

日本大学電子線利用研究施設と研究計画

佐藤 勇、早川 建、田中俊成、早川恭史、桑田隆生、山本 寛¹、大西一功¹、高橋芳浩¹、滝沢武男²、高橋博樹²、中西剛司²、望月章介²、石田 浩²、浅地哲夫²、中西太字人²、中田仁志²、奥山克彦³、鈴木 敢³、沼田 靖³、石川紘一⁴、岡田清己⁴、田中良明⁴、浅井 聡⁴、宍倉文夫⁴、茂呂 周⁵、西山 実⁵、佐藤吉則⁵、菊池久二⁵、清水典佳⁵、安孫子宜光⁶、寒河江登志朗⁶、池見宅司⁶、早川 徹⁶、平塚浩一⁶、五関たけみ⁶、多田充裕⁶、奥 忠武⁷、浜口宏夫⁸、佐藤 伸⁸、末元 徹⁹、瀬戸 誠¹⁰、後藤寿夫¹¹、中井 泉¹²、笥 光夫¹³、松下裕亮¹⁴、LeGeros,R.Z¹⁵、松下 正¹⁶、若槻壮市¹⁶、山本 樹¹⁶、土屋公央¹⁶、榎本収志¹⁷、穴見昌三¹⁷、福田茂樹¹⁷、小林 仁¹⁷、大沢 哲¹⁷、設楽哲夫¹⁷、諏訪田剛¹⁷、紙谷琢哉¹⁷、道園真一郎¹⁷、山田家和勝¹⁸

日大原研、¹理工、²文理、³工、⁴医、⁵歯、⁶松戸歯、⁷生物資源科学、⁸東大理、⁹東大物性研、¹⁰京大原子炉、¹¹広大総合科学、¹²東京理科大、¹³明海大歯、¹⁴東海大開発工、¹⁵New York 大歯、¹⁶KEK物質構造科学研、¹⁷KEK加速器研究施設、¹⁸産総研

電子線利用研究施設の現状

本研究施設では、2000年度の学術フロンティア推進事業として、新実験棟の増築の以外に、小エミッタ電子銃の開発、入射部の改良、エネルギー調整システムの改良、並びに、指向性の強い波長可変単色X線源の開発、自由電子レーザーのビームライン建設、レーザー励起高周波電子銃の開発、X線ビームラインと小角X線回折散乱実験装置、並びに、蛋白質構造解析装置の導入などを積極的に行った。

また、学術フロンティア推進事業として、自由電子レーザー(5~0.3μm)、自発放射光(0.24~29eV)、パラメトリックX線(3~30keV)の3光源が用意される。特に、X線光源は高性能な自由電子レーザー用125MeV電子線形加速器の特色を生かした指向性の強い波長可変単色X源として、その活用が期待される。

(1) 新実験棟(約1300m²)が竣工し、レーザー照射実験室(9室)に0.35μm~5μm波長領域のレーザービームラインが敷設された。赤外線自由電子レーザー用アンジュレーターが完成し、1.5μm赤外自由電子レーザー発振に成功した。0.8μm~5μm波長領域の自由電子レーザーの実用化テストは、施設検査に合格後によくしする。加速器室から各実験室までレーザーを効率よく輸送する光学システムは、回転楕円面鏡と放物面を組み合わせた光学システムを製造中であり、2001年度中に自由電子レーザーの実用化テストが終了後に設置される。



図1 玄関から眺めた新実験棟の外観

(2) 短パルス用クライストロン(2.5μs)の長パルス化運転(20μs)に成功し、高周波位相も安定させることが出来た。最近、加速器の出力ビーム電流は自由電子レーザーシステムを100%通過するようになった。共同利用実験が実施できるように、制御システムの整備を行い、加速器の安定化を目指した改善作業を進めている。加速器の不安定が、室温の変化、商用入力電圧の変動と複雑に重なり、原因の特定に大変苦慮している。

(3) 施設検査

加速器運転中でも、実験室で準備作業が出来るように放射線管理区域の変更手続きを行い、施設検査を受ける準備を行った。特に、加速器室と実験室の間にある通路をコンクリートブロックで迷路を作り放射線遮蔽を行っているが、迷路が浅いために、その効果が不十分であり、迷路を深くして放射線シールドを強化した。

(4) パラメトリックX線

パラメトリックX線源がほぼ完成し、実用化に向けて基礎実験を開始したが、施設検査を受ける準備のために実用化実験は一時中断している。一方、この間を利用して、パラメトリックX線ビームの敷設工事を行い、実験室にX線ビームラインと微小部X線回折実験装置、並びに、蛋白質構造解析装置を設置した。

これは2つ実験装置を、X線のビームライン上に遠隔操作で入れ替えられるようになっている。

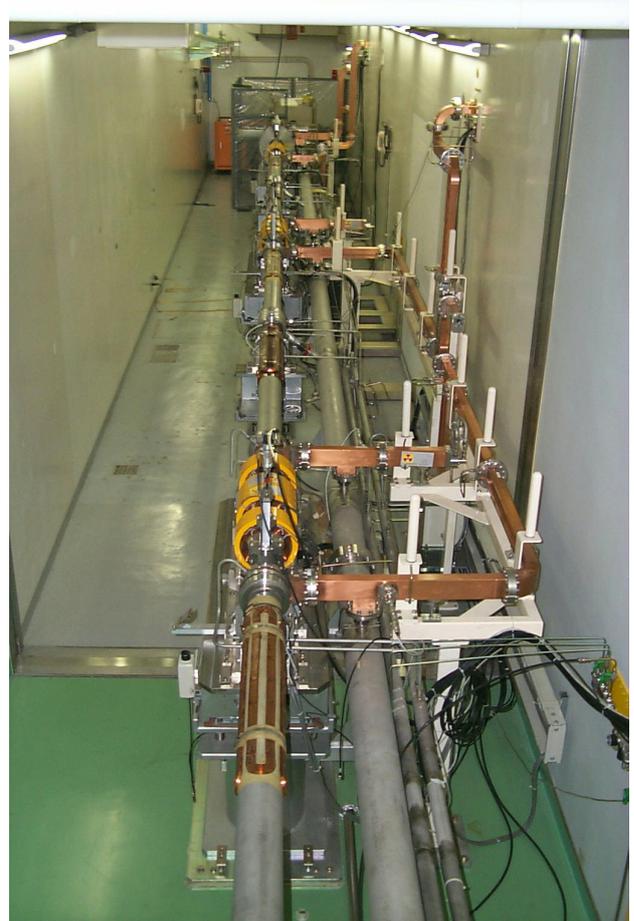


図2 下流から眺めた125MeV電子線形加速器の本体



図3 完成したパラメトリックX線発生装置(左側)と赤外線用自由電子レーザー発生装置(右側)の写真

Table1~Table5 に日本大学電子線利用研究施設の設計仕様を示す。

Table1 Electron linac

Beam energy	125 MeV
Beam intensity	200 mA
Beam pulse duration	25 μ s
Peak current	20 A
Beam bunch width	3.5~10 ps
Beam energy spread	< 0.5 %
Repetition rate	12.5 pps
Maximum beam power	6.25 kW
Frequency	2856 MHz
Accelerator structure	4 m \times 3
DC gun	- 100 kV
Klystron power	30 MW \times 2

Table 2 FEL from near infrared to ultraviolet

Undulator structure	Halbach
Total length of undulator	2,400 mm
Gap space of magnet pole	13~25 mm
Periodicity	24 mm
Periodic numbers	100
Ordinary K-value	0.65~1.1
Length of optical cavity	6,718 mm
Mirror	multi-coated
Photon wave length	0.3~1.5 μ m
Average power	0.3~3 W

Table 3 FEL from infrared to near infrared

Undulator structure	Halbach
Total length of undulator	2,400 mm
Gap space of magnet pole	28~40 mm
Periodicity	48 mm
Periodic numbers	50
Ordinary K-value	0.65 ~ 1.1
Length of optical cavity	6,718 mm
Mirror	multi-coated or metal
Photon wave length	0.8~5 μ m
Average power	1~5 W

Table 4 Spontaneous Emission by the Undulator

Wave length of radiation	0.043~5 μ s
Photon energy	0.24~29 eV
Energy spread	1 %
Average photon flux	2.5 \times 10 ¹¹ photon/s

Table 5 Parametric X-ray

Energy of X-ray	3~30 keV
Energy spread	1 %
Average flux	1.2 \times 10 ⁹ photon/s
Directional angle	~4 mrad

自由電子レーザーは、自由に動き回れる電子ビームが図4に示すような経過を経てレーザーに成長する。即ち、光速度に近い電子ビームが磁石を交互に並べた間を通過すると蛇行運動して進行方向に特定な波長の強い光を放出する。その波長は光速度と電子速度の差が小さいほど短くなる(ドップラー効果)。この装置の両外側に2枚の鏡を置いて、この装置を次々に通過していく電子ビームが放射する光を蓄積すると、図5に示すよ

うに、時間経過と共に蓄積光は次第に強くなっていく。一方、後続の電子ビームも蛇行運動すると光を放出するが、次々に追い越していく蓄積光の強烈な電磁場の影響を受けて、電子ビーム自身に光の波長間隔の濃淡(粗密)ができる。蓄積光は電子ビームの濃淡を追い越す度に、電子ビームからエネルギーを受け取り、図 6 に示すように、その電磁場の振幅は指数関数的に増大して発振状態に成長する。

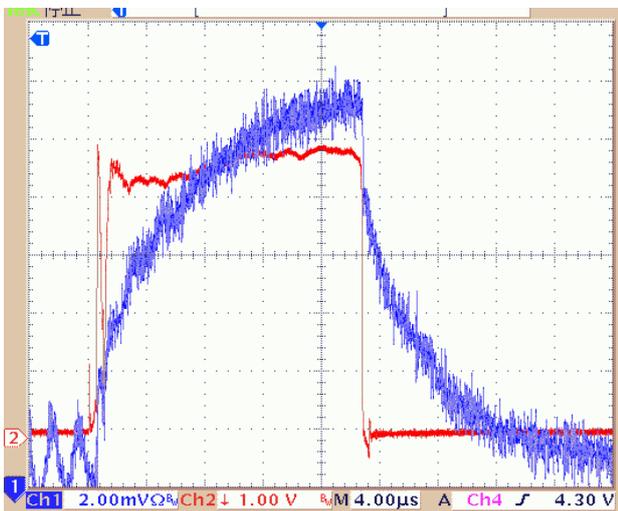
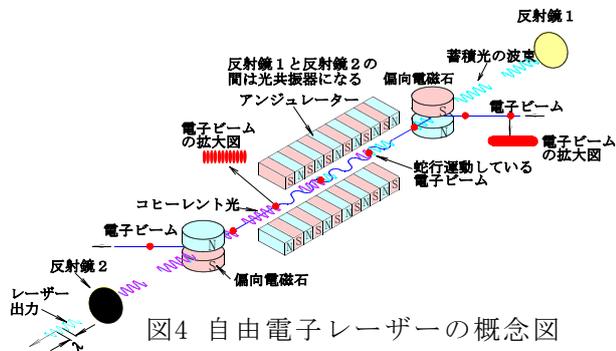


図 5 蓄積光の強度 (青 V:2mV/div) ビーム電流波形(赤 V:20mA/div,H:4μs/div)

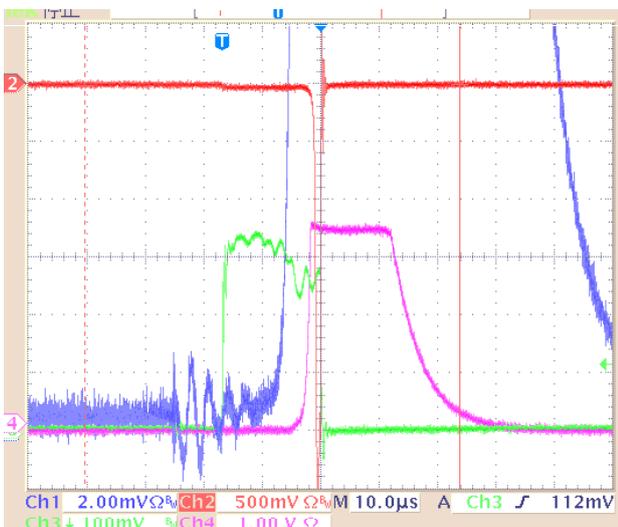


図 6 レーザーの強度(青 V:2mV/div,桃 V:1V/div) 可視光の強度(赤 V:500mV/div) ビーム電流波形(緑 V:20mA/div,H:10μs/div)

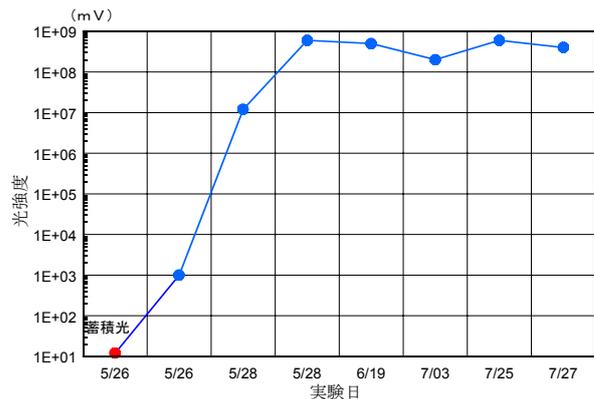


図 7 自由電子レーザー発振後のレーザー強度の推移

レーザーに成長させるには電子ビームをレーザーの波長程度の空間的な広がり制限する必要がある。従って、自由電子レーザーに必要な電子ビームは良質で且つ安定でなければならない。良質の安定な電子ビームを得るために、約 5 年間の歳月を費やし、普通の電子線形加速器の高性能化を進め、平成 13 年 5 月に、遂に 1.5μm の波長の自由電子レーザーを発振させることに成功した。現在のレーザー出力強度は、図 7 に示すような経過を経て、図 6 に示す蓄積光強度の約 1 億倍になっているが、まだ飽和に到達していない。レーザー発振に伴って、予想外の新しい現象として、可視光の閃光(図 6 の赤線)が観測されており、そのメカニズムを解析中である。

パラメトリックX線は図 8 に示すように、単結晶を高エネルギーの電子線で摂動することにより、単結晶が励起状態から緩和されるときにさX線が発生する。そのX線のエネルギーは結晶構造と周期構造に依存し、結晶を回転することによって変えることができる。

Parametric X-ray Radiation (PXR) の概念図

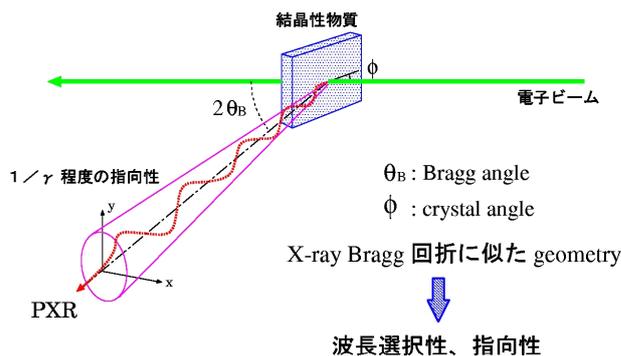


図 8 パラメトリック X 線発生概念図

研究計画

本研究施設では、電子線形加速器の特色を生かし、小型で使い易い赤外線からX線までの波長領域を対象とする可変波長で高輝度単色光源の実用化を進めてきた。この光源が実用化される近い将来には、物質、生命、資源、環境に関わり理、工、医、農学の研究領域を横断する学際的な基礎研究を飛躍的に発展させると推定している。例えば、自由電子レーザーとその高調波を使って、ピコ秒のマルチプローブシステムを確立する

と、極限状態の光反応、高速化学反応過程、巨大分子の部分的な挙動とその反応過程をストロボスコピックに解析する実験が可能になる。本研究施設の大実験室では、光源の特色を活かした利用研究として、レーザーで分子を励起し、その高調波を使って同時に分析するリアルタイム解析システムを計画している。多くのユーザーからは、本研究施設が、このような研究計画に対応できる大学共通研究施設を構築し、その役割が果たせる研究拠点と研究支援体制を早く整備するよう要望されている。

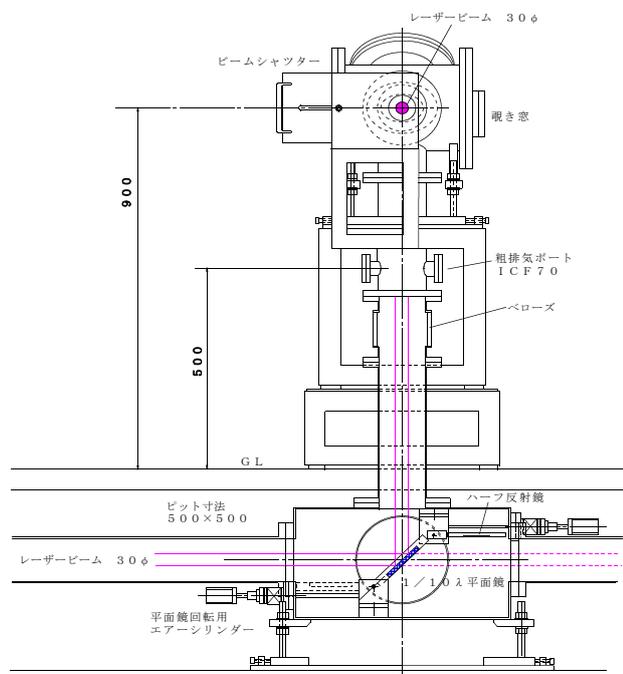


図9 レーザー引き出し装置

本施設の実験棟が増築され、日本大学と国内外の多数の大学や研究機関の研究者と共同研究ができる環境が整いつつある。

例えば、新実験棟の1階には、図12に示すように、レーザー照射実験室(9室)、資料分析室(5室)、資料管理室、事務室があり、レーザー照射実験室は、光励起極限プロセス、化学触媒光反応、光電子分光、半導体プロセス(クリーン室:クラス1000)、新素材開発(クリーン室:クラス10000)、生命科学、医学用、医用1、医用2として使用される。

レーザービームラインはそれぞれの実験室のピットに敷設され、各実験室では2枚の鏡を使って、レーザービームラインから50%、100%のレーザー強度を取り出すことが可能である。

また、資料分析室には粉末X線回折装置、蛋白質構造X線解析装置、資料分析装置、小角X線回折装置等が設置されて、パラメトリックX線を使う本実験の前の予備実験ができるようになっている。新実験棟の2階は、実験準備室(6室)、研究室(7室)、会議室、資料室があり、自由電子レーザーの本実験に備えて前準備に利用される。

小角X線回折や蛋白質構造X線解析の計測には大立体角のイメージングプレートが用意されている。

自由電子レーザーの利用実験としては通常のレーザーでは実現できない領域が研究対象であり、波長依存性と光反応の極限状態産生による新素材の開発や、環境汚染物質の極限光反応による終末の検証が当面の課題である

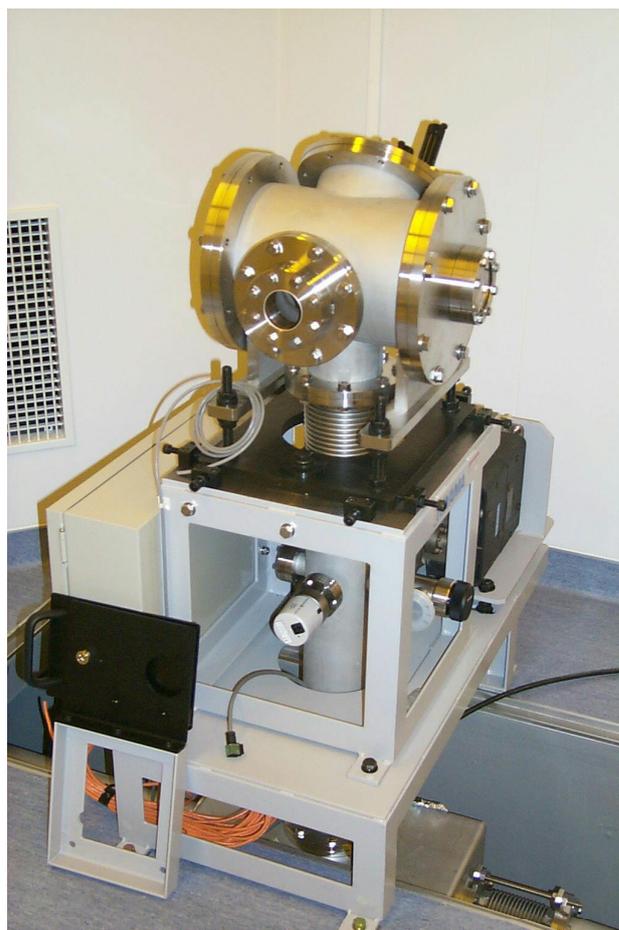


図10 半導体プロセス実験室(クリーンルーム)に設置されたレーザー引き出し装置



図11 医用2のレーザー照射実験室に設置されているフレキシブルアーム

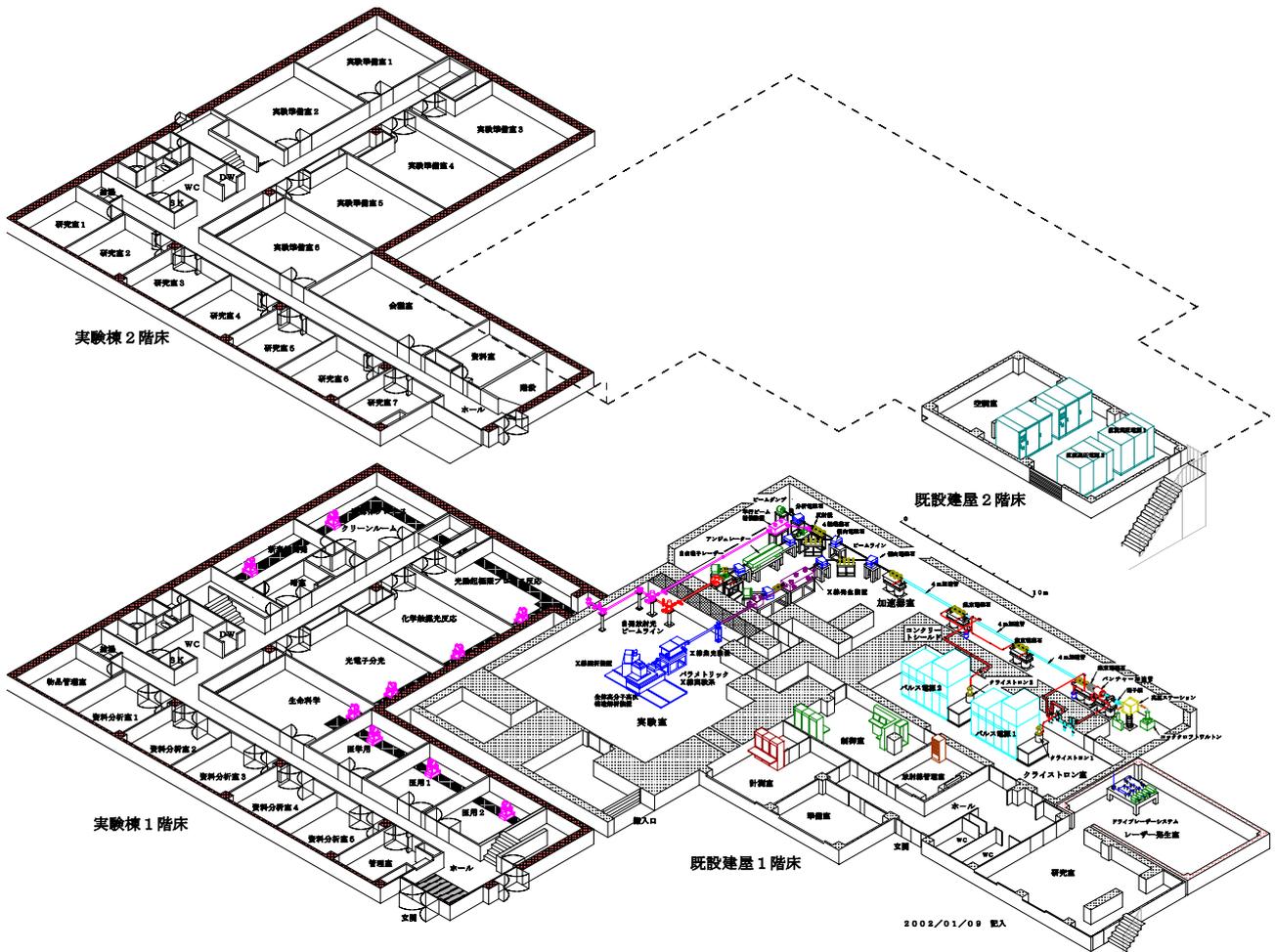


図12 日本大学電子線利用研究施設の鳥瞰図（新実験棟1階と既設実験棟）
 レーザー照射実験室(9室)；半導体プロセス、新素材、光励起プロセス、化学触媒光反応、光電子分光、生命科学、
 医学用、医療用1、医療2
 資料分析室(5室)；微小部X線回折、化学処理、コールドルーム、蛋白質X線構造解析、粉末結晶X線回折
 加速器室；125MeV電子線形加速器、自由電子レーザー発生装置、パラメトリックX線発生装置、
 大電カクライストロンパルス電源(2台)、制御システム
 大実験室；移動式X線回折構造解析装置



図13 実験室に据え付けられたX線回折装置
 手前：微小部X線回折装置、右手奥：蛋白質構造回折装置（後方から眺めた写真）

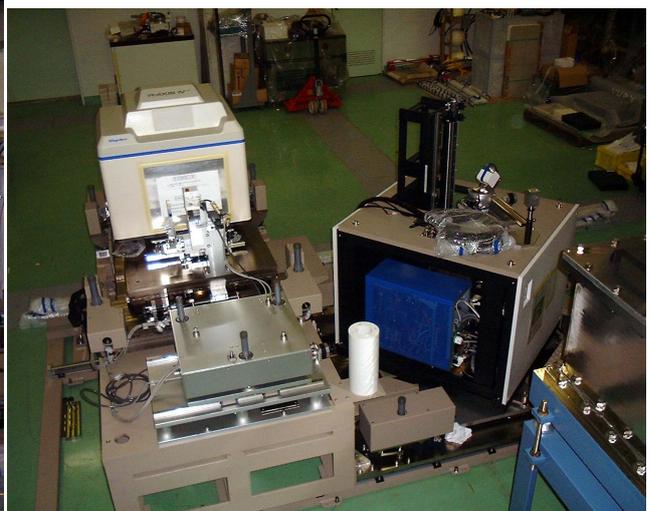


図14 実験室に据え付けられたX線回折装置
 右手：微小部X線回折装置、左手：蛋白質構造回折装置（前方から眺めた写真）



図15 予備実験用のタンパク質構造X線解析装置(資料分析室4)



図16 予備実験用の小角X線回折装置(資料分析室1)

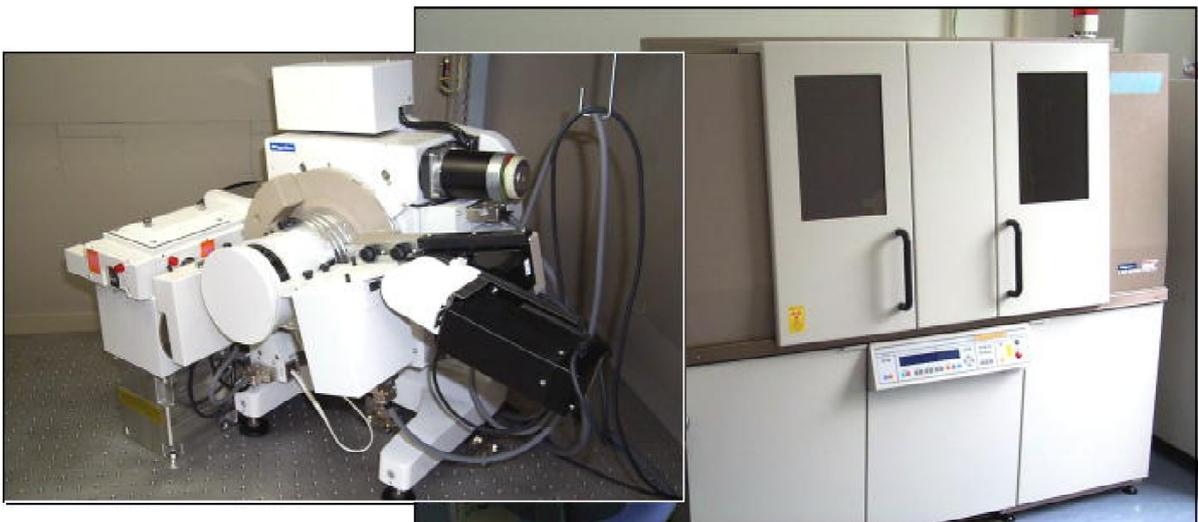


図17 予備実験用の粉末・薄膜X線回折装置(資料分析室5)