必要事項を入力して送信すれば良いようになっている。申し込みは随時、ホームページのアドレスは <http://www.tac.tsukuba.ac.jp> 毎月、15 日が次の月の加速器利用の申し込み期限で、それまでの申し込み課題についてマシントイムが編成される。

II. 陽子線医学利用研究センター

陽子線医学利用研究センターは、KEKとの協力により、昭和58年から平成12年までKEKにおいて陽子線によるがん治療の臨床研究を行った。この間、世界に先駆けて呼吸同期照射法を開発し、これを肝臓がんなどの深部臓器がんに対応し成果をおさめてきた。この研究を更に発展させ、社会的要請に応えるために、専用の研究用陽子線照射設備の整備を平成9年度から始めている。平成12年3月に建屋の建設および機器の設置を終了した。

平成13年9月現在、安定に使用できるビーム電流は約4nAであり、これにより直径200mm、深部広がり120mmの照射野に約1.3Gy/分の照射線量率を得ている。加速器入射系はRFQ、DTLの連結で、7MeVのマルチターン入射を行っている。加速器は分離機能型シンクロトロンであり、周長23m、6個の偏向電磁石を持つ。広帯域加速空洞に、ファインメットを使用している。RF拡散による遅い取り出しを行い、繰り返し2~3Hz、パルス幅0.1~0.5秒で運転を行う。

当所、空間電荷によるカップリング共鳴によるものと考えられるビームロスが観測されたが、計算による予測により、垂直のベータトロン周波数の変更を行い、ビーム電流の増強に成功した。現状の電流値は、治療開始には十分な値であるが、標準的な照射線量率である2Gy/分を達成するために今後もビーム増強を行う必要がある。

平成13年9月3日に、新施設での治療を開始した。医療用具申請のための治験として、まず6名の患者の治療を行う予定である。

陽子線医学利用研究センターの加速器の仕様

分離機能型シンクロトロン、陽子

最大エネルギー250MeV

平均電流約4nA

パルス幅0.1~0.5秒

繰り返し2~3Hz

用途 がん治療、照射技術研究

東京大学工学部の加速器利用

中沢正治 (東大院工)

M. Nakazawa (Graduate School of Engineering, Univ. of Tokyo)

1. 始めに

東京大学工学部における加速器利用については、この研究会の別な報告(工学系の原子力工学研究施設と学内共同利用センターの原子力研究総合センター)にて紹介されており、原子力グループとしては殆どこれに尽きるので、是非、それを参照されることを期待しています。東京大学には、それ以外に理学系研究科の核物理研究センターや医学系研究科の PET 用サイクロトロンなどがある。利用している加速器となるともっと広くて、高エネルギー加速器研究所(KEK)から放射光施設 SPring 8 や欧州 CERN, 米国フェルミラボ, BNL などがある。計画中の加速器としては東海村の原子力工学研究施設の医療用フェムト秒ライナック、柏キャンパスの放射光施設などがあり、逆に最近シャットダウンしたものに、核研の加速器群や、東海村ブランケット棟の 14MeV 中性子発生装置と材料照射用のイオン加速器などがある。

2. 加速器利用と新しい学部教育体制

各装置の利用は、それぞれ特色をもって運用されており、微量元素分析用(AMS や PIXE, RBS や C-14 年代測定用など)や極短時間現象解明用のフェムト秒電子ライナック、更にはイオン照射用などとなっており、従来の基礎核物理、素粒子物理などとは異なった利用法になっているというのが基本的な方向である。このような放射線利用としての加速器利用が中心であったが、現状は一般的に放射線利用の学問自身がやや衰退し始めるにつれ、少しずつ変質しつつあるといえよう。

学内にて進学する各学科を選択するのが、大学の 2 年生になってからという東大では、このような放射線を避ける傾向が他大学に比して、より先行して出易い傾向があり、システム量子工学科に進学しようという学生が激減し始めた。そこで、平成 12 年度から、4 学科(精密機械工学科、船舶海洋学科、システム量子工学科、地球システム学科)が合体してシステム創成学科という新しい学科を作ることになった。各学科の事情はそれぞれあるが、大学院は従来通りであり、教官は原則として大学院が本務となっている。

新しい学科では、学生数が多いので、各専攻の先生が相互交流し、4 つのコースを作って、それぞれ魅力的な教育を行なっている。環境エネルギーシステムコース(E & E)、シミュレーションコース(SIM)、生体情報システムコース(BIS)、知能社会システムコース(PSI)であるが、これらのコースを含む新学科は、進学する学生数について定員割れをせずに、昔の勢いを回復している。それぞれのコースは、従来各工業製品を作ることを目的としたプロジェクト指向学科であったが、新しいコースでは、方法論を中心とした概念的な学科になりつつあると言えようか、また環境問題、ナノテクノロジー、ライフサイエンス、情報技術、脳科学などの新しい分野を背景にしているとも言えようか、人気の秘密はこのあたりにあると考えているが、気を抜くこと

は出来ないものと、教官団は考えているところである。

3. 新しい加速器利用を目指して

筆者は、このシステム創成学科の生体・情報システムコースに属しており、放射線の医学利用、画像工学、治療利用などを教える予定としている。勿論、大学院のシステム量子工学が本務であるが、学部教育用に新しい加速器利用スタイルにもトライしているところである。例えば生体・情報システムコースの3年生に血液の微量元素分析ということでPIXE分析を行なうという学生実験を行なったところ、学生からの評判はまずまずであったようである。

このような状況を考えると、加速器利用に対しては、単に放射線利用や原子力工学の応用というレベルではなく、医学材料、ナノサイエンス、環境利用などへの貢献を中心に考えた新しい位置付けを考えることが必要と思われるし、加速器自身は一般理工学装置として、ちょうど電子顕微鏡のような汎用装置として利用されることが必要であろう。将来はレーザー発振装置のように小型強力化して、やがては家電製品のようになることを期待するものである。

そのような方向性を考えると、この加速器の研究体制の組織化も重要であり、現在、いろいろな加速器について個別的に学・協会ができているところであるが、これらを統合して、「量子ビーム学会」のような組織が必要ではないかと思う。特に利用し易い装置の開発を目指して、装置屋さん和利用屋さんが話し合えるような場が必要であると考え次第であります。

東大原施の現状報告および将来計画

渡部貴宏 勝村庸介 上坂 充
(東大院工原施)

T. Watanabe, Y. Katamura and M. Uesaka
(Nuclear Engineering Research Laboratory, University of Tokyo)

東京大学大学院工学系研究科附属原子力工学研究施設・ライナックでの現状および将来計画について以下に述べる。当施設では 1977 年に 10 ピコ秒シングルパルスが発生させて以来、極短パルスの発生・計測・制御およびそれらを用いた応用実験（放射線化学パルスラジオリシス実験など）に従事してきたが、現在でも基本的には変わっていない。現在では 2 本の電子ライナックと 2 台のテーブルトップ・テラワットレーザーを用いて高時間分解能な過渡現象解析などの研究が行われている。

1. 現状報告

当施設では、平成 10 年度にフェムト秒高速量子現象研究設備を導入し、現在当施設は主に以下の装置からなる。

- ・ 35MeV ライナック
- ・ 18MeV ライナック
- ・ 0.3TW 100fs レーザー
- ・ 12 TW 50fs レーザー
- ・ 各種測定装置

35MeV ライナックは熱電子銃、Arc 型磁気パルス圧縮器等で構成されている。18MeV ライナックはレーザーフォトカソード RF ガン、Chicane 型磁気パルス圧縮器等からなる。2 種のレーザーは CPA 法を用いた Ti:Sapphire レーザーである。これらにより 2 本のフェムト秒電子ライナック（35MeV、18MeV）と 2 台のテーブルトップテラワットレーザー（0.3TW、12TW）が極短量子パルスの発生・計測・応用実験に供され、逐次設備の改良がなされている。電子ライナックは当初の予定通り 0.3TW レーザーシステムと高精度に同期され、ピコ秒パルスラジオリシス実験に用いられている。12TW レーザーを用いた極短電子、イオン、X 線発生実験も進行中であり、発生された X 線は時間分解 X 線回折実験のプロープとして用いられている。平成 12 年度は新規テーマ 1 件を含む以下の計 8 件が行われた。以下は当ライナックの平成 13 年度全国共同利用テーマ一覧である。

- 13L-1 水溶液の放射線効果の研究
(東大原施・勝村庸介)
- 13L-2 放射線の高分子材料への応用
(東大工・山下 俊)
- 13L-3 ポンプ&プローブ法を用いる超高速反応の研究
(東大原施・勝村庸介)
- 13L-4 パルス電子線用電荷モニターの開発
(東大工・中沢正治)
- 13L-5 レーザープラズママルチビーム研究
(KEK・中島一久)
- 13L-6 コヒーレントな放射を用いたバンチ計測法の研究
(東北大科研・柴田行男)
- 13L-7 フェムト秒 X 線回折 (東大原施・上坂充)

13L-8 フラクチュエーション（揺らぎ）法による
フェムト秒パルス計測（渡部貴宏）

括弧内はテーマ代表者。また、13L-5 が新規テーマである。以下に主な研究成果を挙げる。

1.1. MG カソード RF ガン

Spring-8 の RF ガンテストベンチ計画に参画する形で KEK / 住重 / 早大 / BNL / UCLA の協力を得て Mg カソードを製作した（図 1）。Mg カソードは当施設で今まで用いられてきた Cu カソードに比べ 1 オーダー量子効率が高いことが知られ、高電荷量（数 nC / バンチ）電子パルスの発生については高強度 X 線パルスの発生が期待されている。一方、量子効率低下の劣化、エミッタンス増大、大電流に対する下流ライナックの最適化などが今後の課題となる。立ち上げ試験は 10 月頃から開始し、そのまま放射線化学応用実験に用いる。

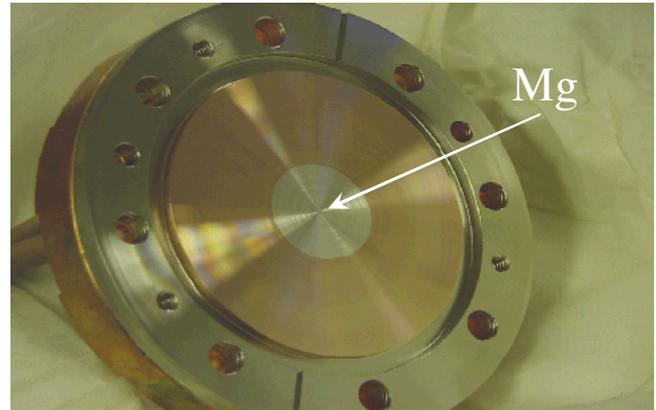


図 1 Mg カソード

1.2. 電子ビーム波形測定

過去数年間にわたり行われてきたコヒーレント放射による電子ビーム計測 [1] に引き続き、インコヒーレント放射の統計ノイズ（フラクチュエーション）から電子ビーム波形を導き出す手法（フラクチュエーション法）を用いたビーム計測を行っている。第 1 段階として実験セットアップの設計をシミュレーションを用いて行った。第 2 段階として設計をもとに時間領域のフラクチュエーションの計測を行った。実験結果を図 2 に示す。同時に計測されたストリークカメラによるパルス幅は 1.0ps であったが、フラクチュエーション法から導き出された結果はそれぞれ 4.5ps であった。この相違は、フラクチュエーションからパルス幅を導出する際に電子ビームの横方向エミッタンスを無限小と仮定しているためである。また、現在第 3 段階として周波数領域での計測を行っている[2-3]。

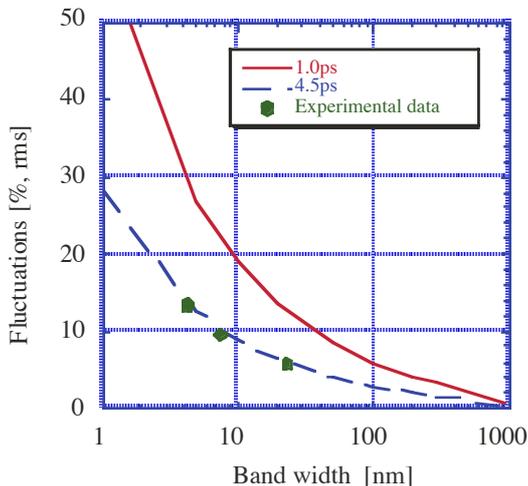


図 2 フラクチュエーション法によるパルス計測

1.3. レーザープラズマライナック（電子ビーム）

12TW50fs レーザーをガスジェット（He, N₂ etc.）に集光し、そこに励起されるプラズマ波を用いて相対論的（～数十 MeV）超短電子

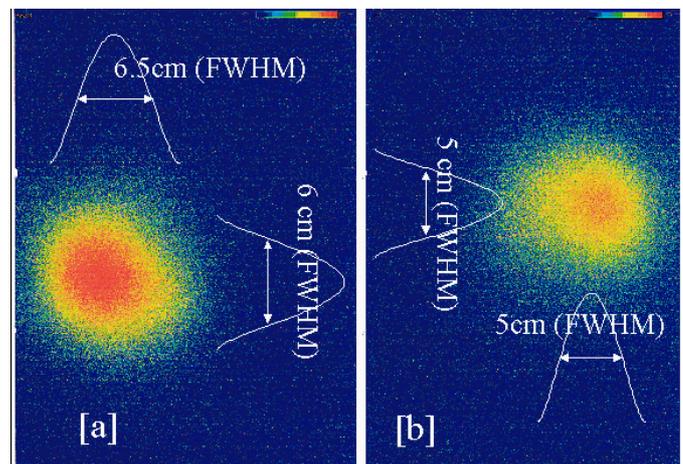


図 3 IP で取得した電子ビーム像

バンチを発生させるのが当実験の目的である。特に我々の特徴は、単一の超高強度レーザーパルスを用いて電子バンチを生成する手法を用いている点である。この手法では、プラズマ波の碎破によってプラズマ電子の一部を非線形プラズマ中に捕獲して加速する。PIC コードを用いたシミュレーションの結果、12TW レーザーと最大 $5 \times 10^{18} \text{cm}^{-3}$ の台形（フラットトップ 500 μm ）な密度分布を持つプラズマとの相互作用により、10fs（FWHM）600pC / バンチのパルス幅を持つ電子バンチを得た [4]。

また、ヘリウム実際に行った実験では、イメージングプレートを用いて電子ビームの像を取得した。結果を図3に示す。右図(b)は左図(a)よりもガス圧およびレーザーパワーが強い場合である。更に、アルミフォイル通過後にファラデーカップを置いて電荷量測定を行った結果、前方 0.07rad の立体角において数 MeV 以上のエネルギーを持つ電子 14pC / バンチを取得した[5]。

1.4. レーザープラズマイオン加速

12TW50fs レーザーを銅固体ターゲットに集光することにより、高エネルギー銅イオン生成の実験を行った。これらイオンは、高強度レーザーの動重力により軽い電子が先に押しつけられることによって生成されるイオンの非中性分布によるクーロン爆発および熱電子電場により発生する。実験では、発生したイオンをトムソンパラボライオンスペクトロメーターによって価数および価数ごとの分別し、それぞれのエネルギー測定を行った(図4)。その結果、価数 +12 ~ +17、エネルギー 50 ~ 220 keV の Cu イオンを観測した。また、個数は 1.1×10^5 個 / sr / shot であった。

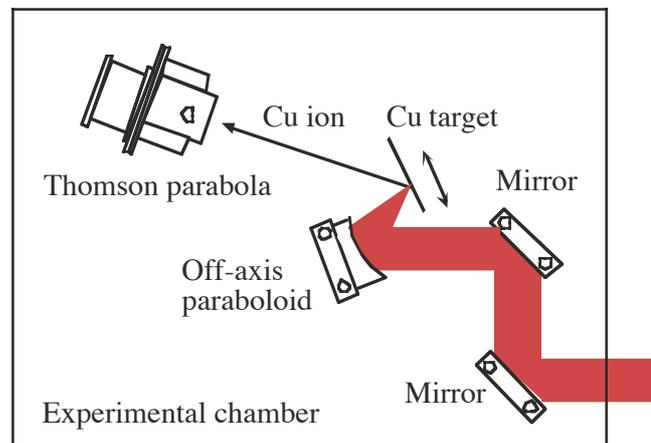


図4 トムソンパラボラによるイオン計測

1.5. ピコ秒時間分解X線回折

12TW50fs レーザーをビームスプリッターで10%、90%に分け、10%をポンプパルスとし、90%を銅版ターゲットにフォーカス・照射して約 10 ピコ秒のパルス幅を持つレーザープラズマX線（LPX）を発生させプローブパルスとして用いてポンプ&プローブX線回折を実施した。試料は GaAs 単結晶（111）を用いた。図5はポンプレーザー照射直後から 250ps まで 50ps 刻みで取得したX線回折像である。この結果およびシミュレーションによる解析により、GaAs 表面における熱膨張・コヒーレント音響フォノンの原子動画像化に成功した[6]。

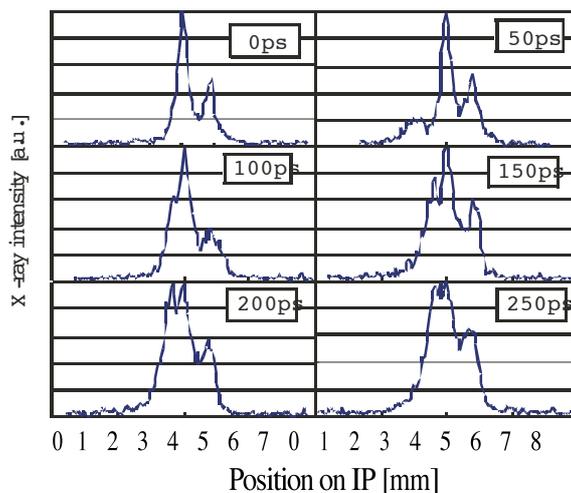


図5 時間分解X線回折像（GaAs）

1.6. 医療用小型加速器開発プロジェクト

平成13年度より5年計画で小型加速器開発事業（文科省プロジェクト）がスタートし、放医研、

東大原施、高エネ研、原研関西研、京大、産総研、阪大レーザー研、広大が仮想研究所 (Virtual Lab) として参画する。具体的には重イオンシンクロトロンによるガン治療システムや逆コンプトン散乱 X 線源による動的血管造影システムの開発を目指し、東大原施は後者システムの主担当として参画する[7]。

2. 今後の展開

電子ライナックについては、反射型 Mg カソード (0.1%)、透過型 Cs₂Te (数%)、ダイヤモンド (50%) など高 QE カソード RF ガン開発を Spring-8 / KEK / 早大と共同で行い、放射線化学応用する。レーザープラズマ加速については世界初の 10fs 電子シングルバンチ計測を目指す。イオン加速については、原研関西研 / 京大 / 広大と共同で炭素イオン数 MeV 高フラックス高指向性ビーム生成を目指す。時間分解 X 線回折については近々 Si、Ge について同様の実験を実施する。Spring-8 と共同でタンパク質の動的構造解析、KEK・PF / 東大応物と共同で時間分解 X 線ホログラフィ / イメージングを実施する予定である。小型加速器開発については X バンド RF ガン・ライナック型硬 X 線源、逆コンプトン散乱 X 線源を X 線自由電子レーザーとともに第 4 世代放射光源と位置づけ、相補的に併行して開発・利用していくべきと考える。国際共同利用も International Committee for Future Accelerators (ICFA) / Advanced and Novel Accelerator PANEL で議論中である。

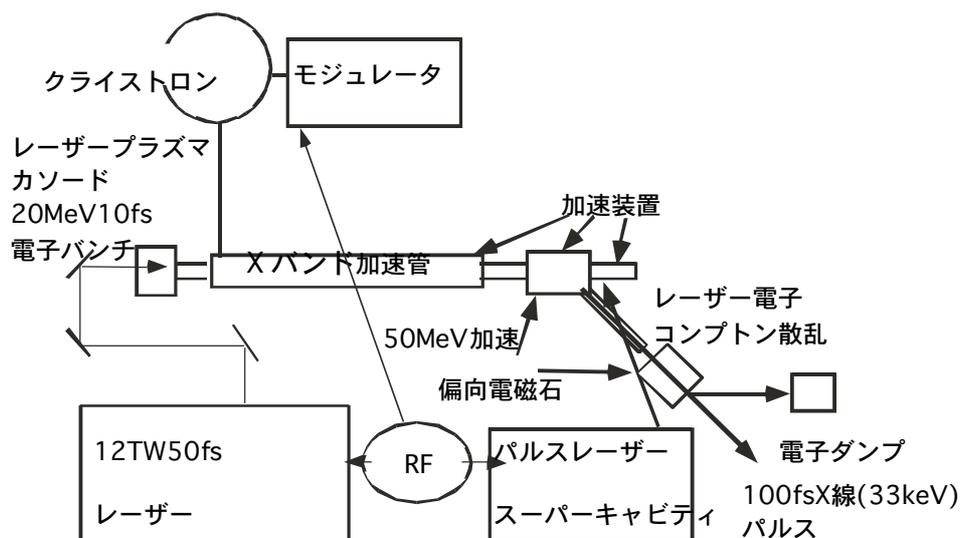


図6 逆コンプトン散乱 X 線源による動的血管造影

謝辞

Spring-8 (JASRI)、KEK、早大、BNL、UCLA、京大、広大および参画企業の方々の研究協力に深く感謝致します。

参考文献

- [1] T. Watanabe et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 437 (1999) 1 ; Nucl. Instrum. Meth. A, in press.
- [2] T. Watanabe et al., Proc. of PAC2001, in press.
- [3] K. Nakamura et al., Proc. of APAC2001, in press.
- [4] N. Hafz et al., Nucl. Instrum. Meth. A, 45 (2000) 148.
- [5] N. Hafz et al., Proc. of PAC2001, in press.
- [6] K. Kinoshita et al., Proc. of PAC2001, in press.
- [7] A. Fukasawa et al., Proc. of APAC2001, in press.

東大原総センターにおける加速器による研究

岩井岳夫、柴田裕実、松崎浩之
(東大原総センター)

T. Iwai, H. Shibata and H. Matuzaki

(Research Center for Nuclear Science and Technology (RCNST), Univ. of Tokyo)

東京大学原子力研究総合センターは、原子力の教育・研究の総合的な発展を図るため、学内の共同利用に供する原子力関係の研究施設の管理運営を行うとともに、原子力基礎研究、エネルギー開発、および放射線の平和利用を推進することを目的とした、全学的な学内共同利用機関として運営されている。その一環として、計4台のイオン加速器が共同利用に供されており、今では完全にそれらの加速器群が当センターの主力設備となっている。内訳は、1MV タンデトロン・3.75MV バンデグラフ (重照射研究設備、東海)、5MV ペレトロン (MALT、東京)、1.7MV タンデトロン RAPID (共用設備管理部門、東京) である。本稿ではそれらについて概観する。

1. 重照射研究設備 (HIT)

重照射研究設備 (HIT: High fluence Irradiation facility, the university of Tokyo) は、東京大学における核融合炉関連の材料研究を中心とした加速器の利用研究を強化する目的により、茨城県東海村の工学部附属原子力工学研究施設内に設置され、原子力研究総合センターで管理・運営を行っている。設備は学内共同利用施設として運営されているが、当初より学外の研究者も東京大学との共同研究という形で受け入れており、現在でも学外からは13大学・研究所等の利用がある。年2回利用申請の募集を行い、年間28週のマシントimeを各実験グループに割り当てて各種実験に利用されている。

本設備は2台の静電型加速器 (3.75MV シングルエンド型バンデグラフと1MV タンデトロン) と7本のビームラインから構成される (Fig.1)。核融合炉環境では14MeV 中性子による重照射損傷と核変換効果の相乗効果が材料に与える影響が問題視されているが、実際に14MeV 中性子を使って重照射実験のできる施設がないことから、重イオンによって照射損傷を導入しつつ、水素やヘリウムの注入で核変換効果を模擬する二重イオンビーム照射実験が設立以来の大きなミッションである¹⁾。MeV オーダーの多重イオンビーム照射施設としては日本最初のものであり、後にTIARAの多重ビーム照射チャンバー製作時にはHITでの経験が生かされた。他に特徴的な実験設備としては、微粒子加速、イオン・陽電子複合ビームライン、マイクロビーム、1nsパルスビームが挙げられる。

微粒子加速は、探査衛星搭載用宇宙塵計測器の地上校正を目的としてバンデグラフに機能追加されたもので、炭素や銀などの1 μ m程度の導電体微粒子を帯電させて加速し、加速管の延長線上に設けられた微粒子加速ビームラインに導く (Fig.2)²⁾。1個の粒子の帯電量が大きい (典型的には1 μ m粒子で 10^{-14} C)、ビームライン途中に設けられたビームモニターを微粒子1個が通過するとき得られる信号によって、各々の粒子の電荷や速度を測定することができる。現在は1分間に数十個程度の頻度で微粒子の通過を確認できる。当面応用

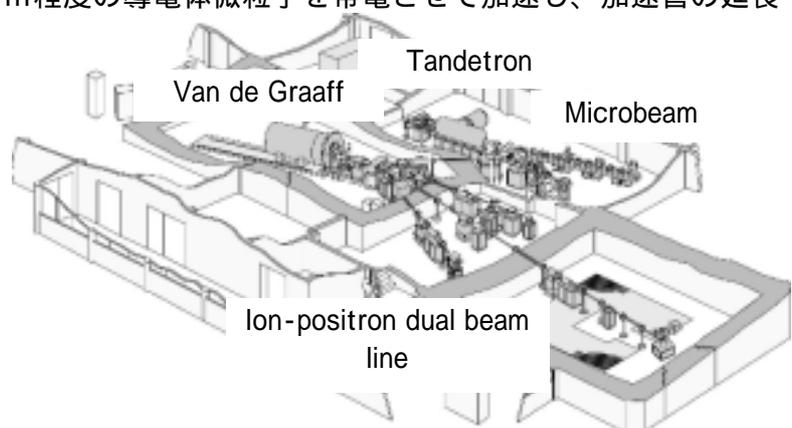


Fig.1 An outline of HIT facility

は宇宙塵計測器開発であるが、将来的には衝撃による表面加工や穿孔への応用が可能かどうか検討中である。

イオン・陽電子複合ビームラインは陽電子消滅による空孔型欠陥評価をビーム照射下や同じチャンパー内で実験可能にしたもので、 ^{22}Na からの陽電子をモデレータで一旦減速し、再放出した陽電子を磁場でイオンビーム照射位置まで輸送、最大 30keV までのエネルギーで陽電子を注入する。現在は直流型の陽電子ビームであるため実験はドップラー拡がりの測定に限られるが、陽電子寿命を測定するためパルス化へのアップグレードを予定している。マイクロビームは現在 1 μm 程度まで集束できており、マイクロビーム PIXE やマイクロビーム FT-IR などの実験に今後発展していくことが望まれる。

HIT の利用分野としては、各種材料照射効果（核融合炉材料、軽水炉材料、高分子、半導体、セラミックス）が一番多くのマシンタイムを占め、設立当初に比べ割合が減ってはいるものの原子力用材料の照射効果研究分野での利用が今なお最も多い。他には重水素を加速して発生する核反応中性子や、先述の高速微粒子は各種分析器の開発に利用される。その他、マイクロビームや陽電子ビームなどを用いた複合ビーム技術開発も管理部を中心に進めている。

2. MALT³⁾

MALT (Micro Analysis Laboratory, Tandem accelerator)の 5MV ペレトロンは、高エネルギーイオンビームによる種々の精密微量分析を主用途として本郷キャンパス近くの浅野キャンパスに 1995 年に設置された。本加速器は、入射分析系に、異なる質量のイオンを交互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を備え、また、高エネルギー側の分析系には、マルチ・ファラデーカップシステムを備えるなど、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。分析手法は加速器質量分析、粒子線励起線分光法 (PIXE)、核反応法 (NRA)、反跳原子分析法 (ERD)、ラザフォード後方散乱分析法 (RBS) などが可能であるが、特に AMS の利用頻度が高く、運転時間の約 8 割を占め、年間約 1500 試料もの測定を実施して

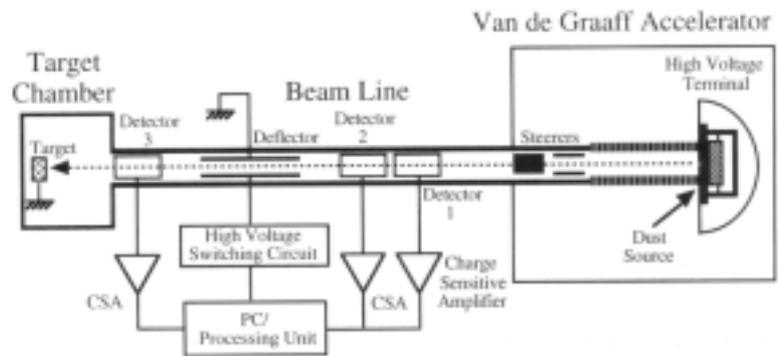


Fig.2 Schematic view of the microparticle accelerator system²⁾.



Fig.3 An outline of MALT

いる。AMS により ^{14}C 年代測定や ^{10}Be ・ ^{26}Al の測定ができることから、研究分野としては考古・人類学や地球科学の割合が多いのが特徴であり、他には宇宙科学、環境科学・医・薬学、核化学、物性研究、原子核物理などの分野で幅広く利用されている。MALT は Fig.3 に示すような構成であり、現在は6つのビームコースが使用されている。NRD コースは、超高真空チャンバーを備え、主として $\text{H}(^{15}\text{N}, \quad)^{12}\text{C}$ 共鳴反応を利用した材料表面層の水素測定を行なっている。PIXE コースでは、2台の検出器(Pure-Si 検出器と CZT 検出器)による多元素同時分析を実現している。利用形態は学内共同利用設備であるが、他大学・研究機関から共同利用という形で多くの研究者が利用研究に参加している。

3 . R A P I D

RAPID(RAPID: Rutherford backscattering spectroscopic Analyzer with Particle induced x-ray emission and. Ion implantation Devices) は 1995 年に浅野キャンパスに設置された分析用 1.7MV タンデントロン加速器で、3本のビームポートに RBS 分析装置、PIXE 分析装置、イオンインプランテーション装置が設置されている (Fig.4)。利用者は学内の工学系の研究者が中心で、Table 1 に示すような課題に利用されている。利用装置の内訳はイオン注入 53%、RBS17%、PIXE30%である (平成 12 年度実績)。

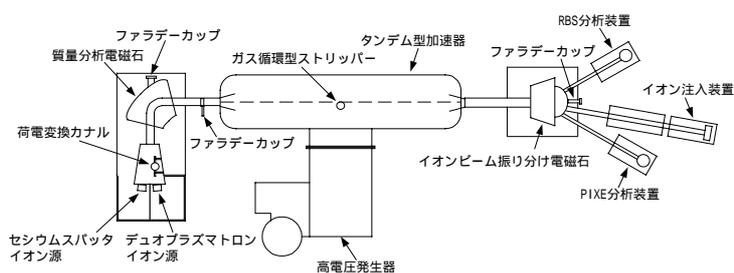


Fig.4 An outline of RAPID⁴⁾

Table 1 Research subjects at RAPID(2000~2001).

- 高エネルギーイオンビームを利用した cBN 薄膜の機械的・電気的特性改質とその評価
- 結晶シリコン中の不純物精製手法の開発と精製機構の解明
- イオン注入による導電性ダイヤモンドの表面改質と電気化学特性
- 核融合炉用セラミック材料・複合材料の液体リチウムとの両立性
- 荷電粒子に対する CR-39 の特性測定
- イオン注入法による遷移金属酸化物の光電特性の制御
- 原子力用機能性材料の製造と評価
- イオンドーピングした半導体の欠陥構造の研究
- PIXE 法による微量ウランの測定

(参考文献)

1. 田川精一、東京大学原子力研究総合センターニュース (特集号) (1984).
2. H. Shibata, K. Kobayashi, T. Iwai, Y. Hamabe, S. Sasaki, S. Hasegawa, H. Yano, A. Fujiwara, H. Ohashi, T. Kawamura and K. Nogami, "Microparticle acceleration by a Van de Graaff accelerator and application to space and material sciences", Rad. Phys. and Chem. 60 (2001) 277-282.
3. 松崎 浩之、小林 紘一、中野忠一郎、春原 陽子、山下 博、堀内 一穂、「東京大学 MALT ・ AMS の現状」、第 9 回東京大学原子力研究総合センターシンポジウム報告集 (2001) 81-92.
4. 東京大学原子力研究総合センターニュース、82 (2001) 5.

東京工業大学における加速器に関わる研究

服部俊幸、林崎規託（東工大 原子炉工学研究所）

T. Hattori and N. Hayashizaki

(Res. Lab. Nuclear Reactor, Tokyo Inst. Technology)

東工大における加速器事情は、加速器メーカーの静電型加速器を購入して各種研究に使用する場合と、新型加速器開発のための研究用加速器建設の場合に大別される。そこで、これらを分類して報告をおこない、最後に今後の計画について述べる。

(A) メーカー購入の静電加速器 + 自作線形加速器

設置部局 加速器名	製造会社 完成年度	加速粒子 加速エネルギー	研究内容（共同研究先）
大学院理工学研究科 4.75 MV バンデグラフ加速器	HVEC 1969/1978	P, He~Ne 0.5~9.5(He) MeV	<ul style="list-style-type: none"> ・長寿命炭素薄膜の開発研究（KEK） ・原始地球大気、火星大気への陽子線照射によるアミノ酸合成と生命誕生の研究（横国大） ・PIXE 法による水、廃棄物、ガラス、陶磁器の元素分析（東京家政大、北海道大、東海大）
原子炉工学研究所 3.2 MV 平板加速器	NEC 1976	P, d, He 0.5~3 MeV	<ul style="list-style-type: none"> ・長寿命核分裂生成物の中性子捕獲断面積 ・中性子捕獲反応による天体核物理の研究（阪大）
原子炉工学研究所 1.6 MV タンデム平板加速器	NEC 1983	P~Cl 0.1~10 MeV	<ul style="list-style-type: none"> ・^{238}Pu の入射機 ・高温プラズマと重イオンビームの相互作用 ・PIXE 法を用いた都市環境汚染の測定
原子炉工学研究所 IH 型重イオン線形加速器 (I)	東工大三菱電機 1984	P~Cl 0.24~2.4 MeV/u	<ul style="list-style-type: none"> ・材料研究に使用後、現在停止中
原子炉工学研究所 IH 型重イオン線形加速器 (II)	東工大三菱電機 1985	P~O 2.4~3.4 MeV/u	<ul style="list-style-type: none"> ・材料研究に使用後、現在停止中

< 共同利用連絡先 >

バンデグラフ実験室 広領域線質放射線照射実験室 原子科学研究室

(B) 加速器研究用加速器

設置部局 加速器名	製造会社 完成年度	加速粒子 加速エネルギー	研究内容 (共同研究先)
原子炉工学研究所 重陽子用 IH 型線形加速器	東工大 1995	P 1.7 MeV	・加速特性研究 (ミュンヘン工科大, ルーマニア IFIN 研究所) ...停止中
原子炉工学研究所 IHQ 型重イオン注入用加速器	東工大 1998	P~O 2.2 MeV	・加速特性研究 (原研, ミュンヘン工科大) ...停止中
原子炉工学研究所 高強度 RFQ 型重イオン線形加速器	東工大東芝 1993	P~Au 0.22~44 MeV	・イオン励起 Ar-Xe 原子レーザーの研究 ・CO ₂ レーザイオン源直接入射 RFQ 線形加速器の加速特性研究 (理研) ・YAG-2 倍高調波イオン源による 1 価イオンの RFQ 加速特性の研究 (理研)
原子炉工学研究所 クラスター, フラウン加速装置	東工大 1997	C ₆₀ 0.3 MeV	・炭素フラウンイオンの生成と加速に関する研究 (放医研) ・炭素フラウンと炭素薄膜相互作用の研究 (KEK)
原子炉工学研究所 APF-IH 型原理実証線形加速器	東工大 2000	P~O 0.085~1.3 MeV	・APF-IH 型線形加速器の加速特性研究 (放医研) ・半導体用 MeV 重イオン注入装置の研究 ・加速装置を使用した各種イオン源, ビームモニター, 収束装置の試験研究 (ルーマニア IFIN 研究所)
(株)東芝京浜事業所 2.5MeV リッジトロン電子加速器	東工大東芝 1999	e ⁻ 2.5 MeV	・加速特性研究 (東芝, 放医研) ...停止中

(C) 加速器将来計画

設置予定部局 加速器名	製造会社 完成予定	加速粒子 加速エネルギー	研究内容 (共同研究先)
原子炉工学研究所 がん治療用テスト IH 型 2 MeV/u 線形加速器	東工大 2002	P, C 2~24 MeV	・加速特性研究 (放医研)
ルーマニア IFIN 研究所 APF-IH 型重イオン加速原理実証 線形加速器	東工大 2002	P~Xe 0.3~36 MeV	・加速特性研究 (ルーマニア IFIN 研究所, ルーマニア Targu-Mures Petro-Maio 大学)

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

早川建 (日大原研)

K. Hayakawa (Atomic Energy Research Institute, Nihon Univ.)

1. はじめに

日本大学原子力研究所電子線利用研究施設(LEBRA)は、電子線と自由電子レーザー(FEL)を利用した研究を推進するため、1995年に電子線形加速器及び自由電子レーザー発生装置の建設に着手した。このプロジェクトは高エネルギー加速器研究機構(KEK)、電子技術総合研究所等との共同研究として行われ、加速器はKEKで陽電子発生陽電子加速器として使われていた物の一部を移設し、自由電子レーザー発生用に改造した。最大加速エネルギー125MeV、ビームパルス幅20 μ sec、ビーム電流200mAを目標とし、1998年1月には電子ビームの加速に成功した。このときの電子エネルギーと電流値は、それぞれ90MeV及び20mAであった。同年2月にはアンジュレーター放射光の発生を確認した。しかし、この時点では加速器の性能は未だ設計の目標値に達しておらず、この加速器を使った自由電子レーザーの発生は困難であることが明らかとなった。性能向上のための作業を、1998年から2000年にかけて行い(この間、後述の学術フロンティア推進事業に関わる建屋建設のため、約半年間ビーム加速実験を中断した時期があった)、2001年5月に1.5 μ mの自由電子レーザーの発振に成功した^[1]。

利用研究の面では、建設当初から学内共同利用研として、原子力研究所、理工学部、文理学部、工学部、薬学部等の理系学部ばかりでなく医学部、歯学部、松戸歯学部、生物資源学部等の生物系学部の研究者の利用に供することを考えていた。2000年には「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」なるプロジェクト名で、文部省の学術フロンティア推進事業に採択され、実験棟建屋及び各種解析装置等が予算化された。この学術フロンティアの採択に際して、X線ビームラインの建設が認められ、パラメトリックX線(PXR)発生装置が建設された。建物及び主な実験装置の鳥瞰図をFig.1に示す。既存建屋内に線形加速器とFEL及びPXR発生装置が置かれ、増築建屋1階部分にFELを使う実験室と資料分析室が、2階部分に実験準備室及び研究室が置かれている。

2. 加速器の改良

加速器の性能を向上させる上で、最大の難関となっていたのはパルス幅20 μ secを確保することであった。問題点は3つあった。第1は、パルス幅の最大定格が7 μ secの

日本大学原子力研究所電子線利用施設

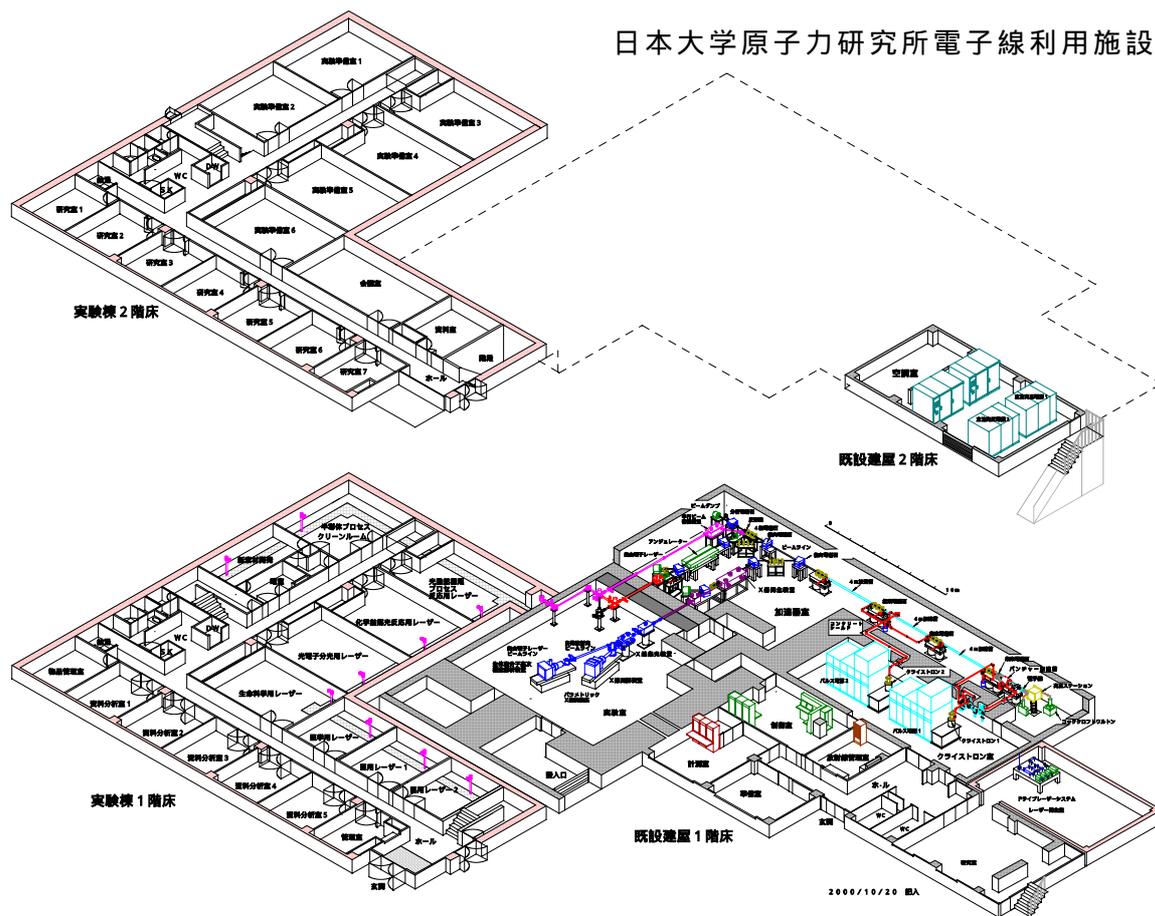


Fig.1 A bird-eye view of LEBRA, in which 125MeV electron linac, FEL beam line and PXR beam line have been installed.

クライストロンを $20\mu\text{sec}$ で使用することに伴う困難 . 第 2 は、パルスの後半で頻発するオイルタンク内での放電 . 第 3 は、放電時にパルストランスに蓄積されるエネルギーの開放方法に関する問題である . 第 2、第 3 の問題点に関しては予想されていたことなので、設計時にその対策を講じていたが、結果的には、それでは不十分であった . タンク内放電に対しては、主に絶縁トランス周りに問題があったが、徹底的に鋭端部を除去する構造にして解決した . 現在はまったく放電はしない . パルストランスに蓄積されたエネルギーはパルス終了後、迂回路を通して抵抗体に吸収させる構造としたが、この回路を形成する抵抗とダイオードの容量不足から、これらの素子は、しばしば破損した . これは容量を大きくすることによって一応解決したものの、現在でも、この回路の破損事故が起きることがある . パルスモジュレーター筐体の空間的な制約からこれ以上の大容量化は難しい . 最大定格を超えてクライストロンを運転することに関しては、容易にはその解決策が見つからなかった . パルス幅を広げようとする、クライストロンの rf 窓が破損するのである . 窓の破損は放電によるものだが、放電の引き金となるのは窓からの放出ガスであると考えられる . クライストロン取り付け時等には窓の片側は大気に晒されるので、このときに吸収した空気が間歇的に放出されるものようである . この放出ガスを速やかに除去できれば、問題が解決されると考

えられた。実際、クライストロンの直後の導波管に8 l/secのイオンポンプ2台を取り付けたところ、窓の破損はほとんど起こらなくなり、現在、2Hzの運転では20μsecのパルス幅で、20MW以上の出力が得られている。

電子銃は、移設前の大電流加速器の構造をそのまま踏襲していたため、FEL用としてはカソード面積が大きく、ウエネルト電極の形状も過剰収束ようになっていた。カソード面積を半分にし、ウエネルト電極の形状を改良した結果、エミッタンスが1/2程度にまで改善された。

クライストロンのrfドライブ系に半導体アンプを使用したことから、パルス内での位相変動と、温度変化による位相のドリフトが問題となった。特に自由電子レーザーの発振のためにはパルス内での位相の変動は0.2度以下にする必要がある。これを解決するために、アンプの前段に高速A(応答速度~10nsec)を設置し、位相を制御するようにした。パルス内での位相の変動の波形はパルスごとには殆ど変化しないので、これを補正する信号をファンクションジェネレータで作る。温度変化による位相のドリフトはゆっくりとした変化なので、遅いフィードバック回路を作り、この信号に先の、ファンクションジェネレータにより作り出された信号を重ねて高速Aに供給することにより、移相の安定化を図っている。クライストロンの運転中はパルスモジュレータの出すノイズの影響を受けるので、精度良く制御するのは難しいが、現在は0.5度程度の安定化が実現している。この程度の移相安定度でも1.5μmの自由電子レーザーの発振は実現した。

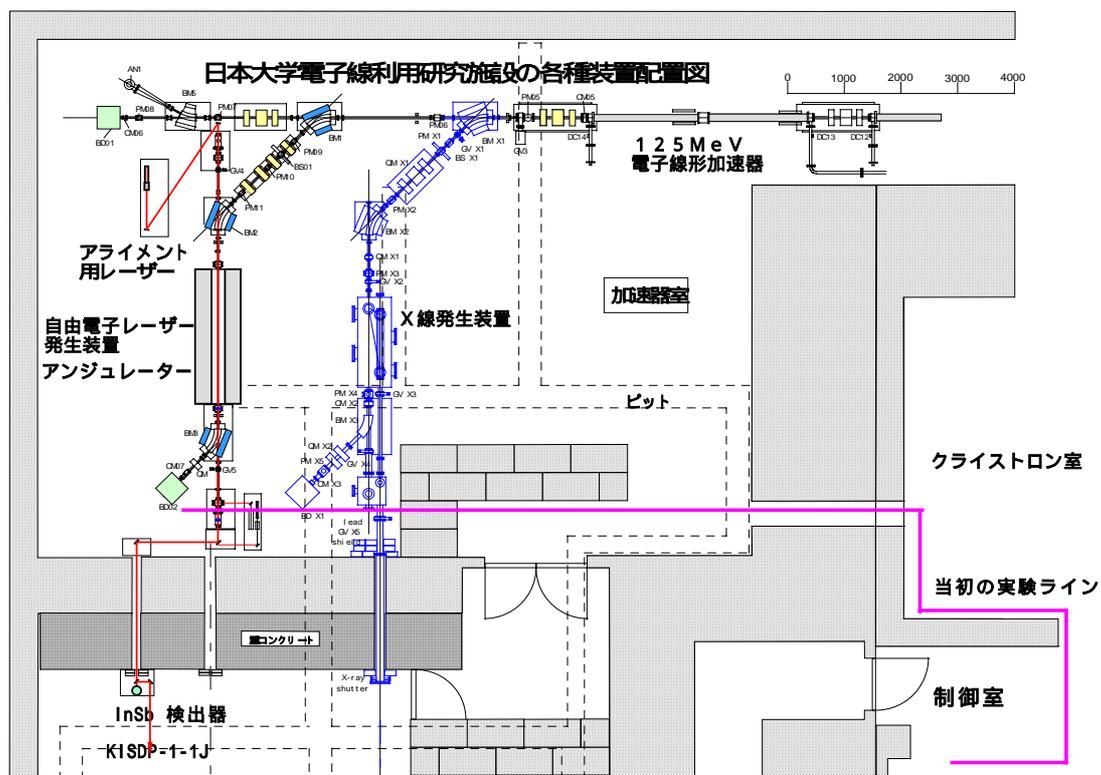


Fig.2 Layout of the FEL (left) and PXR (right) generators and beam lines.

3. ビームラインの現状

自由電子レーザー及び PXR 発生装置の概略を Fig.2 に示す。この図に示すように、右上に線形加速器が置かれ、そのビームを 2 系統の 90 度偏向系によって、それぞれの発生装置に供給している。自由電子レーザーのビームラインは、増築建屋内の実験室の系統はほぼ出来上がっているが、自由電子レーザーに関する基礎実験が未だ残っているため、接続部分の組み立てが終わっていない。今年の秋から冬にかけて接続工事を行い、共同利用が出来るようにする予定である。

パラメトリック X 線のビームラインは現在調整中で、ビームラインの基礎実験が始まったばかりである。こちらも自由電子レーザーと同じ時期の運用を目指している。

4. 利用研究

現在学術フロンティアには利用研究として、自由電子レーザーを利用する課題 7 件、パラメトリック X 線を利用する課題 5 件が申請され、予算化されている。学部の内訳は、理工 2 件、文理 1 件、工 1 件、医 1 件、歯 3 件、松戸歯 3 件、生物資源 1 件である。生物系関連学部からの課題が多く見られる。現状は未だどちらのビームも使えないので、予備実験を行っている段階である。

無論、このようなすでに予算措置のされている研究テーマの他にも、今後多くの利用申請がなされると思われる。また、学内ばかりでなく、学外からの利用申請も受け入れる予定である。

5. 今後の課題

加速器に関しては、安定化が最大の問題である。2 台のクライストロンを使っているため、その相対的な変動がビームの不安定性となって顕在化する。変動の主な原因は、素子の劣化によるものを除けば、商用電源の変動と温度変化による変動である。どちらも完全にこれを除去するのは困難であるので、部分的な安定化と、この変動を補償する制御システムとの組み合わせで安定化を図っているが、未だ完全ではない。

自由電子レーザーに関しては、発振は実現したが、現状は共振器に誘電体多層膜ミラーを使っているため、 $1.5\mu\text{m}$ プラスマイナス数 10nm の範囲でしか使えない。早急に金属ミラーに置き換えて広帯域で発振するようにする予定である。また現在のアンジュレーターでは、 $1\sim 5\mu\text{m}$ の赤外の自由電子レーザーを供給する予定であるが、次のステップとして、 $0.3\sim 1\mu\text{m}$ の短波長での自由電子レーザーの実現を目指している。これには、さらに加速器の改良が必要である。

運用に関して、学術フロンティアの研究課題と、KEK との共同研究がオフィシャルなものとなっている他は、共同利用のためのルールが定まっていない。利用申請を受け入れるためのルール作りが急がれる。

参考文献

- [1] I.Sato et. al. “日本大学電子線形加速器の高度化と自由電子レーザーについて”, Proc. of the 26th Linear Accelerator Meeting in Japan (2001)30-33

名古屋大学の加速器利用施設の現状と 名古屋大学 超小型放射光利用研究センター (NSSR) 計画

曾田 一雄、山本 洋、山根 義宏(名大院工)、
中村俊夫(名大年代測定総合研究センター)

K. Soda, H. Yamamoto and Y. Yamane (Graduate School of Engineering, Nagoya Univ.),

T. Nakamura (Center for Chronological Research, Nagoya Univ.)

1. はじめに

本報告では、まず、講演で簡単にしか触れなかった名古屋大学における加速器施設の現状をまとめ、つぎに、名古屋大学が全学共通基盤設備の一つとして整備を検討している加速器施設：名古屋大学超小型放射光利用研究センター(Nagoya University Small Synchrotron Radiation Center, NSSR)計画を紹介する。

2. 名古屋大学における加速器利用施設の現状

現在、名古屋大学には、工学研究科に2台のバンデグラフ加速器(KN-3750を中心とした核特性測定装置およびAN-2500を中心としたイオンビーム表面解析装置)と年代測定総合研究センターに2台のタンデロン加速器質量分析(AMS)装置(GICタンデロンAMS装置とHVEEタンデロンAMS装置)がある。表1にこれらの性能をまとめた。以下にそれらの現状について簡単に述べる。これらのうち、工学研究科の加速器は、設置後、約20年以上経過し、研究に活発に使用されているにも関わらず、文部科学省からの維持費が削減、あるいは、打ち切られ、研究や装置の維持・向上が非常に厳しい状況となっている。

(1) 核特性測定装置：バンデグラフ加速器KN-3750

核特性測定装置のバンデグラフ加速器は、High Voltage Engineering社製KN-2000であり、1967年に設置、1982年に圧力タンク、加速管などを改造してKN-3750とした。加速器は、横型で、偏向電磁石によってビームを5つのポートに振り分け可能である。その中央ポートは、コンクリートで遮蔽された照射室へビームを導き、中性子線照射と電子線照射に用いる。中性子線照射では、重陽子ビームをD₂ガス、Be、あるいはLiのターゲットに照射して中性子を発生させる。電子線照射では、厚さ0.3mmのアルミニウム窓により、電子ビームを空気中に取り出すことができる。一方、偏向ポートでは、各種の散乱槽を設置して、荷電粒子の透過、散乱および衝突現象等の実験ができる。また、多数の検出器を配置して放射線の位置・エネルギー・時間情報を得るマルチパラメータ同時測定装置が利用可能である。主として3グループが本装置を使用しており、以下に主な研究例を紹介する。

(a) データ欠落領域における中性子放射化断面積の測定

核融合炉の誘導放射能低減に向け、バンデグラフ加速器を用いた高速中性子照射によって核融合炉候補材の放射化断面積を系統的に測定している。データが欠落している3~7MeVのエネルギー範囲における放射化断面積の測定を行うため、d-D中性子発生用ガスターゲットを開発し、⁶⁷Zn (n, p) ⁶⁷Cu反応、⁶⁹Ga (n, p) ^{69m}Zn反応を初めて測定した。

(b) 荷電粒子反応による高エネルギー 線源の開発

10MeV以上の高エネルギー 線計測の標準的手法を確立することを目指し、荷電粒子捕獲反応を利用して高エネルギー 線発生技術とその測定法を開発を行っている。

(c) 酸化物のイオンビーム分析

種々の酸化物高温超伝導薄膜等、機能性酸化物の組成、特に、酸素や不純物の定量分析を行っている。今までにBi系酸化物高温超伝導薄膜からの酸素離脱は起こらないことを確認した。

(d) 合金の電子線照射

原子空孔の役割を検討して材料設計・開発に利用するため、電子線照射によって合金中に原子空孔を導入し、微量元素原子空孔複合体の形成に基づく合金の新しいクリープ変形抑制メカニズムや実用合金に導入した過剰原子空孔による機械的性質の変化について研究をすすめている。

このバンデグラフ加速器 KN-3750 は、公称 3.75MeV までのビームを発生可能であるが、3MeV 以上では極端にビーム電流が取れず、エネルギーが安定しない。中性子反応断面積の測定では、高エネルギーで大きな電流が必要であるが、放電によるベルトの損傷をまねき、ビームの収束性はよくない。今後の

Table 1. Performance and Main Application of Accelerators at Nagoya University

	工学研究科			年代測定総合研究センター	
	核特性測定装置	イオンビーム表面解析装置		¹⁴ C 質量分析装置	¹⁰ Be 質量分析装置
加速器名	バンデグラフ KN-3750	バンデグラフ AN-2500	重イオン 注入装置	HVEE タンデ トロン AMS 装置	GIC タンデトロン AMS 装置
加速粒子	p, d, α, He ₃ ⁺ , e ⁻	p, He ₃ ⁺ , He ₄ ⁺	H ⁺ ~ Au ⁺	¹⁴ C, ¹³ C, ¹² C	¹⁰ Be, ⁹ Be (予定)
加速電圧	最大 3.75 MV	最大 2.0 MV	20 ~ 200 kV	2.5 MV(2.75 MV)	1.8 MV (2.1 MV)
ビーム電流	0.1 μA (3.75 MeV) ~0.1 mA (2 MeV)	最大 20 μA	最大 10 mA	30 μA (¹² C)	1.5 μA (⁹ BeO)
使用日数	約 150 日/年	約 150 日/年	約 50 日/年	約 200 日/年	改造・調整中
主な用途	d-D 中性子による 放射化断面積測定 単色高エネルギー 線源の開発 材料の イオンビーム分析 材料への 電子線照射	材料中の水素 同位体深さ分析 固体表面の 組成分析 固体表面の 結晶性評価	材料への 不純物注入 イオンビーム 誘起界面反応 材料表面の改質 格子欠陥生成 結晶表面 構造解析	¹⁴ C 年代測定: 1 万年前より新し い試料について 測定誤差: ± 20 年~ ± 40 年 正確度: ± 40 年	¹⁰ Be 年代測定

発展のために、ビーム移送系を整備してビームの収束性を改善し、実験の質を向上させたい。しかし、文部科学省からの維持費は、今年度から打ち切れ、厳しい状況にある。サイクロトロンを中心とした先端科学量子ビーム装置の整備・開発を将来構想として考えている。

(2) イオンビーム表面解析装置：バンデグラフ加速器AN-2500と重イオン注入装置

イオンビーム表面解析装置は、1980年に設置された日新電機社製重イオン注入装置と1981年に設置されたHigh Voltage Engineering社製バンデグラフ加速器AN-2500を主体とした装置である。バンデグラフ加速器、重イオン注入装置は、ともに横型で、それぞれビームを5方向と3方向に振り分けることができ、また、同時照射も可能である。これらの装置から発生させたイオンは、オージェ電子分析、X線光電子分析、低エネルギー電子線回折、高エネルギー反射電子線回折、同軸型直衝突イオン散乱分析などの各種表面分析装置を備えた超高真空槽へ導かれ、材料への不純物注入や材料改質のほか、ラザフォード後方散乱分光法や反跳粒子検出分析法によって結晶表面構造の解析、固体表面の元素分析や結晶性評価、材料中の水素同位体分析、また、材料とイオンビームとの相互作用に関する研究に使用される。本装置は、主に10グループが使用しているが、維持費削減で状況は厳しい。以下、代表的な研究を簡単に紹介する。

(a) 黒鉛及び金属被膜黒鉛における金属スパッタリングの抑制

金属被膜黒鉛に高温で Ar^+ や高熱束プラズマを照射し、金属原子のスパッタ収率の温度依存及び粒子束依存を調べ、材料表面に自己修復性を出現させる方法を新しく提案してその条件を検討している。

(b) グラファイト及び金属被膜グラファイトにおける水素同位体リサイクリングのモデル化

核融合炉壁候補材にイオン注入された水素同位体の加熱やイオン衝撃による再放出挙動を反跳粒子検出法で調べ、核融合炉中の水素同位体リサイクリングのモデル化とパラメータの決定を行っている。

(c) Si(111)表面上の貴金属吸着層の加熱による動的挙動と構造変化

Si(111)表面上の単原子層貴金属吸着層の加熱やイオン衝撃による表面組成と超周期構造の変化を各種の表面分析手法を併用して測定し、次世代機能性薄膜のための表面反応や表面相図を調べている。

(d) InP(001)表面上の金属のエピタキシャル成長と水素の効果

InP(001)-p(2x4)表面における Au や Ag 薄膜のエピタキシャル成長条件や表面に吸着した原子状水素の役割、デルタドープされた金属の界面構造について明らかにした。

(e) 酸化物セラミックス中の重水素と水蒸気中の軽水素との低温置換反応

酸化物セラミックスにイオン注入した水素同位体と雰囲気中の水素同位体との低温置換反応に大きな同位体差を発見し、その機構解明とこの現象の応用について研究している。

(f) イオンのエネルギー損失の高分解測定

イオン注入装置を用いて高分解イオン散乱分光を行い、炭素薄膜を透過した 100keV イオンのエネルギー損失分布を高分解能(約 30eV)で測定し、エネルギー損失のばらつき等に関する情報を得た。

(g) イオン照射によるカスケード損傷機構の研究

核融合中性子照射による欠陥構造の発達機構を理解するため、イオン注入装置とバンデグラフ加速器によるイオン照射と電子顕微鏡観察を併用してイオン照射によるカスケード損傷機構が研究された。

(3) タンデトロン加速器質量分析装置

1977年に「タンデム加速器を用いた加速器質量分析」という天然のごく微量同位体の測定法が米国・カナダを中心に開発され、その後、加速器質量分析による年代測定法が急速に世界中に広まった。名古屋大学では、米国General Ionex社で開発された ^{14}C 測定専用のGICタンデトロン加速器質量分析装置(同社作製の第2号機)を1980~1981年度にアイソトープ総合センターに導入した。同装置は、1983年から ^{14}C 年代測定が可能となり、1985年から学内共同利用装置として供された。1990年には、同装置を中心にして年代測

定資料研究センターが発足し、国内唯一の「年代測定」の名称を持つ研究センターとして考古学、地質学関連試料の ^{14}C 測定に利用され、多くの成果を生みだしてきた。1996~1997年度には、新たに最新型のHVEEタンデトロン加速器質量分析装置を導入し、高精度（ ± 20 年~ ± 40 年）、高正確度（ ± 40 年）の ^{14}C 測定を達成した。2000年から学内共同利用に供され、考古学や地質学の幅広い応用分野で高精度の編年の研究などに利用されている。なお、旧型のGICタンデトロンは ^{14}C 測定から ^{10}Be 測定に切り替えるために改良・調整が進められている段階である。これらの加速器では、その用途が固定とはいえ、いかに故障を少なくし、均一な年代データを生み出していくかが課題である。そのためには、保守・管理・運転に相応のマンパワーが必要であるが、現状では専任の熟練したオペレータや技官を確保できていない。

3. 名古屋大学超小型放射光利用研究センター（NSSR）計画

近年、放射光の重要性が世界的に認識され、我が国でも、大型放射光施設 SPring-8 に見るように、放射光源の高輝度化や高エネルギー化が推進されてきた。しかし、このような大型施設では、利用日程と装置に関する制約が大きく、断念せざるを得ない研究が数多くある。一方、広島大学放射光科学研究センターHiSORをはじめ、大学の多くの研究者に放射光を身近なものにする超小型放射光施設も本格的に稼動しつつある。このような超小型放射光施設により、各大学の特色ある研究が推進され、放射光の新しい利用形態や新しい産業が生まれる可能性が飛躍的に高まると予想される。

名古屋大学超小型放射光実験施設設置促進委員会グループは、大学の教育・研究現場に直結した超小型放射光施設として、図1に示すような、蓄積エネルギー1GeV、最大蓄積電流0.5A、周長36mの放射光発生装置を中心とした名古屋大学超小型放射光利用研究センター（Nagoya University Small Synchrotron Radiation Center, NSSR）を提案している。計画では、大学という教育現場で放射光工学や放射光科学の知識と技術をもった若い人材を育成するとともに、大学内外の異なる研究分野の融合によって大型施設

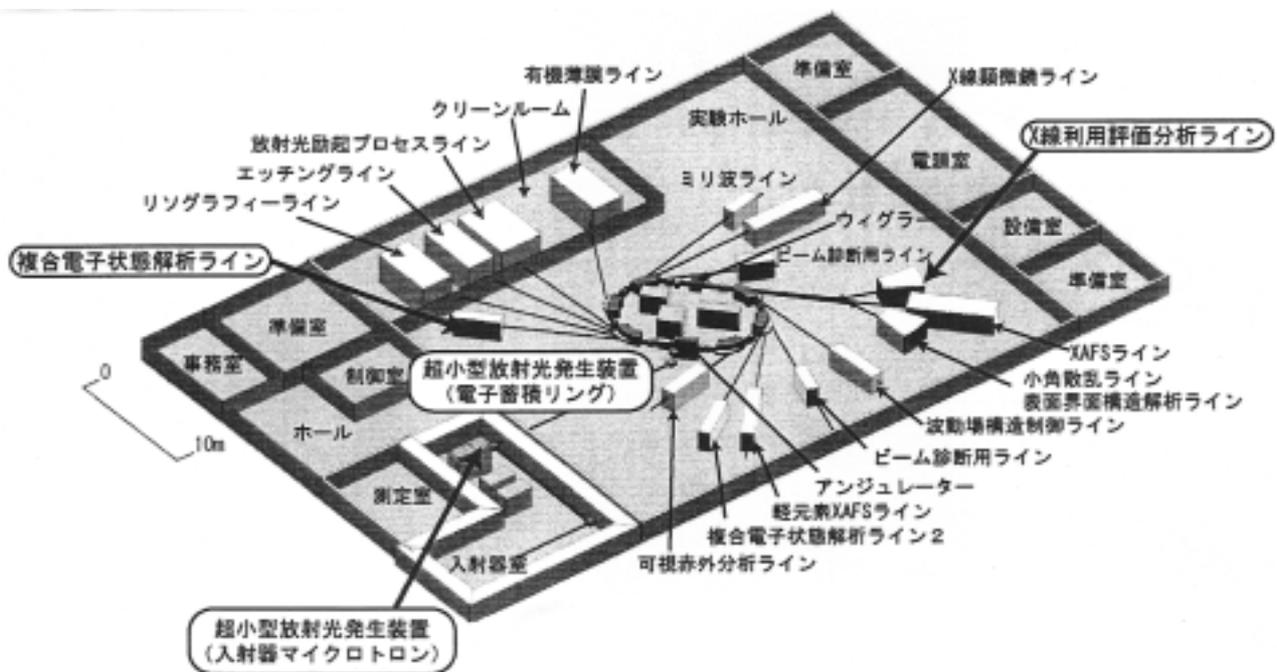


Fig.1 Layout of Nagoya University Small Synchrotron Radiation Facility

の共同利用研究とは異なる独自の最先端研究を推進する。特に、名古屋大学を中心とした中部地区教育研究機関・公的研究機関と中部地区産業界との連携を図り、新しい産業の創出を狙っている。

NSSRの光源加速器は、容易な運転と放射光の安定供給を目指した汎用小型のものを用いる。しかし、

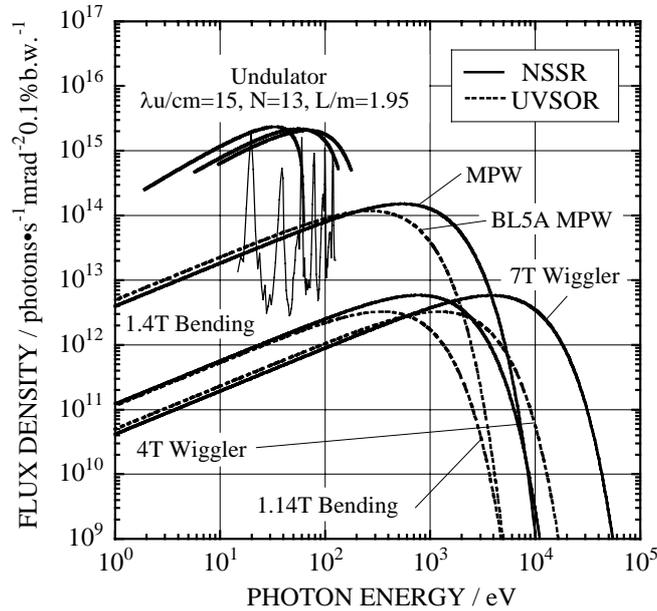


Fig.2 Synchrotron radiation spectra of light sources in NSSR accelerator complex. The spectra were calculated with an energy $E = 1$ GeV, current $I = 300$ mA, and emittance $\varepsilon = 180$ nm·rad of a stored electron beam for NSSR and with $E = 0.75$ GeV, $I = 300$ mA, $\varepsilon = 165$ nm·rad for UVSOR.

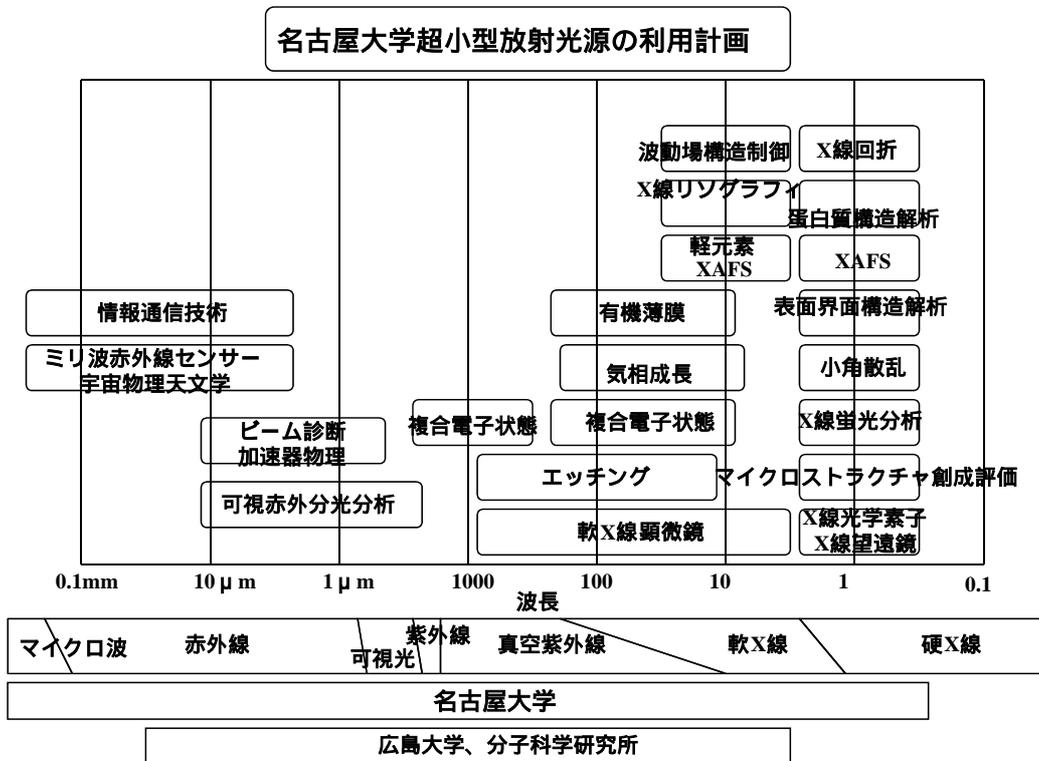


Fig.3 Wavelength range for proposed research fields

Table 2. Performance and Application of Nagoya University Small Synchrotron Radiation Facility

加速器名	NSSR [電子蓄積リング(周長 36 m) + 入射用マイクロトロン(入射エネルギー0.15 eV)]		
加速粒子	電子	蓄積電子エネルギー	1 GeV 以下
		蓄積電流	300 mA 以上
		エミッタンス	180 nmrad
主な用途	放射光光源としてマイクロ波から硬 X 線までの広範囲の放射光を利用した研究 (材料解析・開発・加工、バイオ・医療応用、X 線光学・新型光源技術開発など)		
光源としての特長	7T 超伝導ウイグラー(1 台)	臨界波長 0.54 nm 以下の硬 X 線発生	
	アンジュレータ(1 台)	1 次光 240 nm 以下	
	偏向電磁石(6 台)	臨界波長 1.4 nm、長波長利用も含む	
ビームライン数	ウイグラー部 3 本、アンジュレータ部 1 本、偏向電磁石部 18 本		

7 T 超伝導ウイグラーによって 30keV までの硬 X 線利用を可能にすることが特長である。このような硬 X 線発生は、図 2 に示す放射光の強度分布に見るように、中部地区既設の放射光施設、分子科学研究所 UVSOR ではできない。さらに、ウイグラービームラインを 3 本に分岐し、硬 X 線利用研究を充実する。これは、名古屋大学で伝統的に盛んな X 線分野の研究を活かすものである。他方、光子エネルギー 6~100eV のアンジュレータ光源を設置するとともに、エッジ放射など低エネルギー光子も利用する。これらの光源によって硬 X 線からマイクロ波にいたる幅広い領域で種々の応用分野の要望に応えた放射光利用を可能とする。提案されている研究をその研究が利用する手法の波長領域に分けて図 3 に示した。

NSSR では、試料作製を行う研究現場に放射光を導入することで、特に、不安定な蛋白質や酵素の構造解析・機能解析を行い、ポストゲノム研究を進める。また、図 1 のように、クリーンルーム内での放射光利用や各種物理化学分析技術の集積に応じたビームラインを設置し、ナノ技術応用を目指す学内グループを中心に加工・製造技術に結びついた周辺装置を準備する。一方、これらの重点課題だけでなく、放射光を一手法とする学内外からの多くの利用研究にも柔軟に対応する。このように、大型施設の共同利用では敷居の高い、長期利用、試料作製現場における「その場」分析、簡便利用を行う計画である。

以上に述べた NSSR 計画の特長は、以下のようにまとめられる。

- 1：汎用小型光源加速器を用いた硬 X 線 (30keV) からマイクロ波までの放射光の身近な利用
- 2：長期専用利用、「その場」分析、簡易迅速利用など、大型施設の共同利用とは異なる利用形態
- 3：中部地区の教育・研究機関と産業界へ開かれた利用
- 4：放射光工学・放射光科学の知識と技術をもつ若い人材の育成
- 5：放射光生物学研究と放射光ナノプロセス工学研究の推進

NSSR では、このような新しい利用形態によって名古屋大学の特色ある研究を進める予定である。以上に述べてきた NSSR 加速器の仕様を表 2 に簡単にまとめた。

なお、原子力関連分野から、微細放射線検出器の作製や校正、アクチノイド化合物や熱電材料などエネルギー関連材料の物理化学分析、新しい高エネルギー光子源の開発への利用が提案されている。

京都大学における加速器に関わる研究開発 (I)

今西信嗣 (京大院工)

N. Imanishi (Graduate School of Engineering, Kyoto Univ.)

1 . イオン加速器の現状

京都大学現有のイオン加速器ははなはだ心細い。医学部附属病院の医療用加速器は別にして、Table 1 に示すように、イオン加速器と呼べるものは理学研究科、工学研究科、化学研究所、エネルギー理工学研究所にある比較的小型のものである。理学研究科のタンデム型ヴァンデグラフ加速器、工学研究科のシングルエンドヴァンデグラフ型加速器、コッククロフトワルトン型タンデム加速器などは学内外の共同利用に供されている。利用部局・専攻は、Table 2 にあるように、工学研究科・工学部においては、原子核工学専攻・量子理工学研究実験センター、材料工学専攻、機械物理学専攻、精密工学専攻、電子物性工学専攻・イオン工学実験施設である。理学研究科・理学部においては物理学・宇宙物理学専攻が中心である。両部局の加速器にはエネルギー科学研究科、農学研究科・農学部、情報学研究科、原子炉実験所、化学研究所、放射性同位元素総合センターをはじめ学外の研究者も分析や材料開発等多岐にわたり利用している。

Table 1. Ion accelerators in Kyoto University

理学研究科	タンデム・ヴァンデグラフ (ペレトロン) 型 加速器 : 7.5MV (p, d, ^7Li , ^{12}C , ^{13}C , C-AMS.....) 加速器質量分析、PIXE
工学研究科	タンデトロン : 1.7MV (p, ^4He , ^7Li , Si, Ge, Ag, Au..) RBS、PIXE ヴァンデグラフ型加速器(イオン) : 2.5MV (p, ^4He) NRA、ERDA
化学研究所	線形加速器 (RFQ、アルバレ型)
エネルギー理工学研究所	タンデトロン : 1.7MV, (Si, Ni) タンデトロン (シングルエンド) : 1MV (^4He) DuET (RBS、ERDA...)
医学研究科	サイクロトロン (PET)

現有の加速器はいずれも性能面では特筆に値するものではないが、利用面においては、イオン固体相互作用やそのナノテクノロジーへの展開など物性・材料科学、原子核物理学をはじめ加速器質量分析や検出器の開発のほか、エネルギー学、分析科学、環境科学、生命・生体科学、医学、農学などの思いもよらぬ分野も含めて、格段の創意工夫を凝らした数多くの研究課題が、工学研究科や理学研究科の小型イオン加速器を利用して遂行さ

れている。また、化学研究所においては医療や新しい科学の展開の要請をふまえた特徴あるビームの開発、エネルギー理工学研究所においては核融合材料の研究が行われている。古いものほど創意工夫を凝らす。これが京都の特徴のひとつではあるが、やはり施設の老朽化は否めなく、将来にわたって、研究者の活力に応え、研究志向型大学として世界の知的資産の創造に貢献していくにははなはだ心許ない。Table 3 に加速器利用が展開されている課題例を示す。

Table 2. Accelerator users

理学研究科 タンデム型ヴァンデグラフ加速器	理学研究科・理学部（物理学・宇宙物理学専攻） 工学研究科、放射性同位元素総合センター
工学研究科 コッククロフトワルトン型タンデム加速器、 シングルエンドヴァンデグラフ型加速器	工学研究科・工学部（原子核工学専攻・量子理工学研究 実験センター、材料工学専攻、機械物理学専攻、精密工 学専攻、電子物性工学専攻・イオン工学実験施設） エネルギー科学研究科、農学研究科・農学部、情報学研 究科、原子炉実験所、化学研究所、放射性同位元素総合 センター、国際融合創造センター

Table 3. Accelerator-related research programs

基礎物理： 原子核の構造と反応、原子核物理学の実験的研究、 ビームと物質との相互作用、とくにナノ領域およびフェムト秒からピコ秒領域での初期素過程、など
物質科学および材料開発への応用： 分析・評価：RBS、PIXE、ERDA、NRA、ISS、など、 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、など イオン散乱法による表面1原子層ごとの構造解析、 電子デバイスをはじめとする材料開発、 シリコンナノ結晶の作成と光学デバイスへの応用、 生体適合材料の表面安定化、 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
その他： 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、 イオンビームのマイクロビーム化や同時照射技術など技術面、測定器の開発
加速器開発： 小型医療用加速器、クーラーリング、FEL

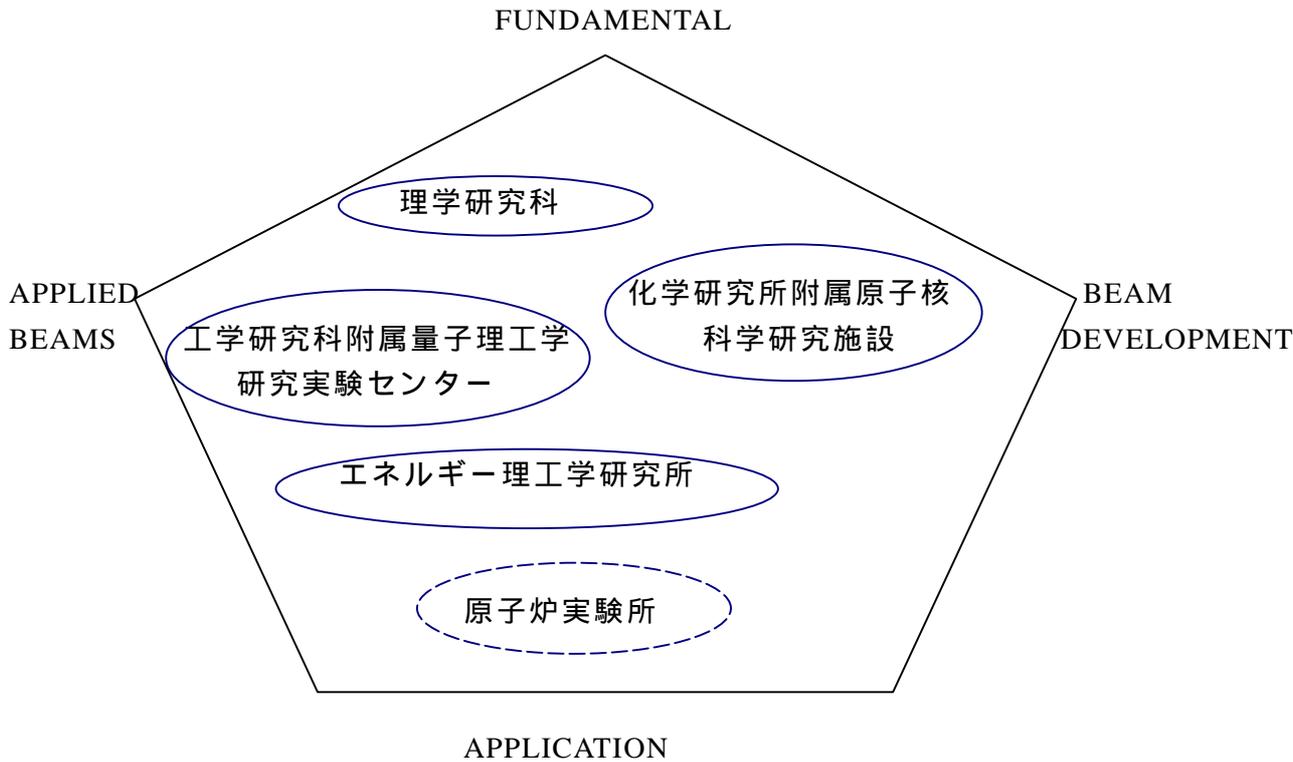
2. イオン加速器の将来計画

京都大学における加速器科学の総合計画：原子力研究整備委員会の下部組織である共

用加速器小委員会が中心となり、“京都大学における加速器科学総合推進のあり方”について、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・機能は何かについて、学内および国内外の状況を調査し、総合的に検討を行っている。京都大学としては、基礎的、創造的、萌芽的研究に重点を置き、それには機動性のある中小型汎用加速器が適していると考えている。また、大規模な第3キャンパス構想から都市型新キャンパス構想へ移行し、実行中でもあり、物理的にも大型施設は困難であるとの認識に立って、まずは、京都大学における既設備ならびに工学研究科、理学研究科・化学研究所、エネルギー理工学研究所が概算要求中の機動性のある中小型汎用加速器からなる新設備のネットワーク化（Fig. 1）を進め、それらによる基礎的、創造的、萌芽的研究が軌道にのれば大型共同利用施設を利用することを考えている。

原子炉実験所については全国共同利用の観点から、別途取り扱う。

Fig. 1. Accelerator network in Kyoto University



京都大学における加速器に関わる研究開発

—大学における加速器・ビーム物理学の研究・教育のあり方—

野田章(京大化研)

A. Noda (Institute for Chemical Research, Kyoto University)

1. はじめに

京都大学におけるイオン加速器の現状とその利用研究については、今西先生の方で纏めていただいている。ここでは本学の施設の紹介といった立場を離れて、「大学における加速器・ビーム物理学の研究・教育は如何にあるべきか。」といった観点を中心に京都大学における現状を分析してみたい。

2. 加速器・ビーム物理学の現状

化学研究所附属原子核科学研究施設では、蹴上に設置されたサイクロトロンを用いた原子核物理学の展開に加えて、中間子科学総合研究センター構想を、理学部物理学教室をはじめとする学内他部局との共同により提案し推進してきた[1]。図1にこの計画で提案されていた加速器システムを示した。これが今年度から高エネルギー加速器研究機構と日本原子力研究所との統合計画として予算化されるに至った大強度陽子加速器計画の端緒を切り開くのに役立ったと考えている。

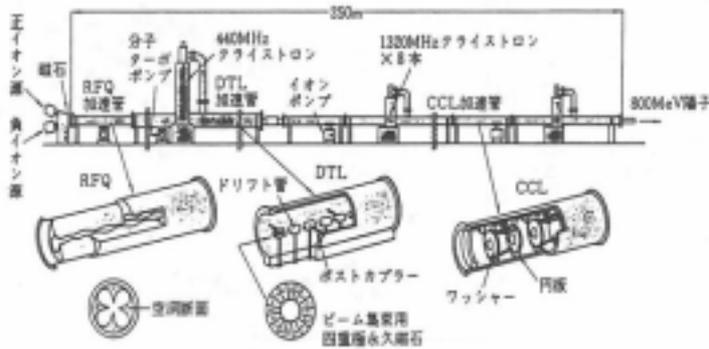


図2 800MeV陽子リニアック

300μAの陽子と100μAの水素負イオンを同時に加速します。表面波4重極加速管(RFQ)で200万電子ボルトに、アルバレー型加速管(DTL)で1.25億電子ボルトに加速し、さらにコップドキャピタリ型加速管(CCL)で8億電子ボルトまで加速します。

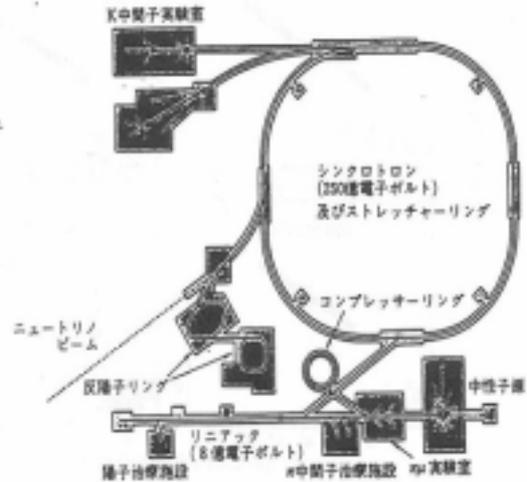


図4 研究施設の概要

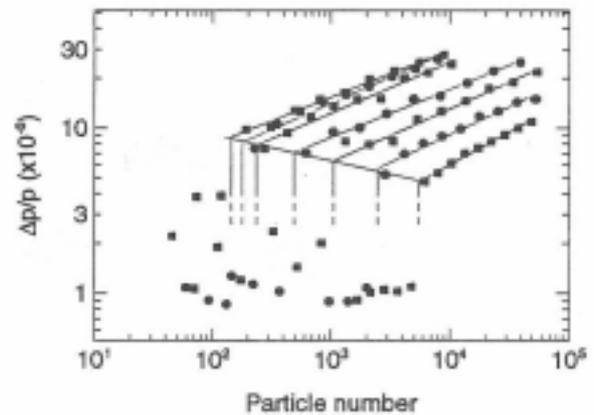
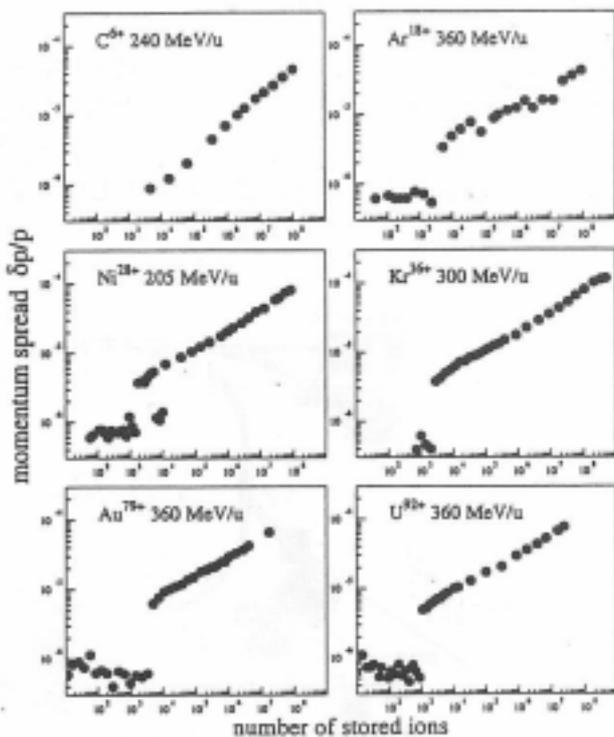
a) 800 MeV Proton Linac

(b) Outline of the Proposed Research Facility

Fig. 1 Accelerator Complex proposed for “Meson Science Research Facility”
(京都大学原子力整備委員会、加速器小委員会、昭和60年1月発行パンフレットより借用)

一方、加速器科学の進展につれ、一大学において最先端の大型装置を保有することは極めて困難な状況となりつつある。こうした状況の中で、単に共同利用機関の装置を利用する受け身の姿勢のみではなく、大学の研究者が主体性を持って加速器科学に取り組む方途を模索してきた。こうした取り組みの中から、従来は、加速器を素粒子、原子核、固体等の対象とする物質別の科学研究の手段としてのみ捉えていた考え方から一歩進んで、加速器中のビームそのものの示す物理現象そのものを解明しようという、「ビーム物理学」なる分野が登場してきた。これは、山崎敏光先生の言葉をお借りすれば、「従来の物質別の縦割り科学に対する横糸のような存在」ともいえる分野である。こうした取り組みの中から、「ビームの極低温への冷却とそれによる結晶化」が提唱され[2]、化研の我々のグループはその実験的検証を目指しつつある。これに関しては、最近ドイツの GSI の ESR とスウェーデンの Manne Siegbahn Institute の CRYRING において、一次元の結晶化を示唆するデータが電子ビーム冷却により示されている。図 2 に今年のシカゴでの PAC2001 で発表された ESR 及び CRYRING におけるビームの相転移を示唆するデータを示す[3,4]。これらのデータはいずれも電子ビーム冷却の結果得られたものであり、ここで示されている兆候は、ビームが一次元的に整列している可能性を示唆するものである。3次元的なビームの結晶化を実現するためにはこれよりも一

桁以上強い冷却力が必要と予測されており、我々はこれをレーザー冷却の強力な冷却力で実現することを目指して、「3次元レーザー冷却」による「ビームの結晶化」の実験的検証に取り組みたいと考えている。



(a) Reduction of the momentum spread of various bare ions electron-cooled at ESR.

(b) Momentum spread of electron-cooled Xe^{36+} ions for various numbers observed at CRYRING.

Fig.2 Experimental indication of phase transition of the electron-cooled ion beams.

KSRのストレッチャーモードでは、図3に示したようなTARN IIにおいてイオンビームに対してはじめて適用された高周波蹴り出し法(RFKO法)を3次共鳴と併用する手法[5]により、ビームスプリを10秒以上にわたって拡大することが可能であることが示されている(図4参照)[6]。今後は、実用化に向けた取り出し効率の向上が急務となっている。

共同利用研究機関を用いた主体的研究を目指す取り組みとしては、上述の統合計画の大強度陽子ビームを用いて、大強度ミュオンビームを「位相空間回転」において実現しようとする取り組みも、京都大学、大阪大学を中心として進められている。

大電力超短パルスレーザーの強い電磁場によって生成されるプラズマにより、高エネルギーイオンビームを生成し、これを医学等の利用研究のために実用化する開発研究[7]も、原研関西研、東大工学研究科、広大先端物質科学研究科との共同研究により開始している。図5に示したようにレーザーで薄膜から生成されたイオンビームをこの超短パルスレーザーと同期した高周波電場で位相回転する事により、生成イオンビームのエネルギースペクトルにピークを生成し、所要エネルギー幅内のイオンビーム強

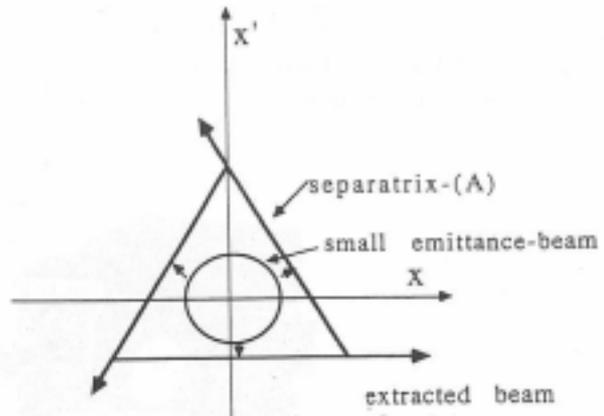


Fig.3 Slow extraction scheme with combination of RF knockout and third order resonance.

Fig.3 Slow extraction scheme with combination of RF knockout and third order resonance.

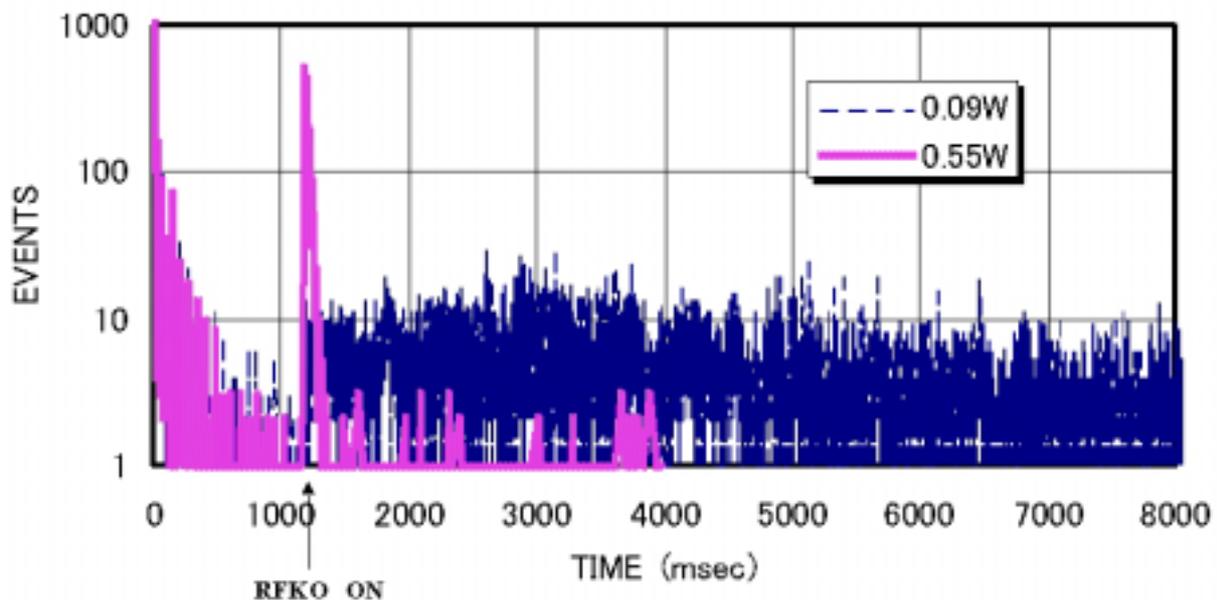


Fig.4 Beam spill of the extracted beam from KSR with different RFKO powers.

度の増大を図ることを計画しており、近く実験的検証を開始する予定である。

3. 大学における研究・教育のあるべき姿

京都大学においては、前項で述べた「ビームの結晶化」の実現やイオンビームと電子ビームの複合ビームの実現を目指した加速器計画を全学組織において推進することを目指した努力を、過去2年間近く継続してきたが、各部局の事情もあり実現に至っていない。加速器装置は、通常の大学の研究室の常識からするとかなり大きな予算及び人員を必要とするため、上述の縦割りの個別科学の研究が中心の各部局内の議論では、支持が得られにくいのが実状である。京都大学内の多数の

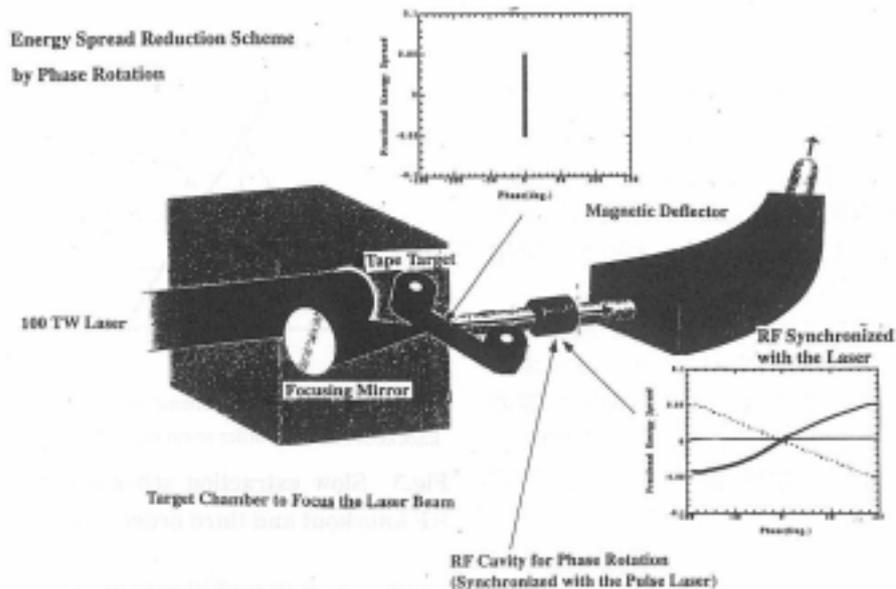


Fig. 5 Scheme of the high energy ion production by a short-pulse high-power laser from a solid target and its phase rotation by an RF field synchronized with the laser.

部局に散在する加速器科学関連研究者の連携をはかり、大学として適正規模の装置なり予算を競争的資金（COE等）も含めて獲得する努力を通じて、学内における研究ネットワークを構築することが急務であると思われる。勿論このネットワークは本来学内に閉じるものではなく、既に述べたような全国的な共同研究をも視野に入れた包容力のあるものであるべきと考えている。こうした取り組みは、学内における適正規模の装置を活用した研究のみならず、全国共同利用機関における主体的研究活動の展開のための基盤としての役割をも担うものといえよう。いずれにしても、大学におけるこうした研究はリアルな実機が大学内の施設として必ずしも設置されることは必要条件ではなく、大学での萌芽的研究の上に立って、実機の完成は共同利用研究機関において実現してもよいが、肝要なことは「世界の最先端を目指す。」姿勢を持ち続けることであると考えている。そして、このようなネットワークを通じて、京都大学における加速器・ビーム物理学の研究を活性化する事がとりもなおさずこの分野の後継者育成の最善の道でもあると信じている。

参考文献

- [1] 京都大学原子力整備委員会、加速器小委員会 「中間子科学総合研究センター」パンフレット、昭和60年1月発行
- [2] 岡本宏巳、「高速イオンビームの結晶化」、現代物理学最前線1、共立出版、pp117-179 (2000).
- [3] M. Steck, K. Beckert, P. Beller, B. Franzke and F. Nolden, "Extremely Cooled Ion Beams in the ESR with Evidence of Ordering", Proc. of PAC2001, Chicago, USA (2001) in print.
- [4] H. Danared, A. Källberg, K.G. Rensfelt and A. Simonsson, "Observations of Ordered Ion Beams in CRYRING", Proc. of PAC2001, Chicago, USA (2001) in print.
- [5] M. Tomizawa et al., "Slow Beam Extraction at TARN II", Nucl. Instr. And Meth. In Phys. Res. **A326** (1993), pp399-406.
- [6] A. Noda et al., "Slow Extraction of Electron with Combination of the Third Order Resonance and RFKO" Proc. of PAC2001, Chicago, USA (2001) in print.
- [7] A. Noda et al., "Collection and Cooling Scheme of Heavy Ions Produced by a High Power Pulse Laser", Beam Science and Technology, **Vol. 6** (2001) pp21-23.

京都大学原子炉実験所における加速器に関わる研究

市原千博、高見 清、川瀬洋一（京大原子炉）

T. Ichihara, K. Takami and Y. Kawase

(Research Reactor Institute, Kyoto University)

1. 原子炉実験所における加速器

原子炉実験所では 1965 年に電子線型加速器 (KUR-LINAC) が設置されたが、当初は定常的中性子源である原子炉と相補的なパルス状中性子源としての位置づけであった。KUR-LINAC は主に、長距離飛行管を用いて炉材料などの核データ収集・核データ検証実験などに利用された。しかし現在では、多様な粒子線源として電子、X 線、中性子による材料照射、 (γ, n) (γ, p) による RI の製造やその応用、ミリ波コヒーレント放射光による物理実験などに広く利用されるようになってきた。この間、利用の多様化に応えるため、エネルギー増強 (23 MeV → 46 MeV)、などいくつかの大規模な改良が行われてきた。

1974 年に臨界集合体 (KUCA) の付設設備として 14MeV パルス中性子発生装置が装備された。これは KUCA の主な設置目的のひとつであるトリウム体系の炉内中性子スペクトルを飛行時間法で求めることを目的として設置された。そのため高い中性子発生量が必要となり、トリチウムターゲットを利用した 14MeV 中性子発生装置としては当時世界でも有数の装置であった。1978 年パルス化を含めて工事が終了し、炉心と組み合わせた利用に加えて核融合炉ブランケットの基礎実験にも使用された。2000 年度からは、次期計画とも関わって加速器駆動未臨界炉心 (ADS) の基礎的研究を KUCA で行うため、日本原子力研究所との共同研究が開始され、電源および操作系のほとんどが更新されることとなった。2000 年度にはイオン源周りのすべての電源が更新され、それにともなって遠隔制御系がデジタル化されてこれまでよりも円滑なコントロールが可能になった。

2. KUR-LINAC

2-1. 装置の概要

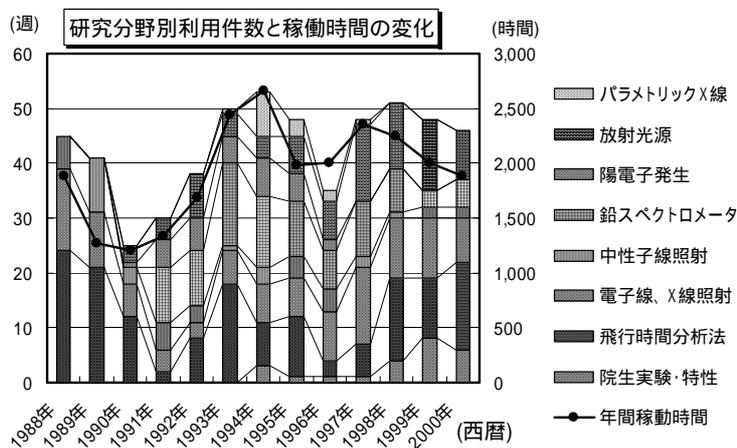
1965 年に米国 ARCO 社製 L-1512G 型電子線型加速器を導入、当初、加速管 1 本であったが、1971~72 年にわたりエネルギー増強(加速管、マイクロ波発生装置の増設で 23MeV → 46MeV)や 1973 年に電流増強 (大型電子銃の導入) 作業を所員で行い、その後も特別設備費や維持費を使って電子銃駆動パルサの大電流化、クライストロンやサイラトロンの型式変更、クライストロン・パルサ(モデュレータ)の高繰り返し化、多様な実験に対応できるようにビームダクトの改造などに取組み、今年行った主クライストロン 2 本の交換とサイラトロン冷却の改造で過去最高のビーム・パワーでの安定な運転が可能になっている。

2-2. 装置の特徴と性能

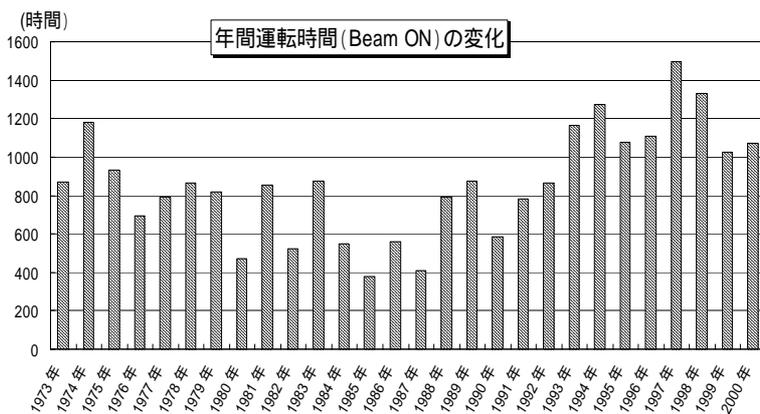
本装置は、Lバンド(1,300MHz)マイクロ波を使ったLINACで、Sバンド(3,000MHz)LINACに比べるとビーム径が15mm弱と大きいのが、加速電流が大きくロング・パルス(4μs巾)で500mAを加速する。この時、ビーム・エネルギーが~30MeV、パルス繰返しが120ppsでビーム・パワーは~8kWである。小型マシンであるが、比較的RIリッチな実験が可能な貴重な装置である。ショート・パルスでは2~6A(100~10nS)のビーム電流とパルス繰返し数1~400ppsの運転ができる。

2-3. 実験設備および利用実験

本装置は全国の大学・研究機関の共同利用設備として、まず、原子炉物理研究を目的とした中性子飛行時間測定法による中性子の拡散、熱化現象、中性子スペクトルの形成にかかる研究からスタートし、炉材料などの集合体系中の中性子挙動・スペクトル測定、中性子輸送計算との比較評価や核データの積分テスト・評価に関するマクロな核データ研究、中性子全断面積、捕獲断面積といったミクロな核データに関する研究



第1図 研究分野別の利用件数



第2図 年間稼働時間の近年の変化

研究が実施されてきた。さらに、電子線、X線、中性子による材料照射、(,n) (,p)によるRIの製造やその応用、陽電子発生、ミリ波コヒーレント放射光による物理実験、鉛スペクトロメータと組み合わせたアクチニド核データの測定、液体窒素温度における電子線照射など、多様な粒子線源として利用されている。中性子発生用としては水冷と空冷のタンタル・ターゲットが、X線発生用として水冷タンゲステン・ターゲットがある。主要な付属装置として、12mと22mの中性子飛行管、鉛減速中性子スペクトロメータ、コヒーレント放射光実験用装置、液体窒素温度における照射装置等がある。

左図に研究分野別の利用件数と年間稼働時間の近年の変化を示す。10年余り前から実験の多様化が始まった。当初は、鉛スペクトロメータの設置やビームダクトの改造で利用は少ないが、年間約50週の利用である。(1996年は実験者の都合で少なくなった。)稼働時間は、加速器の低圧ON時間に実験の準備や片付け(8時間/日)を加えた時間である。下図は、実際のビームON

時間で過去 24 年間を示すが、近年の 10 年程が以前と比べ、明らかに多い。また、準備・片付を含めた利用日数は年間 200 日を越え、30%前後が、準備や片付に要している。年間の延べ利用者数は、800～1,000 人である。ターゲット室や実験室が狭く、単一ユーザ・マシンであるために実験毎の準備や片付けに時間を取られるため現状が限界に近いと判断している。

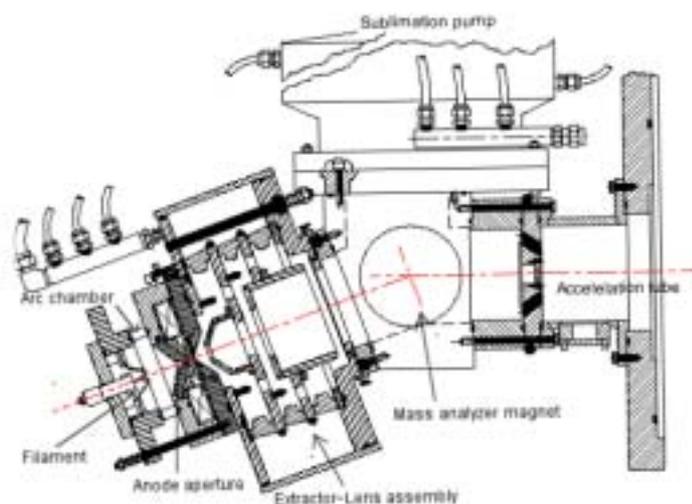
2-4. 問題点および今後の予定

設置以来相当の年を経ても頻繁に共同利用に供されているが、文部省からの特殊装置維持費は、1991年に半減、削減が続き、1997年度から無くなり、所内的予算措置で運転を継続できている。しかし、高額な装置の改修が進まず、老朽化が進んでいる。現在の電子銃はメーカーが製造中止で予備品がないため、運転継続の保証と性能改善を含め、今よりもかなり小口径の YU-156 を使った電子銃を試作中で、ビーム径 10mm 以下を目指している。

3. KUCA 付設中性子発生装置

3-1. 装置の概要

本装置は KUCA の付帯設備として、KUCA 建家の中に設置されている。この最大の設置目的は、KUCA のメインテーマの一つである Th 炉心中の中速中性子エネルギースペクトルを飛行時間法によって測定することで、パルス尖頭値で 10^{12} n/s を目指して設計が進められた。その結果、イオン源としては単体で 12mA の重陽子を取り出すことのできるデュオプラズマトロン型イオン源を採用し、トリチウムターゲットとの組み合わせにより D T 中性子を発生する静電型の加速器を設置することとなった(第 3 図)。イオン源、加速管、主要な電源などは米国 Radiation Dynamics Corp. 製である。加速電圧(最大 300kV)は絶縁変圧器型電源で発生させ、高圧ケーブルで電極に印加される。パルス化は平行電極に 3 kV を印可することによりビームを偏向させ、



第 3 図 デュオプラズマトロン型イオン源

アーク放電をパルス状に同期させて 3 kV をカットすることによって行っている。アークパルスを併用するためにイオン源の負荷を減少させることができる。加速管はパイレックスガラス・ステンレス鋼を張り合わせたセクションを 36 段有する平行電場型で、外径約 30cm、内径約 10cm、長さ約 90cm であるが、収束を強めるため半分のセクションのみを使用している。加速管出口からターゲットまでは約 7 m で、その間 Q-レンズ(ダブルレット) 1 基、電磁式ビーム偏向装置

めていたが、今回の改造の結果、光ケーブルにより直接デジタル制御する事が可能になりより安定な運転が可能になると期待される。

3-2. 利用実験

これまでに大きく分けて、KUCA 炉心と組み合わせた実験と、14MeV 中性子を利用した核融合炉中性子工学実験が行われてきた。前者は、Th 炉心のスペクトル測定¹⁾はじめ、深い未臨界度測定法開発²⁾などがあげられる。後者は金属トリウム、酸化トリウム数百 kg のパイルを用い、14MeV 中性子のパイル中での輸送を放射化箔法で求めるものである。

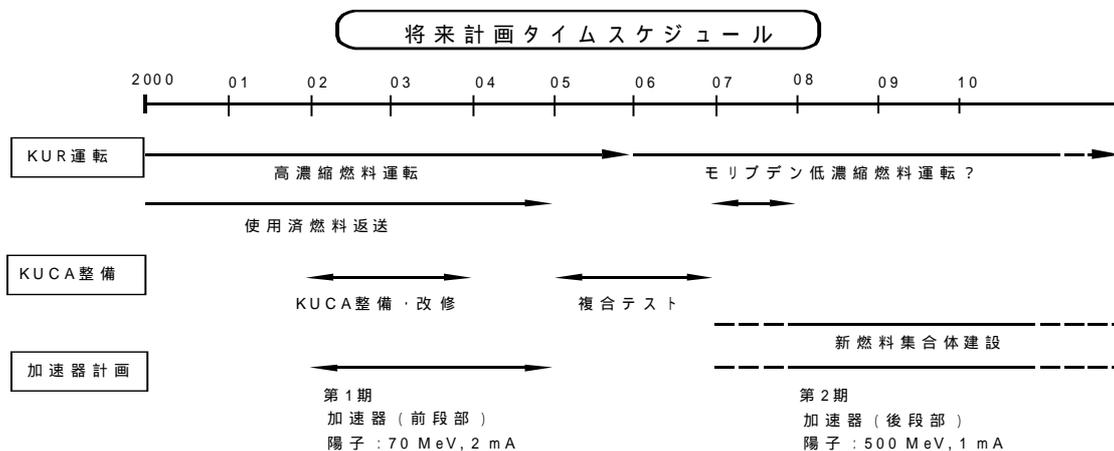
1999 年頃からは上記のように、次期計画を目的とする ADS がらみの実験が開始された。これにつれて、加速器を使った実験のマシントイムは年に 6 ~ 10 週間程度が必要となり、共同利用を含めた KUCA の実験の多くを加速器が支えることになる。

今後は、加速器が KUCA での主要な役割を担うようになり、メンテナンス・改造などの時間が KUCA の他のマシントイムと競合し十分な時間が確保できないことが予測され、早期に解決策を講じていく必要がある。

4. 将来計画

原子炉実験所の将来計画については、いろいろな機会を通じて紹介されているが、現在の状況について簡単に報告する。

原子炉実験所の主要設備である 5MW 研究炉(KUR)の運転をいつまで続けるかは未確定であるが、全国共同利用施設として次期計画を策定し、実現に向けて努力する必要がある。現在、提案されている次期計画の内容は、短期的には、上に述べられている KUCA 付設中性子発生装置を更新するため、70MeV, 2 mA 程度の陽子加速器を CA 棟に隣接して設置し、加速器駆動未臨界炉の基礎研究を行うための中性子入射装置として整備するものである。加速器本体の具体的構成については、予算的な制約などを考慮すると、いろいろなオプションが考えられ、まだ確定的に決定された訳ではないので、仕様などを報告できる段階には至っていない。しかしながら、基本的には、加速器をベースにした中性子源を研究炉(KUR)に代わる主要設備として将来計画に盛り込み、その実現に向けて地元の了解を得るなどの作業を開始している。



加速器の仕様

加速器名	KUR-LINAC	KUCA 付設中性子発生装置
加速粒子	e^-	d^+
最高エネルギー (MeV)	46 MeV	300 keV
平均電流 (μA)	ロングパルス (4 μS) ~ 500 mA (max 100 pps) ショートパルス (10ns ~ 22 nS) ~ 6A (max 360pps)	60
ピーク電流 (mA)		6
パルス幅 (ns)		200ns ~ 100 μS
繰り返し (Hz)		10 ~ 10kHz (最大デューティ比 1% で規制)
主な用途	注 1	加速器駆動未臨界炉中性子入射用

注 1 : 平成 13 年度に採択された研究テーマ。

- ・ 鉄、ニッケル、黒鉛、半導体関連材料の低温照射効果に関する研究
 - ・ 長寿命核種及び原子炉材料の中性子捕獲断面積測定
 - ・ TRU のプロセス化学的研究
 - ・ アクチニドの核データ測定
 - ・ 放射性核種の中性子吸収断面積の測定
- など 12 件。

立命館大学における加速器研究

山田廣成（立命館大理工）

H. Yamada (Faculty of Science and Engineering, Ritsumeikan Univ.)

立命館大学は2台のシンクロトロンを擁している。1台は、超伝導シンクロトロン"AURORA"[1]であり、一台は、光蓄積リング[2]という名のテーブルトップ（軌道半径 15cm、外径 1.2m）常電導シンクロトロンである（図1）。

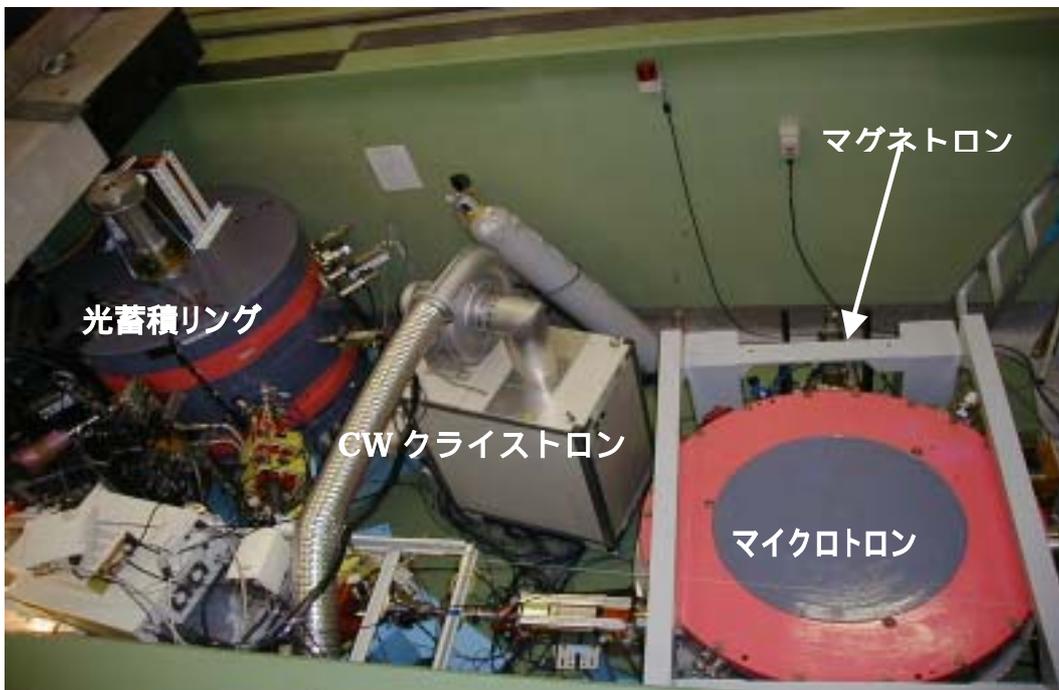


図1 光蓄積リングは常電導シンクロトロンと円形マイクロトロンで構成されている。

前者は、光工学科設立に際して、理事会が導入を決定し、その管理運営も理事会が理工学部を介さず直接に行っている。装置の運営は、企業へのビームライン貸し出しを中心とする産学連携でまかない、利用は学内でも利用料を徴収する形で行われている。装置のメンテは2名の事務職員と2名の嘱託職員が行っている。装置は利用を基本とし、加速器開発研究は行なわないことを前提としている。

一方、光蓄積リングは、科学技術振興事業団"さきがけ研究 21"、科研費基盤研究A、NEDO 地域コンソーシアム補助などの学外資金により山田等が開発したものである。シンクロトロン本体は、

企業に開発委託することなく、物理設計、機械設計から組み立て、据え付け、入射実験までの全てを教授1名と学生で行った。小型とはいえ、新しい加速器の開発を私立大学の一研究室で行ったのは歴史上初めてのことも知れない。5年の歳月を要したのは、予算が一度に付かなかったためである。悪戦苦闘を5年間続けると、次第に周りに理解者も増え、研究員を派遣する中小企業が現れ、現在は企業からの派遣研究員3名が常駐している。

光蓄積リングは、加速器の特徴として完全円形リングという点でユニークである。完全円形リングへの入射はAURORAで初めて成功したが、軌道半径15cmというさらに小型のリングで成功させることができた。小型になればなるほど入射は困難になる。共鳴入射法は住友重機械工業の高山による発明であるが、現在技術を継承しているのは山田グループのみとなった。

光蓄積リングは、テーブルトップ常電導リングで高輝度ハードX線を発生するというユニークな装置であるから、産業利用や医学利用に期待が寄せられている。さらには、まだ成功していないが、放射光を同心円のミラーに蓄えてレーザー発振をさせるユニークな装置でもある。光蓄積リングの名称は、このレーザー原理にもとづくものである。

本プロジェクトは、国家プロジェクトでも大学プロジェクトでも無かった点と、ユーザーに対してオブリゲーションが無かった点で、世界に例のない思い切った開発を実行できたと考えている。小型とはいえ、総額2.5億円の予算を一研究室で獲得できたのは幸運であった。成功の理由としてその背景に、装置がユニークな点が第1にあり、産業界の期待を取り付けたのが第2にある。そして実は、ベンチャー企業を立ち上げることにより研究員と安定的な予算の確保を図ったのが第3の要因である。私立大学では助教授も助手も技官も居ないのが実状であるから、ベンチャーの立ち上げ無しにこのプロジェクトを成功させることはできなかつた。これは色んな意味で加速器開発の新しい試みである。もちろん責任はある。それは加速器を商品化して世に出すという義務である。加速器を小型化することこそが、加速器科学が生き延びる道であると考えている。規模の小さい多様な加速器を開発することにより加速器技術は高度化し、産業利用の関心が高まる。

光蓄積リング1号機により高輝度X線の発生を実証したことで[2]、さらなる展望が開けている。第1に、2号機の開発が実現する運びとなった。科研費基盤研究(S)で1億円の予算が採用された。2号機はさらに小さく入射器とシンクロトロンが $0.5 \times 1.5 \text{m}^2$ のテーブルに載るサイズである。入射器には6MeVのライナックを考えている。第2に、様々な利用研究に着手したことである。当研究室では、加速器開発だけを行うのではなく、利用技術の開発も範疇にしている。加速器は手段に過ぎず、目的を明確にした開発に責任を持つことが加速器技術を発展させる。加速器はどちらかと言えばエスタブリッシュされた技術であるから、技術の革新は利用技術を取り込むことにより行われる。加速器技術だけに埋没し目的を忘れると、人材を養成するにも支障を来す。加速器開発の目的や意義を理解して、初めて若い人はこの分野に根を下ろすことができる。若い人に展望を与えなければならない。色んな意味で、加速器屋が利用技術を範疇に収めることは重要である。加速器技術にはメンテナンスという厄介な仕事があるが、これはユーザーも相応に分担すべき事柄である。往々にしてメンテナンスのみに終わりがちな加速器技術にはあまり展望がない。

光量子発生科学研究室は以下のような研究展望を描いている。

1. 加速器技術の革新、加速器のさらなる小型化

2号機の開発、新型電子銃の研究、新しい入射法の研究等。

2. 高輝度X線発生・利用技術の開発

新型X線源は放射光並強度を持つが、特性はかなり異なる。光源点は数10～数100 μ と小さいが放射角は25mradと大きい(2号機では80mradになる)。このため、むしろ大きなサンプルの位相コントラスト像をとることができる。X線リソグラフィーでは振動ミラーを使うことなく露光ができる。分析用には不向きであるが、X線集光系を用いることにより、タンパク質の構造解析、蛍光X線分析、トポグラフ等を実用化する。もちろんX線のさらなる高輝度化も研究課題である。

3. 光蓄積リング型自由電子レーザー発振機構研究、光と電子ビームの相互作用に関する物理学

新しいレーザー発振原理"光蓄積リング"の実証研究である。周回する電子と電磁波の相互作用は、巨大原子と電磁波の相互作用である。原子との違いは、電子状態に大きな幅がある点である。原子との対比で研究を進めるのは基礎物理学としても興味深い。

4. 高輝度遠赤外線発生・利用技術開発

光蓄積リングから発生する高輝度遠赤外線の利用である。ライナック型自由電子レーザーとの違いは、ピークパワーが比較的小さいのに対して、平均パワーが大きい点である。遠赤外線と物質の相互作用は、未知に包まれている。とりわけ生体と遠赤外線の相互作用や、熱化学反応の制御を特定の遠赤外線で行うことに興味を持っている。

最後に表1に光蓄積リング(Photon storage ring)とAURORAのスペックを掲げる。

参考文献

[1] H. Yamada, "Present status of AURORA#1-Potential of compact SR-ring as a hard X-ray source" (Synchrotron Radiation Facilities in ASIA, IONICS PUBLISHING)(1994).

山田廣成、堀利匡, "オーロラ1号機の現状" 放射光 6(4) pp.421-436(1991)

[2] 山田廣成、霜田光一, "光蓄積リング型自由電子レーザーの開発と生体研究利用への展望" (応用物理, 65(1))(1996) pp. 41-47;

"高輝度遠赤外線及びハードX線発生のための世界最小電子蓄積リングの開発" (放射光, 11(2))(1998) pp. 155-165;

H. Yamada, "The smallest Electron Storage Ring for High Intensity Far-Infrared and Hard X-ray Generation"(Journal of Synchrotron Radiation)(1998) pp. 1326-1331.(Invited paper for SRI97);

[3] H. Yamada, Y. Kitazawa¹, Y. Kanai, I. Tohyama¹, T. Ozaki, Y. Sakai, A.I.Kleev², and G.D. Bogomolov², "Development of the Hard X-ray Source Based on a Tabletop Electron Storage Ring", Proc. 7th Int. Conf. on Synchrotron Radiation Instrumentation, Berlin, August 20-25, 2000

表1 光蓄積リングとAURORAのスペック

	Photon Storage Ring	AURORA
Synchrotron	One piece of cylindrical, weak focusing, and normal conducting magnet	One piece of cylindrical, weak focusing, and super conducting magnet
Injection scheme	2/3 resonance injection	1/2 resonance injection
Orbit radius	0.156 m	0.5 m
RF source	2.444 GHz, 1KW CW Klystron	199 MHz, 30KW vacuum tube
harmonics	8	2
Max electron energy	50MeV	570MeV
Critical wavelength	8.1 μm	1.3 nm
Injector	21 MeV classical microtron	150 MeV racetrack microtron
frequency	2.444 GHz	2.8 GHz
pulse width	0.2 ~ 3 μs	0.2 ~ 3 μs
Peak current	8 mA	3 mA
Repetition rate	Max 30 Hz	Max 10 Hz
Radiation scheme 1	Target Radiation	Synchrotron radiation
Spectrum range	Few 1keV ~ 20MeV	Few 100eV ~ 10keV
Angular spread	25mrad	1mrad
Max radiation DOS E	916R/s/30mA/15cm ²	
Max Brilliance	6.8E+08photons/s/mrad ² /mm ² /0.1% λ at 1keV ~ 20MeV	1E+13photons/A/s/mrad ² /mm ² /0.1% λ at 1keV
Radiation scheme 2	Photon storage ring laser	
Spectrum range	3 to 100 μm wavelength	
Average power	Few to 50W	

大阪大学の加速器施設

田川精一（阪大産研）

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

1. はじめに

大阪大学には収束イオンビーム、イオン注入、分析用などの小型加速器まで含めると、非常に多くの加速器があるが、ここでは大阪大学の4つの代表的な加速器施設について報告する。産業科学研究所附属放射線実験所、核物理研究センター、大阪大学大学院工学研究科のオクタビアンと自由電子レーザー研究施設の4つである。

2. 大阪大学の4つの加速器施設

(1) 産業科学研究所附属放射線実験所

産業科学研究所附属放射線実験所は、わが国の放射線科学の創成期に全学共同利用施設として堺地区に建設され、放射線照射施設として大線源の安全取扱い及び種々の物質に対する物理的、化学的照射効果の基礎研究を行ってきた。

昭和43年吹田地区への移転にともない、種々の新機軸を導入したコバルト60ガンマ線照射施設が新しく建設され、同時に理学部より24MeVベータトロンの移設も行われた。線源として多様化の第一歩を歩みだしたことになる。

放射線科学の精密化と産業界における放射線利用の実用化の進展により、当時実験所は放射線照射効果の初期過程の解明と応用研究を目指すことが、学内外より強く要請された。昭和53年には、世界的にも数少ないピコ秒(10^{-12} 秒)領域の高エネルギー電子パルス(38MeV、50ナノクーロン)の発生が可能な強力極超短時間パルス放射線発生装置(電子ライナック)が文部省特別概算要求により承認され、3年計画で設置された。コバルト60とこの加速器により、放射線照射研究施設としての形態は一応整備され、放射線科学の種々の分野の研究が可能になった。

その後、電子ライナックから発生する2次ビームとして陽電子及び自由電子レーザー(FEL)の発生などの研究が行われ、量子ビームとしての多様化が進められた。平成7年の産業科学研究所の改組に伴い、新たに量子ビーム科学研究部門(2研究分野)が発足した。放射線実験所は、この新しい研究部門と協力しながら量子ビーム科学の研究に取り組むこととなった。平成10年には、強力極超短時間パルス放射線発生装置からのフェムト秒(10^{-15} 秒)の電子線パルスとフェムト秒レーザーを連動運転することにより、世界で最初のサブピコ秒(ピコ秒の時間以下)パルスラジオリシスの実験に成功した。

現在、世界最高の性能を有するサブピコ秒電子線パルスラジオリシス、世界で2台しか稼動していない加速器ベースの低速陽電子ビームによる陽電子寿命測定、赤外FELやコヒーレント放射光などのユニークな量子ビームを活用して、放射線物理、放射線化学、放射線生物の基礎研究から、次世代リソグラフィーの反応プロセス、新規材料の開発、がん治療における放射線初期過程、有害物質の無毒化等の幅広い応用をめざして、日夜努力がしている。

2つのライナックの仕様を以下に示す。

Specification of L-band and S-band Linacs at ISIR, Osaka Univ.

Specification	L-band			S-band
	Single Pulse Mode	Transient Mode	Steady State Mode	
(Performance)				
Max energy [MeV]	18 - 28			145
Pulse width	30 ps	3 - 100 ns	0.1 - 2.0 μ s	2.0 μ s
Peak current	91 nC / pulse	15 A	600 mA	650 mA
Repetition [pps]	1 - 720	1 - 720	1 - 360	60
Energy spread $\Delta E/E$ [%]	2	2	1	5
Beam diameter [mm]	3	3 - 5	3 - 5	5
(Injector)				
Electron gun	Thermionic Cathode YU156 or Y646B			Thermionic Cathode Y796
Applied voltage [kV]	100 (DC)			90
(Sub-harmonic pre-buncher)				
Composition	108 MHz x 29 (12 th), 216 MHz x1(6 th)			-
(Pre-buncher & Buncher)				
Composition	1300MHz x1, 1300MHz x1			2856MHz x1, 2856MHz x1
Power of Klystron [MW]	5			35
(Accelerating waveguide)				
Number of waveguide	1			3
RF Frequency [MHz]	1300			2856
Shunt Impedance [M Ω /m]	40			-
Q-value	19000			12600
Length [m]	3.0 (40 cavities)			2.8 x1(79 cavities), 1.9(52 cavities) x2
Mode	2 π / 3 mode (Traveling Wave)			2 π / 3 mode (Traveling Wave)
Electric field intensity [MV/m]	11.6			20.4, 22.8(@Max power)
Klystron Power [MW]	20			35

(2) 核物理研究センターのリングサイクロトロン

1991年に完成した核物理センターのリングサイクロトロンは、AVFサイクロトロンで加速されたイオンを、より高いエネルギーへ加速するための大型加速器です。リングサイクロトロンは、イオンの軌道に沿って独立の電磁石（セクター電磁石）を設置して、AVFサイクロトロンよりも更に強い集束力を軌道面に垂直な方向に得て、より高いエネルギーまでイオンを加速できるようにしたもので、6基のセクター電磁石で構成されています。AVFサイクロトロンで加速されたイオンが、ビーム伝送系を通じて、リングサイクロトロン棟に送られ、リングサイクロ

トロンに打ち込まれ、更に約4倍のエネルギーまで加速されます。このリングサイクロトロンでは、イオンが一周する間に、3組の高周波共振器で3回加速が行われます。その上、特徴的なことは、フラットトップ共振器と呼ばれる補助的な加速装置が備えられていて、加速エネルギーの均一化が図られていることです。

リングサイクロトロンの性能

電磁石

セクター電磁石	6 基
磁極間隙	6 cm
最大磁場	1.75 T
トリムコイル	36 セット
入射半径	2 m
引出半径	4 m
総重量	2200 トン

加速系

加速用共振器

単一ギャップ型	3 基
周波数	30 ~ 52 MHz
最大加速電圧	550 kV
高周波電力	250 kW / 共振器

フラットトップ用共振器

単一ギャップ型	1 基
周波数	90 ~ 156 MHz

(3) 大学院工学研究科オクタビアン(大阪大学強力14MeV中性工学実験装置)

オクタビアン(大阪大学強力14MeV中性工学実験装置)は、核融合中性工学研究の汎用中性子源として旧原子力工学科第三講座(現在、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、1981年からの利用開始以来今日まで、内外からの数多くの研究に貢献してきました。

この装置の本体は、コッククロフト・ウォルトン型の加速器で、三重水素(トリチウム(T))を吸着させたターゲットに重水素(D)を加速照射し、D-T核反応中性子を発生させています。

特長としては、中性子の発生量を大きくするために、最大ビーム電流20mA(加速電圧300KV)の性能を有し、最大毎秒 10^{12} 個のD-T中性子を発生させることができます。また、ビームライン途中にパルス化装置を設けることにより、最小時間幅2ナノ秒のパルス中性子(10^4 D-T中性子/パルス)も発生させることができます。

最近では、中性子利用以外に水素イオンやヘリウムイオンの加速も可能であることから、イオンビームそのものを利用する実験も行われるようになりました。

(4) 大学学院工学研究科自由電子レーザー研究施設

関西文化学術研究都市津田地区に大阪大学大学院工学研究科付置の「自由電子レーザー研究施設」が2000年4月に開設されました。本施設の主要装置は加速電圧170MeVのRFライナックに5台のアンジュレータを配置し、波長0.25 μ mから100 μ mまでを切れ目なくカバーする自由電子レーザーです。「基盤技術研究促進センター」事業として1992年から1997年まで5ヶ年の歳月を費やして完成したものであります。

高周波線形加速器(RFリニアック)は電子加速器の一つで、電子入射器と線形加速管からなります。自由電子レーザー研究施設には最大165MeVと20MeVに電子を加速する2台のRFリニアックがあります。

・加速器(1): 22.3MHzの0.5nsグリッドパルス駆動の150kV熱陰極型三極管電子銃、714MHzのプリバンチャー(SHB)、2.8GHzの定在波型バンチャー(SWB)からなる電子入射器で6MeVまで電子ビームを加速します。さらに7本の3m長加速管を用いて、最大エネルギー165MeV、ピーク電流80Aのパルス状電子ビーム(パルス幅24 μ s、繰り返し10Hz)を加速できます。

・加速器(2): RF電子銃、 α 電磁石、線形加速管を組み合わせ、最大エネルギー20MeV、ピーク電流40Aのパルス状電子ビーム(パルス幅11.2 μ s、繰り返し10Hz)を加速できます。

今更 「オクタビアン」

高橋亮人(阪大院工)

A. Takahashi (Graduate School of Engineering, Osaka Univ.)

1) 目的:

阪大オクタビアンや原研FNSが強力な標準DT中性子源としてトリチウム増殖ブランケット・遮蔽などの核融合中性子工学の基礎実験、2次粒子放出二重微分断面・放射化断面などの基本核データの測定、プラズマ核計測技術の開発、材料損傷基礎過程実験、等に果たした大きな役割¹⁾は、21世紀の新動向においてはどのように転化されるのであろうか。学会誌15期の答申の核融合炉工学研究用の新強力高エネルギー中性子源として1990年頃から計画され概算要求手続きがおこなわれたが、1996年頃には一度あきらめられたグレードアップDT中性子源計画(オクタビアン-II²⁾, FNS-II)がある。今更ではあるが諸情勢の変化により、ITER計画実現やLHDによる研究のあとをにらんで、計画のリバイバルをする必要性があることをのべる。

経済・エネルギー・環境のトリレンマに陥った人類社会が、この先数十年で予想される人口爆発問題を平和裏に解決して、すなわちソフトランディングで適正規模人口の再生循環型社会を実現し持続的繁栄を謳歌する道がこれから追及される。石油資源枯渇や地球温暖化などの公害をさけて、高い生活レベルを失わないためには、太陽光・風力などの自然エネルギーには高だか10%くらいしか頼れず、大きな部分を核エネルギーに頼るほかに道が見当たらない。FBR路線が行き詰まり、ITER後に核融合発電炉が見込めない、ような事情の展開となることが十分予想されるため、エネルギー安全保障のため他のパスにも保険をかけるべきである。そのため、「核融合核分裂ハイブリッド炉」によるPu-239, U-233の核燃料の大量生産と分散型小型安全炉(核分裂)発電の“新核燃料サイクル”を準備しておくことは大変重要と思われる。「新強力14 MeV中性子源施設」を計画実現して、“大学レベル”からそのための基礎研究を立ち上げておくべきと考える。

2) 加速器の仕様:

新強力14 MeV中性子源として計画されたOKTAVIAN-II(仮称)のおもな仕様を表1に示す。

400keV コッククロフト、4ビームライン; パルス中性子ラインは時間平均電流5 mA D⁺、パルス幅2ns以下、繰り返し周波数1kHz-2MHz、時間平均中性子発生量は 1×10^{12} n/s。連続ビーム中性子ラインは回転ターゲットで200mAD⁺、平均中性子発生量は 5×10^{13} n/s。ほかにイオンビーム照射専用ライン(パルス、DC)が2本。50-100mAD⁺ビーム。イオン源共通で加速管3本の変則型。加速器室+3照射実験室で約30m×20mの建屋と制御・計測・研究棟などからなる。加速器の基本設計は日新電気に依頼して、1993年頃までに行われ、ビーム輸送については、パルスラインの100mAビームのクリストン方式による2ns幅へのパルスングでやや厳しいが恐らく実現可能であると思われる。問題は大型回転ターゲットの開発・製作である。とくに

数千キュリーとなるトリチウムターゲットを製作できる（してくれる）ところが欧米・日本にはない、ことである。

加速器建設に約20億円、建物は遮蔽が厚くなるため約20億円、そのたの費用を含めて、数十億円規模の施設となろう。全国共同利用施設とすべきである。

表 1 : OKTAVIAN-II (仮称) 主要性能

ビームライン	D + ビーム (400 kV)	DT 中性子発生量 (n/s)
パルス中性子ライン	時間平均電流 (最大) : 5 mA 最小パルス幅 : 2 ns 繰り返し周波数 : 1kHz-2MHz	平均中性子発生量(n/s): 1×10^{12} パルスあたり : 5×10^5 n/s
連続中性子ライン	最大電流 : 200 mA	平均発生量 : 5×10^{13} n/s
パルスイオンライン	ピーク電流 : 50 mA パルス幅 : 2 μ s - 1 ms 繰り返し周波数 : 1-100 kHz	(D-D 中性子発生可)
連続イオンライン	平均電流 : 100 mA	

3) 研究テーマ :

I T E R 後は「核融合原理を利用する出来るだけコンパクトで分散型のエネルギー源となりやすいもので“とりあえず”電力のとれる炉のコンセプト」が見直されるであろう。また、F B R 路線から転換してU-238を有効利用する他の道も追求されよう。このような事態をにらんで、「小型核融合・核分裂ハイブリッド炉」の研究を重点項目の筆頭とする。

表 2 に FF ハイブリッド研究の必要性を整理している。DT 炉は核分裂炉と比べて出力あたりの中性子発生量が10倍ある（正しくは中性子経済 = 利用余裕が約10倍）特徴に注目し、 $Q < 1$ のトカマク中性子源でのハイブリッドブランケットを研究し、実用小型炉の実現を目指す。表 3 に FF 炉の性能の設計例を示す。核分裂ブランケット部の実効中性子増倍率 (keff) が 0 . 8 程度の非常に深い未臨界で有効な核燃料生産とトリチウム生産が可能である。また、トカマクのブランケットでは大容積のU-238/Th-232 照射が可能であり、大量の fissile (Pu-239, U-233) を生産できる。この fissile を米欧・日本で開発中の開発途上国も安全に使える分散小型核分裂発電炉系

3>へと供給して新核燃料サイクルとすれば、1000年程度の人類の循環型社会をサポートできよう。

表 2 : 小型核融合・核分裂ハイブリッド炉研究の必要性

- 1) ITER後は「とりあえず電力のとれる小型炉」のためのコンパクトなトカマクや他の方式の研究へと展開するだろう。
- 2) $Q < 1$ のトカマク中性子源でFFハイブリッド炉をつくり「小型発電炉」を実現する。
- 3) FBRの alternative として、U-238 / Pu-239の利用パスをつくる。
(FF炉による fissile 生産と小型安全軽水炉への fissile 供給による“新核燃料サイクル”)
- 4) Th-232 / U-233のFF炉による利用パスを開発する。
- 5) その他：
KUCAの核燃料、阪大のLi+黒鉛ブランケット、などの再利用。

表 3 : FFハイブリッド炉の概念

分類	熱中性子炉型	高速炉型	高速炉型	核分裂抑制型
目的	発電	発電	発電 + 燃料生産	燃料生産
中性子壁負荷	1.0 MW/m ²	0.9 MW/m ²	1-2 MW/m ²	1-3 MW/m ²
Blanket	Li/U/Pu/C	Li/nat.U	Li/nat.U/Th	Be/U/Li
TBR	1.11	1.04	1.05	1.05
Fissile-BR	0.10-0.14	0.7-0.8	0.9	0.4-0.7
E増倍率	8	5	6	1.5-2
核融合出力	350 MWt	670 MWt	800 MWt	700-400MWt
全出力	2800 MWt	3400 MWt	4800 MWt	1000-3000 MWt
Fissile 生成量		1500 kg/y	2500 kg/y	1000-5000 kg/y

KUCAの核燃料と阪大のLi球(ブロック)は大変貴重な財産であるが、FF炉の基礎実験に利用できよう。

第二のテーマは、材料損傷問題における核融合 核分裂関連の研究である。これはIFMIFが実現した場合に純粹スペクトルの実験として比較標準となる。IFMIF型中性子源(d-Li)は中性子スペクトルが1-30MeVに広がるがそこはさまざまなしきい核反応が立ち上がり競合する複雑な領域である。そのため、オクタビアン-I Iのような純粹スペクトル(14MeV)での校正実験が欠かせないはずである。そのほかのテーマとして、低放射化材料開発などのための二次反応を含む核反応断面積の精密測定、プラズマ計測機器開発・校正、原子炉廃棄物の核変換の研究(これは

FF 炉研究に含められる)、一般中性子実験、イオンビーム固体反応の研究、などがあげられる。

4) 設置場所:

阪大の現オクタビアン周辺は、民家・宅地が押し寄せていて、もはやこのような装置をおくには難しくなっている。おくとすれば、かなりの地下埋設構造とすべきである。将来、文部科学省のもと、原研やNIFSなどの活力を統一し大学などにも共用利用するシステムが出来る可能性を考えている。NIFSや京大原子炉実験所(KURRI)がこの「全国共同利用新強力DT中性子源」の設置場所として検討されることを望みたい。KURRIが「中性子源センター」としての道をとるなら、多様な中性子源施設を持つほうがよく、現在の「加速器駆動炉用陽子加速器計画」とも矛盾しないと思う。“小型トカマクDT中性子源”を設置してFF炉の本格的な研究をするフェーズが次にあるが、“熱核融合装置も大容積の自己ターゲットを持つ変な低エネルギー加速器”とこじつけてみれば、「中性子源センター」の路線の延長上に見えてこよう。

参考文献:

- 1) 前川、真木、高橋、森、大山、井口、池田、他: 講座「中性子工学」、プラズマ核融合学会誌、1995年10月号から1996年3月号に連載
- 2) K.Sumita, A.Takahashi, T.Iida, J.Yamamoto: Status of OKTAVIAN-I and Proposal of OKTAVIAN-II, Nuclear Science and Engineering, 106, 249-265 (1990)
- 3) 鳥居弘之: 原子力の未来、日本経済新聞社刊、1999年

近畿大学における小型加速器の利用

近藤嘉秀（近大原研）

Y. Kondo (Atomic Energy Research Institute, Kinki Univ.)

1. 装置の概要

近畿大学原子力研究所では、1962年に米国 Texas Nuclear 社 9504 型の中性子発生装置を設置した。この装置はコックロフト・ワルトン型の加速器をコンパクトに改良したものである。高圧用の遮蔽ドームは横向きに配置し、このドームの後端部よりターゲット・アセンブリーの先端部までの全長が 2m 足らずの小型の加速器である。中性子発生装置の本体部分は 3.2m×7.2m の広さの照射室に収納されている。本装置は D-T 反応により 14MeV 中性子を発生する。イオンの発生装置には RF イオン源を用い、重水素ガスの注入により発生したデューテロン・イオンを最大 150kV の加速電圧で加速してトリチウム・ターゲットに当て、最大で毎秒 4×10^{10} 個の中性子が得られる。トリチウム・ターゲットはバックリング金属として用いた 30mm 径の銅板上に 25mm 径の Ti を蒸着し、この蒸着層にトリチウムを吸蔵させた固体ターゲットを用いた。通常は 4~5Ci のトリチウム・ターゲットを水冷却で用いた。

2. 利用の状況

中性子発生装置の設置した当初は専用の建屋ではなかったが、専用の加速器建屋が建設されるまでの間、装置の十分な利用は図れなかった。設置より 8 年後の 1970 年にトレーサー加速器棟が新設され、今日に至るが、本格的な利用はこの時期以降となる。これまで、放射線計測、放射線生物学の分野で利用してきた。とりわけ、放射化分析の分野では、小型加速器の用途を拡大するための応用面の研究に力点を置いてきた。

当初、放射化実験では、試料を一定時間照射した後、人が立ち入るために運転を止め、遮蔽扉を開けて照射試料を取り出し、測定する方法で実験を行ってきた。しかし、この方法では測定を始めるまでに数分間の時間を要した。14MeV 中性子を用いた放射化実験では (n, γ) 、 (n, p) 、 $(n, 2n)$ 反応などにより数分以下の半減期を持つ核種が数多く生成する。通常、利用する照射中性子束は $10^7 \sim 10^8 \text{n/cm}^2/\text{sec}$ である。これはトリチウム・ターゲットの減耗を少なくするため、ビーム電流を抑制することが原因の一つになっている。これらの事柄を勘案して、繰り返し放射化法の実験への適用を考えた。この方法によれば放射化分析において、(1) 短寿命核種に対する効率の良い測定が可能となり、実験時間の短縮が図れる。(2) 目的とする核種に対する感度の向上が可能になる、などの利点が挙げられる。この目的を達成するには、高速の試料気送装置を必要とした。この装置はダブル・ループの気送管を配した設計となっており、1980 年頃に完成したが、その後、改良を加え現在に至っている。この装置を用いて、繰り返し放射化分析の理論的な検討および応用面での検証を行ってきた。

本研究所の中性子発生装置は購入後 40 年近く経過しており、使用部品の経年的な劣化に伴う故障の頻発およびトリチウム・ターゲット価格の高騰が最近の利用を妨げる大きな要因となっている。

神戸商船大学における加速器に関わる研究

北村 晃(神船大原子力)

A. Kitamura (Department of Nuclear Engineering, Kobe University of Mercantile Marine)

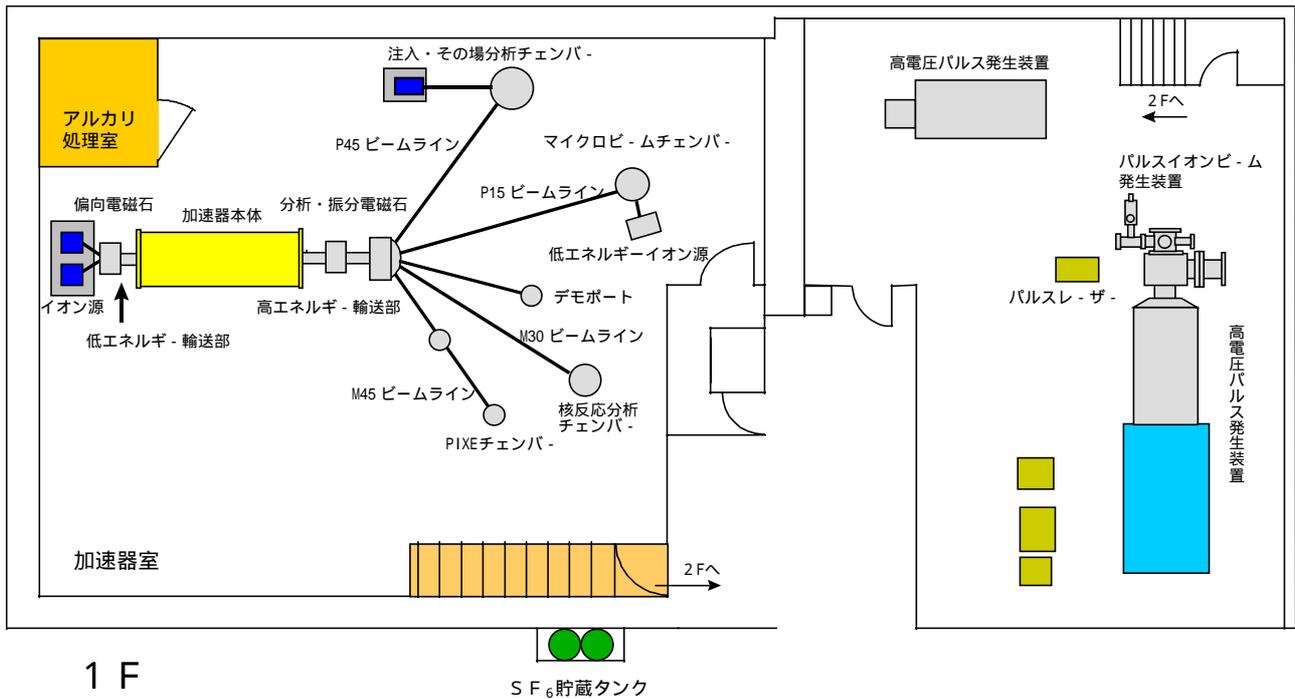
1. はじめに

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、原子力システム工学講座の前身、原子力工学科の基本設備として、核反応工学実験設備が1979・80年度に設置された。タンデムファンデグラフ型静電加速器5SDHがその中核装置であり、核反応実験用チェンバ、PIXEターゲットチェンバ、そしてパルスイオン注入装置を付属設備としていた。設置後、ビームラインを4本に増設すると共に、そのうちの1本に30keVイオン注入装置を接続し、イオン注入-その場分析システムを構築するなど、機能拡充を図ってきた。

1995年1月、阪神淡路震災時に、パルスイオン注入装置を除く全システムが横転、上下振動などの衝撃により壊滅的被害を受けたが、1995年度震災復旧予算により、静電加速器の5SDH-2への更新、並びに各チェンバのオーバーホールを実施した。そして1997年度以降、学外共同利用設備として本格的な使用を再開している。本稿では過去10年以内の学内利用状況を中心に述べる。

2. 加速器の仕様

加速器名	タンデムペレトロン 5SDH2	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(4 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	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、二次粒子の発生と応用	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



P45ビームライン

2軸マニピュレータ仕様

y (垂直方向); ±50mm, 分解能5 μ m
 θ (y軸回転); ±180°, 分解能0.01°

5軸マニピュレータ仕様

x (水平方向); ±8mm, 分解能5 μ m
y (垂直方向); ±25mm, 分解能5 μ m
z (ビーム軸方向); ±8mm, 分解能5 μ m
 θ (y軸回転); ±180°, 分解能0.01°
 ϕ (z軸回転); ±90°, 分解能0.01°

イオン注入器 (デュオプラズマトロン) 仕様

プラズマ生成方式; アーク放電, 600W
粒子エネルギー; 最大30keV
電流; 2mA
イオン種; H⁺, He⁺, O⁺, Ar⁺他
質量選別; E×Bフィルタ方式
エミッタンス; 7 π mm·mrad·(MeV)^{1/2}

P15(マイクロビーム)ライン

5軸マニピュレータ仕様

移動距離 / 角度, 精度

x (水平方向); ±12.5mm, 5 μ m
y (垂直方向); ±12.5mm, 5 μ m
z (ビーム軸方向); ±50mm, 5 μ m
 θ (y軸回転); ±180°, 0.1°
 ϕ (z軸回転); ±180°, 0.1°

低エネルギーイオン源仕様

プラズマ生成方式; マイクロ波放電,
2.45GHz, 200W
粒子エネルギー; 50eV - 25keV
ビーム電流・安定性; 最大100 μ A, ±15%以下
質量選別・中性粒子除去; 90°偏向分析電磁石方式,
0.7amu·MeV/z²

3. 現在までの利用

A. タンデムペレットロン5SDH-2

利用目的は、材料分析のためのプローブ粒子ビームとしての利用、照射目的、二次粒子発生、そして教育実験に分類される。

(A1) 分析利用

* 表面分析機器としての利用においては、主として核融合関連材料中の水素同位体分析に重点を置き、分析法の改良・開発を行ってきた。Tiの重水素保持に与えるHe照射効果のD(³He, α)p核反応

を用いた分析、 $H(^{19}F, \alpha\gamma)^{16}O$ 反応分析の高精度化、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の問題、深部重水素分布の測定法の開発等である[1]。

- * これらの水素同位体分析法を利用して、トカマクプラズマのスクレイブオフ層 (SOL) の粒子測定を行った。コレクタプローブとしてSOLに挿入した炭素板を、プラズマ照射後、水素同位体ERD分析や重元素RBS分析を行って、SOLプラズマの密度・温度分布や不純物測定を行うものである[2]。
- * 海洋環境科学への応用として、エアロゾル物質のPIXE分析も行われている。硫黄の大気圏滞留時間の評価の問題等に関連して、陸起源大気と海洋性大気の混合の様相や、気象条件がエアロゾル粒径等に及ぼす影響など、詳細な研究が継続されてきた[3]。そして近年、分子形態の同定のため波長分散型測定器が導入された。

(A2) 照射効果

- * ポリマにイオンビーム照射した時、非常に多くの水素が放出される。その個数は入射粒子の阻止能に依存するが、ポリエチレンのCイオン照射の場合などは、飛跡1nm当たり50個もの水素原子が放出されている。この現象に関連して、ポリマの改質やグラフト重合の適用による機能性ポリマ作製の研究を開始している[4]。
- * そもそもイオン入射による飛跡形成は、放射線検出器の観点等から研究されてきた。本学でも飛跡検出器として利用されているCR-39における飛跡形成機構の詳細な研究が、吸光分析やAFMを駆使した種々の測定法と共に、加速ビームの微量照射を工夫して行われている[5]。
- * 一方、イオンビーム照射下の固体中にはランジェントに局所的な高圧高密度状態が生じる。この状態は今まで見過ごされてきた特異な効果を核反応機構に与えているのではないかと推測させる実験結果が発表され、期待がもたれている。所謂“常温核融合”現象の追試実験等でも説明が容易でない現象が種々観測されており、それらとの関連が追及されている。本学でも、種々の分析法・測定法を工夫しながら、低エネルギービーム照射下の高密度重水素化固体からの放出粒子の詳細・精密測定を行い、現象の解明を試みている[6]。

(A3) 二次粒子発生

- * (p, γ) 反応時に生成される γ 線が反応生成物と同種の原子核により共鳴吸収されることを利用して、特定元素の γ 線透過非破壊元素分析ができる。本学では、 $^{13}C(p, \gamma)^{14}N$ 反応9.17MeV γ 線を利用した、税関における麻薬や火薬などの透過検査システムの検討などが開始されている[7]。

(A4) 学生実験、公開講座デモ実験等

- * 4年学生実験の1テーマとして、Rutherford散乱の観測に利用している。
- * また、非定常的ではあるが、一般市民を対象とした公開講座でも利用している。放射線教育の色彩を込めて、ビームを石英板照射により可視化し、磁場による荷電粒子の偏向を観測させている。

B. パルスビーム発生器ER-2

設置当初は慣性核融合エネルギードライバを目指した大電流パルスイオンビーム (PIB) の発生自身を研究目的としていたが、ビーム開発がアスケールアップするに従い、本装置の使用目的は、材料照射や二次粒子発生など、パルス幅数10ns・10-100GWというパワーを生かす応用研究に方向転換している。

(B1) 瞬間大電力熱源

- * エネルギー密度1-10J/cm²のPIBによって誘起されるターゲット物質のアブレーションは薄膜生成等への応用が有望である。炭素コレクターに収集した放出粒子のRBS分析やSEM/EPMA分析、電荷コレクターによる飛行時間測定等を行って、アブレーション機構を検討し[8]、応用を模索している。

(B2) XUVレーザー

- * 軟X線顕微鏡等への応用が期待されるXUV領域のレーザー発振を目的として、ER-2を電源としたパルス細管放電プラズマの特性研究を行っている。平面結像型軟X線分光器を用いた細管軸方向出力光のXUVスペクトル分析により、CVI(2p-3d;18.2 nm)のレーザー遷移が示唆されている[9]。

4. 今後の方向

複合照射設備を充実させると共に、*in-situ*分析・測定系の複合化の徹底や、マイクロビームの高度利用なども推進して行きたい。神戸大学との統合を機に、学内共同利用設備としてより多くの利用者を期待すると共に、学外利用者の拡大も歓迎している。

[参考文献]

- [1] *e.g.*, N. Kubota, A. Taniike, Y. Furuyama & A. Kitamura; Nucl. Instrum. & Meth. in Phys. Research, Vol.B149(1999)469].
- [2] *e.g.*, T. Nakajima, *et al.*; J. Nucl. Mater. Vol.220-222(1995)361.
- [3] *e.g.*, H. Miyake, *et al.*; Nucl. Instrum. & Meth. in Phys. Res. Vol.B75(1993)282.
- [4] 濱本真平, 谷池晃, 久保田直義, 古山雄一, 北村晃; 神戸商船大学紀要第二類46号(2001)155.
- [5] *e.g.*, T. Yamauchi, T. Taniguchi & K. Oda; Radiation Measurements, 31(1999)261.
- [6] *e.g.*, N. Kubota, A. Taniike & A. Kitamura; Conference Proceedings Vol.70 "ICCF8" (F. Scaramuzzi (ed.), Italian Physical Society, 2001)311.
- [7] *e.g.*, K. Oda *et al.*; Reactor Dosimetry, ASTM STP 1398(2001)819.
- [8] *e.g.*, A. Kitamura, T. Asahina, Y. Furuyama & T. Nakajima; Laser & Particle Beams, 13(1995)135.
- [9] *e.g.*, T. Gotou, Y. Takahashi, H. Kobayashi, A. Taniike & A. Kitamura; Jpn. J. Appl. Phys., 40(2001)995.

newSUBARU での加速器研究

安東 愛之輔 (姫工大高度研)

A. Ando

(Laboratory of Advanced Science and Technology for Industry, Himeji Institute of Technology)

1. はじめに

加速器には、大きく分けて3つのタイプがある。(1)運転に研究者を必要としないも、(2)運転に常に研究者を必要とするものと(3)開発用である。

(1)は運転の仕方が固定されていたり、決められたモードの運転しかされないものであり市販の製品や製作時のみ研究者が指導するもので、大きなものではペレトロンや医療用サイクロトロン・シンクロトロンに代表される。

(2)はビーム利用実験や加速器開発研究等に応じて多様な運転モードがあり、またビーム利用実験のためにも、常に加速粒子ビームの性能向上が必要とされるものであり、高エネルギー実験や、多数の挿入光源が複雑かつ多様なモードで利用される電子蓄積リング、或いはFEL用の加速器に代表される。

(3)は利用が具体的に決まっているものではなく、新しい加速方式や小型化などを目指すものである。

また加速器の研究にも大きく分けて以下の3つの側面がある。

(A)装置の安定な運転を保証・確保するため、或いはより効率的な運転を切り開くための、ハードウェアや運転プログラムの開発。

(B)加速粒子集団の振る舞いそのものを研究し、直接的にはビーム性能の向上、長期的には新しい加速器への探求の道を開いたり、新しい「物性」として研究。

(C)高エネルギー加速器に端的に見られるように、現時点では実現できないが、利用実験の観点からは是非達成しなければならない目標が明確にあり、それに向けてへのハード及びソフトの開発。或いはタイプ(3)の研究。

従って、加速器研究者の組織化において、同じく研究会の組織化においても、加速器のどの側面に力点を置くかで、大いに異なったものとなる。特にタイプ(1)の加速器が念頭にある場合、企業の技術者・研究者を見落としてはならない。少なくとも企業の動向と技術力に精通している研究者は不可欠である。

2. ニュースバル設置の狙いと位置づけ

(1) 加速器の狙い

電子蓄積リング・放射光光源リングとしての第1義的な目的は、新しい放射光源の開発及び光源リングの小型化である。従って加速器の設計においては、SPring-8内に設置されることを考慮し、世界一高輝度のSPring-8ではカバーできない側面を前面に立てた。即ち、

(A)超短バンチ電子ビームへの取り組みが可能なこと。

(B)長い直線部を導入し、レーザーなどの外部ビームとの相互作用が容易に導入出来ること。

この結果Fig. 1に見られるように、逆方向偏向電磁石を実用加速器としては、世界で初めて導入し、GeV級としては、周長(118.731m)の10%以上にも及ぶ、~15mの磁石の全くない長直線部を2箇所設けた。この2箇所の長直線部には、当面アンジュレータやFEL用のオプティカル・クライストロンが設置されるが、最終目標としては、ビーム冷却を夢見ている。即ち一方のアンジュレー

タ中でレーザー・ビームと相互作用させ、電子ビームのバンチ内での分布の揺らぎを検出し、他方でも同様の相互作用をさせ、この揺らぎを消して行く、確率冷却である。これが実現すれば、蓄積リングでの電子ビームのエミッタンスや運動量広がり、放射励起などで決まる現状を打破し、小型リングでも超低エミッタンスが可能となる。

(2) 利用目的

一言で言えば、兵庫県地元企業の放射光による「ハイテク」化であるが、産業利用においては必ずしも本格的である必要はなく、最低限、SPring-8への練習台となればよい。しかしながら、現時点でも、NEDOの下、3つの「国家プロジェクト」がニュースバルを使用している。(軟x線縮小投影露光による超LSIの開発及び光学素子(特に反射鏡など)の超高精度測定、LIGAをベースにしたマイクロシステムの開発及びクラスターイオンビームをベースにしたプロセステクノロジーの開発)

これらの研究は、蓄積リングの真空焼き出しが不十分なため、寿命が目標値に達していない段階から、十分な結果を生みだしている。

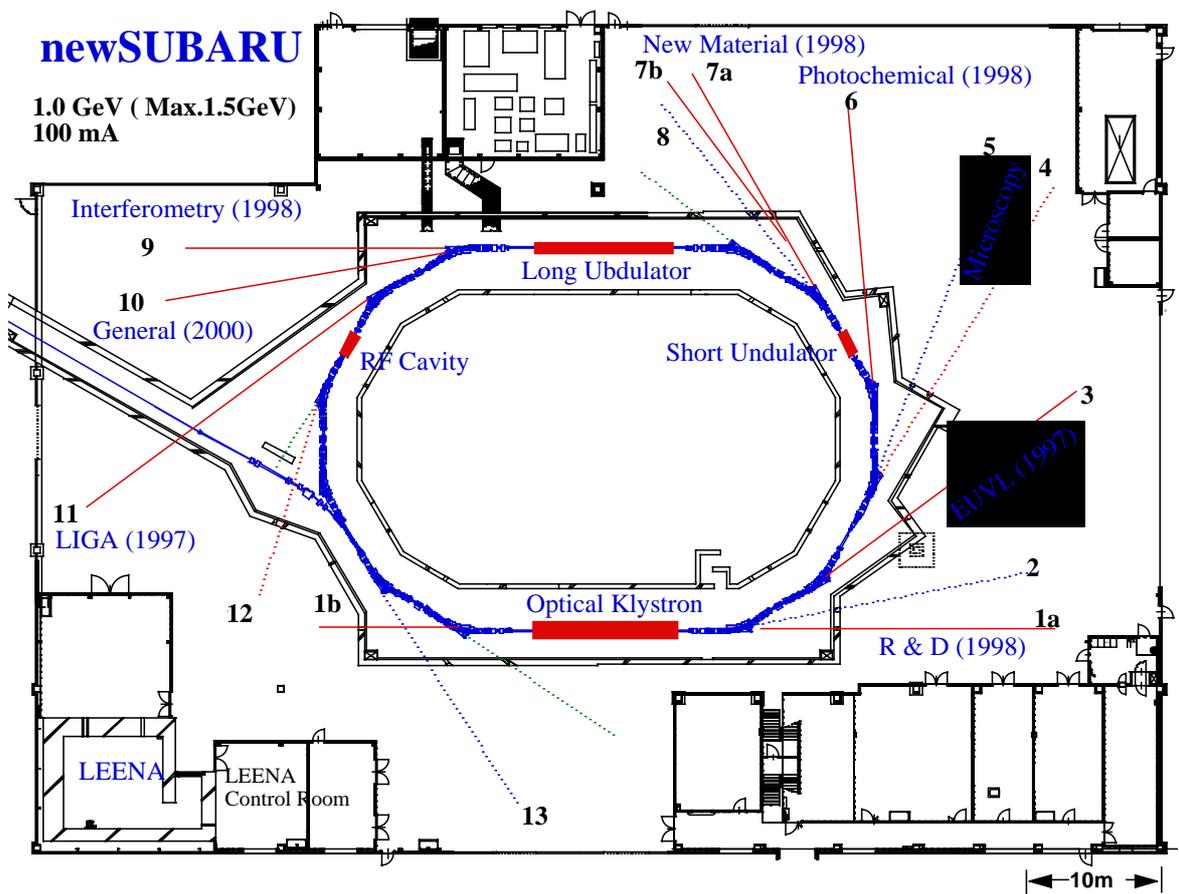


Fig.1 ニュースバル平面図

(3) 高度研の「特異性」

高度研としては、放射光だけではなく、あらゆる粒子加速器の研究を視野に入れ、まず研究分野に人員(3人)を配置した。そこに、一地方大学としては非常に大きな設備がつけられたため、装置

から見ると人員は決定的に不足している。しかしながらビーム利用に限らず光源リングの高度化も含め、SPring-8本体と共に、「放射光研究複合体」を目指しており、この観点からSPring-8より支援と協力を得て、当面新しい放射光源の可能性追求することになっている。

3. 加速器の現状

ニュースバルの性能と到達点は以下の通りである。

	到達点	目標
エネルギー (GeV)	1.0 (1.25)	1.5
最大蓄積電流 (mA)	100	100
寿命 (時間) @ 蓄積電流 (mA)	1.5 @ 90	8 @ 100
利用実験時: 入射頻度	1分毎	1回 / 8時間
電流値	$\sim 55 \pm 0.4$	100 - > 35

寿命は残留ガスとのラザフォード散乱で決まっており、更に5～6倍改善する必要があるので、以下の方策をとっている。

- ・ 真空排気ポートを増やし真空度を $\sim 1/2$ に下げる(今夏実施)
 - ・ 1.5 GeV運転(10月より調整開始)
 - ・ 垂直方向ビームサイズが $\sim 1/2$ のオプティックス(調整運転中、改善の兆候あり)
 - ・ 焼き出し運転時の電流値を500 mAとする(秋以降に許可申請提出予定)
- これらの項目では実質約2倍の改善ファクターが期待されるので、この1年中には目標寿命を達成できるものとして、調整を続けている。

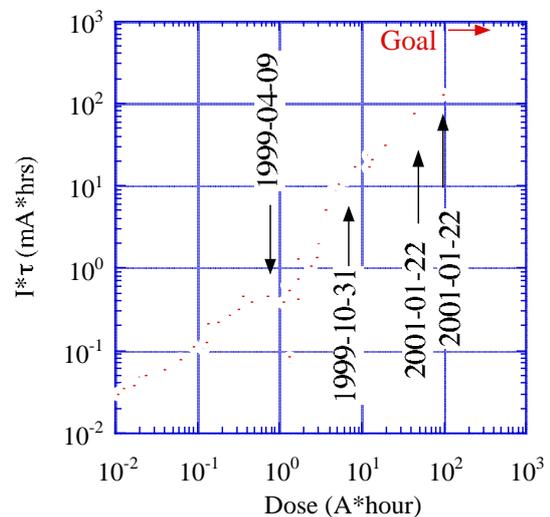


Fig. 2 延べ蓄積運転時間とビーム寿命 × 蓄積電流

<注> 1999年夏期のドラスティックな改善は、挿入光源部真空系の根本的改造による。

4. 加速器研究の当面の課題

(1) コヒーレント放射光発生機構の追求

- ・ 波長程度に電子ビームを短くする或いはその部分だけを抽出する。

< = = リング・オプティックスの変更や外部ビームとの相互作用

(2) 極超短パルス放射光(物質の熱振動時間以内)

< 基本的姿勢 >

- ・ 先ず応用・利用がありそれに向けての研究ではなく、(荷電)粒子多体系の極限への挑戦として取り組む。

5. ニュースバルにおける加速器の研究実験の現状: Best Performance の実現

設計目標の早期達成が最優先課題のため、研究面は当面「なおざり」になっている。

しかし入射効率100%の維持(=>限られた電荷の有効利用)や、軌道の安定化、ビーム不安定性の克服などを通して、ニュースバルにおける荷電粒子多体系の振る舞いへの理解を深めている。同時に加速器研究者としての理解力・技術力の向上をはかっている。

(1) Energy widening due to turbulence (microwave instability) (to be published in NIM-A)

Single bunch でのビームサイズ(SR光をCCDカメラにて観測)の電流依存性が、リング

全体での Wide band impedance を 0.2 0.3 とすれば、古典的な Keil-Schnell Criterion に

より正しく説明できた。

加速空洞からの寄与は 0.2 程度であるから、リングの真空系は設計の 0.1 以下で出来ている。

(2) 捻れ4極磁場の分布と垂直方向エミッタンス

ステアリング電磁石にて垂直方向にバンブ軌道を作り、水平方向の軌道のずれから実効的な捻れ4極磁場の位置と強さを求める。

他方垂直方向ビームサイズを最小にする補正捻れ4極電磁石の設定値を求める。

これらから Linear Coupling Resonance を計算すると、大きさは殆ど同じで位相だけが 180°ずれていた。

以上から真の垂直方向エミッタンスが評価でき、実測では光学系の分解能から大きく観測されることが判明。(水平方向エミッタンス/垂直方向エミッタンス = 39 / 0.6 (nm))

(3) Negative Alpha-p Lattice 調整運転

Alpha-p: 電子リングでは相対的エネルギーのずれに対する軌道長のずれの割合を示す。

ハドロン加速器のトランジションエネルギーは $(\text{Alpha-p})^{-1/2}$ で与えられる。

通常 $\text{Alpha-p} = +10^{-3}$ であるが -5×10^{-4} に挑戦中、本 Lattice では y は通常の約 1 / 1.5 であるので、寿命は ~ 2 倍になると予想。暫定的なデータではあるが、1.6 倍を得ている。諸パラメータの最適化が必要である。

更には絶対値 10^{-5} 、バンチ長にして 1mm を目標としている。又制御の Know-How の確立が重要。

(4) Head-Tail Instability

経験による対処療法で回避し、単バンチ運転では ~ 30mA まで蓄積。

=> 定量的・系統的实验を実施し、ニュースバルの特性を洗い出す予定

6. 終わりに

ニュースバル蓄積リングは、限られた建設予算の中で「最大限」を実現しようとしたため、遮蔽壁の厚さを 30cm とした。このため 1 週間当たりの入射電荷量が、放射光による真空焼き出しには不十分になることに気付かず、電子ビーム蓄積時の真空度は未だに目標を達成できていない。これ以外については、ほぼ設計通りの仕様を実現できているが、真空度の 1 点を以て「ダメな」加速器という風評を得るに至っている。これは実績を以て克服するしかないが、真空系を他施設に比べ余分に増強する事になり、加速器研究を本格的に展開できないでいる。1 日も早く目標を達成し、十分な研究活動を展開し、加速器科学の実績を示さなければならない。

追記：加速器研究への取り組み姿勢について

今回の会合は「原子力の視点から」とありますが、高エネルギー荷電粒子ビームをこのような視点から論ずるときには十分な配慮が必要でしょう。とりわけ「原子力」が示してきた実績と社会的問題点の発生の事実を正しく反省すべきです。多量の放射線を発生しうるビーム集団を、確立された工学的技術と思うことは、原子力発電の二の舞になるでしょう。このような物理的対象に「経済効果」などを持ち込むことについては、科学者としてもっと慎重であるべきです。（体例の場合、大企業中心の経済効果が一人歩きし、ややもすると「経済効率」とはき換えられる場合が多々見受けられる。）

加速器関連研究者の組織化が原子力学会が一足先行し、最近やっと物理学学会でも「ビーム物理分科」の確立に向け本格的議論が始まりましたが、少なくとも高エネルギー物理学、原子核物理学及び放射光科学につながる加速器研究者の間では、KEKや阪大核物理研究センター発足の時点から、このような組織の必要性が、潜在的に議論され続けていました。今一步「科学」として確立させ、「独自の Journal」を持つには、未だ力量不足ではないかという認識があり、今日に至っていると私は理解しています。今日加速器関連研究者の組織化で若干の「混乱」が見られるのも、ひとえに「経済効果（経済効率）」や「工学的技術」としての評価に幅広いスペクトルがあるからではないでしょうか。一学会が主催する会合ならいざ知らず、学術会議が主催する以上もっと注意深い議論と準備が必要ではないでしょうか。

加速器技術は、とりわけハドロン加速器は、経済効果・効率を議論できるレベルにはまだないと、私は思います。エネルギー効率の最も高い放射光光源蓄積リングでも、総てに消費される電力から見て、放射光利用への効率は微々たるものです。建設費を含めれば議論すべきでもないでしょう。ハドロン加速器の場合は、エネルギー効率以上に、新規に放射化物を作り出す、という問題があります。

従って、当面は「経済効果」は無視し、今まで出来なかったが加速器で実現すれば、「民生」の向上に如何に役立つか、という視点であるべきです。決して「原子力」で行き詰まったから次は加速器で、等という考えを持ってはならないでしょう。

加速器の仕様

名称	電子蓄積リング、ニュースバル（newSUBARU）
加速粒子	電子
最高エネルギー	1.5 GeV
平均電流	100 mA
ピーク電流	80 A
パルス巾	0.1 nsec
繰り返し	2.5 MHz（最大500MHz）
主な利用	放射光によるリソグラフィ及び加速器研究
特記事項	蓄積リング故主催者側の分類は不適當

広島大学における加速器研究

小方 厚 (広大院先端)

A.Ogata (Graduate School of Advanced Sci. of Matter, Hiroshima Univ)

広島大学にはいくつかの加速器がある。まず、放射光研究のための蓄積リングは、現状では中国・四国・九州地方で唯一のものである。工学部のバンデグラーフ型加速器、ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーの電子周回装置が研究用に使われている。また原爆放射能医学研究所の中性子発生装置が放射線医学のために使われている。しかし「加速器」として見た場合さして特色があるとは言えない。そこでここではこれらの加速については仕様をまとめるにとどめ、いささか我田引水的ではあるが、「ビーム物理学研究室」について紹介させていただき、つぎに筆者がこの10年来係わってきた「レーザー・プラズマ加速」の現状について紹介させていただく。

広島大学の加速器の仕様

「①加速器名, ②加速粒子, ③最高エネルギー(MeV), ④平均電流(μ A), ⑤ピーク電流(mA), ⑥パルス幅(ns), ⑦繰り返し(Hz), ⑧主な用途, ⑨その他特記事項」の順番で記載。

I ①放射光科学研究センターHiSOR蓄積リング, ②電子, ③入射時150MeV蓄積時700MeV, ④⑤蓄積電流200mA, ⑥-, ⑦RF周波数191MHz harmonic number14で運転, ⑧放射光利用, ⑨-。

II ①放射光科学研究センターレーストラック・マイクロトロン, ②電子, ③150MeV, ④-, ⑤2-10mA, ⑥0.2-2 μ s, ⑦0.2-100Hz, ⑧HiSOR蓄積リングと電子周回装置への入射, ⑨-。

III ①原爆放射能医学研究所中性子発生装置 シェンケル型(コックロフト・ワルトン型), ②H, H², He⁴および0.1-17MeVの準単色中性子, ③3MeV, ④-, ⑤HとH²は1mA, He⁴は0.1mA, ⑥⑦-, ⑧中性子の生物効果, PIXE, ⑨-。

IV ①工学部バンデグラーフ型加速器, ②H, He³, He⁴, N¹⁴, N¹⁵, ③0.2-2.5MeV, ④⑤⑥⑦-, ⑧イオンビーム分析(PIXE, PIXE-XRF, RBS, NRA, ERDA, PIGE, μ -PIXE, Channeling)およびイオン・インプラントーション, ⑨-。

V この他に、ベンチャー・ビジネス・ラボラトリーに電子周回装置がある。レーストラック・マイクロトロンの電子を蓄積するリングであるが、加速装置はない。

ビーム物理研究室

「ビーム物理学研究室」は大学院先端物質科学研究科の物質基礎科学講座(7研究室からなる大講座)に1999年に発足した。構成は教授・助教授・助手書くである。先端「物質」科学研究科という部局に所属しているため、ここではビームも物質ということにされている。パンフレットには「空間的に局所化された同一基本粒子(イオン・電子・光子など)の集合は一つの特異な物質形態と見なすことができます。この集合が高速で運動するとき、われわれには「ビーム」に見えます。「ビーム物理学」はこのビームの基礎物性と応用を研究する新しい分野です」とある。広大の現在の「ビーム物理学研究室」の研究内容は下記のとおりである。

(1) ビーム・レーザー・物質の相互作用の実験的研究

テーブルトップ・テラワットレーザーによるレーザー加速; 特に薄膜照射で発生するイオンのイオン源としての実用化。ビームと結晶による放射光発生, スタンフォード線形加速器センターのプラズマレンズの実験への参加等。

小方 厚「プラズマによる粒子加速」大槻義彦編 現代物理最前線2 p143-217 (2000).

(2) 結晶ビームの基礎物性研究およびその生成法の理論的研究

イオンビームを極限まで"冷却"して"クーロン結晶状態"に到達させる方法と、この「クリスタルビーム」の基礎物性.

岡本宏巳「高速イオンビームの結晶化」大槻義彦編 現代物理最前線 p117-179 (2000).

(3) イオントラップを用いた加速器ビームの実験的研究

重心系では、イオントラップの1成分プラズマと加速器のビームとは等価である。卓上の安価なトラップ装置を用いて空間電荷効果、ハロー生成などの高速ビーム物性研究を高精度に行うという実験手法の研究.

H.Okamoto and H. Tanaka, Nucl. Instrum. Meth., A437, 178 (1999) .

ちなみに英語のPhysics of Beamsの直訳である「ビーム物理」という言葉をおおやけに、かつ意識的に用いたのは、

安東愛之輔, 井上 信, 片山武司, 平田光司「ビームの物理」日本物理学会誌 52 (1997) 83
が最初であろう。この年に「ビーム物理同好会」という団体が「ビーム物理研究会」を開催した。この研究会はその後毎年行われている。また「同好会」は将来学会に発展することを目指して「研究会」と名前を変えた。

<http://www-acc-theory.kek.jp/BP/BPclub.html>

が団体としてのビーム物理研究会のホームページで、その機関誌的な意味を持つページ、「ビーム物理通信」は

<http://home.hiroshima-u.ac.jp/ogata/>

にアドレスがある。

また研究会会員はビーム物理が日本物理学会の分科として独立することを目標に、学会年会で実験核物理、素粒子実験、領域2(プラズマ物理・核融合、放電分野)の分野を横断するセッションを定期的に設ける等の運動を続けてきた。この結果、最近新たに設けられた「新領域」の第一号として「ビームの物理」が採択されたとのことである。新領域として3年間の試行期間があり、永続性・安定性が認められれば、正式な分科に出世できる。

レーザー・プラズマ加速

レーザー・プラズマ加速には、わが国にも電子リング加速器などの歴史があるが、こと電子加速に関しては、Tajima-Dawsonの方法[T. Tajima and J. M. Dawson, Phys. Rev. Lett. 43 (1979) 267]が主流である。KEK加速器・名古屋大学理学部・山梨大学工学部・総合大学院大学等で研究されてきたが、現在精力的に実験を行っているのは宇都宮大学工学部・大阪大学レーザー研・広島大学・日本原子力研究所関西研究所である。

レーザー航跡場加速はプラズマ波長程度のパルス幅を持つテラワットレーザーでプラズマ波を作り、この波のポテンシャルで荷電粒子を加速する方法である。電子加速の実験ではこの方法で100MeV/mmを越える加速勾配が得られている。だからといって100GeV/mができるわけではない。つぎの目標は1GeVのエネルギーゲインを得ることである。

陽子・イオン加速器は実用性という点では電子加速器に勝るかもしれない。ところが陽子・イオンの加速には光速のプラズマ波に基づいたレーザー航跡場加速は使えない。固体に大パワーレーザーを照射すると高速イオンが飛び出すという現象があり、これをイオン源として用いるための開発計画が放医研を中心に進んでいる。ただし現在のrf加速器に匹敵する加速法は理論的にさえ確立していない。

レーザー・プラズマ加速の実験的な成果という点では日本の研究者は健闘している。しかし研究者は物理屋であって、Physical Review Letters に論文を出せば満足してしまい、この加速法を実用化するという意欲には欠けている。また実用化のための方法論も持ち合わせてない。原子力屋さんのこの分野への進出を期待したい。

九州大学における加速器に関わる研究

石橋健二(九大院工)

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。現在、佐賀県シンクロトロン光応用研究施設との連携が進められており、さらにキャンパス移転に伴う粒子線応用研究センターの設立と新加速器の設置が鋭意検討されている。

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. これまでの主な研究成果

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、核分裂炉の核設計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た。さらに、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。

実験技術に関しては、14 MeV 中性子飛行時間測定 (TOF) 系の開発とともに実験の効率を上げるためにユニークな技術の開発がなされた。すなわち TOF の時間基準を決定するために反跳 ⁴He を使うとともに、⁴He 検出器と散乱体とを中性子ターゲットの周りで回転させることにより、中性子検出器を動かさずに中性子反応の測定を可能とした。この方法では、検出器を固定するためシールド等を十分に施せるようになり、(n, n') 反応角度分布の測定を比較的簡単にかつ効率良く行えるようになった。こうした中で、14 MeV 中性子による (n, n') 反応の高励起状態連続スペクトルの角度分布がいろいろなターゲット核種について測定された。スペクトルの高エネルギー部分は前平衡過程から放出されたと考えられており、その角度分布データが系統的に測定できるようになったため、前平衡過程の反応機構研究の黎明期において重要な貢献を果たした。これらのデータ解析にあたっては、前平衡過程を記述するためのエキシトン模型が使用された。3 エキシトン状態を最初の直接反応に対応させ、直接反応の遷移行列を使った解析が試みられた。

この他にも ²³⁸U 核分裂反応や、核融合炉第一壁の候補であるニオブに対する中性子の影響を調べるために Nb(n, p) 反応等の研究も精力的に行われた。特に核分裂反応の研究はその後、光核分裂反応の研究へと進展し、高エネルギー領域の核分裂では (3, 3) 共鳴が大きな寄与を果たすことの証明につながった。

3. 今後の研究の方向

現在は維持費が切られており加速器の運転を停止している。この建物では共同利用研究所での次のような実験のために準備研究を行っている。

(1) (n, d) 反応による原子核単一空孔状態の分散に関する研究。

(p, d) 反応で精力的に研究された原子核中性子空孔状態の分散と比較することが可能となり、アイソスピン対称性や Q 値依存性によるエネルギー分布の変化が明らかになる

と期待される。また、SU(3)模型による解析をおこない深部空孔状態の空間対称性に関して調査を行う。

(2) 中性子検出器の開発。

パルス中性子ビームを利用して液体メタンタイムプロジェクトチェンバー (LMTPC) の開発が可能になる。LMTPC は中性子検出器としては極めて高い検出効率が期待できるとともに、ドリフト時間測定も高分解能でできるため、中性子物理学および中性子工学において期待が高まっている。また、低エネルギー領域のエネルギー可変中性子ビームにより、中性子磁気モーメントによる散乱を利用した新しい計測技術の開発も計画している。

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 カ年計画で建設、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 pμA (DC)。この規模の静電加速器としては世界でもユニークな横型であり、メンテナンス、新たな加速器技術開発を容易に行う環境が得られている。これにより本加速器独自の技術が多く確立されており、それを土台とした特色ある研究が繰り広げられている。

2. これまでの主な研究成果

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広島大、徳島大、京都大、東京大、高エネルギー加速器研究機構等、多くの研究者が利用している。国際的には、アジア諸国との共同研究にも利用されてきた。また、研究と並行し、大学院学生はもとより学部学生の教育においても有効に活用されている。

研究利用用途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。具体的には、小数多体系における核力の研究、ガンマ線核分光による原子核構造の研究、新同位元素の発見、軽、重イオン核反応を利用した原子核反応機構や原子核の高励起状態の研究等において特色ある研究が広げられてきた。一方、核データの系統的収集整備、炉材料の特性、鉱物資源熱履歴等、工学的研究にも幅広く活用されてきた。その利用者としては九州大学工学研究院、総合理工学研究院等、九州大学所属の研究者が主要である。現在中性子ビームの開発及びその理工学への応用に向けた研究が総合理工学、工学、理学の 3 研究院共同グループにより推進されているのに代表されるように、研究院の枠を超えた共同研究が精力的に進められているのも大きな特徴の 1 つである。

最近新たに、加速器質量分析、天体核反応率直接測定の 2 つのプロジェクトを推進しつつあり、これらプロジェクトの実現に向けた加速器及びその周辺における新たな技術開発に割く時間がかなりの割合を占めるに至っている。現在、ビームのパルス化、気体による荷電変換、イオン源の多様化、質量分離器等の必要開発要素はすべて完成に近い状況にあり、まもなく両プロジェクトとも本格的測定に入る予定である。

3. 今後の研究の方向

現在重点的に進めている中性子ビーム開発とその応用、天体核反応率測定、加速器質量分析の3つのプロジェクトを、九州大学内横断的な共同研究グループにより推進していく。九州大学の新キャンパス移転を控え、現在の教育研究のさらなる活性化を図り、新キャンパスにおいて建設を計画している新加速器施設での新たな教育研究活動へ継続的に結び付けていく。

新加速器施設に関しては、理学、工学両研究院を中心として検討を進めており、現在、詳細検討を始めた段階にある。またその準備研究を本格的に推進する母体として「粒子線応用研究センター」の設置を計画している。全学的なセンター設置準備委員会により、従来の原子核科学分野に加え、材料科学、生物学、医学、薬学等、幅広い学問分野から新加速器施設への学内要求が集約されている。センターの位置付け、組織構成等、佐賀県シンクロトン光応用研究施設との相補性等も考慮した詰めが現在進行中である。

九州大学医学部附属病院小型サイクロトロン

1. 加速器の仕様と設置年

BC1710 (日本製鋼所製) 加速エネルギー：陽子；17 MeV, 重陽子；10 MeV,
設置：1983年

2. これまでの実績・成果

1983年に既存の附属病院放射線部核医学施設を拡充する形で建物(地下1階、地上2階、600 m²)とサイクロトロンが設置され、さらに翌1984年にPET装置が導入されPET施設が完成した。国立大学では東北大学、京都大学について3番目であった。放射性医薬品を合成するためのホットラボには3基のホットセルが設置され、O-15水、C-11シアン、N-13アンモニア自動合成装置が準備された。同時に臨床利用の指針を定め、新しい薬剤の審査をするために院内に「九州大学医学部附属病院サイクロトロン生産放射性同位元素の医学利用に関する委員会」が設けられた。開設当初は、O-15ガスをを用いたモヤモヤ病や一過性脳虚血発作などの脳血管障害を主に臨床研究を行った。1985年には、F-18 FDG自動合成装置が完成し、痴呆や変性疾患での糖代謝測定を開始した。1988年にはF-18 DOPAの合成装置が完成し、パーキンソン病や多系統萎縮症などの運動障害患者のドパミン代謝に関する研究を開始した。また、この頃からFDGを用いて肺癌などの体部腫瘍の検査を徐々に始めた。1992年にはC-11メチオニンをを用いた腫瘍PETを開始し、脳腫瘍や肺縦隔腫瘍での研究を行った。1993年には世界に先駆けてC-11 NMPBによるムスカリン性アセチルコリン受容体の研究を開始した。1997年にはC-11ラクロブライドを用いたD2受容体の測定を開始し、ドパミン受容体に対する薬剤の影響を研究している。1998年にはSiemens社の最新鋭PET装置であるECAT EXACT HR+が導入され、3次元データ収集による全身FDG PETや脳の研究を行っている。

PET施設の運営は放射線科医と放射線技師が中心となり、各診療科の医師と協力して行ってきた。検査は医師1-3名、放射線技師1-2名、臨床検査技師1名、看護婦1名がそれぞれ仕事を分担して行っている。検査は週に4日(火-金)行い、1日(月)はメンテナンスに当てている。

3. 今後の方向

サイクロトロンが設置されすでに15年以上経過している。このため故障が多くなり、装置を維持するための人手や費用が増加している。また、サイクロトロン本体の放射化

により被曝の危険性が増している。現在、全身 FDG PET が悪性腫瘍患者の新しい診断法として急速に普及しつつあり、近く保険適用される見込みである。保険適用されると患者数激増すると予想されるため、操作が簡単で F-18 の収率も高い小型サイクロトロンが必須である。また、すでに保険適応されている O-15 が安定して供給できることが条件である。

九州大学応用力学研究所タンデトロン

1. 加速器の仕様と設置年

1 MV タンデトロン (欧州ハイボルテージ社製) 1991 年設置
(応力研 TRIAM 実験装置の付属装置として設置、不純物制御観測装置の一つとして設置)

2. これまでの主な研究成果

(1) 照射実験

核融合炉において材料が受ける照射損傷をシミュレートするために種々の照射実験が行われてきた。代表的なものとしてステンレス鋼、銅合金に対する二重ビーム照射実験で、重イオンビーム (銅イオン、ニッケルイオンなど) とヘリウムイオンの両方を同時に照射することにより、核融合条件下における損傷組織の発達の様子を研究してきた。さらに核融合条件では温度が変動することが期待されるので、この条件下でも照射実験が行われてきた。これらを通して核融合条件下における材料の照射効果に関する貴重なデータがこれまでに得られている。

(2) 水素の分析実験

核融合におけるプラズマ粒子が材料に侵入する様子を調べるには、水素の分析が不可欠である。そのためにヘリウムビームを用いた反跳粒子検出法によりステンレス鋼、グラファイト中の水素の分布、昇温過程における挙動などを詳細に調べ貴重なデータが得られた。

3. 今後の研究方向

今後も核融合条件下での材料挙動をさらに詳細にシミュレートしていくことを通じて、核融合材料の開発研究に寄与していく。加速器そのものの整備に関しては現在のものを整備点検しながら使用していく。むしろ照射チャンバーを温度を可変にするなど (とくに低温) の改良が必要である。PIXE 機能をさらに向上させることも (マイクロビームなど) 一つの方向である。

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 2003 年度完成、2004 年度業務開始予定

2. 今後の研究の方向

九州大学では、次の 4 つを柱として研究を計画している。

(A) 深刻リソグラフィビームライン (マイクロ電子機械等のナノテクノロジー技術開

発。

- (B) 機能材料開発ビームライン（アンジュレータ光による新しい非平衡低温プロセス技術の開発）。
- (C) X線分析・解析ビームライン（高輝度X線による固体電子構造、磁気モメント配列、高励起エネルギー・状態等の研究）。
- (D) 原子力関連研究として、中エネルギー標識付き準単色中性子源と単色高エネルギーガンマ線源。

ここでは、これらのうち (D)について略述する。

(D-1)中エネルギー標識付き準単色中性子源

入射器（リニアック）が発生する電子ビームを利用すると、通常の方法では得られない数 10MeV 領域の中性子を単色標識化し発生させることが可能となる。この中性子源を利用して、近年活発な研究がなされ、幅広い応用が期待されている中高エネルギー領域の中性子の計測器較正等の研究を行う。

(D-2)単色高エネルギーガンマ線源

レーザーとリングに蓄積された高エネルギー電子ビームとの逆コンプトン散乱を利用すると、通常では得られ難い数 10MeV 領域の単色ガンマ線が発生することが出来る。この単色高エネルギーガンマ線を利用して、大型ガンマ線検出器の応答特性の精密測定や、原子力、医療や宇宙開発等でますます重要になってきた核データ評価で必要とされる種々のパラメータ決定に必要な原子核の巨大共鳴等の原子核構造に関する精密測定を行う。

九州大学の加速器のまとめ

加速器名	高周波型コッククロフトワルトン加速器	タンデム静電加速器	小型サイクロトロン	高エネルギーイオン発生装置(1MVタンデトロン)
加速粒子	陽子、重陽子	原子番号 40 以下の原子イオン	陽子、重陽子	陽子、He, Fe, Cu, Ni イオン等
最高エネルギー	500kV	10 (q + 1) MeV (q: 陽イオンの電荷数)	陽子 1.7 MeV、重陽子 1.0 MeV	4 MeV
平均電流	5mA	1μA	50 μA	1μA
主な用途	DT 中性子による原子核反応断面積の測定	原子核科学研究、工学的研究、学際領域研究、放射線計測機器開発	C-11, O-15, F-18 の生産	核融合炉に関する材料の照射実験、分析実験 (ERD, RBS, PIXE)
その他特記事項	前平衡反応の先駆的研究	横型。独自の新加速器技術が多数開発された。H, D に関しては偏極ビーム加速可能	BC1710 (日本製鋼所製), AVF, 自己遮蔽型	重イオンビームとヘリウムイオンによる二重ビーム照射実験

KEKにおける加速器に関わる研究例の紹介

伴 秀一 (KEK 加速器放射線科学センター)

S. Ban (Radiation Research Center, KEK)

(1) KEK で使用されている主な加速器の仕様

通常の運転で、使用されている状態でのおおよその値を示す。平均電流が [] 内に示されている加速器は、設計値もしくは目標値である。

加速器名	主な加速粒子	最高エネルギー	平均電流	パルス幅(ns)、繰返し(Hz)	主な用途、その他特記事項
12GeV 陽子シンクロトロン	陽子	12 GeV	0.6 μ A [0.8 μ A]	速い取り出し： 1.1 μ s, 0.5 Hz、 遅い取り出し： 2 s, 0.25 Hz	ニュートリノ生成、 高エネルギー実験
ブースター陽子シンクロトロン	陽子	500 MeV	6 μ A [10 μ A]	50 ns, 20 Hz	核破砕中性子源、 ブースター
陽子リニアック	H ⁻	40 MeV	[30 μ A]	20 Hz	前段加速
RFQ リニアック	H ⁻	4 MeV	[600 μ A]	400 μ s, 50 Hz	大強度陽子加速器計画用研究
電子陽電子加速器 (KEKB/PF リニアック)	電子、陽電子	8 GeV	0.5 μ A [1 μ A], 10 nC/バンチ	10 ps, 50 Hz	4種の蓄積リングへの入射器
KEKB ファクトリー	電子、陽電子	電子: 8 GeV 陽電子: 3.5 GeV	電子:800 mA, 陽電子 : 1000mA (蓄積電流)	1153 バンチ	非対称ダブル・リング・コライダー
PF リング	電子、陽電子	3 GeV	450 mA (蓄積電流)	多バンチ、または単バンチ	放射光専用リング
PF-AR	電子	6.5 GeV	[100 mA] (蓄積電流)	0.1 ns 幅、1.3 μ s 周期の放射光	単バンチ専用放射光リング
テストリニアック	電子	46 MeV	[20 μ A]	2 μ s, 50 Hz	低速陽電子生成
ATF リニアック	電子	1.5 GeV	2nA	1 Hz (17 バンチ)	リニアークライダー開発
ATF ダンピングリング	電子	1.5 GeV	2nA	1 Hz (17 バンチ)	リニアークライダー開発

(2) 開発研究の例

(a) 電子蓄積リングの大電流、低エミッタンス化

KEKB ファクトリーでは電子陽電子衝突型加速器のルミノシティをあげるため、蓄積電流 0.8~1A の 8GeV 電子、3.5GeV 陽電子を、垂直 3 μ m、水平 100 μ m に絞ったビームサイズで衝突させる。蓄積電流の設計最大値は、電子 1.1 A、陽電子 2.6 A、ルミノシティは $10^{34}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ である。現在到達した 0.8~1A の蓄積電流でも最高ルミノシティは $4.4\times 10^{33}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ を達成し、最近の 1 年で 2 倍以上に増大した。発熱を押さえる工夫、ビームサイズが大きくなるのを防ぐ工夫が続けられている。目標を達成し更に将来的に $10^{35}\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ のルミノシティを得るためには、蓄積電流をあげた時に陽電子のビームサイズが大きくなるのを防ぐ抜本的な対策が必要である。このため現在とは電子と陽電子のエネルギーを逆転させ、8 GeV 陽電子を蓄積するような改造が検討されており、2002 年の初めには最大 2.9 A の電子を蓄積するための開発研究を開始する予定である。

PF-AR は 6.5 GeV の放射光専用リングとしての性能を上げるために、現在、停止して改造中である。単バンチ運転のみの専用リングである。実験室の増築、単バンチで最大 100mA 蓄積するリングの大電流化、長寿命化が行われている。2002 年 1 月に運転を再開する予定である。

(b) 電子リニアックでの大電流・低エミッタンスビームの加速

電子陽電子加速器 (KEKB/PF リニアック) では、10 nC/bunch で 10 ps 幅のビームを加速している。この電子を 3.5 GeV まで加速し陽電子生成ターゲットに照射する。陽電子電流は電子電流の 6% に達している。これ以上に大強度の陽電子ビームを得るのは難しいため、1 つの RF パルス内に 2 バンチを加速し、KEKB リングの RF 周期にも合わせて 2 バンチ入射する開発が行なわれている。現在 3.5 GeV 陽電子を得ているが、将来には KEKB の改造に合わせて 8 GeV 陽電子ビームを得るための、ダンピングリング、または C バンド加速管の設置が検討されている。

KEKB/PF リニアックの電子ビームを使って低速陽電子を作り出す、低速陽電子施設が稼働していた。低速陽電子施設の専用の 46 MeV の電子リニアックも整備が行われており、2002 年 1 月には運転再開の予定である。

先端加速器試験装置 (ATF) では、将来の電子・陽電子リニアークライダーや自由電子レーザーの前段加速器をつくるための開発研究が行われている。更に低エミッタンスビームを発生させる研究、編極陽電子を生成する実験が国際協力で行われている。ATF リニアックは、平均 29 MeV/m の加速勾配で 1.5 GeV の多バンチ電子ビームを加速する。これをダンピングリングに入射し、垂直 6 μ m、水平 40 μ m のビームサイズを短時間に得るため、2 台の多極ウィグラーがダンピングリングに入っている。

(c) 電子リニアックでの高電界加速

電子・陽電子リニアークライダー、自由電子レーザーのために、X バンド、C バンドのクライストロン、加速管の開発が行われている。X バンドはリニアークライダーの主リニアックとするために重点的に開発する技術として位置づけられ、開発に関しては、米国との共同研究が行われている。X バンドクライストロンの試験では、パワー 73MW、パルス幅 1.5 μ s、効率 55% で繰り返し数 Hz を達成している。KEK の工作センターで加工精度 1 ミクロンの銅の加速ディスクを超精密加工でつくり、多数のディスクを熱をかけて拡散接合して X バンド加速管を作り出す。できた加速管は目標の加速勾配 (75 MeV/m) を目指して SLAC へ運んで高電界試験が行われている。このとき放電のために微細な痕跡ができて、加速管の銅の表面が劣化するのを防ぐために、精力的に研究が行われている。

C バンドも開発が進んでおり、SPring-8 と共同で X 線自由電子レーザー用のリニアックの加速試験が行われる予定である。

(d) 大強度陽子加速器

長基線ニュートリノ振動実験のために 12 GeV 陽子の速い取り出しビームラインを延長して、ニュートリノビームラインが作られ、最大 0.48 μ A の陽子が 1.1 μ s 以内に取り出されている。数 m rad に絞られたニュートリノ・ビーム発生のためのマグネティック・ホーンも開発された。現在、 4.6×10^{19} の 12 GeV

陽子がホーン内のターゲットに達しており、2002年にはニュートリノビームラインの20%の電流増強を行いあと2年で目標の 10^{20} 個の積算陽子になる予定である。

現在の陽子加速器施設では、大強度化のために効果の大きい500 MeV ブースターシンクロトロン¹の改造が主に検討されてきた。ニュートリノ振動実験に合わせて12 GeV陽子シンクロトロンでの強度増強作業も96年から精力的に行われ、近年電流が増大してきた。

将来的には大強度陽子加速器計画(KEK・原研の統合計画)のためのRFQ, DTL リニアックの開発が行われている。これは加速試験の終了後は原研東海研の敷地へ移送されて、大強度陽子加速器の初段部分になる予定である。

(e) 小型シンクロトロン

直径2.5 mの小型のFFAG(Fixed Field Alternating Gradient Synchrotron)陽子シンクロトロン²の開発研究が行われている。高い繰り返し加速によって、小型なのに高効率で大強度の陽子ビームを実現できる。2002年の早い時期には、本格的な陽子加速実験が始まる予定である。将来的には、小型の低消費電力の大強度加速器、短寿命なミュオンなどの加速に、応用が期待されている。

KEKの田無分室では重イオン蓄積リングTARN IIが開発されてきた。更に重いイオン、大きい分子を貯蔵する小型の静電型貯蔵リングが開発されている。4×1 mのレーストラック型のシンクロトロンでイオンを長時間貯蔵し、更に高分子イオンを入射するための技術開発が行われている。

原研東海研究所における加速器の現状と今後の計画

横溝英明(原研東海)

H. Yokomizo (Center for Neutron Science, JAERI)

日本原子力研究所東海研究所には、稼動中、建設中及び計画中の加速器が複数ある。それらを紹介する。

(1) 大強度陽子加速器計画(建設中)

本計画は、生命、物質、素粒子、原子核、原子力技術などの最先端科学研究を推進するために、世界最大強度の陽子ビームを発生・利用する計画であり、原研と KEK の共同プロジェクトである。図 1 に概要を示す。

高エネルギー陽子を原子核標的に照射し強力な二次粒子、三次粒子を作りだし、それを用いて研究を展開しようとするものである。本計画は、三つの分野；原子核・素粒子物理、生命・物質科学、及び原子力科学技術で世界のトップクラスの研究を目指している。原子核・素粒子では、K 中間子、短寿命原子核やニュートリノを用いて宇宙創生の原理、自然の基本原則、物質の根源についての研究を行う。生命・物質科学では、中性子ビームやミュオンビームを用いて生命・物質の解明、医療、医薬品の開発、新しい材料の開発等の研究を行う。原子力科学技術では、中性子ビームを用いて原子力発電に伴う高レベル放射性廃棄物に含まれる長寿命核種の短寿命化の基礎物理研究を行う。

一次粒子である大強度陽子ビームを生成する加速器は、400MeV 定伝導リニアック、400-600MeV 超伝導リニアック、3GeV シンクロトロン(330 μ A、1MW)、50GeV シンクロトロン(15 μ A、0.75MW)から構成される。第 1 期計画は平成 13 年度建設を開始し、18 年度完成予定である。(図 2)

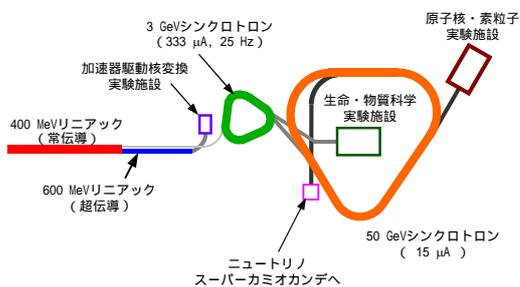


図 1 . 大強度陽子加速器の概要

年度	平成 11	12	13	14	15	16	17	18
R & D	■							
加速器			■					
実験施設				■				
基幹設備			■					

図 2 .建設のスケジュール

(5) 核融合中性子工学用中性子源 FNS (稼動中)

重水素ビームを加速し中性子を発生させる加速器であり、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両の実験を進めると共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。図 6 に、施設概要を示す。主要仕様は、端子電圧 450kV、ビーム電流 25mA、トリチウムターゲット回転数 880rpm である。

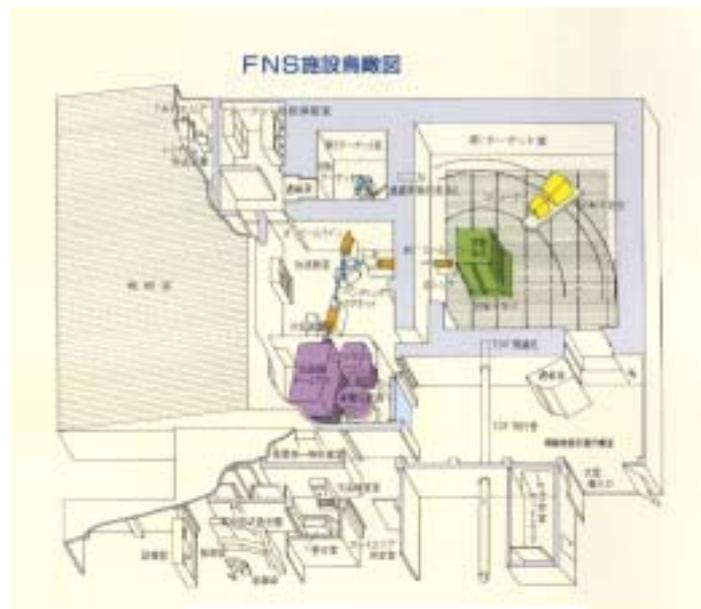


図 6 . FNS 施設鳥瞰図

(6) 中性子校正場の開発 (稼動中)

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科学校正場が必要であり、中性子線量計をより精度良く校正するには実際の作業場所に近いスペクトルを有する校正場が必要である。そのために、図 7 に示すように 4 MV バンデグラフ型加速器を導入し、各種ターゲット、減速材と吸収材を組み合わせることによって中性子校正場の技術開発を行っている。



図 7 . 中性子校正場の概要

原研高崎研究所における加速器の現状と今後の計画

小原祥裕、西堂雅博（原研高崎）

Y.Ohara and M.Saidoh (Advanced Radiation Technology Center, JAERI)

1. 高崎研究所における加速器

日本原子力研究所の高崎研究所では材料照射用の電子線加速器として1978年に θ 付ミトン型(3MeV, 25mA)、また1981年にコックロフト-ワルトン型(2MeV, 30mA)の加速器が導入され、現在も各種材料の電子線照射にほぼ100%の稼働率で有効に利用されている。さらに、1987年3月にはイオンビームの高度利用を目的とした「放射線高度利用研究計画」が策定され、本計画を推進するための研究施設としてイオン照射研究施設(TIARA: Takasaki Ion accelerators for Advanced Radiation Application)の建設・整備が1987年4月から6カ年計画で開始された。1993年7月には全ての施設が完成し、1994年1月からフル稼働するに至った。「放射線高度利用研究計画」は、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テーマで構成されており、TIARAはこれら材料やバイオ技術研究を進めるための専用加速器施設として建設された世界で最初の施設であり、非常にチャレンジングな計画であったと言える[1]。

2. TIARA

2-1 装置の概要

TIARAはAVFサイクロトロンと3台の静電加速器を備えており、数10keVから数100MeVにわたる広範囲のエネルギーを有する多種類のイオンビームの利用が可能である。研究の目的を達成するために最も適したイオンビームを提供するため、大面積均一照射からマイクロビーム照射、 $1\mu\text{m}$ の位置精度でのシングルイオンヒット照射等の各種照射法、3台の静電加速器からのビームを同時に照射出来る実験装置(トリプルビーム照射装置)等、イオンビーム利用の高度・先端技術を開発し、利用研究者への提供を行っている。TIARAの鳥瞰図をFig.1に、4台のTIARA加速器がカバーするイオン種、エネルギー及び照射法等の特徴をTable 1に示す。

TIARAは、所内外に開かれた施設として運営され、実験課題の公募、専門家の審査による採択、研究成果の公表(TIARA研究発表会と年報)を原則としている。TIARA研究発表会は、1992年から開始され、2001年には第10回目の節目を迎えた。この間、利用希望時間の増加に対応し、課題審査方法等の改訂を行っている。

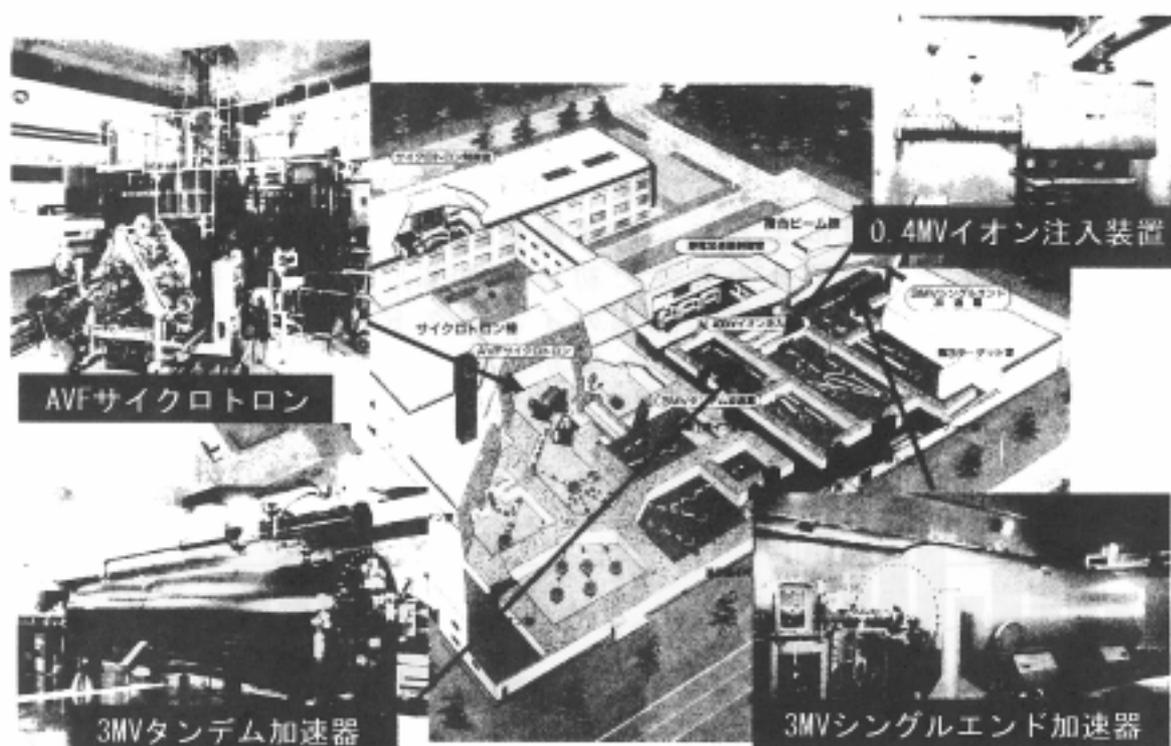


Fig. 1 Layout of Takasaki Ion Accelerators for Advanced Radiation Applications (TIARA)

Table 1 Typical beam characteristics of the TIARA accelerators

加 速 器	性 能			特 徴
	加 速 粒 子	エ ネ ル ギ ー (MeV)	電 流 (μ A)	
A V F サイクロトロン	陽子	5 ~ 90	30	<ul style="list-style-type: none"> ・カクテルビーム ・マイクロビーム ・拡大照射野 ・パルスビーム ・垂直ビーム ・中性子ビーム発生
	He	10 ~ 108	20	
	Ar	100 ~ 970	3	
	Kr	210 ~ 520	0.1	
	Xe	324 ~ 680	0.5	
	Au	500	0.02	
タンデム加速器 (3MV)	陽子	0.8 ~ 6.0	5	<ul style="list-style-type: none"> ・マイクロビーム ・クラスタービーム ・他の加速器との複合利用 (トリプル、デュアルビーム)
	C	0.8 ~ 15.0	10	
	Ni	0.8 ~ 15.0	5	
	Au	0.8 ~ 15.0	15	
シングルエンド 加速器 (3MV)	陽子	0.4 ~ 3.0	100	<ul style="list-style-type: none"> ・マイクロビーム ・電子ビーム ・他の加速器との複合利用 (トリプル、デュアルビーム)
	重陽子	0.4 ~ 3.0	70	
	He	0.4 ~ 3.0	70	
	電子	0.4 ~ 3.0	50	
イオン注入装置 (0.4MV)	P	0.02 ~ 0.4	30	<ul style="list-style-type: none"> ・各種イオンビーム発生 ・他の加速器との複合利用 (トリプル、デュアルビーム) ・透過電顕でのその場観察
	Ar	0.02 ~ 0.4	50	
	Ag	0.02 ~ 0.4	4	

2-2 利用実験

現在進めている研究分野は、宇宙環境材料[2]、核融合炉材料、無機機能材料、バイオ技術、有機・放射線化学、RI製造・核科学、基盤技術の7分野である。各研究分野の課題採択数の変遷を Fig.2 に示す。また、TIARA10年の成果として、学術誌発表数、受賞数等を Fig.3 に示す。研究成果の具体例として、イオンビーム照射による突然変異誘発の研究で、従来のガンマ線等で得られなかったキクの変異体を世界で初めて作出したバイオ技術の結果が挙げられる (Fig.4) [3]。この研究成果のインパクトの大きさは、サイクロトロンでのバイオ技術の課題数が1997年から急増していることから推察できる。

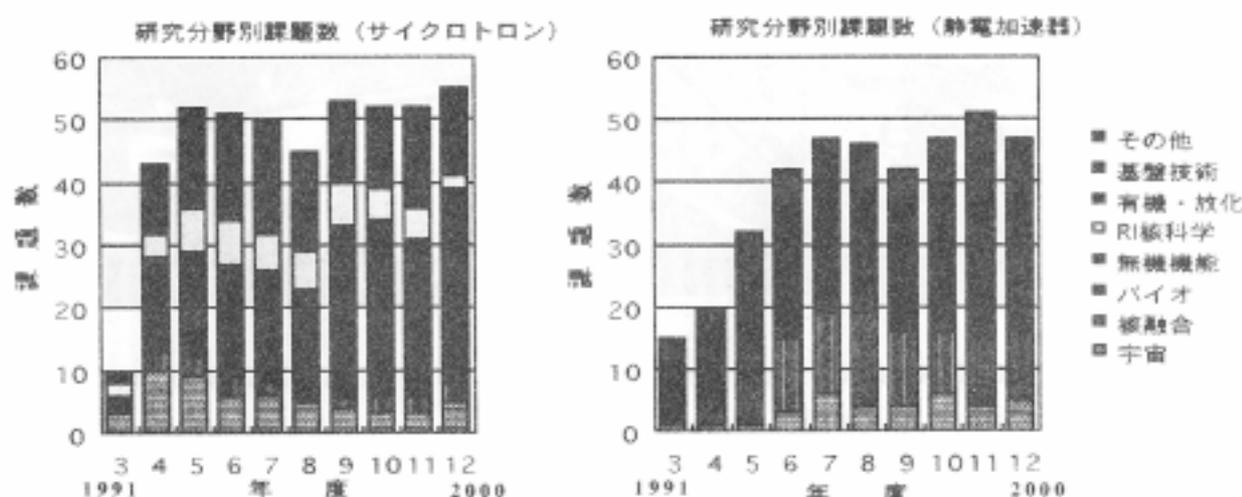


Fig.2 Change of the number of research items at the cyclotron and three electrostatic accelerators

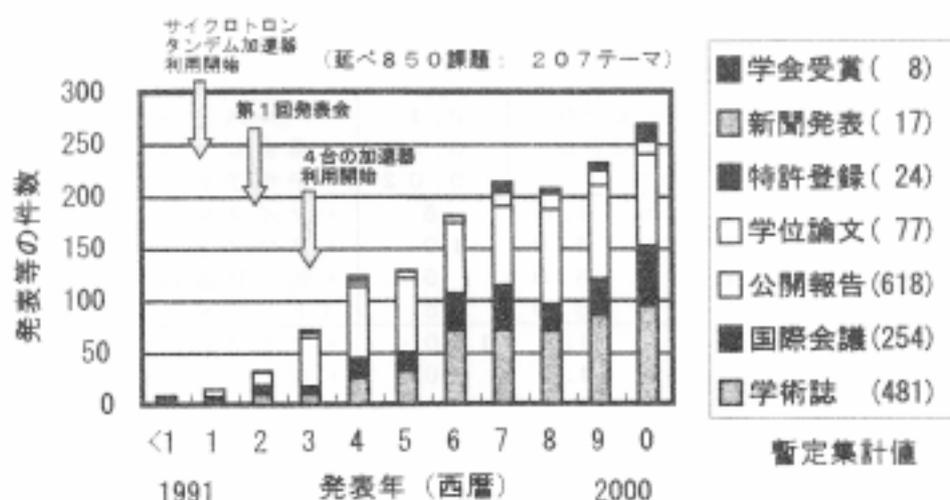


Fig.3 Steady increase of scientific and engineering results obtained at TIARA for the past 10 years

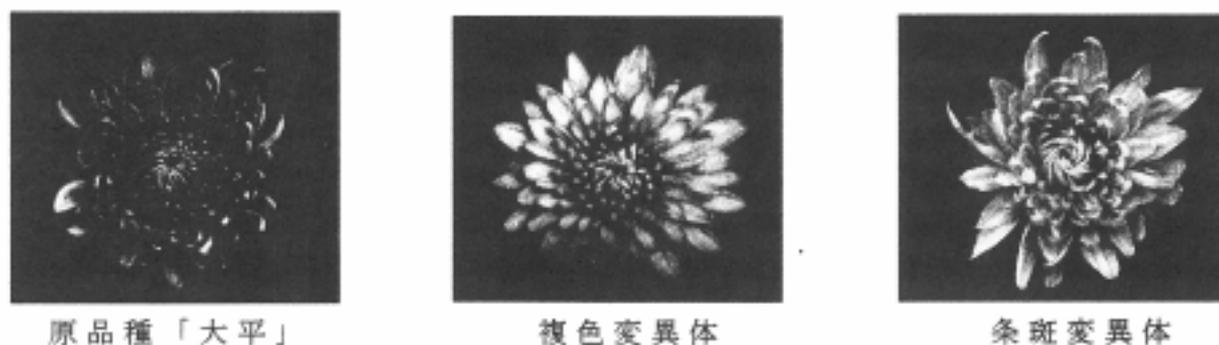


Fig.4 Mutation induction on chrysanthemum plants through ion beam irradiation

3. 課題及び将来計画

現在のサイクロトロンのはじめ性能は陽子で 90MeV、重イオンで 27.5MeV/核子であり、今後ますます重要となる材料・バイオ科学研究上、打ち込み深度や線エネルギー付与(LET)の不足は否めない(Fig.5 参照)。このため材料・バイオ科学への新たな展開と医療分野での地域協力を視野に入れた GeV 級重イオン加速器(超伝導サイクロトロン)の建設・整備計画の検討を開始しており、今後、その具体化を進める予定である。

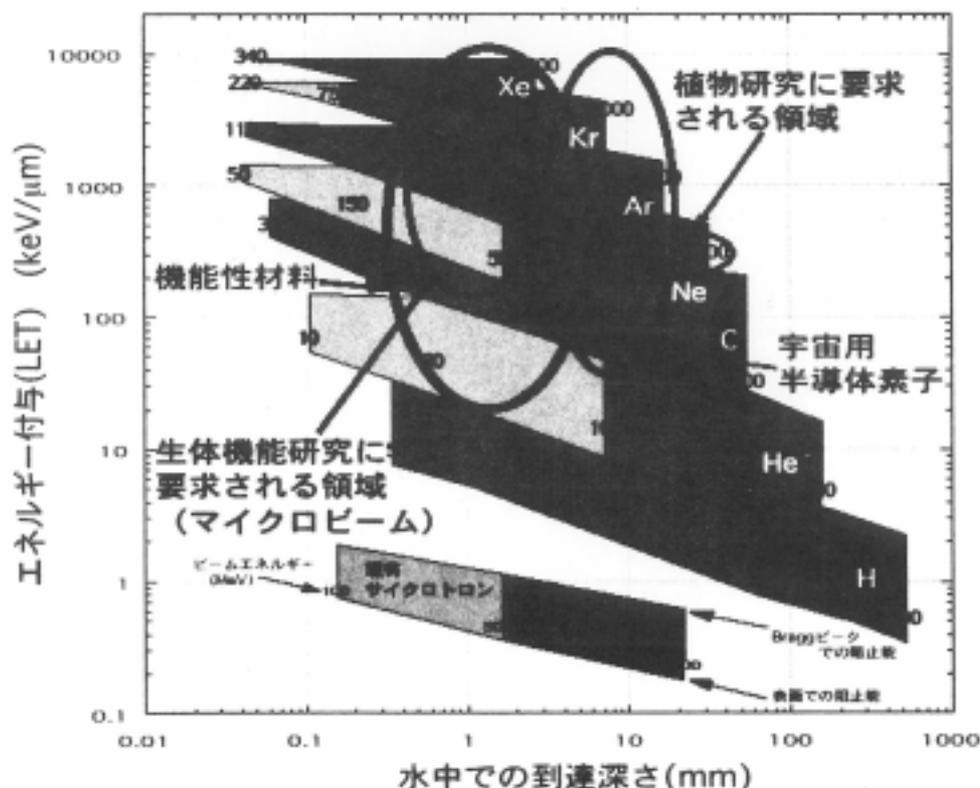


Fig.5 Linear energy transfer (LET) and penetration depth in water achieved in the present cyclotron and expected in the planned accelerator.

参考文献

- [1] S. Sato, "The Advanced Radiation Technology Project using Ion-Beams in JAERI-TAKASAKI", Proc. Int. Conf. on Evolution in Beam Applications (Takasaki, Japan, Nov. 5-8, 1991) pp.239-244.
- [2] M. Saidoh, M. Fukuda, K. Arakawa, S. Tajima, H. Sunaga, et al., "The Irradiation Facilities for the Radiation Tolerance Testing of Semiconductor Devices for Space Use in Japan", Workshop Record of 1999 IEEE Radiation Effects Data Workshop, 12-16 July 1999, Norfolk, Virginia, pp.117-122.
- [3] R. Tanaka, T. Kamiya, T. Sakai, et al., "Recent Technical Progress in Applications of Ion Accelerator Beams to Biological Studies in TIARA", Proc. 1st Asian Particle Accel. Conf., Tsukuba, Japan (1998) pp.894-898.

重粒子がん治療における加速器に関わる研究

曾我文宣(放医研)

F. Soga (National Institute of Radiological Sciences)

現在、日本人の死亡原因の第一位である悪性腫瘍(がん)の治療には主として3種類の方法が施行されている。手術、抗ガン剤、放射線治療である。放射線治療には大別して電磁放射線によるものと、粒子線によるものがある。重粒子線治療は前者に比べて線量集中性が圧倒的に優れていること、その生物学的効果が数倍高いことを主たる理由として、近年最先端の治療法として急速に注目を浴びてきた。

放射線医学総合研究所では、重粒子線による医学利用、特にがん患者にたいする治療を目的として、HIMACを建設し、1994年6月より臨床試験を開始して7年が経過している。当初の設計方針は世界初の医療専用重粒子線加速器であり、治療用として粒子の種類を始めとして未確定の研究開発要素が多々あることに鑑み、できるだけ多くの可能性を備えた加速器を目指すこと、放射線治療を遂行する目的から、安定性、信頼性に優れた加速器を製作すること、単に治療室のみでなく、照射技術および測定技術の向上、治療に関係した放射線基礎生物の実験等が可能な種々の照射室を具備し、総合的な重粒子治療試験および研究開発を推進する体制を作り上げることに留意した。その結果、医用専用加速器施設としては、かなり大規模な施設となっている。

Table 1 加速器の仕様

加速器名	HIMAC (Heavy Ion Medical Accelerator in Chiba)			
	3イオン源、RFQライナック、アルバレライナック、2シンクロトロン			
加速粒子	He, C, Ne, Si, Ar (以上 治療用及び照射実験用)			
	Fe, Kr, Xe (以上 照射実験用)			
最高エネルギー	加速器性能として、800 MeV / 核子			
平均電流	粒子の種類によって異なるが、Cで 約 $2.0 \cdot 10^9$ pps			
時間構造				
ライナック	パルス巾	500 μ s	マイクロバンチ	10 ns
	繰り返し	1 Hz		
シンクロトロン	パルス巾	1.5 s	バンチ	100 ns
	繰り返し	0.3 Hz		

種々の考察から治療用照射粒子として炭素を採用し、治療部位は頭頸部、肺、肝臓を始めとして10部位以上に及び、現在までに臨床試験の対象者として約1000人

の治療患者を治療している。全体的に治療成績は非常に良好なので、この治療法を是非とも日本全体にあるいは世界にむけて普及させたいと願っている。

Table 2 腫瘍部位別患者数 総計 946 2001年2月時点

頭頸部	158	中枢神経	61	肺	167	肝	108
前立腺	128	子宮	67	骨/軟部	84	食道	23
頭蓋底	14	膵臓	3	その他	133		

現在、兵庫県粒子線治療センターで陽子線と炭素線の両用照射施設を建設し、治療を開始した。HIMACで重粒子線治療を開始して経験を積み、炭素線は多くの症例で適切な選択であった事ははっきりしてきたこと、各地域に施設を普及させるためには加速器設計の小型化を含む最適化、施設の小規模化、コストの低減化が必要であり、それへの努力を研究所としても進めている。

Table 3 現在の HIMAC における研究技術開発項目

- 電子冷却装置によるビームの質的向上
- Broad Beam による 3次元照射
- スポットスキニングの実現
- 2次ビームの診断(治療)装置の開発
- 治療の質的制御と質的保証
- 小型医用加速器の開発

それと共に以上にまして重要な事は人材の養成である。特に粒子線治療においては放射線技師とは別に、十分な素養を持った医学物理士が必要であるが、現在の教育体制ははなはだ不十分であり、放医研では博士取得後この方面で活躍を希望する若い研究者を少しずつではあるが、研究に組み込みながら養成している。また現在の日本は粒子線治療施設の建設、普及においては世界的にも最先端をいっているが、これらの諸施設の計画、実施にあたるについての人的体制についても、出来る限りの助言を与えられるよう心がけている。

Table 4 日本における粒子線治療施設

放射線医学総合研究所	炭素：400 MeV/核子	1994年6月
国立ガンセンター	陽子：235 MeV	1998年11月
兵庫県立粒子線医療センター	陽子：230 MeV	2001年5月
	炭素：320 MeV/核子	2001年中?
筑波大学新陽子線医学利用センター	陽子：250 MeV	2001年9月
福井県若狭湾エネルギー研究センター	陽子：200 MeV	2001年度中?
静岡県立がんセンター	陽子：235 MeV	2003年?

H I M A C の利用に関しては、治療が昼間だけであるため、施設の有効利用の観点から、当初から夜間及び週末は単に治療関係にとどまらず、高エネルギー加速ビームを使用する基礎研究に開放しており、現在約 1 3 0 グループ、所外利用者 4 5 0 人（外国人約 1 割）が H I M A C 共同利用者となっている。

Table 5	HIMAC 共同利用	2 0 0 0 年度	研究グループ数
	治療・診断研究班		1 8
	生物研究班		6 5
	物理工学班		5 8

産総研電子加速器施設の現状と将来計画

豊川弘之、大垣英明、三角智久、山田家和勝、清紀弘、大平俊之、鈴木良一、
安本正人、小川博嗣、野口勉 (産業技術総合研究所)

H. Toyokawa, H. Ohgaki, T. Mikado, K. Yamada, N. Sei, T. Ohdaira,
R. Suzuki, M. Yasumoto, H. Ogawa and T. Noguchi

(National Institute of Advanced Industrial Science and Technology (AIST-Tsukuba))

1 施設の概要

産総研電子加速器施設(Fig. 1)は、リニアックTELL、低速陽電子施設、蓄積リングTERAS、NIJI-II、NIJI-IVで構成される。電子銃は熱陰極DC 80 kV、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、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・波長分解能のシンクロトロン放射光が利用できる。産総研電子加速装置、およびTERASビームラインの主な仕様を、Table 1、Table 2にそれぞれ示す。

Table 1 産総研電子加速装置の主な仕様

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 × 8 (ピーク)
電子エネルギー	350 MeV (ピーク電流100 mA時)
パルス幅	1 - 4 μsec
パルス繰り返し	0.5 - 300 pps
主用途	各施設への入射器
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 ⁸ 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
電子蓄積リング NIJI-II	
入射電子エネルギー	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

電子蓄積リング NIJI-IV

入射電子エネルギー	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	6.3 m ETLOK-
主用途	自由電子レーザーのドライバ

電子蓄積リング TERAS

入射電子エネルギー	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、標準研究、レーザー逆コンプトン 線源

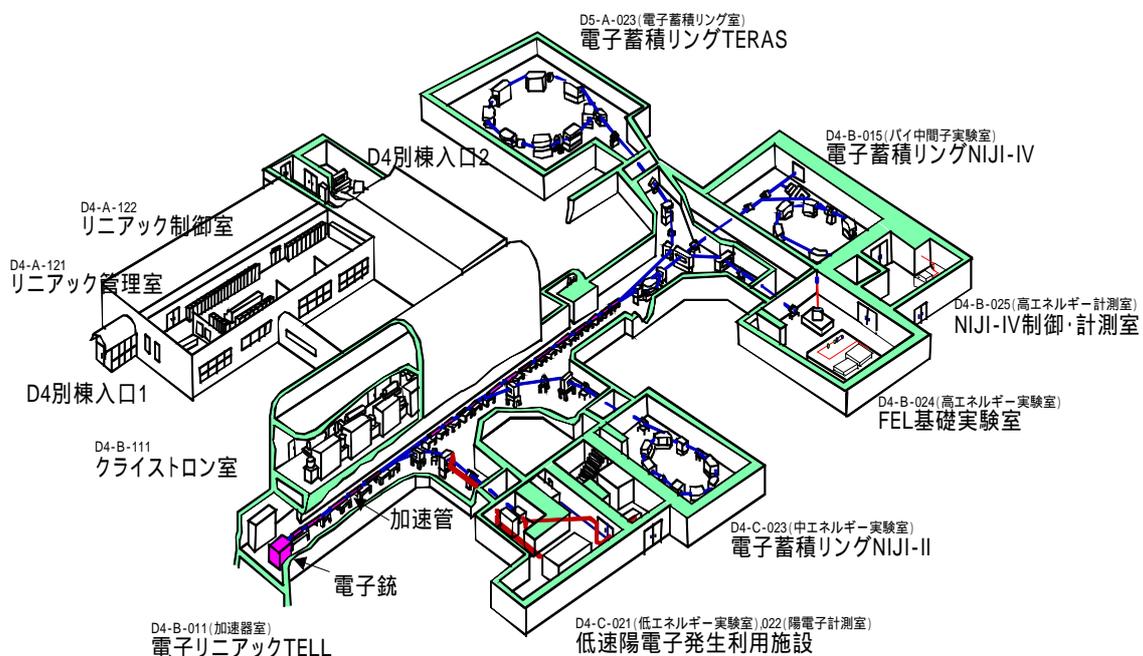


Fig. 1 産総研電子加速器施設

Table 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	軟X線絶対測定、原子分子 (TOF)
1B	Seya-Namioka	50 - 300	0.1	温暖化物質の光吸収断面積 (原子分子)
2A	ラミナー格子	2 - 8	0.01	蛍光X線微量分析
2B	1 m トロイダル格子	10 - 60	0.03	固体分光
2C	0.3 m 直入射	110 - 300	0.05	検出器
Q2		30 - 40		偏光可変アンジュレータ
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		white		LIGA露光用
B1	鉛コリメータ	(1 - 20 MeV)	>1%	逆コンプトン散乱、高エネルギーフォトン標準研究専用
L1	鉛コリメータ	(1 - 40 MeV)	>1%	逆コンプトン散乱

2 蓄積リング群の利用研究例

産総研電子加速器施設において実施されている様々な研究のうち、蓄積リングを用いて行われている、FEL、レーザーコンプトン散乱における研究成果等について、簡単に紹介する。

2-1. NIJI-IVにおける研究

NIJI-IVは、1990年に川崎重工と共同で製作した世界初のFEL専用リングである。7.25 mの長直線部を有したレーストラック型小型リングであり、6.3 mのOptical Klystron, "ETL0K-II"が設置されている。これまでに、200 nm以下の真空紫外域におけるFEL発振を目指して、バンチ密度の増大に関する諸改造を行ってきた。主なものとしては、SQS(Sextupole-Quadrupole-Sextupole)電磁石を設置することによって、効果的に六極磁場を配置し、クロマティシティの補正を行った結果、Head-tail instabilityをほぼ完全に抑えることができるようになったこと、RF加速空洞の入力パワーの増大(~4 kW)を行い、従来シングルバンチ30 mAにおいて、約200 ps (rms)であったバンチ長を170 ps (rms)としたことなどである。また現在、マイクロ波不安定性を低減するため、蓄積リング全周の75%以上の真空チャンバーを低インピーダンス型のものに交換する改造を進めている。更に次期計画として、赤外用optical klystronを用いて赤外領域のFELを発生させ、共振器内で電子バンチと逆コンプトン散乱をさせることによって100 keV程度の光子を発生させる準備も進めている。

2-2. TERASにおける利用研究

TERASを用いて行われている主な研究は、LIGAプロセスを用いた3次元フォトニック結晶の作成、超伝導X線検出器の特性評価、数10 eVの偏光可変アンジュレータ光による表面物性の動的過程の研究、レーザー逆コンプトン散乱(Laser-Compton Scattering; LCS)が挙げられる。ここでは最近の

LCS利用研究について簡単に紹介する。

産総研光技術研究部門(旧・電総研量子放射部)では、正面衝突によるレーザー逆コンプトン散乱技術を確立し、原子核物理研究において顕著な成果を挙げている。現在、LCS光子のエネルギー可変性、高指向性を利用した産業応用イメージング技術の開発が行われている。本研究は、まだ開発初期段階であるが、数10 cmのコンクリート片を透視したり、セラミックや金属で構成される試料のラジオグラフやCT像の撮影に成功している。ラジオグラフでは数100 μm の位置分解能が得られている。Fig. 2にラジオグラフの一例を示す。これはTERASで用いているRF加速空洞に電力を供給する四極管TH571Aの電極部であり、細部の構造を観察することができる。本手法は、加速器を用いた産業応用研究の一種であるが、今後、このような応用研究を進展させていきたいと考えている。

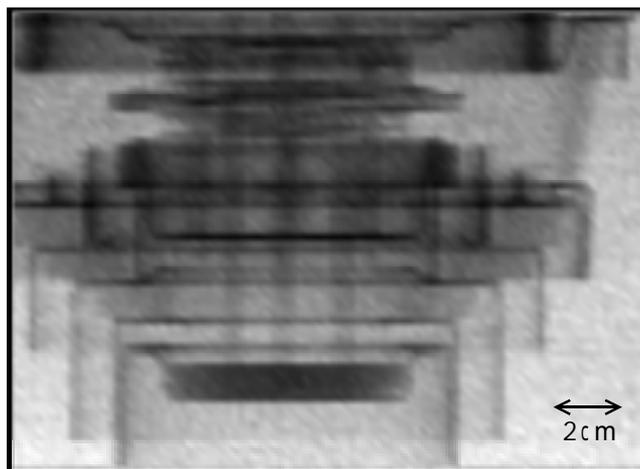


Fig. 2 Radiograph of the RF tube "TH571A".

3 将来計画

産業技術総合研究所では、これまで、TERASを初めとして、NIJIシリーズのような、小型蓄積リングを開発してきた。NIJIシリーズは小型という特性を生かしつつ、それぞれ産業用(リソグラフィ等)や自由電子レーザー用といった単機能型のものであった。これに対し、近年SPRING-8に代表される、大型汎用リングが稼働を開始し、その威力を発揮し始めている。しかし、大型汎用機には場所の制限がある、低エネルギーフォトン発生が困難である、利用者の利便性に欠ける点などがあり、わが国の産業を下支えする中小企業にとっては利用しにくい面があることは否めない。当所では、2001年4月の独立行政法人化に伴い、これまで以上に産業科学技術育成のために力を注いで行く所存である。このためには、独法人内に新たな中型汎用蓄積リングを建設し、産業科学技術の推進母体として広く産業界に開放することを計画し、現在その基本設計を行っている。

現在、幾つかの提案がなされているが、ここでは中型汎用放射光施設の計画(Super-TERAS)に付いて言及する。本計画では数keVまでのX線を利用可能することを基本とし、電子エネルギー1.5 GeV、ビームエミッタンス20 nm rad程度の高輝度リングを計画している。これには更に、10~20 mの長直線部を2箇所設置し、自由電子レーザーに供する予定である。また、標準供給のためのビームラインや、逆コンプトン散乱X線ビームラインを設置し、遠赤外から線にいたる広帯域光源を目指す予定である。現在は予算要求を行っている段階である。現在設計しているリングのパラメータをTable 3に示す。

Table 3 Machine parameters of AIST new storage ring "Super-TERAS".

Circumference:	144 .6 m
Momentam Compaction:	0.0055
Energy:	0.3 - 1.5 GeV
Natural Emittance:	24 nm rad
Critical Radiation Wavelength:	0.09 keV
Energy Spread:	0.58 %
Betatron Tune: Horizontal	7.46
Vertical	1.36
Long Straight Section	20 m x 2
Short Straight Section	3 m x 6

4 まとめ

産総研電子加速器施設の概要について述べ、施設の諸性能、主な利用研究等について紹介した。産総研で行われている研究は、加速器を利用した各種量子ビーム発生や、広帯域にわたる光源開発とともに、その応用研究を同時に行い、これらの結果をもとに、より高度な量子放射源開発を積極的に進めていることに特色がある。今後もこのようなスタンスを取りつつ、研究を進めていく予定である。しかし本施設の主要な部分は1980年代前半に作られたため、施設の老朽化が進んでいる。我々は最先端の研究ポテンシャルを維持していくため、上述の様な施設更新計画を提案している。この計画の実現には、産総研加速器施設に関連する研究者の熱意に加えて、産総研内外、特に産業界からの支持がなにより大切である。今後、関連の研究機関や企業との連携や情報交換を積極的に行っていく必要があると考えている。

理化学研究所RIビームファクトリー計画

矢野安重 (理研)

Y. Yano (The Institute of Physical and Chemical Research)

1. はじめに

理化学研究所加速器研究施設 (Fig. 1) の重イオン加速システムは、リングサイクロトロン (K 値 540 MeV RRC) と入射用の可変周波数型線型加速器 (RILAC) および AVF サイクロトロン (K 値 70 MeV AVF) からなり、全元素にわたる重イオンビームを核子当たり 0.6 MeV から 135 MeV のエネルギー範囲で供給している (Fig. 2)。当施設では、重イオンビームに加えて 210 MeV 陽子、270 MeV 偏極重陽子ビームを供給しており、これら各種の軽重イオンビームを用いた原子核の研究を主に推進しているが、その他に、マルチレーザーの製造と利用研究、重イオンビームによる癌治療の基礎研究、植物・動物の突然変異体の作出、宇宙環境重イオンによる集積回路の誤動作のシュミレーション等の学際的研究の推進も行っている。当施設の際立った特長は、リングサイクロトロンで得られる重イオンビームから入射核碎片分離装置 RIPS によって世界最高強度の軽元素の放射性同位元素 (radio-isotope, RI) ビームを発生できることで、これによって最先端の RI ビーム科学研究を推進してきた。

当施設は、この RI ビーム科学研究をより一層発展させるために、平成 9 年度から「RI ビームファクトリー」(Fig. 1) の建設に着手した。このファクトリーは、核子当たり数 100 MeV 以上の RI ビームを、全元素にわたって世界最高強度で供給することを目指す。RI ビームの発生には現施設と同様に入射核破碎反応を用いるほかウランの光核分裂反応も用いるので、一次ビームとして核子当たり 100 MeV を十分に上回る大強度重イオンビームが必要となる。このような重イオンビームを得るために、既存の RRC の後段に K 値 2500 MeV の超伝導リングサイクロトロン (SRC) を建設する。SRC は RRC のビームを、軽元素に対して最高核子当たり 400 MeV、ウランなどの重元素に対しても 350 MeV に加速する。さらに、RI ビームファクトリーでは不安定核の電荷密度分布を精密に測定するために、蓄積冷却リング (ACR)、電子・RI 衝突装置を建設することも計画している。

新施設が完成したあかつきには、新たに約 1000 種類の原子核が発見され、現在の核図表が約 1.4 倍に拡大する。さらにこれらの原子核の生成・反応確率や寿命を測定することによって、「宇宙における元素合成」、「中性子星等の極限状態における核の状態」など、現代科学においていまだに謎となっている諸現象を解明できる。また、RI ビームを物質や生体内の任意の場所に打ち込む手法 (RI インプランテーション) を用いた新しい応用研究が、物性・材料・科学・生物などの幅広い分野で可能になると期待されている。

2. 大強度 RI ビーム発生用加速器システム

RI ビームファクトリーでは、RRC の後段に K 値 510 MeV の固定周波数リングサイクロトロン (fRC) 、K 値 980 MeV の中間段リングサイクロトロン (IRC) と K 値 2500 MeV の超伝導リングサイクロトロン (SRC) をカスケード状に配置し (Fig. 1) 、RRC のビームを 3 段階で所期のエネルギーまで加速する。また、初段加速器として使用する RILAC に、大強度重イオン入射システムと多価化器 (CSM) を導入し、重イオンビームの大強度化を図る。これによって、核子当たり 350 MeV のウランビームを 1 μ A の強度で供給することができるようになる。

2. 1 RILAC の入射システム

RI ビームファクトリーでは RILAC を初段加速器として用いる。RI ビームファクトリーで目指す重イオンビームの強度を実現するために、18 GHz の ECR イオン源 (ECRIS-18) を装備した周波数可変 Folded-coaxial 型 RFQ リニアック (FC-RFQ) を開発し良好な運転実績を積んできた。またさらなる性能の向上をめざして最近超伝導の ECR イオン源が完成し、性能試験を行っている。

2. 2 CSM

CSM は、加速器、チャージストリッパおよび減速器で構成される。RILAC が出力するイオンビームは CSM においてさらに加速されてストリッパを通過し、より高い荷電状態のイオンになった後、磁気剛性を下げるために元のエネルギーまで減速される。この装置によって、最も収量の多い荷電状態のイオンビームの磁気剛性を、RRC が加速可能な値にまで低減することができる。最近、CSM が完成し運転を開始した。これによって、核子当たり 6 MeV の重イオンビームが RILAC 実験室で使用可能になったほか、RRC のビーム性能も飛躍的に向上した。

2. 3 fRC・IRC・SRC

リングサイクロトロン (RRC) からのビームは、中間段リングサイクロトロン (IRC) および後段の超伝導リングサイクロトロン (SRC) でさらに加速される。また、とくに非常に重い元素イオンに対しては、RRC と IRC の間にもう 1 台のリングサイクロトロン (fRC) を設置することによって、エネルギー増大率を上げることを計画している。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あたり 400 MeV、ウランなどの重いイオンで核子あたり 350 MeV に達する (Fig. 2) 。予想されるビーム強度は 1 μ A である。fRC、IRC および SRC の基本仕様は次のとおり。1) K 値 (MeV) : 510, 980, 2500, 2) セクター数 : 4, 4, 6, 3) セクター電磁石総重量 (トン) : 1200, 2700, 8000, 4) 取出し半径 (m) : 3.16, 4.15, 5.36, 5) 速度利得 : 2.0, 1.5, 1.5, 6) 最大磁場 (T) : 1.7, 1.9, 3.8, 7) RF 周波数 (MHz) : 36.7 (固定) , 18 \sim 38, 18 \sim 38, 8) 加速ハーモニクス : 8, 7, 6。これら 3 台のリングサイクロトロンの中、SRC は世界でも前例のない超伝導のリングサイクロトロンであるため、必要に応じて各種 R&D や試験を行って問題点を一つ一つつぶしながら設計・製作を行っている。

3. BigRIPS

RI ビームは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。生成装置は SRC の下流に、アクセプタンスの大きなもの (BigRIPS-L) と小さなもの (BigRIPS-S) が 1 本ずつ設置される。BigRIPS-L は、角度アクセプタンスが 100 mrad、運動量アクセプタンスが 6 % で、核子あたり 350 MeV のウランビームの核分裂片を約 50 % の効率で収集できるように設計されている。

BigRIPS-Lの二重極電磁石の偏向能力は8 Tmである。また、四重極電磁石は、磁場勾配が20 T/m、ボア径が24 cmの超電導磁石で、最近プロトタイプを製作し試験を行って設計の妥当性を確認した。生成されたRIビームはRIビーム実験室および将来建設予定の蓄積冷却リング（ACR）まで輸送される。

4. 電子・RI衝突器

電子・RI衝突器は、蓄積・冷却リング（ACR）および電子・RIビーム衝突装置（e-RI Collider）で構成される。ACRは、周長146 m、ハーモニクス30、最大磁気剛性8 Tm、水平/垂直アクセプタンス $125\pi/40\pi$ mm・mrad、運動量アクセプタンス $\pm 1\%$ のリングである。RIビームのマイクロパルスは、マルチターン入射とRFスタッキングの組合せで入射され、その後確率冷却法で予備冷却される。このサイクルに要する時間は約100 msで、このサイクルをRIの寿命の間もしくは空間電荷限界まで蓄積し、最終的に確率冷却法と電子冷却法の両方を用いて運動量広がり0.1%以下、横方向エミッタンス0.1p mm.mrad以下まで冷却する。このように蓄積・冷却されたRIビームは速い取出しで取り出され、e-RI Colliderに1ターン入射で入射される。e-RI Colliderは不安定核の電子散乱実験を行うためのもので、1カ所で交差する電子蓄積リングとイオン蓄積リングで構成される。電子エネルギーは500 MeVである。電子リングの周長は114 mでハーモニクスは182である。イオンリングは、ACRと同様、周長146 m、ハーモニクス30、最大磁気剛性8 Tmである。e-RI Colliderでは $10^{27}/\text{cm}^2/\text{秒}$ 以上のルミノシティを目指している。

5. 建設計画

RC、IRC、SRC、Big RIPSの建屋への搬入・据付けおよび運転調整を2003、2004年に行い、Big RIPSからの最初のRIビームを2005年の秋に得ることを予定している。また、実験設備は建屋の建設が2002年に始まり2005年に完成するのを待って、その後ステップ・バイ・ステップで導入する予定である。

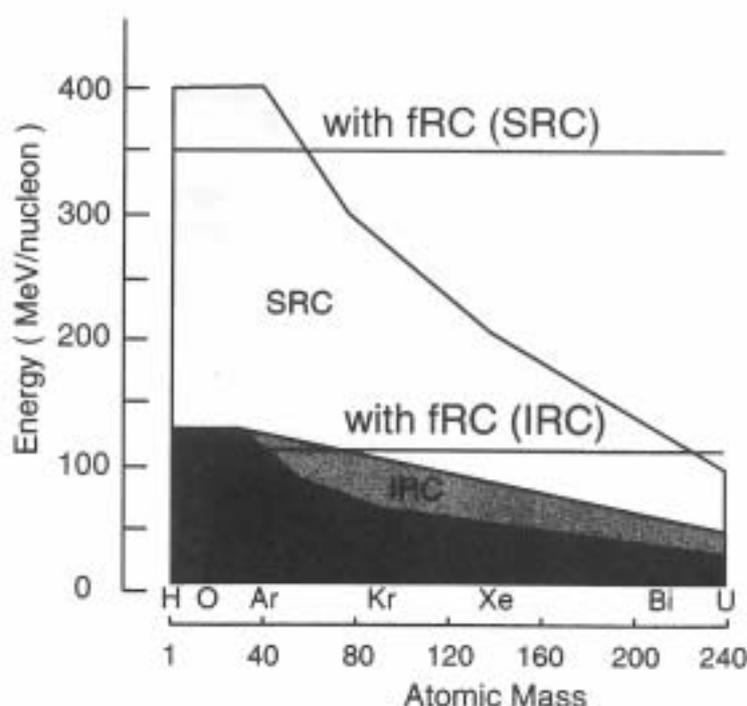


Fig. 2 : Energy vs. mass performance of RIBF accelerator complex.

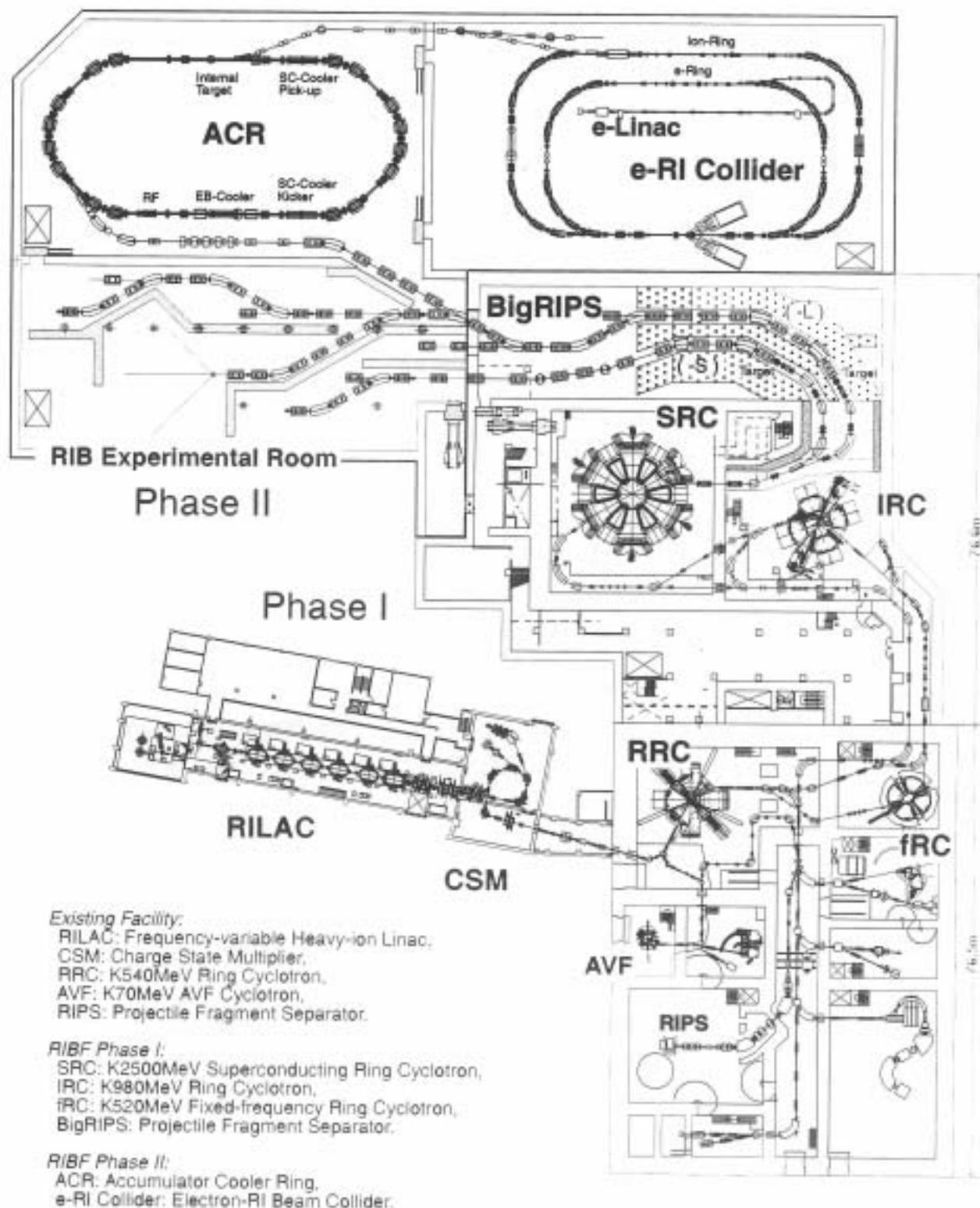


Figure 1: The layout of the RI Beam Factory (RIBF). The first phase of the RIBF building is presently under construction and will be completed in 2003. The construction of the second-phase building, the layout of which is preliminarily depicted here, is planned to begin in 2002 and will be completed in 2005.

分子研 UVSOR における加速器に関わる研究

加藤政博 (分子研)

M. Katoh (Institute for Molecular Science)

分子科学研究所・極端紫外光実験施設 (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。1983 年にビーム蓄積に成功して以来 17 年以上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¹⁾。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、その半数は共同利用に供されている。現在、年間 900 名ほどの利用者を受け入れている。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。UVSOR の加速器配置を Fig.1 に示す。また主要なパラメタを Table 1、2 にまとめてある。

Plane view of the UVSOR Facility

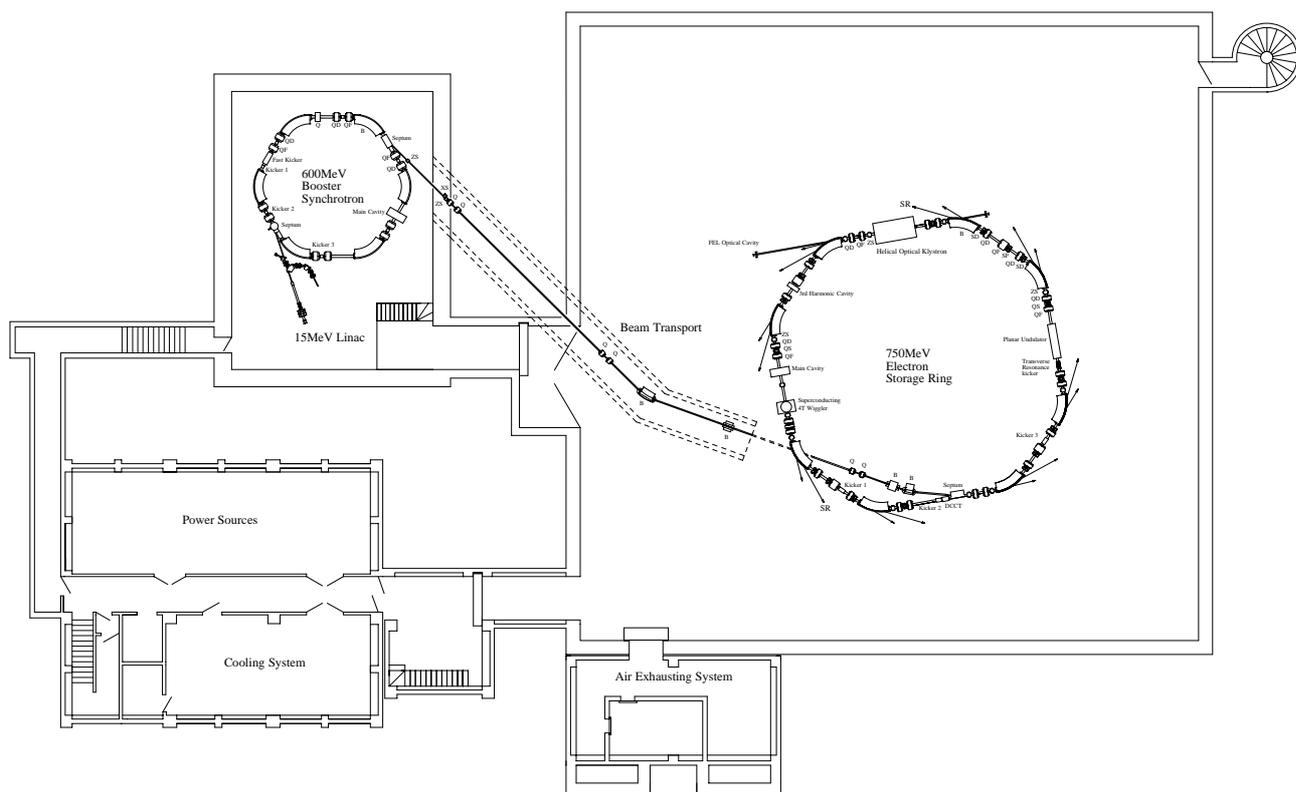


Fig. 1 UVSOR Accelerator Complex

Table 1. Parameters of UVSOR Storage Ring

Circumference	53.2 m
Lattice	DBA × 4
Straight Sections	3 m × 4
Beam Energy	750 MeV
Bending Radius	2.2 m
RF Frequency	90.115 MHz
Harmonic Number	16
RF Voltage	46 kV
Mom. Comp. Factor	0.026
Betatron Tunes	(3.16, 1.44)
Natural Energy Spread	4.2×10^{-4}
Natural Emittance	165 nm-rad
Natural Bunch Length	160 psec ^{#1}
Max. Beam Current	300mA (multi-bunch) 70 mA (single bunch)

#1) About three times longer with harmonic cavity on

Table 2. Parameters of UVSOR Injector

Injection Linac	
Energy	15 MeV
Length	2.5 m
Frequency	2856 MHz
Acceleration	2 /3Traveling Wave
Klystron Power	1.8 MW
Energy Spread	~ 1.6MeV
Repetition Rate	2.6 Hz
Booster Synchrotron	
Energy	600 MeV
Lattice	FODO × 8
Circumference	26.6 m
Beam Current	32 mA (8-bunch filled)
Bending Radius	1.8 m
Harmonic Number	8
RF Frequency	90.115 MHz
Renetition Rate	2.6 Hz

これまでに本施設で行われてきた加速器に関わる研究は、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。前者は例えば高調波空洞の開発²⁾など、後者は自由電子レーザー開発に代表される。自由電子レーザーに関しては、一時、短波長の世界記録を有するなど、めざましい成果を挙げてきたが、最近では発振の安定化、高出力化に取り組み、放射光との同期性を活かした利用実験も開始している³⁾。本年7月には蓄積リング自由電子レーザーとしては世界最高となる 1.2W の最大出力を記録した。このときのデータを fig. 2 に示す。

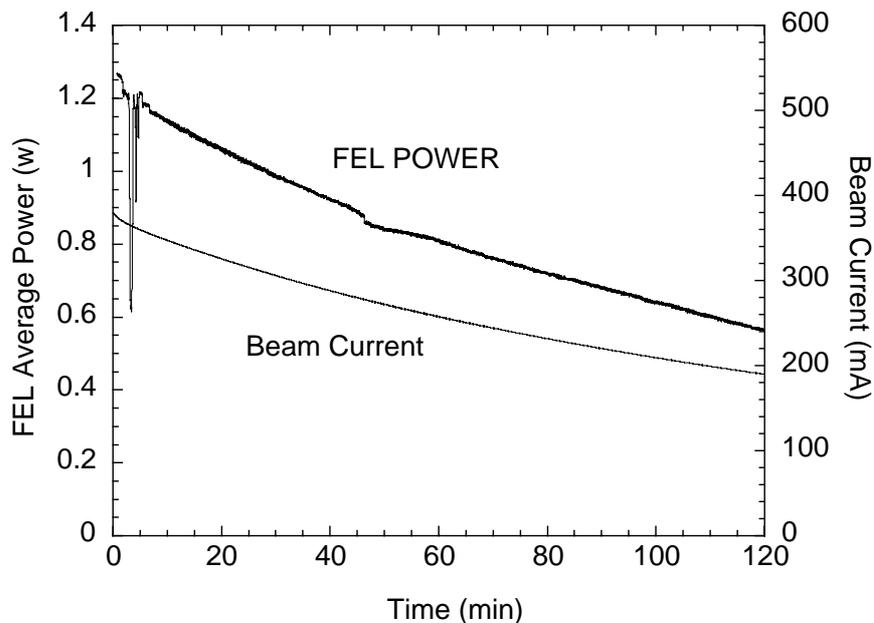


Fig.2 Output Power of UVSOR-FEL

以上のような開発研究は今後も継続していくが、その一方で、約 20 年前の設計思想と技術で作られた UVSOR の放射光源としての競争力の低下、加速器各部の老朽化の進行、を考えると、近い将来、ある程度の規模の高度化改造を実施する必要がある。我々が現在提案している UVSOR 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、今後 10 年以上、VUV 軟 X 線領域における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る^{4, 5)}。高度化で予定しているラティス改造を Fig. 3 に、また、高度化改造前後でのビームオプティクスを Fig. 4 に示す。早期の計画実現を UVSOR 利用者とともに願っているところである。

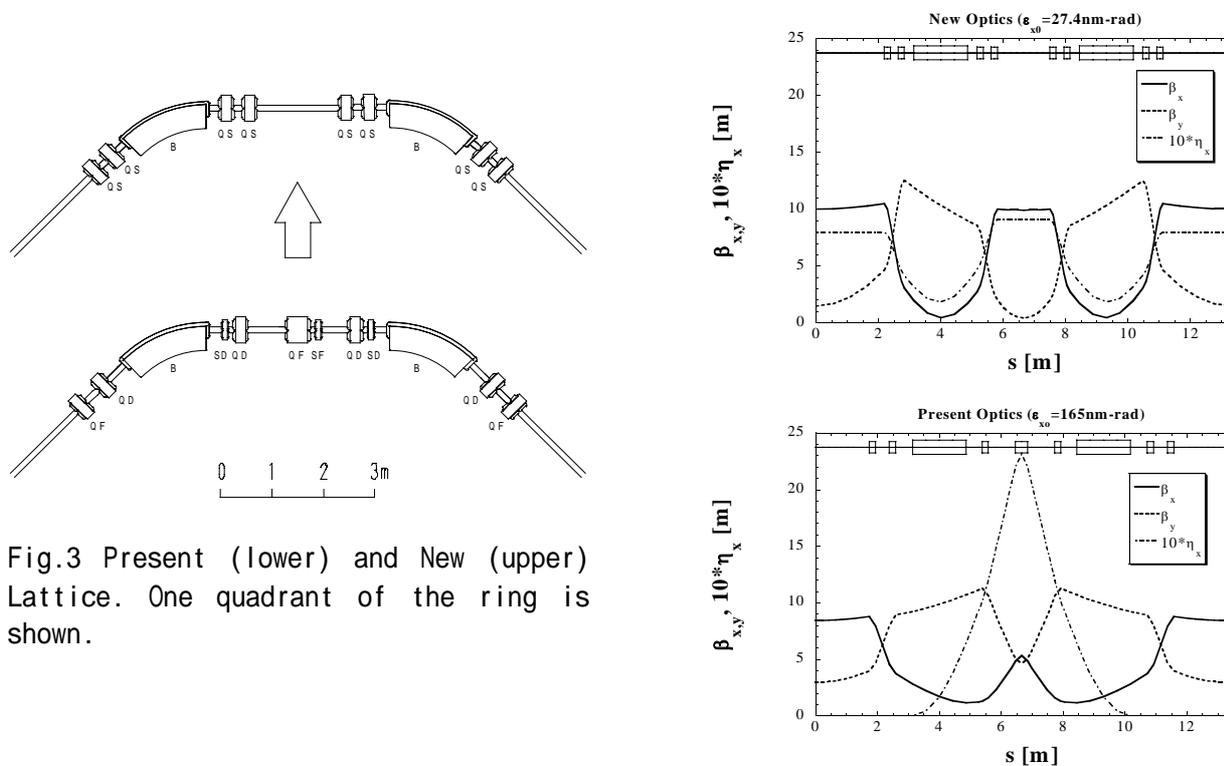


Fig.3 Present (lower) and New (upper) Lattice. One quadrant of the ring is shown.

Fig. 4 Present (lower) and New (upper) Optics One quadrant of the ring is shown. The emittance is 165 nm-rad and 27 nm-rad, respectively.

参考文献

- (1) M. Kamada et al., J. Synchrotron Rad. 5, 1166 (1998)
- (2) K. Tamura et al., Jpn. J. Appl. Phys. Vol. 33, L59 (1994)
- (3) M. Hosaka et al., submitted to the 23th FEL Conference (Darmstadt, 2001)
- (4) M. Katoh et al., Nucl. Instr. and Meth. A467-8, 68 (2001)
- (5) 加藤政博、放射光 Vol.14, No.4, 27 (2001)

SPring-8における加速器に関わる研究

宮原義一（高輝度光科学研究センター）
Y. Miyahara (Synchrotron Radiation Research Institute)

1 はじめに

SPring-8の加速器は1 GeVライナック、8 GeVシンクロトロン および8 GeV蓄積リングで構成される。ライナック、シンクロトロンの運転はそれぞれ1996年8月と12月に開始され、ともに1週間で所期のエネルギーまでビームが加速された。蓄積リングの運転は翌97年3月に開始され、2週間後に0.05 mA, 1カ月後に当初目的の20 mAまで蓄積された。7月までビーム調整と真空チェンバーの焼きだしを行い、10月から放射光実験のための利用運転が開始された。ビーム寿命は年度末に20 mAで約100時間になった。利用開始とともに7台の挿入光源を含む10個の共用ビームラインが稼働開始または完成間近になり、131の利用研究が採択された。98年には当初の設計値の100 mA運転が始まった。また挿入光源の増設に対処するため、99年夏、加速空洞が32台、加速電圧は16 MVになった。リングの磁石配列については後で説明するように、初めにハイブリッドモードで行い、99年にHHLVモードに変更された。2000年夏には長直線部が導入された。ビームラインは現在29本が稼働中、11本が建設または調整中である。

2 蓄積リング

言うまでもなくSPring-8は共同利用研究施設として長期間安定に運転することと高輝度リングとしてビーム高安定性を達成することが要請される。幸い多数の関係者の努力により大きなトラブルがないだけでなく、小さなトラブルも他の類似の研究施設に比べて格段に少ないという実績を示してきた。運転時間に関しては、たとえば99年では5050時間に達し、ユーザ利用時間(68%)のうち、96%が実際に供給されている。4%はマシンエラーと再入射時間である。運転時間をできるだけ多く確保するために、土日月を休みとする2週間連続運転方式から、年を追って3週間連続運転、4週間連続運転方式が導入された。2000年では運転時間は5500時間になった。夏期冬期のシャットダウンが加速器の補修や挿入光源の新設、それに伴う真空チェンバーの交換のため不可欠であることを考慮すると限界に近い数字である。

ビーム安定性は加速器の構成要素や電源の不安定性による軌道安定性と、ビームと加速器要素との相互作用によるビーム安定性(不安定性)に大別される。高輝度を意図してもビームがふらついてはその価値は半減する。また多数の挿入光源をユーザが自由かつ独立に運転できること、その場合ビーム軌道の変動が他のビームラインで邪魔にならない程度に抑制することが理想である。ビーム安定性は高輝度ビームになればなるほど重要になる。

まずビームのエミッタンスについては、ビーム入射用のバンブ磁石を用いて水平方向にバンブ(こぶ)軌道を作りビーム電流の減少の測定から設計通り7 nm radであることが確

認められた。これにより挿入光源を設置する直線部のビームサイズは400 μm になる。垂直方向のビームサイズは理想状態ではゼロに近づくが、リングを構成する緒磁石の軸方向のわずかな回転によりある大きさになる。これは新たに設置された29台のスキュー4極磁石によりx - y結合度0.1%以下、エミッタンスにして0.007 nm radまで縮小され、電子密度に敏感なタウシェク効果に着目したビーム寿命の測定により確認された。これにより長さ5 mの挿入光源によるX線の輝度はphotons/s/mm² mrad²/0.1% band widthの単位で10²⁰に達した。

X線の輝度は1913年に発明された熱陰極X線管による10⁷が長い間続いた。60年代に電子ビームによる放射光の有用性が確認され利用が始まると輝度は急激に上昇し、挿入光源の開発、エミッタンスおよびx - y結合度の縮小などにより40年弱で10²⁰台に到達した訳である。さらに長尺挿入光源の導入により10²¹台の輝度が期待されている。しかし今後もこの勢いが続くとは考えにくい。次世代光源としてエミッタンス0.1 nm radをめざした周長の更に大きいリングやビームエネルギー回収型超伝導ライナックが提唱されているがX線自身の持つエミッタンスが0.001 nm radであるから、輝度は10²³あたりが限界である。方式は異なるがSASEによるX線FELの期待値もこの程度である。ただしパルス当たりの輝度は大幅にあがる。

軌道安定化の道具としてビーム位置モニター（BPM）とステアリング磁石は不可欠であるばかりでなく、軌道の微細補正によるマシンの性能向上にも極めて有効である。90年代においてはビームによるBPM自身や緒磁石の校正と、計算機によるモデルリングの連携により軌道の精密制御が達成されるようになった。SPring-8のリングにはセル当たり6個のBPMと水平、垂直のステアリング磁石が設置されている。ベータトロン振動1波長あたり水平、垂直でそれぞれ5.1個と16個である。BPMの4つの電極信号は1つずつ計算機に読み込み、軌道とスペクトルが表示される。最初にステアリング磁石で補正された軌道補正歪（COD）は250 μm (rms)であった。次にBPMのオフセットが除去された。すなわち表示されたCODは凸凹状で、これに対応する高周波成分を除去することにより、一次的に妥当なCODが求まる。これをもとにBPM毎にオフセットが求まる。更にステアリング磁石で局所的にバンプ軌道を作り、予想と実際の軌道の違いからその4極磁石と6極磁石の磁場中心と積分強度が求められた。こうして磁石のパラメータが精度よく取得されるとともに、ビームは磁場中心を通るよう軌道補正された。

軌道補正に伴いランダムな軌道変動とともに周期的な変動が現れた。すなわち磁石冷却水の温度変化に伴う軌道変動、太陽と月の運行や四季の温度変化に伴うリング周長変動など。周長変動に対しては加速周波数の微少変調によりビームが常に磁場中心を通るよう補正された。直線部のエネルギー分散は磁石と軌道の微調整により1 mmに縮小された。ランダムな軌道変動の原因については個別に対策がとられてきた。しかしまだ軌道変動が残っており、スペクトル解析により、冷却水の温度変化、冷却水擾乱による電磁石の固有振動、電磁石電源の変動などが原因と見られている。これらの軌道変動に対してはCOD測定と軌道補正を一分毎に行い、水平、垂直でそれぞれ5 μm 、2 μm 以下に抑制された。一方

挿入光源の積分磁場はゼロになるよう製作されるが、任意のギャップでゼロにはならないためギャップを変えたとき軌道変動が現れる。この変動はギャップ毎に挿入光源の両脇に設置されたステアリング磁石で抑制するよう励磁電流のテーブルが作成された。

ビーム不安定性は一般に加速空洞や真空チェンバー内壁にビームで誘起された電磁場がビームに作用しておきる。またチェンバー内の残留ガスがビームでイオン化されてビームに作用することもある。加速空洞には加速モードの他に高次モードがあり、これがビームで励起されてビームに作用する。従って高次モードを空洞外に引き出す構造にしたり、その探針をつけたりする方法がいろいろな加速器施設で行われているが、SPring-8では32個の空洞毎に高次モードの周波数をチューナーと冷却水温度で制御して共鳴をずらす方法により不安定性を成功裏に回避している。また真空チェンバーの内壁はできるだけ滑らかにして誘起電磁場の停留による増大がおこらない構造にしてある。しかしそれでもチェンバーに起因する不安定性がある。まず単バンチ運転におけるヘッドテイル不安定性がある。ただしこれはクロマティシティを正の3-4にすることで抑制されている。またビーム電流の増大とともにベロー部の発熱が増大し16 mAで限界に達する。それとともにバンチ長が伸び、ピーク電流が飽和する。ビーム電流をリング一周に均等に分布させるフルバンチ運転ではイオンとの相互作用で不安定性がおきる。このため一部分バンチを除いた運転が行われている。しかし長直線部導入後ではその真空度がまだ十分に上がっていないためか、生成されたイオンが逃げ去るまでのビームとの作用のために微弱な不安定性がおきている。そのほか微細な不安定性がいくつかあるが、よその施設に比べてSPring-8では極めて少ない。

蓄積リングはチャスマン・グリーン型低エミッタンスの挿入光源を主体とするX線用高輝度リングである。周長は1436 mで、48セルあり、そのうち4セルは偏向磁石がない。リングの運転調整が十分に達成された時点であるべく早期に4極磁石を再配列して、30 mの長直線部を実現することが予定されていた。これは2000年の夏期シャットダウン中に実行され、長尺のX線用挿入光源が1台設置された。このような長直線部はAPSやESRFにはないSPring-8の特色になっている。長直線部に長尺アンジュレーターを設置すれば輝度が増大する。しかしこれは高々4-5倍である。SPring-8の特色である長直線部の潜在的可能性を生かすには新しい考え方が待たれる。

完成直後の磁石配列は水平方向のベータ関数が直線部で交互に大小になるハイブリッド型であった（垂直方向は中程度で皆同じ）。大の所にアンジュレーター、小の所にウィグラーを設置する意図からである。しかしユーザーによりアンジュレーターの要望が強いため、99年夏どの直線部のベータ関数も水平で大、垂直で小というHHLVの磁石配列に変更された。この磁石配列はハイブリッド型よりも単純であるため、エミッタンス(6.8 6.2 nm rad) ビーム寿命(70 160 時間)を含めてビーム性能が向上した。次に30 mの長直線部が導入された。長直線部は高エネルギー用コライダーでは衝突部として普通のことであるが、挿入光源用としては始めてである。磁石再配列においては単純周期構造のHHLVにベータ関数の大幅に異なる不規則セルを導入するので動力的安定領域を縮小さ

せないよう工夫された。現在、ビームサイズは水平、垂直でそれぞれ380 μm 、4.5 μm になっている。寿命は100時間であるが長直線部が十分に枯れてくれば寿命は伸びるはずである。

3 ライナックとシンクロトロン

ライナックは全長140 m、加速周波数2856 MHz、ビームエネルギー1 GeV で、蓄積リングの多バンチ運転と数バンチ運転に対処するため、バンチ長40 nsと1 nsでシンクロトロンに入射されている。98年10月からは新設のNew SUBARUにもビームが供給されている。運転開始以来、ビームエネルギー変動対策として、パルス変調器による加速管電圧の安定化や高周波電送路およびクライストロンの空調・冷却水温度の安定化による加速位相の安定化が行われた結果、エネルギー変動は0.03 % (rms)に抑制されている。またビーム負荷によるエネルギー広がりには偏向磁石列によるエネルギー補償システムにより0.2 % (rms) である。

シンクロトロンは周長396 m、加速周波数508 MHzで8 GeV まで1 Hz で加速する。入射エネルギーでのRFノックアウトにより意図する高周波バケット以外に存在する電子ビームを蹴落としてバンチの純度を上げ、蓄積リングの数バンチ運転でバンチ純度は 10^8 に達している。シンクロトロンと蓄積リングの周波数は同じで周長比は8/29であるのでバンチの同期がとれる。しかしライナックとは同期が取れない。またライナックはエネルギー安定化のため60 Hzの商用電源に同期している。そこで特殊な方法で3者の同期をとるとともに、ライナックの電子銃で0.2 nsのグリッドパルサーにより2856MHzの一つのバケットに入射し、蓄積リングの数バンチ運転を純度の高いものに行っている。

4 おわりに

当面の課題は加速器の更なる安定化、高性能化であるが、とくに蓄積リングにおいては軌道変動を1 μm 以下に抑制する研究や、連続入射（例えば1分間隔）によりビーム電流をほぼ一定に保つための研究が行われている。さらにSASE-FELの基礎研究としてレーザー照射による高周波加速電子銃の研究が行われている。また長直線部を利用したSASE-FEL、短パルスX線源、コンプトン後方散乱によるガンマ線源の開発など水面下で色々な開発研究や検討が行われている。

佐賀県におけるシンクロトン光応用研究施設（仮称）整備事業計画

小川 博司(佐賀大理)

H. Ogawa (Faculty of Science, Saga Univ.)

『 1 . はじめに 』

シンクロトン光(SL)は、次世代の科学技術の旗手として大きく注目され、国内では既に二十数箇所におよぶ施設が運用されているが、大阪以西では、Spring-8を始め、ニュースバル(姫路工大)やHiSOR(広島大)の3施設が運転を開始するものの、九州では未だ運用されるに至っていない。佐賀県では、将来の地域産業発展の要とすべく、平成10年度に「シンクロトン光応用研究施設整備検討委員会」を発足させ、設置に関する基本計画を策定したが、この計画のもとに平成11年度より基本設計が開始され、平成13年5月現在、建屋や光源等の設備に関する具体的で詳細な案がまとめられる段階に至っており、いよいよ今秋(平成13年)には、鳥栖北部丘陵新都市にて建屋等の建設が始まる予定である。

本稿では、基本計画¹⁾の概要と、本事業の整備推進や施設の利用促進のために設けられた委員会等においてなされた調査・検討結果を中心として簡単に紹介する。

『 2 . 背景 』

平成9年3月に佐賀県科学技術会議(座長;佐古宣道佐賀大学長)によってまとめられた、「佐賀県科学技術振興ビジョン」²⁾は、佐賀県の科学技術の基本理念、基本構想、及び基本計画について提言し、その中で新たな研究開発拠点の形成(サイエンスパーク)と、小型放射光(シンクロトン光)研究施設等の整備の必要性を指摘している。つづいて、この提言を受けて、翌平成10年3月、「佐賀地域及び鳥栖地域研究施設整備調査報告書」³⁾が、佐賀県当局によってまとめられ、九州北部学術研究都市整備構想(アジアス九州)との関連において、更にはこれら地域の新たな研究拠点施設整備の重要性において、「シンクロトン光応用研究施設」の必要性を強く主張している。

『 3 . 基本計画の概要 』

平成10年度にシンクロトン光関連の専門家を中心に大学、研究機関、県の研究者及び責任者から構成された整備検討委員会(委員長;木原元央・高エネルギー加速器研究機構・加速器研究施設長)によって基本計画がまとめられた後、整備推進委員会(委員長;上坪宏道・高輝度光科学研究センター理事)に引き継がれて、今日まで具体的で詳細な検討がなされている。これら両委員会での検討結果の概要を以下に紹介する。

(1) SL施設の基本方向とねらい

先に述べた佐賀県科学技術会議などの提言を基に、下記の考えを基本方向とした。

- ・地域産業の高度化と新規産業の創出
- ・優秀な頭脳の集積
- ・多様な産学官連携拠点の形成
- ・先端科学技術を担う人材の育成

・科学技術への理解の促進

これらの視点から基本コンセプトとして、

新産業創造、地域産業の高度化に向けた
アジアワイドの高輝度光産業開発交流拠点

を掲げ、SL 施設の先端性・希少性から佐賀地域のみならず九州地域はもとより、全国、さらにはアジア地域にまで利用が広がる事を期待している。県（自治体）としてのかかる施設の整備は、我が国で初めてであり、自由度の高さを特徴としたアジアワイドの産業開発拠点の整備を目指し、産官学の多様な連携（コラボレーション）の展開が期待されている。

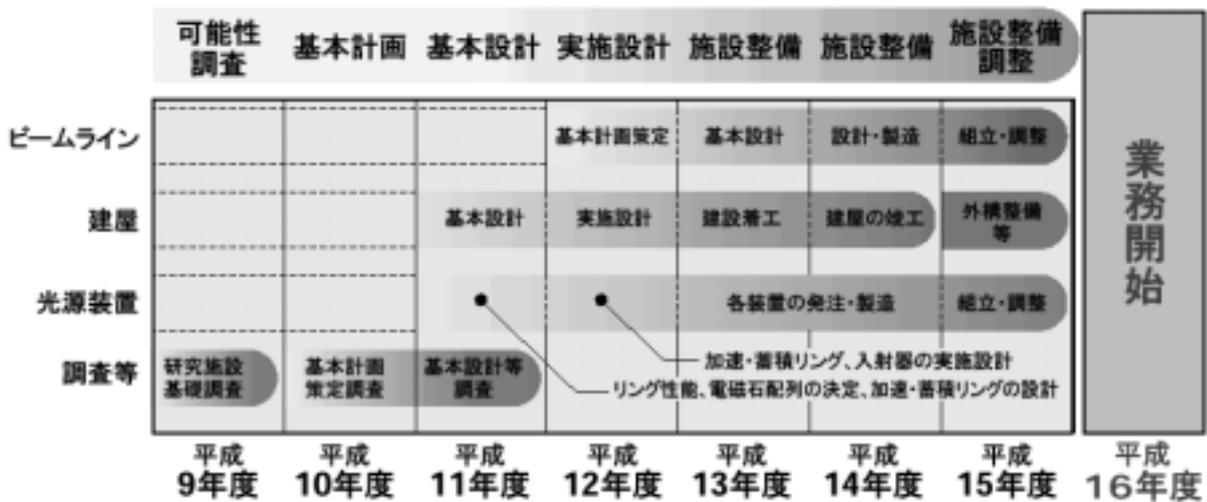
（２）事業の目的

「佐賀地域における産官学連携による研究開発の拠点として整備し、研究者、研究機関、企業等の交流と集積を図り、関連研究分野の中心地としての地位を確立するとともに、地域産業の高度化や新産業の育成など地域産業への波及効果を狙う」ことを目的としている。

（３）事業スケジュールと財源

事業期間を平成 10 年度から 15 年度とし、平成 16 年度に運用開始を目指しており、そのスケジュールの概要は、次の通りである。

Table 1. Schedule.



財源としては、「放射線利用・原子力基盤技術試験研究交付金」（文部科学省所管）をあてる。

(4) 施設整備の内容

下記の様に光源の仕様等がまとめられているが、基本的な考えとして、運転、保守管理が容易で、運転経費の低廉なシステムである事に重きを置いている。

光源の設計は、富増多喜夫・自由電子レーザー研究所特別顧問を中心に行われている。

光源装置の性能（基本パラメータ）

Table 2. Outline Parameters of Saga SL Research Center.

加速・蓄積リング		発光点の大きさ（カップリング10%、挿入光源なし）	
・最大電子エネルギー	1.4GeV	・偏向部 5度	水平方向 300 μ m 垂直方向 180 μ m
・蓄積電流値とビーム寿命		・偏向部 16.5度	水平方向 300 μ m 垂直方向 240 μ m
:低エミッタンスモード	300mA/2.5時間以下	・長直線部（ \sim 3m）	水平方向 567 μ m 垂直方向 100 μ m
:高エミッタンスモード	300mA/5時間以上		
・ラティス	DBA(Double Bend Achromat)	挿入光源	
・セル数	8	・ウイグラー	
・周長	75.4m	・アンジュレータ	
・直線部	8ヶ所(2.89m)	ウイグラーからの光子束	
・ハーモニック数	126	・7.5Tウイグラー(1周期)の場合	3.4×10^{10} [photons/s/(mrad) ² /(1%bw) ⁻¹]
・ベータトロン振動数		(ビーム電流300mAの場合)	
:低エミッタンスモード	水平方向/7.183 垂直方向/2.218	・発光点の大きさ(高エミッタンスモード、カップリング1%)	
:高エミッタンスモード	水平方向/4.812 垂直方向/2.722	水平方向 1404 μ m 垂直方向 67.7 μ m	
・エミッタンス		・3Tウイグラー(10周期)の場合	1.2×10^{10} (同条件)
:低エミッタンスモード	12nm-rad	アンジュレータからの光子束	
:高エミッタンスモード	73nm-rad	・ 4.8×10^{12} [photons/s/(mrad) ² /(1%bw) ⁻¹]	
・放射損失	105.9keV/turn(31.9kW,300mA)	ビームライン(BL)	
・RF周波数・電力	501MHz-90kW	・ビームライン数	20本(最短9m 最長38m)
入射器(リニアック)		・ビームラインタイプ	
・電子ビームのマクロパルス長が1 μ Sと13 μ Sの2モードで運転		① 県有BL(県が設置するBLで、時間単位でビームの利用を図ります)	6本
・入射モードでは、1 μ Sパルス長で250MeVの電子ビームを毎秒1パルス(1pps)入射		② 外部BL(利用者自らが設置するBLで、設置者が占有的に利用できます)	14本
・FELモードでは、13 μ Sパルス長で40MeVの電子ビームを10ppsでFEL装置に入射			

研究施設

研究施設の外觀のイメージと内部構造の概略を図1に示したが、施設は「実験・研究棟」と「宿泊棟」から構成されている。

実験・研究棟は、入射器、加速・蓄積リング、ビームライン、実験装置、実験・研究室、コントロールルームなどで構成する実験研究施設であり、宿泊棟は遠方からの利用者等の為の研究活動支援施設である。

研究施設全体の延床面積は約 5,000 m²となるが、これら施設は、科学者や技術者、あるいは大学院生等の研究・開発の場としてだけでなく、教育・訓練の場としての役割を担う事も想定される事から、その為の空間や、更にはそうした研究者等のもとより、子供達を中心に一般の人々が容易に見学出来るスペース(見学ブース)も確保されている。

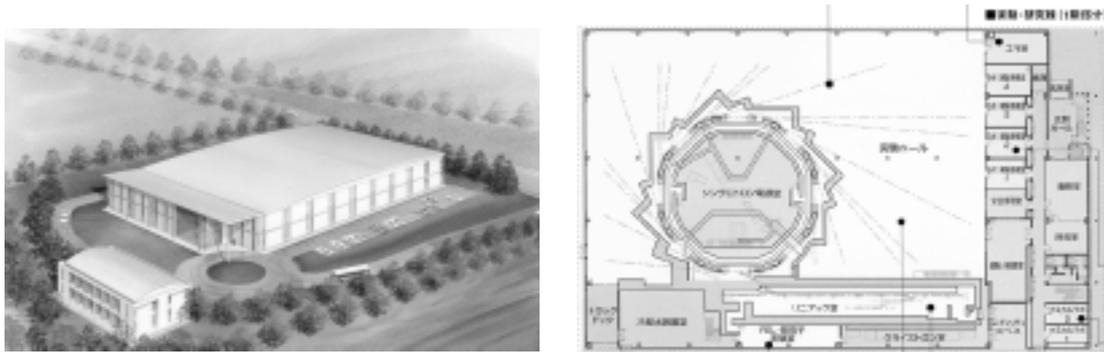


Fig.1. Outward images of facility and outline of internal construction.

『 4 . 産業界で想定される利用分野と利用研究フォーラム』

九州地域を中心に民間企業、大学、研究機関等の研究者からの聞き取り調査結果によると、地域に集積している一般機械、精密機械、電気機械メーカーでは、超微細加工に最も強い関心を示し、半導体関連メーカーでは、量産技術の確立に向けたウエーハ―等の分析などに期待しており、さらにリソグラフなど次世代の半導体製造技術にも大きな関心を寄せている。化学、金属、精密機械関連メーカーでは、材料中の不純物分析や高分子膜の構造解析等にニーズを持っている。医薬品メーカーでは、蛋白質の構造解析に強い興味を持ち、具体的に利用の検討を進めている所もある。大学、公設研究機関では、次世代の半導体製造技術、マイクロマシーン等をターゲットとした LIGA プロセスへの応用等に関心が払われている。この外、考古学の分野での遺物鑑定などへのニーズも指摘されている。

これらの利用分野を大きく分類してみると、

加工製造技術分野での利用

微細加工（LIGA プロセス、リソグラフなど）

分析・解析技術分野での利用

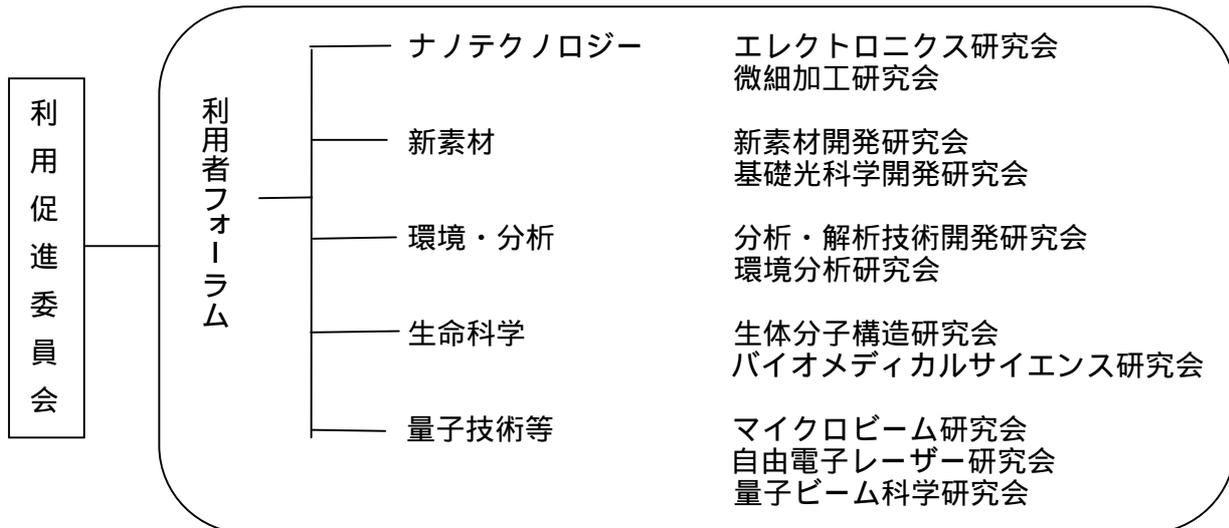
原子・分子構造解析、超微量分析（蛍光 X 線分析、X 線回折、XAFS など）

であるが、更には入射器の利活用にも大きな関心が寄せられ、

○ 量子ビーム加速計測

の研究分野が提案されている。

かかる調査をもとに利用促進委員会（委員長；千川純一・兵庫県立先端科学技術支援センター所長）では、佐賀県の専有ビームライン（当面 3 本程度、将来は合計 6 本整備の予定）の具体案について積極的な検討を重ねているが、同時に佐賀大学や九州大学など地域の大学や公設研究機関等の研究者等を中心にした積極的な利用提案に基づき、次の様な研究会から構成される「利用者フォーラム」を結成した。このフォーラムは、相互に積極的で密接な関係をもちながら、佐賀県の S L 施設を有効に利活用して、産学官の多様な交流、連携を推進し、研究成果の産業移転の促進、ひいては地域産業の高度化及び新産業の創出を目指している。



『 5 . 施設運用に係わる事業内容 』

施設を活用して、次のような事業展開を想定している。

- 研究支援、分析サービス・試作品製造サービス、研究技術開発
- 人材育成、施設・設備等の有償利用など

また、円滑な施設維持管理や、各種広報活動も重要な事業の一つである。

ユーザーが、不自由なく使えるフレキシブルな運営システムの構築や、民間企業の利用ニーズの発掘、利用促進のためのサポート体制の充実等、後発のメリットを生かした取り組みによって、利便性の高いユーザーフレンドリーな研究施設となるであろう。

『 6 . 期待される波及効果と佐賀大学の取り組み 』

SL 研究施設の設置による地域産業への波及効果は、上述の様に多方面にわたり新技術、新製品、ひいては新産業の創出につながるだけでなく、施設の設備が最先端の科学技術にもとづくことから、施設の建設、設備の保守管理において地域の技術の高度化や複合化、あるいは新展開を促すものと思われる。

教育機能にも大きな期待が寄せられる。国内外から大学関係者を中心として、多くの研究者や技術者等の参加が見込めることから、これまでの枠組みを越えた、新しい多様な形態を持つ人材養成（主に大学院レベルの高等教育）が行われよう。さらに、この施設は市民の国際交流の場、あるいは若年層など一般市民の最先端科学技術へのアプローチの場としての役割を担うことも期待される。

佐賀大学では、以上の期待に応えるべく、更には県 SL 施設へのアカデミックな立場からの積極的な支援・協力と密接なる連携・共同研究を行うために、担当教官 2 名（教授 1、助手 1）からなるシンクロトン光応用研究センターを学内研究施設として、平成 13 年 6 月 1 日付にて発足させた。将来、県施設に大学専有のビームラインを設置し、大学独自の研究プログラムを推進させ、同時に大学院レベルを中心とした高等教育が積極的に行われるであろう。

『 7 . 施設の立地場所 』

佐賀県鳥栖市の北部に整備が進む鳥栖北部丘陵新都市内のテクノセンター用地の一角（用地面積；約1.2ha）に建設される予定である。この新都市は、久留米・鳥栖テクノポリス構想の中核的な事業として整備がなされ、将来九州の研究拠点として発展することが期待されることや、鉄道、高速道路などへの交通アクセスに優れることから、立地条件は良好と言える。



Fig.2 Location of facility.

『 8 . おわりに 』

佐賀県シンクロトロン光応用研究施設は、小型施設の特徴である優れた操作性、保守・管理性や、建設コスト等の経済面での優位性を生かした、柔軟で機動性が高く、ユーザーフレンドリーな研究施設として誕生するものと期待される。また、九州地区にとって初の設置となるが、自治体（県）が主体となって整備する点も我が国最初の試みである。こうした特記事項に加え、この事業は研究開発のみならず教育にまで及ぶ産官学連携の積極的な好例として注目されよう。

三年後の平成 16 年度に運用が開始される予定であるが、この研究施設は、21 世紀の幕開けに相応しい新しい科学技術を地域にもたらすだけでなく、科学技術をとおしての活発な国際交流を生み、更には地元大学との密接なる連携による教育機能を核とする知的センターのとしての役割も担うものと予想される。

(文献)

- 1) シンクロトロン光応用研究施設整備検討委員会報告;佐賀県,平成 11 年 3 月
 - 2) 佐賀県科学技術振興ビジョン ; 佐賀県科学技術会議 , 平成 9 年 3 月
 - 3) 佐賀地域及び鳥栖地域研究施設整備調査 ; 佐賀県 , 平成 10 年 3 月
- 外に , 佐賀県シンクロトロン光応用研究施設パンフレット

パネル討論発言要旨

I. 21世紀における大型加速器プロジェクトの在り方

- 田川（阪大）： 加速器分布図（巻末資料参照）にはすべて載せられないほど、加速器の台数自身は非常に多い。東京近辺、関西に密集している。大規模なものは大研究所に集中しており、予算も大研究所に集中している。大学に多くの小規模な加速器があるが、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。加速器利用は大きな経済効果を有しているが、先端的利用への転換は不十分である。ナノテクへの利用をはじめとするビーム利用の高度化や医学・医療利用など、今後のシナリオを考えていく必要がある。
- 的場（九大）： 日本地図の上での加速器分布図は非常に印象的である。報告書の後ろに加速器施設一覧表も付けたい。現状を鳥瞰し、横断的にこれからのことを考えることが重要。加速器は殆ど原子力予算で作られてきたという事実がある。今回原子力が呼びかけたという点については、色々なご意見があるだろうが、お許し頂き、議論を進めて頂きたい。
- 安東（姫工大）： このワークショップにおいて「加速器研究施設」をどう考えるか。加速器を用いた「研究」に重点を置くのか、あるいは加速器の開発研究のウェイトがオーソライズされた施設をいうのか。加速器ビーム科学の研究のあり方を議論する場と思って出席したが、加速器研究施設の紹介に重点が置かれているのは意外だった。
- 田川（阪大）： 取り上げた加速器は、オープンにしても構わないもの。もう一つの見方としては、商業用や医療診断用ではなく普通の人アクセスできる加速器である。
- 的場（九大）： 加速器は利用されないと意味が無い。医療、産業利用はひとまず置いておいて、研究開発目的の加速器についてまず考えたい。
- 安東（姫工大）： 加速器には2種類ある。利用目的を徹底的に追求し開発を進めるものと、市販の装置を買って利用するもので、この2つには明らかな相違がある。「大型加速器プロジェクト」の議論は市販の装置利用の視点だけではできない。
- 柴田（高工研）： このワークショップは学術会議の専門委員会から発している。大きな施設に関して言えば、はじめは核物理や高エネルギー分野の全国研究者がまとまって計画を立て、共同利用研という形で実現するという形であった。これらの分野は目的を一つにまとめやすいという

面があったが、近年加速器の利用用途が広がってきたこともあり、今後どのように大型プロジェクトを進めていくべきか考える時期に来ている。研究所主導で進めるのか、ユーザー側からの要望を議論しまとめる場をつくる必要があるのか。ユーザーが広がれば学会は議論の場としては不適當で、やりようが難しい。是非御議論頂き、今後の専門委員会での検討の参考にしたい。

野田（京大）： 数年前、京大の将来計画に関しアンケートを取った経験から、広大な利用分野の人達の議論を集約しての新しい計画を策定するためには、柱になるものを明示しないと困難であるという印象を持った。大学にいて加速器性能向上に携わっている立場として感じるのは、昔と状況が大きく変わっているという点である。日本は今や加速器技術では、分野は限られるにしても世界のトップレベルに到達している。また、日本のメーカーは大型加速器でも既存の通常のものであれば、ほぼ独力で完成させる力を有するに至っている。このような状況において大学の加速器研究者のあり方が問われており、それに答えるものとしてチームが共通して持つような現象自身の研究、即ちチーム物理の研究を掲げている。物理学会にチーム物理分科会を設立すべく運動しているが、これを素粒子・原子核・物性といった個別科学を連携する横系として定着させることが極めて重要と考えている。

横溝（原研）： 一般に大型加速器とは千億円を超える規模と考える。大学でこの規模の議論をしようとしているのか、という疑問がある。これまでの加速器はユーザーとつくる側が一体となって一つの夢を追った形でできた。最近、大強度陽子加速器計画などの大型プロジェクトは、経済波及効果や社会的効果を示すことを求められている。大型施設とユーザーとのかわりにはこれまでのあり方とは異なるものになるであろうし、大型施設と大学研究者との関係も考えなおすべきフェーズにきているのではないか。

的場（九大）： お金の額にかかわらず、全国共同利用を考えるものをここでの「大型プロジェクト」と考えてほしい。大型加速器に限定はしない。

上坂（東大）： 大学の加速器は三十年前くらいに建設されたものが多い。維持費が殆ど切れており、大きなターニングポイントにあると感じる。大型施設と小型加速器は相補的關係にある。現在、大学研究者が連携し、小型加速器開発プロジェクトを立ち上げようとしている。大学の目指す加速器の方向は小型化、として議論を進めることを提案したい。

山田（立命館）： 大型加速器はユーザーのコンセンサスなしにはできない。この場には加速器研究者だけが集まっているので、議論に適切な場とは言えない。今は大型加速器をどんどんつくる時代ではない。ユーザーの

みならず地域社会のコンセンサスが必要である。加速器技術自身は古い技術と考えるが、小型化でハイテクになりうる芽がある。様々なユニークな加速器が大学から出てくる地盤をつくることが重要。

田川（阪大）： 主催者の意図は大型加速器のみを議論しようという趣旨ではないと思うが。

曾我（放医研）： この会で論点をフォーカスするのは難しい。原子力委員会の専門部会でも議論すべき内容が問題となっている。加速器科学サイド、ユーザーサイド、様々な側面が絡んでくる。大型装置の利用は単目的に限るべきではなく、例えば放医研の HIMAC は夜間には一般の基礎研究に使われている。また一方、加速器を広めるためには小型化が重要である。様々な論点を持った人達が意見を表明する場があること、そしてそれを統合しようという努力をすることが重要である。

的場（九大）： 加速器のための加速器の時代は終わったと感じる。やはり利用されてはじめて加速器は意義がある。今後加速器の開発が必要かという観点からの議論も必要かもしれない。何故今か、22世紀の人達に付託してもよいのではないか。

安東（姫工大）： 我々の研究を支えているのは学会組織である。放射光の計画はソサエティ皆の計画になるという印象を持てなかった。それに対し、高エネルギー、原子核の研究者は学会レベルで真摯に議論してきた。これが我々の研究のあり方を律していく最もわかりやすい道だと思う。

的場（九大）： 加速器はやはり使用されることが重要。専門外の研究者が思いもかけぬ使い方をされることもある。加速器関係者が一つの学会にまとまるより、広くかかわって時折集まるようにした方が長い目で見れば良いのではないか。

井上（京大）： 原子力と加速器のかかわりについて整理しておく必要がある。第一世代では核物理も原子力も混然一体で一研究者が両方に関係する研究を行っていた。次の世代から分かれて、核物理の研究者は核物理研究を遂行するために加速器を要求し、実現してきた。一方原子力では研究者がボヤボヤしている間に政治家が予算をつけるという形で始まっており、京大炉を例にとると、第一回原子力長期計画で原研炉のほかに大学の研究用ということで関西方面に原子炉1基を設置すると決められて計画がスタートし、その後学術会議がこれを大学附置の全国共同利用研究所にすべきという勧告を出して今の形で実現した。利用者は多岐にわたるが、利用者が要求してつくったものではなく、あるものを使うという感じで、ユーザーズユニオンに迫力を感じない。大型加速器に関しては、最近の放射光施設の実現を見ると、モチベーションがユーザー側にあったのか、つくる側に

あったのか、そう簡単ではないと感じる。

山田（立命館）：若い研究者を加速器分野に引き入れるには、単に加速器技術のみを研究するのではなく、その利用目的も含めた教育が必要である。加速器研究に携わっている学生が発表する適当な場がない。加速器学会実現に皆さん努力してほしい。学会は学生に熱気を感じさせるものでなくてはならない。学生への配慮、社会の流れを考えると原子力とは別の学会が好ましい。

的場（九大）：大型プロジェクトの加速器の大半が原子力予算でつくられたという事実を目をそむけてはならないであろう。

安東（姫工大）：それは政府のやったことで政治的な問題である。

的場（九大）：我々が矛盾点を抱えていることは確かであるが、今後とも、議論を尽くして前向きに考えていくべきではないか。

II. 加速器・ビーム科学分野の広がりやと大学の役割

的場（九大）：大学の加速器の維持費が低下しつつあるが、一方で良く使われているという事実もある。これをどうするかがポイント。大型プロジェクトを知った上で大学のあり方を考える必要がある。大型施設の方向性を議論しようと言う趣旨ではない。日本原子力学会の中に部会をつくり検討を進めることが要請されたが、基礎科学を進めるという観点から、その名称を加速器・ビーム科学部会として加速器研究者及び利用者が一緒に議論することを主張し認められたという経緯がある。当面避け得ない原子力の問題に対処するには各大学の原子力工学科において科学技術をしっかり学んだ人材を養成することが不可欠である。しかしこの分野でも学生が発表する適当な場所がない。

柴田（高工研）：文科省において科研費分科細目変更の検討が進んでおり、複合領域において放射線影響科学とビーム量子理工学の二本を立てたいとの要求を学術会議に出している。加速器やビーム利用についての確かな判断のできる審査員が確実に選ばれる新たな科研費分科細目を立てることが目標である。また、量子ビームに関連する研連があれば、この分野の発展に大きな貢献をもたらす。他の研連に意見を反映する方法もあるのかもしれないが。

上坂（東大）：地域振興の予算を活用するのも一つの手段である。ただし独立に進めるのではなく、このような場で議論し連携することが大事。

大谷（若狭湾）：地方は未だ箱物主義から脱却できていない。地域振興の予算には人

の枠が全く用意されていない。その点覚悟を決めて議論する必要がある。国の予算の点からいえば、原子核技術に関する予算がすべて原子力と結びついている点は見直すべきである。現在、原子核技術は核燃料サイクルという意味の原子力とは全く無縁と言っても過言ではない。都合の良い時だけ原子力を利用するのではなく、基本に立ち返った議論が必要なのではないか。

田川（阪大）： 地域振興予算は原子力では歴史的に特殊な位置付けもあるが、最近提唱されている地域振興予算には地域と産学の連携という面もあり、地場産業への学からの貢献も求められている。評価も厳しくなってくると思われ、安易に予算を取るだけでは済まないので、適切な計画をたててほしい。今後、かなり厳しくなってゆく印象を受ける。

井上（京大）： 都合の良い時だけというのは、原子力サイド、核物理サイド両方に責任があったと思う。原子力サイドは原発以外で身近に役立っていることをアピールして原子力のマイナスイメージを払拭したいという意図があった。核物理サイドはお金があるところを利用しようという意図で原子力と称して加速器をつくろうとした。旧科技庁サイドは、本当に必要な原子力予算を定め、放射線応用への予算とは区別して、エネルギー利用としての原子力を縮小する気ならそれをはっきりすべき。大学には原子力から逃げていた面があるのではないか。旧文部省にも、大学から原子力工学科が無くなっていくことに対する反省は起こっていると思う。第一回原子力長期計画には、核研建設中にもかかわらず、加速器には全く触れていない。原子炉で動力利用と放射線利用の両方を行うと書いてある。加速器による核物理研究は原子力とは区別されていた。今は双方の意図でかなりずれてきているが、何となく原子力、というのではなく、中身をクリアにする姿勢で努力する必要がある。ただし、放射線応用での接点や放射線計測などの共通ツールを持っているのだから、技術開発のレベルでの共通の場は必要で、金を媒介とした野合ではなく真の連携は重要である。例えば高エネルギー研のリニアコライダー計画などは、金ほしさに原子力にすり寄るのではなく、素粒子研究拠点としてアジアの CERN のようなものを目指し、その必要性を国民に説明して予算をとるべきであり、その一方で大強度陽子加速器計画のような接点のあるものは原子力と連携するということではないか。

山田（立命館）： 教育面にしても今後のありかたにしても、学会設立が重要となる。その第一歩として、分散している研究会（加速器科学研究会、ライナック研究会、自由電子レーザー研究会、ビーム物理研究会等）が年に1回、同じ場所で同じ期間に研究会もしくは学会を行うことを提案したい。私どものような微小研究室では、こんなにもたくさんある学会に出席するのは不可能である。それに、どの学会でも同じ

ようなことを話さなければならない。それが可能となるよう各学会リーダーに調整を依頼してはどうか。隔年ではだめで毎年やることが重要。また、査読付きの学会誌を作るべきである。放射光学会は良い例で、PF 研究会、UVSOR 研究会等を同時に開催している。

安東（姫工大）：日本の大学システムは欧米と異なり加速器研究をオーソライズしていない。加速器の研究をしていると公言しては大学で市民権を得られない雰囲気がある。人材養成についてはこの現状の認識なしで安直に議論することはできない。また、極論するならば、加速器の利用を重視する場合は市販品を買うべき。加速器研究者としては特化した加速器の建設を目指す。

的場（九大）：原子力学会設立時は原子力エネルギー利用と放射線利用の両方をうたっている。ただし当面は核分裂炉に集中するとも書かれている。原子力発電に市民のイメージが固定されたことも事実。山田さんの御提案について意義は感じるが、現実的にはそれぞれの学会での活動と両立させることに相当の困難があるのではないかと。

田川（阪大）：現在ある非常に多くの加速器関連機関を一つに統合するとか、発表会を一つにするということは難しいと思う。しかし、共通の事項を話しあうために、加速器関係者が年一度会合を持つことに関しては、加速器関連の同好会、研究会との統合は支障無く取れると感じる。しかしユーザー側には素粒子・核物理のような強いユーザーソサエティもある。強いユーザーとここにお集まりの方々との整合性をとることの方が問題かもしれない。これからは原子力という聖域がなくなり競争社会になる。これまでは予算獲得のために広い視野から計画に意義を考えてみるという点で、無防備だったという印象もあり、準備を整え自助努力を行うことが必要となる。

参 考 資 料

- ・ 日本における加速器一覧
- ・ 日本における加速器研究施設と利用研究

日本における加速器一覽

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	元素分析
	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
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						
加速器センター	タンデムバンデグラフ	p,d,HI	11 MV		1976	多目的
陽子線医学利用研究セ	シンクロトロン	p	250 MeV	4 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

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,	2.0 MV	20 μA	1981	表面解析
	イオン注入装置	p, HI	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, HI	7.5 MV			加速器質量分析
工学研究科	タンデトロン	p, ³ He, HI	1.7 MV	50 μAmax	1988	イオン物質相互作用
	バンデグラフ	p, ³ He, HI	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, HI	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	HI	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						
	超伝導シンクロトロン	e	570 MeV	300 mA(蓄積電流)		放射光
	マイクロトロン	e	150 MeV	3 mA		入射器
	常電導シンクロトロン	e	50 MeV	(軌道半径 15 cm)		放射光、FEL
	マイクロトロン	e	20 MeV	8 mA		入射器

日本における加速器一覧

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, ,HI	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
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
神戸商船大学						
	タンデムバンデグラフ	p, ,HI	1.7 MV	1 μA	1997	分析
	パルスビーム発生器	p,HI	0.4 MV	20 kA(60ns)	1980	大強度パルス
姫路工業大学						
高度研	電子蓄積リング	e	1.0 GeV	100 mA(蓄積電流)	1998	放射光
広島大学						
工学部	バンデグラフ	p, ,HI	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	200 mA(蓄積電流)	1999	放射光
原爆放射能医学研	コッククロフト	p,d,	3 MeV	1 mA	1992	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, ,HI	10 MV	1 μA(p)	1980	核物理
応用力学研究所	タンデトロン	p, ,HI	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

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, 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	He	400 kV	30 μ A(P)	1993	多目的
放射線医学総合研究所						
	シンクロトロン	³ He	800 MeV/u	2x10 ⁹ pps	1994	医学利用
	サイクロトロン	p, d, 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	e	300-800 MeV	300 mA (蓄積電流)	1981	放射光
	電子蓄積リング	e	150-600 MeV	200 mA (蓄積電流)	1989	放射光
	電子蓄積リング	e	250-500 MeV	250 mA (蓄積電流)	1990	自由電子レーザー

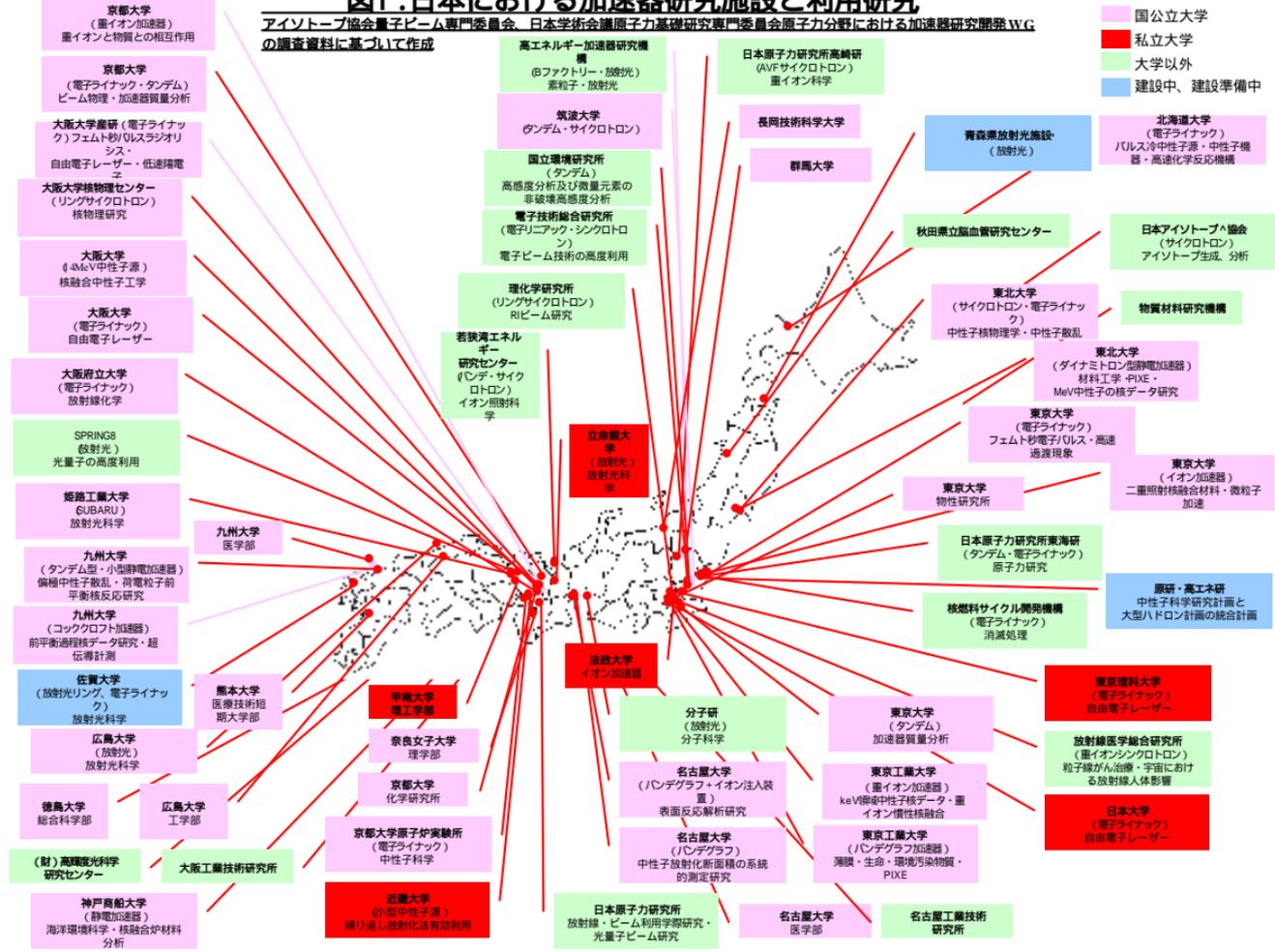
日本における加速器一覧

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	300 mA (蓄積電流)	1983	放射光
若狭湾エネルギー研究セ	シンクロトロン	p, e ⁻ , 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

図1.日本における加速器研究施設と利用研究

アイソトープ協会量子ビーム専門委員会、日本学術会議原子力基礎研究専門委員会量子力分野における加速器研究開発WG
 の調査資料に基づいて作成



- 国公立大学
- 私立大学
- 大学以外
- 建設中、建設準備中

原子力分野における加速器の研究開発ワークショップ
21世紀における加速器・ビーム科学の研究開発の在り方

主 催 京都大学原子炉実験所
日本学術会議（核科学総合研究連絡委員会原子力基礎研究専門委員会）
協 賛 日本原子力学会及び同加速器・ビーム科学部会
会 期 平成13年8月7日（火）13:00 ~ 8月8日（水）17:00
場 所 京都大学原子炉実験所 事務棟会議室

プログラム

平成13年8月7日（火）

13:00 ~ 13:05 : 開会の挨拶 的場 優（九大）
挨拶 井上 信（京大炉）
13:05 ~ 13:20 : 「ワーキンググループの趣旨について」 柴田徳思（KEK）
13:20 ~ 15:20 : 高エネ研（伴 秀一） 原研（横溝英明、小原祥裕） 理研（矢野安重）
放医研（曾我文宣） 産総研（豊川弘之）
15:40 ~ 17:40 : SPring8（宮原義一） 東大センター・施設（渡部貴宏、岩井岳夫）
阪大センター・施設（田川精一） 分子研（加藤政博） 京大原子炉（市原千博）
17:50 ~ 18:30 : パネル討論会
「21世紀における大型加速器プロジェクトの在り方」
懇親会

平成13年8月8日（水）

9:30 ~ 9:55 : 講演「ビーム利用の広がりとその経済効果」 田川精一（阪大）
9:55 ~ 12:00 : 東大（中沢正治） 日大（早川 建） 立命大（山田廣成） 神船大（北村 晃）
姫工大（安東愛之輔） 広島大（小方 厚） 若狭湾エネ研セ（大谷暢夫）
佐賀県SL施設（小川博司）
13:00 ~ 16:00 : 北大（住吉 孝） 東北大（石井慶造） 筑波大（栄 武二）
東工大（服部俊幸） 名古屋大（曾田一雄） 京大（今西信嗣、野田 章）
阪大（高橋亮人） 九大（石橋健二）
（話題提供各15~20分、討論まとめて最後に）
16:20 ~ 17:00 : パネル討論「加速器・ビーム科学分野の広がりと大学の役割」
17:00 閉会の挨拶 川瀬洋一（京大炉）