

[12B-04]

## ADVANCED STATUS AT LEBRA IN NIPHON UNIVERSITY

I.Sato, I.Kawakami, K.Sato, Y.Matsubara, K.Hayakawa, T.Tanaka, Y.Hayakawa, Y.Nakazawa<sup>A)</sup>,  
K.Yokoyama<sup>A)</sup>, K.Kanno<sup>A)</sup>, T.Sakai<sup>A)</sup>, K.Ishiwatari<sup>A)</sup>, H.Inokawa<sup>A)</sup>, Y.Nakamura<sup>A)</sup>, A.Yagishita<sup>B)</sup>,  
S.Yamamoto<sup>B)</sup>, Y.Azuma<sup>B)</sup>, H.Kato<sup>B)</sup>, K.Tsuchiya<sup>B)</sup>, S.Anami<sup>C)</sup>, S.Fukuda<sup>C)</sup>, H.Kobayashi<sup>C)</sup>, A.Enomoto<sup>C)</sup>,  
S.Ohosawa<sup>C)</sup>, T.Shidara<sup>C)</sup>, S.Yamaguchi<sup>C)</sup>, T.Suwada<sup>C)</sup>, T.Kamitami<sup>C)</sup>, S.Michizono<sup>C)</sup>, Y.Yamada<sup>D)</sup>

Laboratory for Electron Beam Research and Application (LEBRA) in Atomic Energy Research  
Institute of Nihon University

Narashinodai 7-24-1, Funabashi-chi, Chiba-ken, 274-8501 JAPAN

<sup>A)</sup> Graduate School of Science and Technology of Nihon University

Kanda Surugadai 1-8-14, Chiyoda-ku, Tokyo 101-8308 JAPAN

<sup>B)</sup> Institute of Materials Structure Science in High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-chi, Ibaraki-ken, 305-0801 JAPAN

<sup>C)</sup> Accelerator Laboratory in High Energy Accelerator Research Organization

1-1 Oho, Tsukuba-chi, Ibaraki-ken, 305-0801 JAPAN

<sup>D)</sup> Electrotechnical Laboratory in Agency of Industrial Science and Technology

1-1-4 Umezono, Tsukuba-chi, Ibaraki-ken, 305-8568 JAPAN

### Abstract

We had been troubled with a lot of accidents from the beginning operation of linac, and were damaged to insulation in an oil tank, back diodes of a pulse transformer and a rf window of a high power klystron. After the commission of accelerator, we had been also worried about such troubles as rf phase-shift within pulse duration, fire-trouble of thyratron and radiation damage for FEL system. Recently, the troubles have been extinguished by being settled them. The duty factor of klystron was greatly improved by a strengthening of exhaust power around its rf window. The operation of linac maintains stability. On the other hand, LEBRA proposed a new project i.e. researches and development for advanced application of the variable wavelength, high brightness, monochromatic light sources. It was authorized by the Ministry of Education and continues a five-year program from this fiscal year. The project is application researches that are based on radiation lights which are generated FEL and Parametric X-ray radiation make use of a 125 MeV electron linear accelerator. This paper discusses about advanced status and the new project on LEBRA.

## 日本大学電子線利用研究施設の現状

### 1. はじめに

日本大学電子線利用研究施設 (LEBRA)<sup>1)</sup>では、1994年度に電子線形加速器と自由電子レーザー発生装置の建設<sup>2,3)</sup>に着手、1998年3月に完成した。1998年1月、90 MeV 20 mAの電子ビーム加速<sup>4,5)</sup>に成功、同年2月、自発放射光を観測した。

建設途中、クライストロンのヒーター絶縁トランスが耐圧劣化し、パルストランスのオイルタンクで時々放電<sup>6)</sup>を起し、次第に印加電圧が低下して使用不能となった。1998年末、改良絶縁トランスと交換、その結果、放電は皆無となった。制御系やインターロック系も整備され、電子線形加速器は一人で運転可能<sup>7)</sup>となった。1998年10月、入射部集束系を強化し、その結果、電子ビーム強度は100 mAから220 mAに増強した。一方、モノクロメーター、ストリーク・カメラ、高感度 CCD カメラ等の導入によって計測系も徐々に整備され、自発放射光のスペクトルや電子ビームのパンチの計測も可能となった。又、電子ビームのエミッター特性はプロファイル・モニターを変え、計測精度を上げながら精力的に測定し、規格化エミッターが30 mm・mrad程度であることを突き止めた<sup>8)</sup>。又、自由電子レーザーが発振に至らない原因を詳細に検討し、その原因の1つに、アンジュレータ

ーの永久磁石が放射線損傷<sup>9,10)</sup>を受けていることを突き止めた。そこで、放射線損傷を受けにくい周期長が2倍の新しいアンジュレーターが検討され、永久磁石や光学系の設計製作<sup>11)</sup>に取りかかり、2000年3月には新しいアンジュレーターが導入された。2000年5月、赤外線レーザー発振に向けた基礎実験を開始した。その結果、レーザー共振波長近傍(1.5 m)の自発放射光基本波、2倍と3倍の高調波を観測し、高調波スペクトル<sup>12)</sup>は非常にシャープであることが確かめられた。

一方、兼ねてからの念願だったクライストロン性能向上(高周波電力×パルス持続時間×繰り返し=20 MW× $s \times 12.5$  Hz)も幾多の試練を経た後、真空システムの強化により当初の目標仕様値<sup>13)</sup>に到達することが出来た。残された課題は、ビームエネルギーとビーム電流の不安定性に絞られた。これらの問題は、立体回路接合部接触不良の修復、バックダイオード回路の部品交換、サイクロン・リザーバーの詳細調整<sup>14)</sup>、クライストロン前置増幅器の高周波位相補償<sup>15,16)</sup>等の作業により順次に改善され、安定性は大幅に向上した。最近では、約 $\mu$ s幅の電子ビームを自由電子レーザーシステムに入射可能となり、そのビームは約100%輸送が可能となった。又、加速器室と実験室の間の放

射線シールドが強化され、研究者が加速器運転中に実験室で計測可能となった。もう1つ朗報は、LEBRAが学術フロンティアの研究拠点に選定され、平成12年度から5年計画で新プロジェクトがスタートすることになったことである。

## 2. 運転状況

過去4年間(1996年度～1999年度)の通電時間、稼働日数、ビーム加速時間、ビーム加速日数を表1に示す。過去数年間の加速器通電時間の多くは、クライストロンの性能を向上させるためのコンデショニングに費やされた。しかし、1999年度は加速器通電は1257時間に留まったが、ビームの加速日数は45日、ビーム加速時間は248時間に増加した。又、1日のビーム加速時間の平均は5.5時間であった。残りの通電時間の大部分はクライストロンのコンデショニングに費やされた。一方、加速器不具合の修復、実験環境整備(放射線シールド強化)、アンジュレーター永久磁石交換等の作業のため、運転を中断する場合が多かった。

表1 電子線形加速器の稼働状況

年度	通電時間	通電日数	ビーム 加速時間	ビーム 加速日数
1996	71	8	0	0
1997	559	61	50	13
1998	1617	159	160	40
1999	1257	127	248	45

## 3. クライストロンの性能限界動作例

本研究施設では、三菱電機製クライストロン(PV-3030A1)をFEL用電子線形加速器の長パルス用クライストロン(20MW×20s×12.5Hz)として稼働させることに挑戦してきた。このクライストロンは元来短パルス用であり、メーカーでは最大出力電力:30MW、パルス持続時間:2.5s、繰り返し数:50Hzに制限している。

一方、本研究施設で使用するクライストロンの負荷電力は70MW×12.5Hz×30sであり、どのクライストロンもこの負荷テストはクリアしたが、目標とする高周波性能仕様(20MW×20s×12.5Hz)はクリア出来なかった。モジュール1・2号機でテストした各クライストロンの破損時までの最大性能を表2に示す。何れのクライストロンも12MW×20s×12.5Hzの性能は満たしていた。しかし、その後、高周波電力テストでは窓破損に至るまで個体差があった。

## 4. クライストロンの性能向上

クライストロンの高周波電力は、最初、ダミー負荷(水負荷)を使って測定された。その後、加速管負荷に切り替えられた。クライストロンの超性能仕様を満す条件の見極めには多くの困難が伴った。テスト途中で、パルス・トランスやヒーター絶縁トランスが油中で放電するアクシデントなトラブルにより、クライストロンにも二次的故障が波及し、クライストロン窓も断続的に破損した。この破損により、高周波窓の性能限界が次第に明らかになった。PV-3030A2型クライストロンでは表2に示すように、繰り返し2Hzでは、20sのパルス幅で26MWの高周波電力が得られるようになったが、しかし、高周

波窓は何れの場合も短時間で破損した。

このテストを通じて奇妙な現象に気がついた。本研究施設の電子線形加速器では、図1に示すように、クライストロンと加速管の間の立体回路にはクライストロンの高周波窓以外にもう1個の高周波窓(セラミック窓)が設置してある。この2つの窓に対する高周波電力の通過条件はほぼ等価である。しかし、これまでのテスト実験では多数のクライストロン窓が破損したが、このセラミック窓は何時も健在であった。この差はどこから生ずるかを追究した。その結果、高周波窓の真空環境の差ではないかとの結論に達した。そこで、クライストロンの高周波窓近傍にイオンポンプ2台を取り付けて、窓周辺の排気能力を上げた。この効果は絶大で、パルス持続時間が20sを保持し、デューティ・サイクルも12.5Hzと大幅に改善<sup>13)</sup>された。クライストロン(番号:90507)の高周波窓破損は、パルス電源のPFNを調整中に発生したものであり、又、図1に示す接合不良の導波管からの反射波も関連し、最終的な性能は不明である。

表2 クライストロンの性能限界

品名	番号	性能限界
**PV3030A1	90507	20MW 20μs 12.5Hz
*PV3030A2	91506	19MW 13μs 2Hz
*PV3030A1	87514	24MW 20μs 2Hz
*PV3030A1	88516	21MW 8μs 2Hz
*PV3030A2	92505	21MW 12.5μs 2Hz
*PV3030A2	92502	26MW 20μs 2Hz
*PV3030A2	92503	26MW 20μs 2Hz

\*PV:破損したクライストロン \*\*真空強化後破損

## 5. アンジュレーターの放射線損傷

平成10年1月、電子線加速、同年2月にはアンジュレーター放射光を観測、同年3月に自由電子レーザー発生システムは完成した。更に、光学計測系を整備し、平成10年7月にレーザー発振波長の488nmを中心に、アンジュレーター放射光スペクトルを測定<sup>9)</sup>したが、所定の特性が得られなかった。その原因追究のため、電子線特性を色々な角度から調べた結果、自由電子レーザー発振に必要な電子ビームの特性は満たされていることが判明した。一方、自発放射光のスペクトルは測定の度に広がっていった。アンジュレーター劣化を疑い磁場分布を測定した<sup>10)</sup>。永久磁石は、図1に示すような放射線損傷を受け、磁束密度が著しく低下していた。特に運転当初は、アンジュレーターのビーム輸送路に於けるビーム損失が多かった。これは、コミッショニングを開始した当時は、ビームハンドリングに不慣れであったことと、アンジュレーターに設置されているビームダクト(内径:7mm、長さ:2.5m)が細長いパイプでビーム調整が難しかったことが、その原因と考えられる。又、加速時にビームが非常に不安定であったことも原因の1つである。

## 6. 新アンジュレーター

LEBRAでは、アンジュレーターの永久磁石が放射線損傷を受け使用出来なくなったことを重視し、アンジュレーターを短波長用と長波長用の2種類を用意することにした。短波長用は放射線損傷を受けた永久磁石

を再着磁して再生して使用することを試み、長波長用には周期長が 2 倍のアンジュレーター永久磁石を新たに設計製造することにした。短波長と長波長のアンジュレーター仕様を表 3 に示す。短波長用は損傷永久磁石の再生作業を準備している段階であり、長波長用は 2000 年 3 月に完成した。一方、加速器室と実験室の間の放射線シールドが強化されたことに伴って、実験室で自由電子レーザー計測が可能となった。現在、長波長用自由電子レーザーの基礎実験では、これまでにない高輝度の自発放射光が観測され、2 倍と 3 倍高調波のシャープなスペクトル分布が測定されている。

また、最近では運転技術が向上し、又、加速器の性能が格段に向上したので、自由電子レーザーシステムに於ける電子ビーム損失はほとんどない。

表 3 アンジュレーターパラメーター

パラメーター	アンジュレーター-1	アンジュレーター-2
型式	ハルバック	ハルバック
全長 m	2.4	2.4
周期長 mm	24	48
最大磁束密度 G	1.28	1.28
K 値	0.65~ 1.1	0.65~ 1.1
周期数	100	50
最小磁極間隔 mm	13~ 25	28~ 40
ビームダクト径 mm	7	25
レーザー波長 $\mu\text{m}$	0.35~ 1.5	0.8 ~ 5
平均出力 W	0.3~2	1~ 6

## 7. 電子線形加速器の改良

本研究施設の電子線形加速器は電子銃、プレバンチャー、バンチャー、0.3m 加速管、4m 加速管 3 本で構成されている。当初の計画では rf 電子銃を使って短波長自由電子レーザーシステムを完成させる予定であったが、rf 電子銃は開発要素が多く、リスクも大きいので、途中から直流電子銃を使用することになった。従って、rf 電子銃の部分が電子銃、プレバンチャー、バンチャーに置換わった経緯があり、この加速器構成には、0.3m 加速管でビーム損失が発生するとエネルギーが変わり、長パルスの安定したビームを必要とする加速器では致命的な欠点となる。そこで、エネルギー調整を容易にするために、0.3m 加速管を末端部に配置することを考慮して、図 1 に示すように、電子銃、プレバンチャー、バンチャー、4m 加速管 3 本、0.3m 加速管の構成になる。又、カソード面積の小さい電子銃によるエミッタンスの性能向上<sup>17)</sup>を試み、最適パラメーターをサーチしている。加速器の改造や新しい電子銃のテスト実験を今年中に行う予定である。

## 8. 利用研究の高度化計画

電子線利用研究施設では、KEK、電総研、東北大学、日本大学の理工、文理、医、歯、松戸歯、生物資源科学部等の協力の下に、FEL とパラメトリック X 線を基本とした光源開発とその光の高度利用研究を推進してきた。可変波長高輝度単色光源の高度利用研究を研究課題として平成 11 年度の学術フロンティアに応募し、このプロジェクト計画の研究拠点に電子線利用研究施設が選定され、平成 12 年度からこの推進事業が 5 年間継続されることになった。この計画では、図 2 に示すように、加速器室にはパラメトリック X 線源<sup>18)</sup>、既設実験室には赤外線から紫外線までのビームライン

と X 線ビームラインが建設される。X 線ビームラインには、X 線回折装置と生体高分子高次解析装置が設置される。

図 3 に示すように、半導体プロセス、新素材開発、光励起極限プロセス、化学触媒光反応、光電子分光、生命科学、医学、医用 1、医用 2 等の 9 つの実験テーマを取り上げ、9 実験室が用意される。そのための実験棟 (約 1300m<sup>2</sup>) は 2 階建となる。又、それぞれの実験室には自由電子レーザービームラインが設定される。

## 9. おわりに

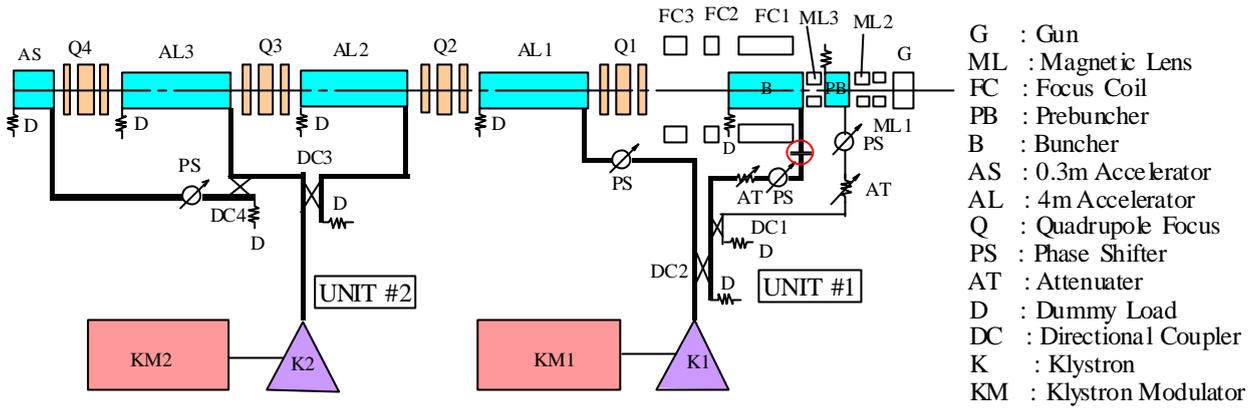
LEBRA の電子線形加速器は、4 年間にわたった、冷却系の腐食防止、パルストランス、クライストロンのヒーター絶縁トランスの改良、バックダイオード回路の改良、安定化電源の導入、集束系の強化、加速管配置不具合の修正、クライストロン高周波窓周辺の真空システムの強化、導波管接合不良の改修、高周波増幅器の位相補償、サイラトロン微調整等の改善の積み重ね作業によって、加速ビームも安定になりその性能が大幅に向上した。この間、短パルス用クライストロンを長パルス用として使用するので、その性能限界を見極める非常に難しい作業があったが、この作業もクリアできた。最近、モノクロメーター、ストリーク・カメラ、高感度 CCD カメラ、高速受光素子等が導入され、自発放射光のスペクトルや電子ビームのバンチ状態をリアルタイムで計測することが可能となった。一方、自由電子レーザーの基礎実験では、アンジュレーター永久磁石が放射線損傷を受け、発振を断念せざるを得なかった。長波長用アンジュレーターを新たに製作し対応した。自由電子レーザーの発振環境は徐々に整いつつある。

学術フロンティア推進事業では、平成 12 年度に実験棟が増築され、パラメトリック X 線源とレーザービームラインの建設に着手、平成 13 年度から共同利用実験が開始される。

## 参考文献

- 1) I.Sato, et al., Proc. of 22nd Linear Accel. Meeting in Japan, 104(1997).
- 2) K.Hayakawa, et al., Nucl.Instr.and Meth. A375 (1996) ABS25.
- 3) T.Tanaka, et al., Nucl.Instr.and Meth. A407 (1998)II-103.
- 4) T.Tanaka,etal.,KEKProceedings98-10Nov.1998A722.
- 5) T.Tanaka, et al., Proc. of 23rd Linear Accel. Meeting in Japan,25(1998).
- 6) I.Sato, et al.,Proc.of23rdLinearAccel.MeetinginJapan, 22(1998).
- 7) K.Hayakawa,etal.,Proc. of 23rd Linear Accel.Meeting in Japan,167(1998).
- 8) K.Yokoyama, et al., The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech.,Riken,Japan(1999)473-475.
- 9) H.Nakazawa, et al., The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech.,Riken,Japan(1999)394-396.
- 10) I.Sato, et al., The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech., Riken,Japan(1999)37-39.
- 11) K.Hayakawa,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 12) Y.Hayakawa,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 13) T.Sakai,et al.,Proc.ofthisMeeting.
- 14) K.Ishiwata,et al.,Proc.ofthisMeeting.
- 15) K.Yokoyama,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 16) T.Tanaka,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 17) K.Kanno,etal.,Proc.ofthisMeeting.
- 18) Y.Hayakawa, et al.,The 12 th Sym. on Accel. Sci. and Tech.,Riken,Japan(1999)391-394.

# 125MeV ELECTRON LINAC



○ 導波管の接触不良部

図1 日本大学の125MeV電子線形加速器の全体図

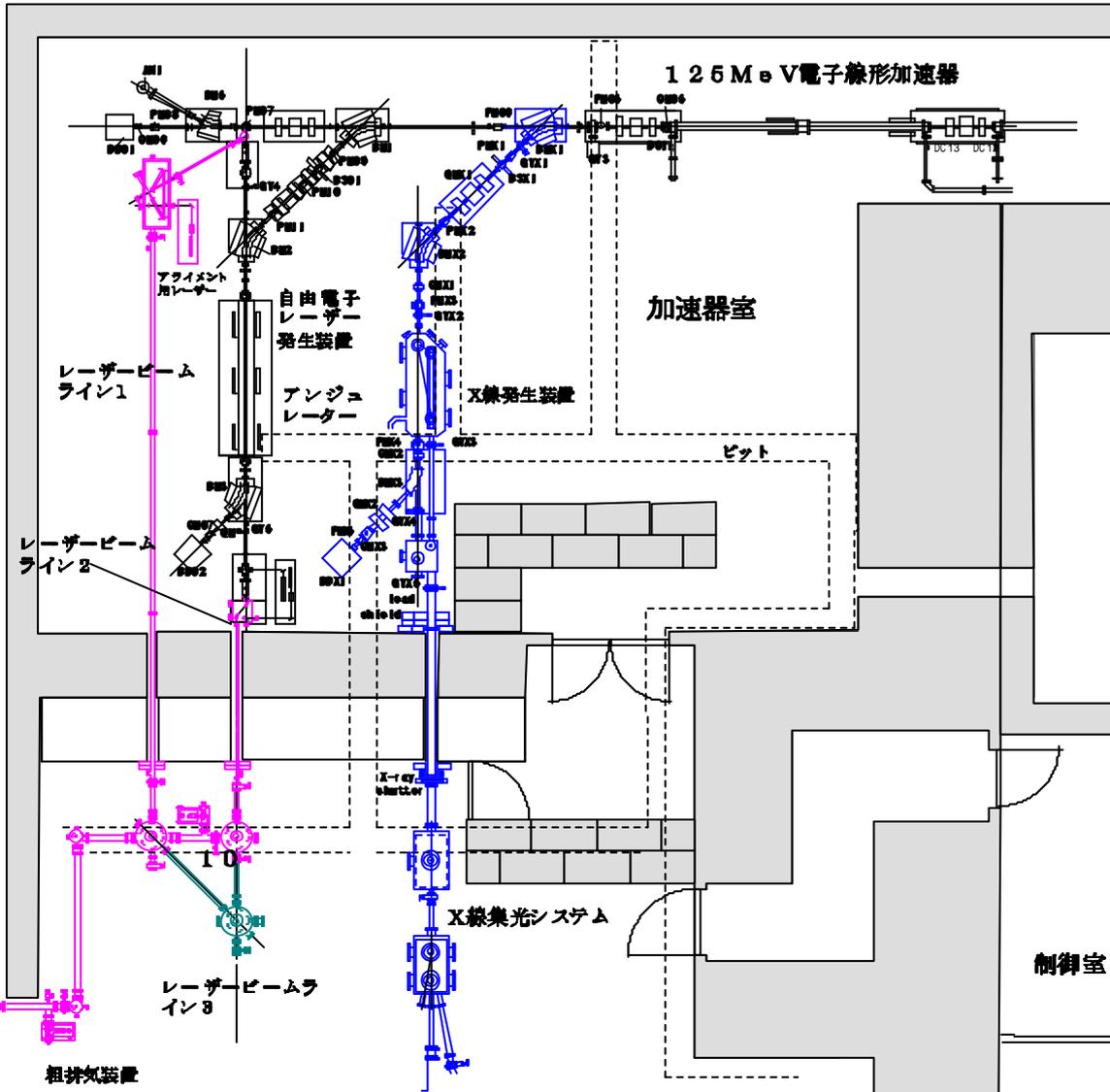


図2 パラメトリックX線源と自由電子レーザー・ビームライン

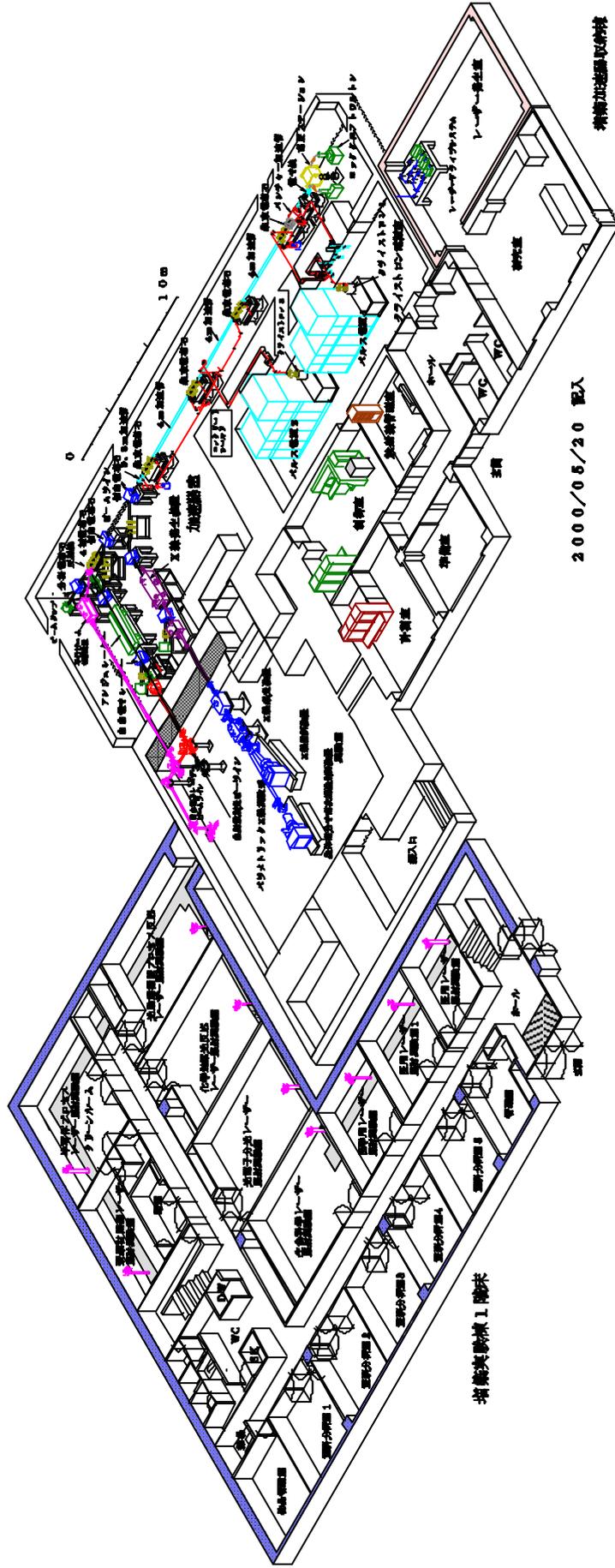


図 3 電子線利用研究施設実験棟の鳥瞰図