

LEBRA施設報告

No. 1

2001年8月

日本大学電子線利用研究施設

はじめに

電子線利用研究施設は平成 12 年度の「私立大学学術研究高度化推進事業」である「学術フロンティア推進事業」の研究拠点に選定され、研究プロジェクト「可変波長高輝度単色光源の高度利用に関する研究」(研究組織代表者：小嶋勝衛(原子力研究所所長))が平成 12 年度から平成 16 年度にかけて実施されることになった。

本推進事業の研究施設として、平成 12 年度に既設研究施設に隣接した 2 階建実験棟(1304m²)が増築された。又、大型の研究装置として X 線回折装置(含む微小部回折装置)、生体高分子高次構造解析装置、レーザービームライン、パラメトリック X 線発生装置が導入され、更に、研究設備としてマイクロ波電子銃、ドライブレーザー、イメージ・インテンシファイアー、TOF 質量分析装置、ZEKE-PFI 測定装置、マイクロアレイ解析システム等が整備された。

本報告書は上記の研究プロジェクトによる平成 12 年度の研究計画の進捗状況を取りまとめたものである。

平成 12 年度は、学術フロンティア推進事業に伴って、加速器の高度化、自由電子レーザー(FEL)の基礎実験、パラメトリック X 線(PXR)の開発研究、特定領域研究 B の促進、国際シンポジウム、ユーザーミーティング等の作業が実施された。

短波長自由電子レーザーは、「リニアコライダーや粒子衝突リング」と同様に「究極の高周波加速器」と言われ、膨大な建設費と高度な総合技術を必要し、ロケット打ち上げと同様に、その成功はその国の総合的な科学技術レベルの高さを示す指標になっている。又、先進国では、これまでに「自由電子レーザー」を国家プロジェクトとして推進しその成功を競ってきた。

平成 12 年度の学術フロンティア推進事業の研究費は、本推進事業の基盤である加速器の高度化に投入され、自由電子レーザー基礎実験を大きく躍進させた。その結果、平成 13 年 5 月 26 日(土) 21 時 15 分、1.5 μ m の赤外線自由電子レーザーの発振に成功した。しかも、「サブハーモニック・バンチャー」や「高周波電子銃」など特殊装置を使わないで、比較的短波長で自由電子レーザーを発振させたことは、これまでの世界の常識を破るもので、関連研究者に大きなインパクトを与えた。

この成功は長年の間、電子線利用研究施設が日本大学本部や関連学部並びに多くの研究機関の支援を得て、加速器高度化の開発研究を積極的に進めてきた努力の積み重ねによるものである。

数年間にわたる加速器高度化の研究成果には、次のようなことが上げられる。

- 1) 大電力パルストランスの小型化
- 2) 短パルス大電力クライストロンの長パルス化
- 3) パルス電子銃の低エミッタンス化

- 4) エミッタンスの評価方法の開発
- 5) 半導体高周波増幅器の高周波位相シフト対策
- 6) ビーム加速エネルギーの安定化
- 7) 短パルスクライストロンの高出力と長パルス化

特に、開発研究の多くは高エネルギー加速器研究機構との共同研究の成果でもある。

平成 13 年 6 月

学術フロンティア推進事業

「可変波長高輝度単色高原の高度利用に関する研究」

研究分担代表責任者 佐藤 勇

[研究プロジェクト事務局]

〒274-8501

千葉県船橋市習志野台 7-24-1

日本大学理工学部船橋校舎物理実験 B 棟

電話 : 047-469-5489

FAX : 047-469-5490

e-mail : office@lebra.nihon-u.ac.jp

URL : <http://www.lebra.nihon-u.ac.jp>

目次

1. 研究プロジェクトの概要	
● 本研究プロジェクトの背景と目的	1
● 沿革	2
● 研究組織と研究実施状況	4
● 研究年次計画	6
● ワークショップ、研究会等の開催状況	8
2. 研究設備	11
3. 自由電子レーザーと加速器	
● 自由電子レーザーの歴史	16
● 自由電子レーザーとは	17
● コヒーレントとは	22
● 電子線と光の相互作用	23
● 電子加速器	24
● 自由電子レーザーが要求する電子ビームの性質	29
4. 作業グループからの報告	
● レーザービームライン	32
● フォトカソードマイクロ波電子銃の開発	41
● パラメトリック X 線放射による可変長単色 X 線源の開発	43
● 自由電子レーザーの炎症メディエーター産生への影響	45
● 自由電子レーザーの歯根膜細胞の発痛、骨吸収因子産生への影響	45
● レーザーの波長の違いが歯の硬組織に及ぼす影響	49
● MIS 構造素子の放射線照射効果に関する研究	51
● 金属タンパク質の NO 捕捉能に関する研究	53
● 自由電子レーザー回転コヒーレンス分光法を用いた van der Waals 錯体の構造決定	56
● 高輝度 X 線源を利用した生体物質・インプラント界面の構造と組成研究と応用	59
● 歯科用合金の金属疲労に関する研究	61
● パラメトリック X 線放射を利用した高分子物質の構造解析	63
● 自由電子レーザーの組織再生効果に関する研究	67
● パラメトリック X 線を用いた高圧化における XANES 研究	69
● 自由電子を用いた歯質切削条件に関する検討	72
● クラスターの光誘起構造層転移	74
● 光誘起化学反応の解明と新光機能材料の探索への応用	74
● 自由電子レーザーによるスーパー・ダイヤモンドの合成	77

1. 研究プロジェクトの概要

本研究プロジェクトの背景と目的

日本大学原子力研究所は、昭和32年に設立され、核融合研究を中心とする研究所として出発した。昭和50年からは文理学部、理工学部、医学部、歯学部、松戸歯学部、生物資源科学部などを関連学部とする理系の学際的研究所としての役割を担っている。特に、平成4年からは「電子線利用研究施設」を建設、高エネルギー加速器研究機構など5機関の協力を得て、加速器による赤外から紫外に至る自由電子レーザーの開発に着手し、平成10年に125MeV線形加速器のアンジュレータ放射光の発生に成功した。平成11年度には放射光、自由電子レーザーさらにパラメトリックX線などの線源の開発を行う一方、線源利用の研究のための学際的研究施設をつくりつつある。これらの線源の利用範囲は、物理学領域にとどまることなく、超精密光励起加工や新素材の開発などに関わる工学領域、生体反応に対する影響やタンパク質構造解析などに関わる生物学領域、さらには医療用レーザーや疾病診断・治療に関わる医学領域など、広範にわたっている。本研究プロジェクトにおいては、これまでそれぞれの研究分野にあって研究を遂行し、実績のある研究者が結集して、個々の研究を実施しつつ、他の関連領域の研究に対しても協力し、新たな研究テーマを見出し、研究を発展させることを目的としている。異領域の研究者が共同研究を実施すれば、従来の研究で考えられていなかったような展開が起こるものと期待でき、またその結果が新たな技術さらには新たな産業の創成につながるものと考えられる。また、学内ばかりでなく、広く国内外の研究者にも開放し、社会の要請に応えられるような研究が推進できるように配慮する予定である。

沿革

1960年代に γ 線によるがん治療が盛んに研究されていたが、 γ 線は反応過程が電磁相互作用に依存するために、 γ 線が生体を通じた時に与えるエネルギー変換（Linear Energy Transfer: LET）が小さく、がんのような低酸素細胞には殺傷効果が小さかった。一方、中性子、陽子、重イオン、 π 中間子は反応過程が強い相互作用である核力に依存し、生体を通ずる時は高 LET であることからがん治療に有効ではないかと注目され、米国のロスアラモス科学研究所に「 π 中間子ファクトリー」施設ができ、そのオプションとして世界最初の「乳がんの治療」（1974年）が行われた。

日本大学における電子線利用研究施設の始まりは、1975年、湯川秀樹博士の呼びかけによって理工、医、歯の3学部のプロジェクトとして発足した π 中間子による癌治療計画（ π 計画）にある。この π 計画の提案により、日本大学総長指定の総合研究に取り上げられ、1976年に π 中間子発生専用加速器として1GeV電子線形加速器を建設する研究グループ（ π グループ）を日本大学原子力研究所に結成し、1977年には松戸歯、農獣医（生物資源科学）学部がこのプロジェクトに加わった。1981年に π グループは科学技術庁所管の「新技術開発事業団」から電子リニアックの実験調査が委託され、1984年に約5億円の助成金を得て、 π 計画の加速器のプロトタイプとして、35MeVダブルサイドマイクロトロン（Double Side Microtron: DSM）の製作を開始した。一方、高崎市より「中間子癌治療施設」の誘致申し入れがあったが、膨大な建設費用と π 中間子のがん治療効果が疑問視され、建設計画は中止し、 π 計画は放射光計画に変更された。同年1988年、この放射光計画に文理学部が参加した。1989年に35MeVのDSMが完成しビーム加速に成功した。1992年に大学本部と理工、文理、医、歯、松戸歯、生物資源科学によって日本大学の共通研究施設として「電子線共同利用センター」（仮称）を設立し、共同利用研究プロジェクトとして進められた。大学本部と6学部の資金協力の下に実験棟が増築された。1997年に「電子線共同利用センター」（仮称）を正式に「電子線利用研究施設」に改称し、日本大学の「電子線高度利用の共通研究施設」として定着したものとなる。一方、電子線高度利用計画は、高エネルギー物理学研究所（現在の高エネルギー加速器研究機構）、電子技術総合研究所、東北大学原子核理学研究施設、東北大学科学計測研究所、動力炉・核燃料開発（現在の事業団核燃料サイクル開発機構）等の協力を得て進められた。

1996年に高エネルギー加速器研究機構（KEK）と「高性能電子線形加速器と自由電子レーザーに関する研究開発」に関して共同研究の協定を2年間結び、日本大学の「電子線共同利用センター」（仮称）にKEKから電子線形加速器本体を移設し125MeV加速器の建設が理学、工学、医学、生命科学の広範囲な学問分野を対象に高度利用研究を推進する目的で進められた。そして、1998年に電子ビーム加速に成功した。同年、川崎重工と共同研究協定を結び、「紫外線領域の自由電子レーザー発振に関する研究開発」を行い、2000年には光蓄積を確認した。また継続して3年間KEKとの共同研究を提携し、「電子線形加速器の高性能化と電子線の高度利用に関する先進的な利用研究開発」を進めた。

また一方で、1997年には、COE計画を中心に電子線利用研究施設の研究拠点化を進め、

加速器科学、物質科学、生命科学を横断する 7 つの研究班を学内に組織して、自由電子レーザーとパラメトリック X 線を基盤とする超分子機能の研究高度化を進めた。2000 年 4 月から私立大学研究高度化の研究拠点に選定され、KEK、東京理科大学、ニューヨーク大学、明海大学、徳島大学、東北大学、筑波大学等と連携して研究の高度化を推進し、図 1 に示すような構成の加速器が整備された。本研究施設を基盤とする「可変波長高輝度単色光源の高度利用」が文部科学省の学術フロンティア推進事業として 5 年計画でスタートした。超分子の研究は「21 世紀のもの作り」として進められている。

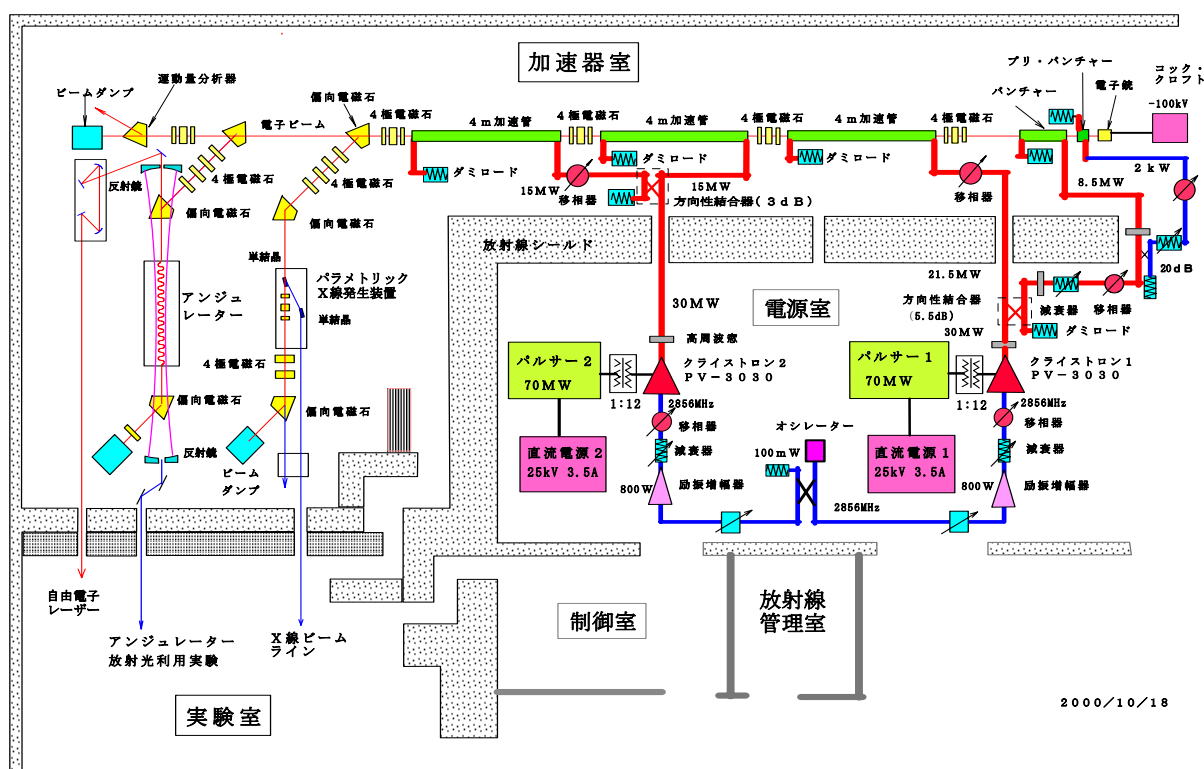


図 1 日本大学電子線利用研究施設の要素構成図

研究組織と研究実施方法

本研究プロジェクトは加速器科学、放射線計測、機能系基礎歯科学、保存治療歯学、半導体工学、生物生産化学・生物有機化学、レーザー分子分光学、解剖学一般（含組織学・発生学）、補綴理工系歯学、分子生物学、半導体物性、生物生産化学・生物有機化学、半導体物性、補綴理工系歯学、光物性物理学、電子材料等、学問分野が多岐に渡っている。このような状況の中、各分野間で密な連携を取るため、下記の17名の研究分担者からなる研究組織を作るに到った。なお、以下は研究分担者氏名、所属機関、分担・役割の順に記述されている。

研究代表者	所属機関
小嶋 勝衛	日本大学原子力研究所

研究分担者名	所属機関	分担・役割
佐藤 勇	日本大学原子力研究所	研究リーダー 加速器科学
早川 建	日本大学原子力研究所	加速器科学
早川 恭史	日本大学原子力研究所	放射線計測
安孫子 宜光	日本大学松戸歯学部	機能系基礎歯科学
池見 宅司	日本大学松戸歯学部	保存治療系歯学
大西 一功	日本大学理工学部	半導体工学
奥 忠武	日本大学生物資源科学部	生物生産化学・生物有機化学
奥山 克彦	日本大学工学部	レーザー分子分光学
寒河江 登志朗	日本大学松戸歯学部	解剖学一般（含組織学・発生学）
佐藤 吉則	日本大学歯学部	補綴理工系歯学
穴倉 文夫	日本大学医学部	分子生物学
清水 典佳	日本大学歯学部	機能系基礎歯科学
滝沢 武男	日本大学文理学部	半導体物性
西山 實	日本大学歯学部	補綴理工系歯学
望月 章介	日本大学文理学部	光物性物理学
山本 寛	日本大学理工学部	電子材料

現在、上記の研究分担者組織を主体として、本プロジェクトに関わる全ての研究者を対象に研究分担者会議を行い、その上で研究計画を策定し、この計画に沿ってプロジェクトを運営、特に本年度は研究設備の整備を進めてきた。整備の根幹は大別して、施設に関する物と、装置に関する物とがある。本年度において、まず、施設に関しては、新実験棟の建設が挙げられる。この新実験棟はレーザー照射実験室、資料分析室、実験準備室、研究室、セミナー室、資料室、物品管理室、管理事務室を備えており、本研究プロジェクトの一翼を担う施設である。なお、新実験棟に関する詳細は、『2.研究設備』の項に述べられて

いる。次に、装置に関しては、各種装置の購入が挙げられる。各研究分野における必要性、要求に応じて、X線解析装置、生体高分子高次構造解析装置、レーザービームライン、パラメトリック X 線発生装置、マイクロ波電子銃、ドライブレザー、イメージ・インテンシファイアー、TOF 質量分析装置、ZEKE-PFI 測定装置、マイクロアレイ解析システム等の購入を行った。なお、各装置の設置に関しては次年度以降になる予定である。

研究年次計画

本研究プロジェクトにおける研究は、実際の研究進展状況を研究分担者会議等で検討し、今後、必要に応じて軌道修正を加えつつ研究を進めて行くことになるが、平成11年度に文部省に提出した年次計画の概要は以下の通りである。

平成12年度

- (1) 自由電子レーザーおよびパラメトリックX線源を組み合わせた小型単色光源の開発を目指し、現有の装置に改良を加え、ビームラインの完成を目指す。
- (2) 完成したビームラインと装置・設備の組立を行う。これと平行して、生物系グループにおいては、現有のレーザー光源を利用して、遺伝子損傷、抗炎症作用などについて、予備的な実験を行う。
- (3) 理工系グループにおいては、現有の装置・設備に改良を加えつつ、研究目的と合致するシステムを構築する。

平成13年度

- (1) 完成した実験装置の試運転期間とし、光源とともに装置などの改良を行いつつ、目的とする研究のための基礎的条件を整える。
- (2) レーザー光源を用いる生物系の実験においては、前年度の予備実験に加え、様々な細胞に対する生物学的反応に関する研究を行う。X線源による研究においては、リゾチームをモデル・タンパクとして、その結晶化およびX線回折を行う。
- (3) 2年間に得られた予備的な研究成果を総括・公表し、学内外の研究者から、平成13年度以降の研究課題を公募する。

平成14年度

- (1) 本調書提出時点での研究を実施する。
- (2) これらの研究は、東京理科大学、立命館大学、高エネルギー加速器研究機構、ソレーク原子核研究センター（イスラエル）、国立科学研究センター（フランス）などの研究機関と密接な連携のもとに実施する。
- (3) 学外からの公募研究課題についても、審査のうえ、可能なものから実施する。また、優れた研究課題の応募が可能となるように、研究会を開催して、成果を公表する。

平成15年度

- (1) 研究を継続的に行うとともに、研究会を開催するなどして、新たな可変波長高輝度単色光源の利用研究の可能性についても検討を行う。
- (2) 得られた研究成果の社会的還元につとめる。この中では、①新産業の創生および、②医療への応用を考慮している。

平成16年度

- (1) 研究を継続的に行う。
- (2) 学術フロンティアの趣旨に従い、本研究プロジェクトの継続とともに、さらに高度な可変波長高輝度単色光源の利用研究が可能となるように、学内的な条件の整備を行う予定である。

ワークショップ、研究会、講演会等の開催状況

(1) 電子線利用研究施設の利用研究会

(日本大学会館 7階 701 室 平成 12 年 3 月 16 日 10:00~16:00)

- 10:00~10:20 電子線利用研究施設現状と研究計画：日本大学原子力研究所 佐藤 勇
- 10:20~10:40 電子線形加速器の現状：同上 田中俊成
- 10:40~11:00 自由電子レーザーの改善：同上 早川 建
- 11:00~11:20 X線発生とその測定：同上 早川恭史
- 11:35~12:05 多層薄膜ターゲットを用いた共鳴遷移放射による X線発生実験
：NTT 通信エネルギー研究所 山田浩治
- 12:05~12:30 無脊椎どう物酸素結合タンパク質—構造、機能、進化と展望—
：日本大学医学部 宍倉文夫
- 13:45~14:05 自由電子レーザー放射光によるスーパーダイヤモンドの合成
：日本大学理工学部 山本 寛
- 14:05~14:20 自由電子レーザーによる尿路結石破砕に関する基礎研究
：日本大学医学部 吉田利夫
- 14:20~14:40 歯学領域におけるレーザー利用の現状—歯科技工を中心に—
：日本大学歯学部 菊地久二
- 14:55~15:20 X線回折法を利用した生体血漿物質：日本大学松戸歯学部 寒河江登志朗
- 15:20~15:45 光による固体・クラスターの個数制御、構造相転移
—新しい光機能物質の探索—：日本大学文理学部 望月章介

(2) 学術フロンティアと特定領域(B) 合同シンポジウム

(日本大学理工学部船橋校舎図書館小視聴覚室 平成 12 年 12 月 22 日 10:00~17:10)

- 学術フロンティア推進事業の進捗状況：日本大学原子力研究所 佐藤勇
- 自由電子レーザーと高調波同期光源の開発：同上 早川 建
- 広帯域 2 連アンジュレーターの開発：同上 田中俊成
- レーザー照射による骨形成促進炎症抑制作用の機序：日本大学松戸歯学部 安孫子宜光
- ピコ秒ポンプ・プローブ法による高速光化学反応：東京大学理学部 佐藤伸
- 回転コヒーレント分光法による様々な 1:1 Van der Waals 錯体の構造決定
：日本大学工学部 奥山克彦
- 赤外線自由電子レーザー施設 FEL-SUT の現状と研究計画：東京理科大学 黒田晴雄
- パラメトリック X線の特性 日本大学原子力研究所：早川恭史
- 最近のヘモグロビン研究の成果と将来の研究計画：日本大学医学部 宍倉文夫
- 微小部 X線回折法に期待する研究の事例：日本大学松戸歯学部 寒河江登志朗
- 半導体素子に対する放射線照射効果：日本大学理工学部 高橋芳浩

- ダイヤモンドアンピルセルを用いた高圧 XANES 測定—物質科学への応用
：日本大学文理学部 高橋博樹
- ポストゲノム時代の放射光 X 線構造生物学：高エネルギー加速器研究機構 若槻壮市
- 放射線業務に関する諸注意：日本大学原子力研究所 佐藤和男

(3) 「第10回自由電子レーザーと大電力放射に関する先端的研究会」

(日本大学理工学部船橋校舎 13号館 1314教室)

2001年3月8日～9日

3月8日 (木)

- 10:10～10:30 日本大学電子線利用研究施設の現状：佐藤 勇 (日大・原研)
- 10:30～10:45 中赤外FEL装置の現状：小田史彦 (川崎重工)
- 10:45～11:00 線形電子加速器LEENAの現状と将来計画：井上隆博 (姫工大・高度研)
- 11:15～11:30 NIJI-IV自由電子レーザーにおける紫外域発振の現状：山田家和勝 (電総研)
- 11:30～12:00 自由電子レーザーの技術開発と応用の進展：峰原英介 (原研)
- 13:30～14:00 オングストロームX線自由電子レーザー計画：北村英男 (理研)
- 14:00～14:15 蓄積リングNIJI-IVの赤外FEL用挿入光源：清紀弘 (電総研)
- 14:15～14:30 遷移放射によるPrebunched FELの研究：柴田行男 (東北大・科研)
- 14:45～15:05 日大赤外FEL：早川建 (日大・原研)
- 15:05～15:20 FEL-SUTにおけるFEL導光システムとその性能評価：能丸圭司 (東京理大・総合研)
- 15:20～15:35 遠赤外からサブミリ波領域でのSASEスペクトルと高調波発生
：加藤龍好 (阪大・産研)
- 15:35～15:50 Resonance wavelength shift in single-pass FELs by self-fields
：Dong zhiwei (京大・エネルギー理工研)
- 15:50～16:05 Saturation in an FEL oscillator at perfect synchronism：N.Nishimori (原研)

3月9日 (金)

- 9:30～ 9:45 UVSOR-FELにおける同期フィードバックシステムの開発と
pump & prove実験への応用：江田茂 (分子研・UVSOR)
- 9:45～10:00 阪大産研Lバンド電子ライナックの安定性の研究：小西敏文 (阪大・産研)
- 10:10～10:25 高周波電子銃におけるback-bombardment現象の定量的評価
：山口智彦 (京大・エネルギー理工研)
- 10:25～10:55 RFガン製作及びRFガン試験計画：浦川順治 (KEK)
- 11:10～11:30 日大パラメトリックX線発生装置の概要：早川恭史 (日大・原研)
- 11:30～11:55 世界最小電子蓄積リングへのビーム入射と高輝度X線発生
：山田廣成 (立命館・理工)
- 13:30～14:30 Lessons learned from high power lasing at Jefferson Lab
：S. Benson (Jefferson Lab)
- 14:45～15:00 高強度電子ビームの制御とサブミリーミリ波コヒーレント放射光源
による吸収分光：奥田修一 (阪大・産研)

15:00～15:15 自由電子レーザーによる尿路結石破碎に関する基礎的研究：吉田利夫（日大・医）

15:15～15:30 Laser in Dentistry：勝呂尚（日大・歯）

2. 研究設備

研究設備

本研究施設は図 1 の鳥瞰図に示すように鉄筋コンクリート 2 階建で旧実験棟と新実験棟（写真 1）に区分されている。実験棟は 2 回の増築によって総床面積が 2223m²に拡張された。

新実験棟（1303m²）にはレーザー照射実験室（9 室）、資料分析室（5 室）、実験準備室（6 室）、研究室（7 室）、セミナー室、資料室、物品管理室、管理事務室が用意された。レーザー照射実験室と実験準備室は暗室構造であり、微光測定も可能である。

一部の実験室では有機ガスが取り扱えるように強制排気装置（ドラフター）を完備している。半導体と新素材を開発するためのレーザー照射実験室はクリーンルームになっている。半導体と新素材開発室はクリーン度がクラス 1000 とクラス 10000 である。既設実験棟（920m²）には加速器本体室、モジュレーター室、電源室、空調室、制御室、放射線管理室、実験室、測定室、研究室、電子ビーム加速テスト室、搬入室等が設けられている。加速器室には、写真 2 に示すように電子線形加速器（50～125MeV、0～200mA、1～20μs、0.5～12.5Hz、～6.25kW）が設置されている。表 1 に電子線形加速器の性能仕様を示す。

表 1 電子線形加速器性能仕様

電子エネルギー	50～125	MeV
電子銃	直流型電子銃	
電子ビーム電流	200	mA
電子ビームパルス幅	20	μs
規格化エミッタンス	30	π mm・mrad
加速繰り返し	0.5～12.5	Hz
加速周波数	2856	MHz
加速管の全長	12.3 m (0.3 m + 4 m × 3)	
クライストロン数	2	本
クライストロン最大出力電力	30	MW

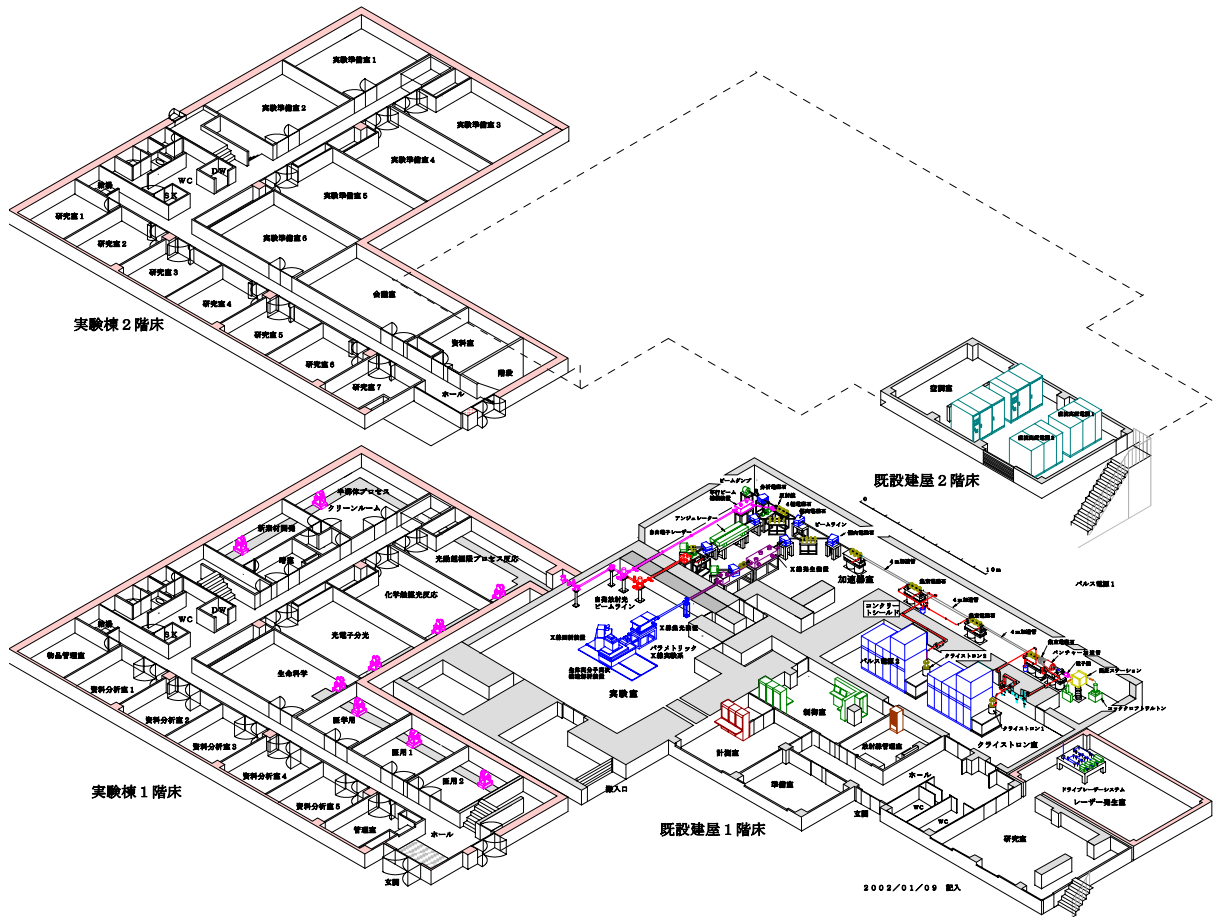


図2 日本大学電子線利用研究施設の全景鳥瞰図



写真1 学術フロンティア推進事業によって増築した新実験棟

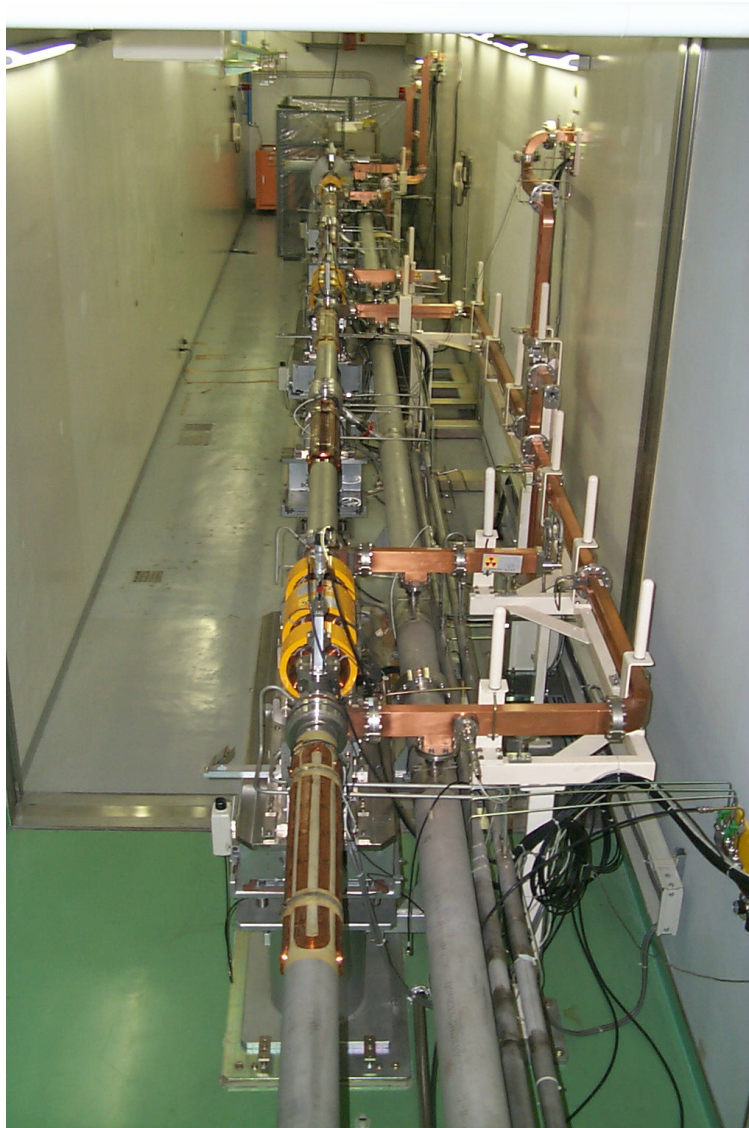


写真2 下流から眺めた 125MeV 電子線形加速器。

レーザー照射実験室には、イオン放電槽とダイヤモンドアンビル、イメージ増強型極低迷光高分解能分光装置、飛行時間質量分析装置、フーリエ変換高分解能自動認識分光器、バイオベンチ、低温冷凍庫、マイクロアレイ解析システム（遺伝子アレイ読み取り用）、多関節自由腕レーザー導入装置等が用意してある。更に、新実験棟の資料分析室（5室）には、拡張型粉末X線回折装置(写真7)、タンパク質自動X線高次解析装置、微小部自動X線回折装置、コールドルーム（タンパク質結晶成長用）、化学洗浄処理装置等が用意され、これらの実験装置は共同利用実験に使用できる。X線自動解析にはイメージングプレートが用いられる。

本研究施設の特徴は、1) 自由電子レーザー利用実験では事前に実験準備、2) パラメトリックX線利用研究ではX線回折装置を使って事前に予備実験等が研究施設内で出来ることである。

また、加速器室には自由電子レーザーシステム（5～0.35 μm ）とパラメトリックX線源（3

～30keV、 3×10^{11} 光子/秒) が写真3 (右) と (左) に示すように設置されている。表2にパラメトリック X線、表3にアンジュレーター放射光、表4に自由電子レーザーの性能仕様を示す。

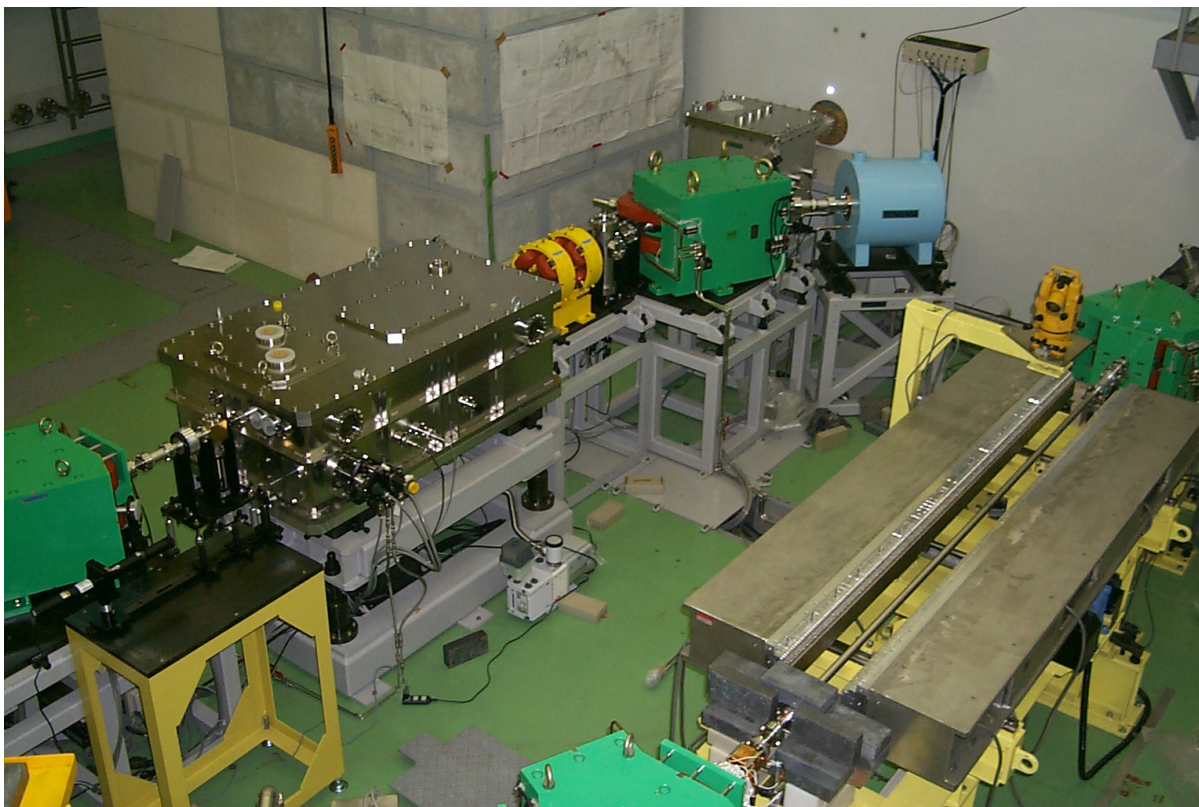


写真3 加速器室に設置されているパラメトリック X線発生装置 (左) と自由電子レーザー発生装置 (右)

表2 パラメトリック X線性能仕様

照射電子エネルギー	～125	MeV
照射電子ビーム電流	～200	mA
照射電子ビームパルス幅	20	μs
照射繰り返し	0.5～12.5	Hz
照射ビーム電力	6.25	kW
発生標的	シリコン単結晶 (厚さ 0.2mm)	
X線フラックス	4×10^{14}	/sec·Duty
X線エネルギー	3～30	keV

表3 アンジュレーター放射光性能仕様

	紫外用	赤外用	
光子エネルギー幅	1	2	%
指向性	4~10	4~10	mrاد
波長（基本波～第7高調波）	1.8~0.043	5.0~0.56	μm
光子のエネルギー	0.69~28.8	0.25~22.1	eV
光子数	3.35×10^{11}	2.1×10^{10}	個/sec

表4 自由電子レーザー性能仕様

	紫外用	赤外用	
自由電子レーザー波長	0.35~1.8	0.8~5.0	μm
平均レーザー出力	6	6	W
アンジュレーター長さ	2.4	2.4	m
アンジュレーター周期長	24	48	mm
アンジュレーター周期数	100	50	
ギャップ長	11~15	28~35	mm
アンジュレーター構造	ハルバック型	ハルバック型	
磁石材料	永久磁石(NdFeB)	永久磁石(NdFeB)	
中心磁束密度	0.29~0.49	0.20~0.30	T
K値	0.65~1.1	0.65~1.1	
光空洞共振器間長さ	6718	6718	mm
反射鏡制御	5軸制御	5軸制御	

3. 自由電子レーザーと電子加速器

自由電子レーザーと電子加速器

自由電子レーザーの歴史

1980年代、自由電子レーザーは世界の各国で国家プロジェクトとして、多数の研究機関で建設が進められた。しかし、可視光領域では自由電子レーザーの半数が成功したに過ぎなかった。残りの半数は加速器性能が自由電子レーザーを発振させる条件を満たさなかったからである。失敗の主な理由は、加速器技術の不足、予算的な制約、時間的な制限等により、レーザー発振に適合する条件を満たす改良が十分に行われなかったためであるが、しかし、発振しない自由電子レーザー装置の幾つかは、不思議にも生き残り、未だに運転を継続し、レーザー発振に向け開発研究を続けている。

自由電子レーザーの基盤は1951年にモッツリ¹⁾が周期磁場を使うウィグラーを提案し、電子線をウィグラー磁石で蛇行運動させると電子線から高輝度の放射光が発生することを実証²⁾したことから始まった。1960年に、フィリップスは、ウビトロン³⁾（低電圧の自由電子レーザーと呼ばれている装置）を開発した。ウビトロンでは電子密度の高い電子線を蛇行運動させて空間電荷波を励起させ、10cmから5mm波の電磁波を10%を越える高効率で1MW級大電力⁴⁾を発生させることができた。しかしながら、同時に進行波管と同様の高利得で且つ使い易い他の装置が開発されたので、ウビトロンは進展しなかった。

1970年にスタンフォード大学のメーディは、シンクロトロン放射光源の影響を受け、導波管を必要としない短波長領域の光源として、ウビトロン（電磁波源）を相対論的な電子線を使って光の領域まで拡張する方策を考案し、これを自由電子レーザー⁵⁾と称した。又、この原理を量子論で記述し、これがレーザーであることを明確にした。

自由電子レーザーは量子論的に取り扱われ、電子の量子状態の転移によって励起されて光を放射する記述になっている。その後、古典論を使っても正確に記述^{6,7)}されるようになった。

1976年、メーディ等はスタンフォード大学で、24MeV電子線と5mウィグラーを使い、炭酸ガスレーザー光を増幅し、自由電子レーザー装置は光を増幅⁸⁾することを示した。1977年には、この装置の両側に反射鏡を設置し、43MeV電子線を使って、3.5 μm レーザー発振⁹⁾に成功した。

1983年、フランスのオルセイ(LURE)ではストレジリング(ACO)を使い可視光の発振¹⁰⁾に、スタンフォードではメーディ等が超伝導加速器(SCA)で近赤外の発振¹¹⁾に、ロスアラモスでは電子線形加速器による中赤外の発振¹²⁾にそれぞれ成功した。

更に、コロンビア大と海軍研究所の共同研究グループは、1.2MeVのエネルギーと25kAの尖頭電流を持つ電子線を使って、400 μm のサブ・ミリ波の発振¹³⁾に成功した。

1988年、ロシアのノボシビルスクの原子核研究所にあるストレジリング(VEPP-3)では、240nmの波長の発振¹⁴⁾が達成された。ローレンスリバモア国立研究所のインダクションリニアック(EAT)では、高利得(40%)で非常に長い波長(9mm)¹⁵⁾の大電力(1GW)が達成された。

自由電子レーザーとは

電子は、原子や分子の構成物質に捕捉されている場合と、自由空間に単独で存在する場合では、観測される現象が著しく異なる。原子核は電子群の雲に覆われて、その素顔を直接見ることは出来ない。同様に、自由に動き回る電子には、常時仮想光子(バーチャルフォトン)が付きまとい、その素顔を直接見ることは出来ない。

従って、電子はこの光子を媒介してのみ外部の電子と作用することになる。即ち、電子から電子に働く力を伝えるのは光子群である。これを電磁相互作用と呼んでいる。

充電したコンデンサーにコイルを接続すると電荷はコイルに通じて正極から負極に移動し、コンデンサーは逆の電位に充電される。この電荷は再びコイルを通じて逆向きに移動し、この振動状態は電位を減少させながら継続する。電荷の移動速度の時間変化は加速度であるから、電荷は加速度を受けながら移動していることになる。コンデンサーの電位の減少は、電荷が移動するときにコイルとコンデンサーに発生する熱や電磁波のエネルギーに変換されたためである。従って、この回路は電磁波を放射するが、周辺に高感度の計測器を配置すると、この電磁波を観測することができる。この現象は簡単な実験装置で観測できる。ここで、回路を移動する電荷に質量を与え、自由に動ける荷電粒子(自由電子)に置き換える。もし、この荷電粒子が移動中に速度が変化する(加速度を受ける)と荷電粒子は電磁波を放射することになる。即ち、図1に示すように、電子が垂直方向に単振動すると、静電界が歪み、電子の移動で誘導される磁界が水平方向に放射される。即ち、静止していた電子が垂直方向に単振動すると静止電界が歪み誘導電界と誘導磁場が直交しポインテングベクトル(電磁波)が水平方向へ働き電磁波が円盤状に放射される。一方、電子が垂直方向に単振動しながら右の方向へ光速に近い速度で移動すると図1の下図に示すように、電子の進行方向に放射される電磁波はドップラー効果で波長が短縮される。

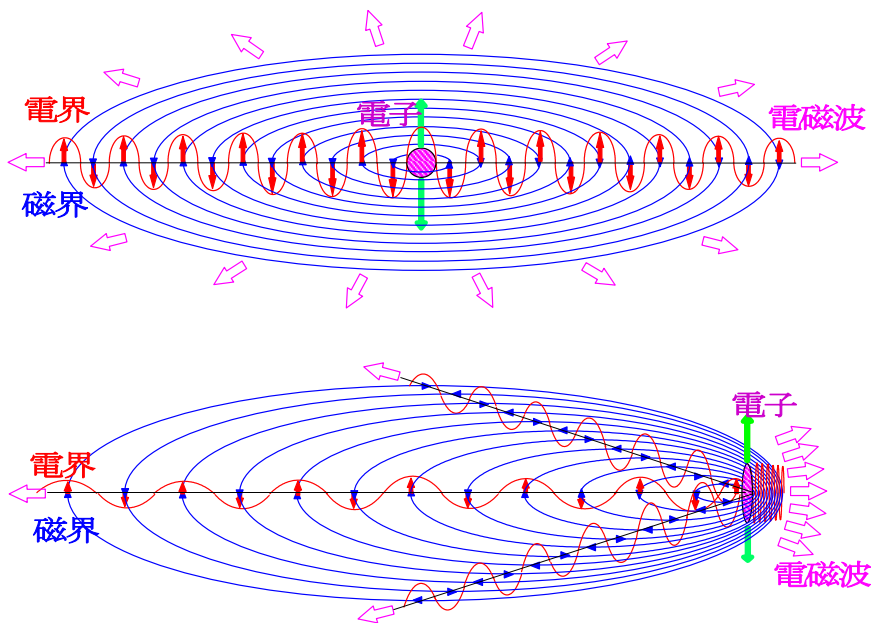
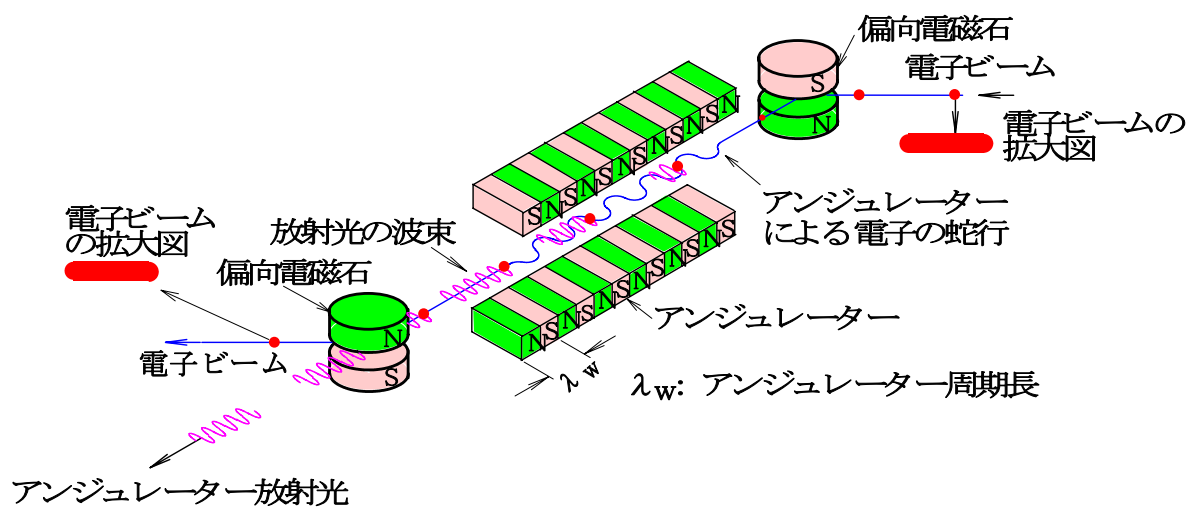


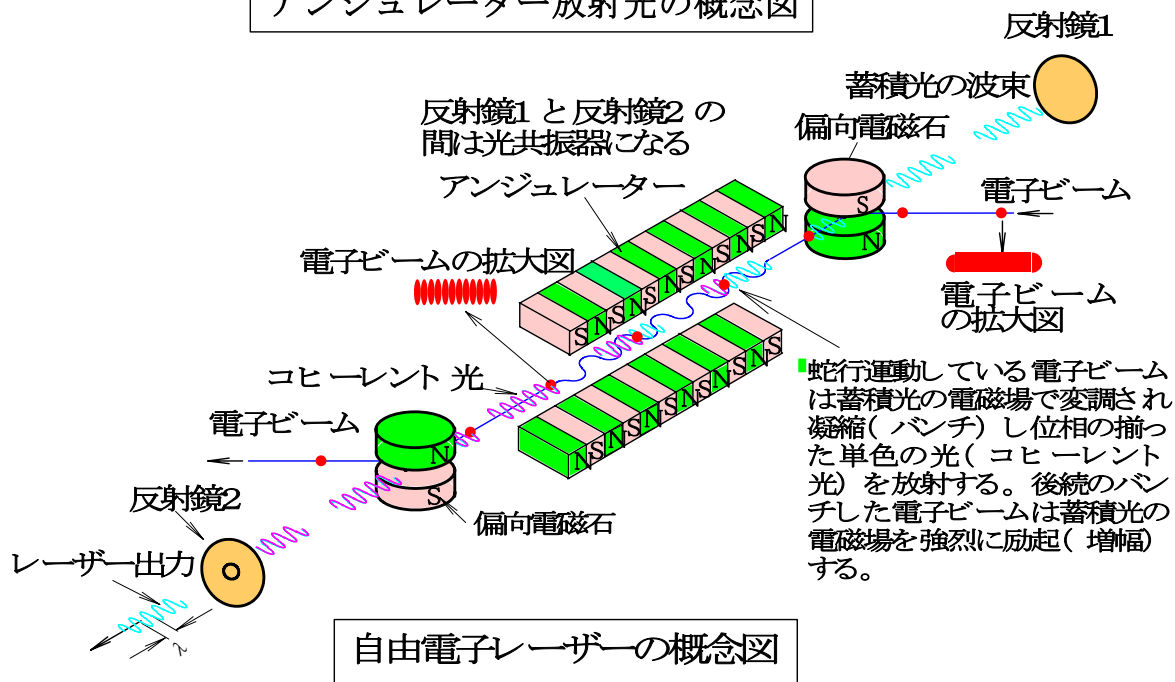
図1 垂直方向に単振動運動している電子と単振動しながら光速で水平方向に移動する電子が放射する電磁波。

又、光速度に近い速度の電子は磁場中で円運動すると加速度を受けて光を放射する。この現象はシンクロトン放射と呼ばれている。又、集群(バンチ)した電子群は高周波空洞に通過するとき、高周波空洞に高周波を放射し、その作用として加速度を受けて減速する。これはウェーク場の放射と呼ばれ、電子線を使って高周波を増幅するクライストロンに利用されている。

自由電子レーザーの原理は簡単であり、垂直方向に単振動する電子線が水平方向に光速度に近い速度で移動する時に放射する電磁波に電子線が誘導放射することにある。即ち、自由電子レーザーの基本は、図2に示すように、電子線がウイグラー(アンジュレーター)中を水平方向に蛇行運動しながら通過するだけである。ウイグラーは磁極が数 cm 毎に反転するように多数の磁石が並べられ、その全長は通常数 m である。



アンジュレーター放射光の概念図



自由電子レーザーの概念図

図2 自由電子レーザーの概念図

電子線はウイグラー中を進行すると磁場によって交互に偏向され蛇行運動する。この動きは単純な力で振動し、微細な共鳴効果は含まれない。もし、電子の平均速度でウイグラーを移動する図を描くと、電子はウイグラー座標軸上で前後に首振りしているように観測される。実験室系に立っている観測者には、その時、観測者に向かって動いてくる発生源によって作られる放射電磁波として観測される。その周波数はドップラー効果によってより高い周波数にシフトされる。

この波長を計算するために、電子1個が速度 $v = \beta c$ でウイグラーを下流に向けて移動していると仮定しよう。ここで、 c は光速である。電子は、図3に示すように、周期数 N_w のウイグラー磁場を通過する間に N_w 回の蛇行運動し、この区間に N_w 個の連続した光波(電磁波)を放射することになる。この連続した波を波束(ウェーブパケット)と呼んでいる。

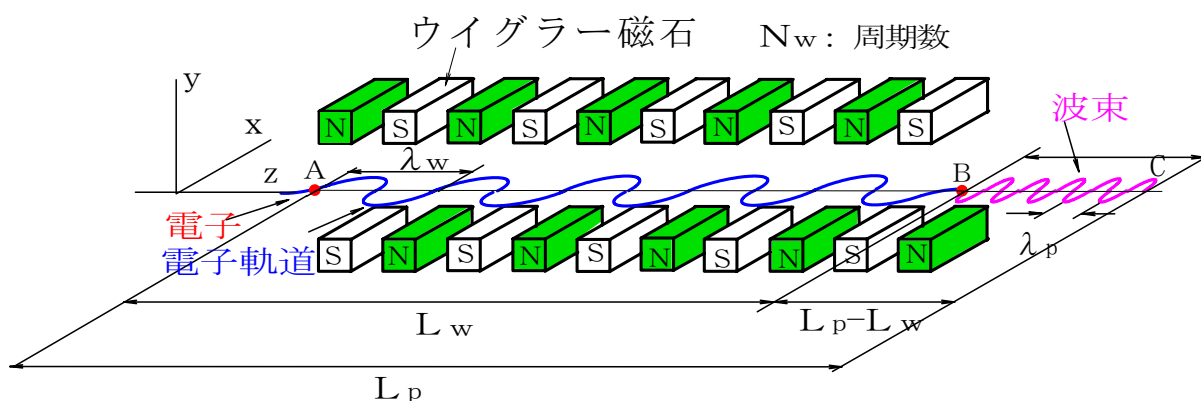


図3 自由電子レーザーの原理図

速度 v の電子がウイグラーを通過する時間 t はウイグラーの長さを L_w とすると

$$t = \frac{L_w}{v} \quad (1)$$

で表される。ここで、ウイグラーの周期長を λ_w とすると、 L_w は

$$L_w = N_w \lambda_w \quad (2)$$

で与えられる。電子は t 時間後にウイグラーの終端に到着したとき、電子の前方には電子から放射された光の波束が進行している。波束の先端の波はウイグラーの始点で電子が放射した最初の光波であり、その光波は電子の前方距離 ct の所を進行している。波束の後端はウイグラーの終端を電子と一緒に進行中であるから、波束の全長は $(c - v)t$ で与えられる。

ここで、相対論的電子速度 v と光速 c の比を β で表示すると、波束には、 N_w の振動波を含んでいるから、レーザー波長 λ_p は、

$$\lambda_p = \frac{(c - v)t}{N_w} = \frac{\lambda_w(1 - \beta)}{\beta} \quad (3)$$

で表わすことができる。電子速度 v が光速 c に近い場合には比速度 β を $\beta \simeq 1$ とすると、

(3)の右辺式の $(1-\beta)/\beta$ を次のような近似できる。

$$\begin{aligned}\frac{1-\beta}{\beta} &\approx \frac{(1+\beta)(1-\beta)}{(1+\beta)\beta} \\ &= \frac{1-\beta^2}{2}\end{aligned}\quad (4)$$

一方、相対論的電子の全エネルギー m (運動エネルギーと静止質量エネルギーの和)を静止質量エネルギー m_0 単位であらすと、その比(ローレンツ因子) γ は

$$\gamma = \frac{m}{m_0} = \frac{1}{(1-\beta^2)^{1/2}} \quad (5)$$

で与えられる。ここで、電子の静止質量エネルギーを電子ボルト単位で表すと、 $m_0=0.511\text{MeV}$ である。(3),(4),(5)式から、レーザー波長 λ_p は

$$\lambda_p = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \quad (6)$$

で表される。

ここでは、強い磁場で電子が蛇行運動すると電子の速度が変調され、ウイグラーを通過する電子軌道の通過距離が長くなり、電子の平均速度が少し小さくなる効果を考慮していない。この効果を正確に考慮すると、レーザー波長 λ_p は

$$\lambda_p = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left[1 + \frac{eB_w \lambda_w}{2\pi m_0 c} \right]^2 \quad (7)$$

で表される。

ここで、 e は電子の電荷量であり、 B_w はウイグラー磁束密度の平均値である。(7)の方程式は、自由電子レーザーの波長を正確に表す。

これは、電子の平均速度で動く座標系の中で、電子の振動周波数は光学的な場の振動数と全く同じであることを示唆している。それ故に、(7)は自由電子レーザーに関する共鳴状態を示している。実際に、ウイグラー磁場が強くなると蛇行運動の振幅が増大し、電子から放射されるエネルギー量が増加するが、波長は余り長くならない。

これは、(7)のウイグラー磁場に関する項である $(eB_w \lambda_w / 2\pi m_0 c)$ が一般に1のオーダーであることを意味する。永久磁石でも、2cmのウイグラー周期長に対して平均磁束密度は0.5Tのオーダーである。

例えば、 γ が200に相当する100MeVの電子エネルギーに対して、レーザー波長は $\lambda_L \sim 0.5\mu\text{m}$ となり、可視光スペクトルではグリーンの部分に相当する。各電子から放出される波束は有限な振動数、即ち、 N_w に等しいので、周波数は不完全に定義される。

放射スペクトルは電子から放出された波束のフーリエ変換に相当する。電子はウイグラーの始端から終端まで均一に放射するから、波束は矩形包絡線をもつ。その強度スペクトル $I(\omega)$ は

$$I(\omega) \propto \left[\int_0^{N_w \lambda_p / c} \exp[-i(\omega - \omega_p)t] dt \right]^2$$

$$\propto \left\{ \frac{\sin[2\pi N_w (\omega - \omega_p) / 2\omega_p]}{2\pi N_w (\omega - \omega_p) / 2\omega_p} \right\}^2 \quad (8)$$

で与えられる。ここで、レーザー周波数は

$$\omega_p = \frac{2\pi c}{\lambda_p} \quad (9)$$

である。図4には、 $E = 125\text{meV}$ 、 $I = 300\text{mA}$ 、 $\Delta E / E = 7.3 \times 10^{-4}$ 、 $N_w = 100$ 、 $\lambda_w = 24\text{mm}$ 、 $K_{\max} = 1.7$ 、 $\lambda_p = 0.1626\mu\text{m}$ (7.625eV)のスペクトルの計算例を示してある。ここで、放射電磁波のライン幅は $1/N_w$ のオーダーである。

自発放射光のスペクトル

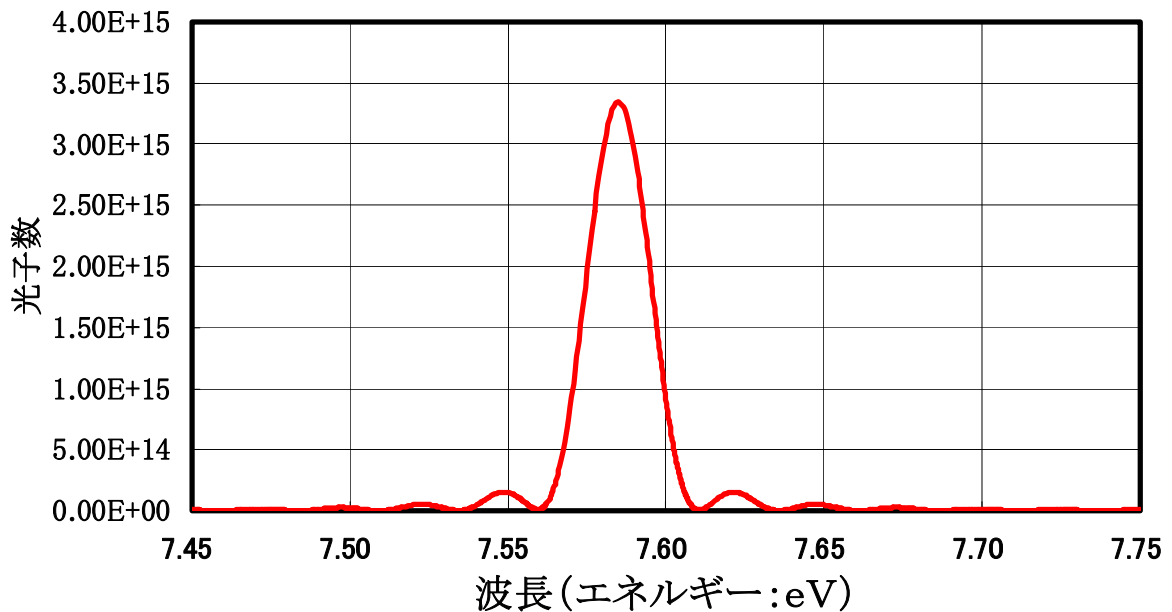


図4 自発放射光のスペクトルの例

実際のウイグラーは周期数が約100位であるから、放射電磁波は約1%のライン幅をもつ。ここで、放射電磁波は通常のレーザーの自然放射と呼ばれているものとは異なる。これは、シンクロトロン放射光源のウイグラーやアンジュレーター放射と呼ばれている非コヒーレント放射電磁波（波の位相が揃っていない）である。

コヒーレントとは

コヒーレントとは粒子や波がばらばらの状態から密着した状態になることを云う。例えば、電子線が集群(バンチ)した状態や同じ波長の波が重なった(位相が揃った)状態はバラバラな状態とは著しく異なる特性をしめす。

図5には非コヒーレントとコヒーレントの相違をしめしてある。電子線の中にバラバラに存在する多数の電子はウイグラーを通過するとき、各々の電子が放出する電磁波もバラバラであり、電磁波の平均振幅 e は、電子線の中に含まれる電子数 N の平方根に比例する。電磁波の強度(エネルギー量：パワー)は、電子数に比例する。

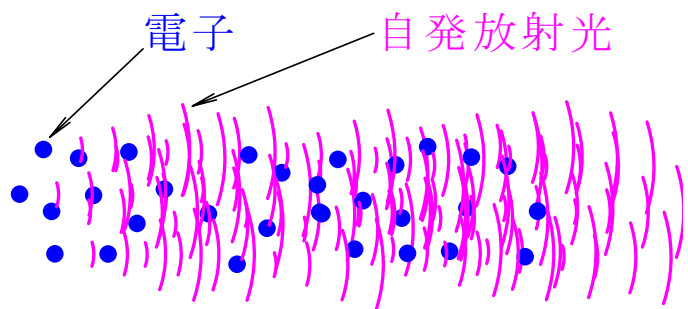
一方、各々の電子が密着し団子のようにになっている電子線から放射される電磁波は図5に示すように波面が揃い、個々の電子から放出される電磁波は振幅が重なり合い、振幅 e は電子数 N に比例し、そのエネルギー量は電子数の自乗に比例する。これを超放射現象と言う。

電子の数 N

光の強度 e

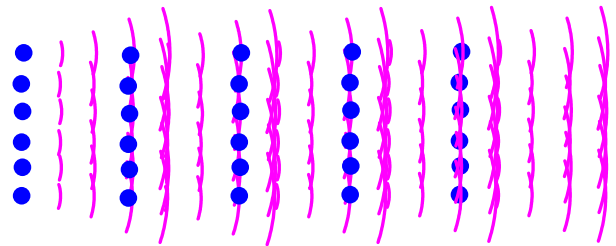
バラバラな電子ビームからの
自発放射光

$$\begin{aligned} e &\propto N^{1/2} \\ e^2 &\propto N \end{aligned}$$



密着した電子線からの
自発放射光

$$\begin{aligned} e &\propto N \\ e^2 &\propto N^2 \end{aligned}$$



自発放射光の電界： E

利得 G

$$\begin{aligned} e &\propto N \\ e \cdot E &\propto N \end{aligned}$$

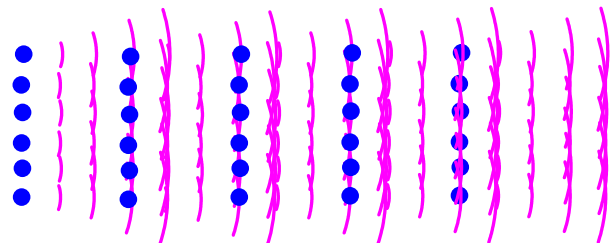


図5 非コヒーレントとコヒーレントの相違

電子線と光の相互作用

自由電子レーザーにおけるより重要なことは、図2に示すように、レーザーの波長より電子線が小さく集群（バンチ）され、先進の電子線が放射した光の電場と後続の電子線のバンチが同期すると、ミクロにバンチした電子線は最初に放出された光の電場にエネルギーを放出（誘導放射）して、光を増幅することになる。ここで、ウイグラーを通過する電磁波（光）の電場をベクトル場 E 、集群（バンチ）した電子から放出される電磁波の電場をベクトル場 e で表わすとする。 e/E が1より小さいと仮定する。ウイグラー出口における電場が $E+e$ とすると、光の強度は

$$(E+e)^2 = E^2 + 2E \cdot e + e^2 \approx E^2 + 2E \cdot e \quad (10)$$

で与えられる。従って、光の強度の利得 G は

$$\begin{aligned} G &= \frac{E^2 + 2E \cdot e}{E^2} - 1 \\ &= 2e \cdot \cos(\phi) / E \end{aligned} \quad (11)$$

で定義される。ここで、 ϕ は電子線が放出する光の電場と既に電磁波（レーザー）の電場との間の位相角である。 e は電子線の電流に比例するから、利得も又電子線の電流に比例する。電子線が最初に放出された光の電場の周辺でバンチする位相は電子線のエネルギーに依存する。電子線が最初正確に共鳴エネルギーにある場合は、位相 ϕ が $\pi/2$ であり、(11)より明らかのように、この場合、利得¹⁰⁾は無い。これは、電子線の半分が加速され、残り半分は減速されるからである。従って、そこには実質的にエネルギーの変化はない。エネルギー保存則より明らかのように、光電場の増幅には電子線が保有するエネルギーの消費が伴わなければならない。もし、電子線が共鳴エネルギーより僅かに高いエネルギーをもってウイグラーに入射されると、電子線は $\pi/2$ より小さい位相 ϕ のまわりにバンチし、利得は正になる。従って、電子線は平均として光電場に僅かにエネルギーを放出する。電子線がエネルギーを失うと、電子線の平均エネルギーは共鳴エネルギーまで減少し、電子線は光にエネルギーを変換出来ないで、レーザーの電場は飽和する。逆に、もし電子線が共鳴エネルギーより低いエネルギーでウイグラーに入射されると、電子線は $\pi/2$ より大きい位相 ϕ のまわりにバンチし、利得は負になる。即ち、レーザーの電場から電子線にエネルギーが移動し、電子線は加速される。

以上のことから、自由電子レーザーに入射する最初の光源は、別個のレーザーを用いるか、或いは、自由電子レーザーの出力を再生するか、どちらでも適用出来る。

もし、光源が外部にあれば、自由電子レーザーは増幅器として利用され、光源は信号源（マスターオシレーターと呼ばれている）になる。明確に、自由電子レーザーから出力される光の波長は信号源の波長と同じになるように、電子線のエネルギーとウイグラー磁場は(7)を満足するように調整されなければならない。もし、信号源が通常のレーザーである場合、波長はレーザーの性能仕様に制限される。言い換えると、図2に示すように、ウイグラーの両端に反射鏡を設置すると、信号源である入力光線は、先発の電子線から出力された光の一部を取り出して自由電子レーザーの入力光にすることができる。このシステムでは正帰還が働き、波束が繋がり放射電磁波はコヒーレントとなる。従って、ライン幅は非

常に狭くなり、通常のレーザーのライン幅と見合ったものになる。放射電磁波も又非常に強力になる。

電子加速器

自由電子レーザーを通常のレーザーと比較した場合、自由電子レーザーの最大の利点は任意の波長を選べることである。

自由電子レーザー用加速器には、高周波型電子線形加速器、電子蓄積リング型電子加速器、誘導型電子線形加速器、静電型電子加速器等が用いられている。自由電子レーザー用として最も多く用いられている加速器は高周波型電子線形加速器である。

図6には電子線形加速器による基本的な自由電子レーザーの構造図を示す。電子線形加速器の最も標準的な構成は、電子銃、サブハーモニック・バンチャー、プレバンチャー、バンチャー、加速管であるが、最近は、低エミッタンスの電子ビームを発生させる高周波電子銃とアルファ型電磁石に加速管で構成される加速器を用いる例が多くなってきた。

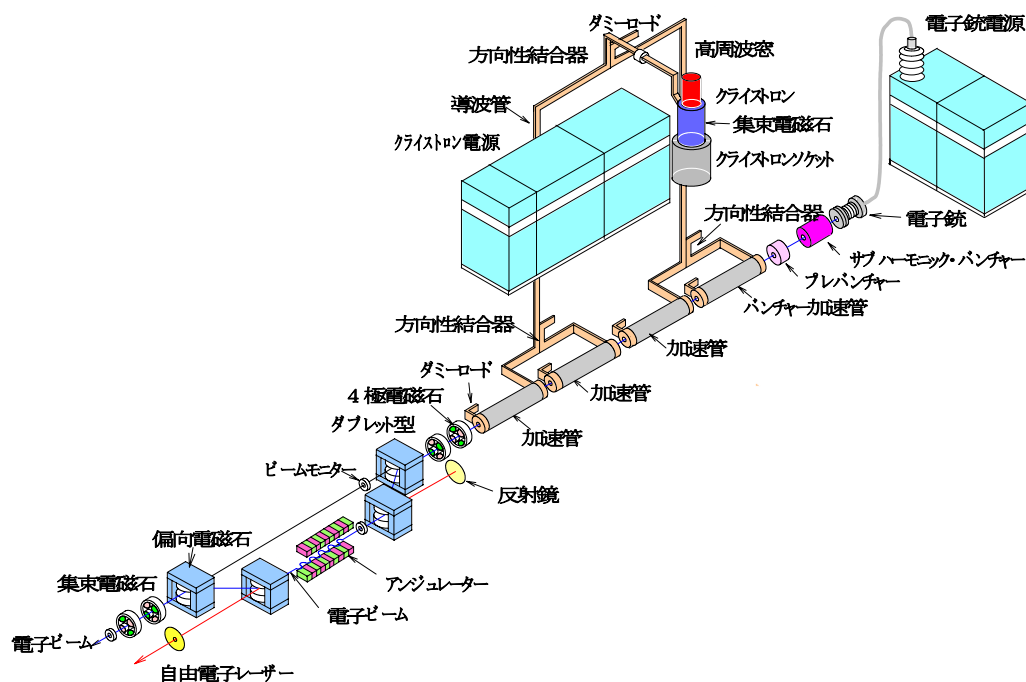


図6 電子線形加速器を利用した自由電子レーザー基本図

図7には日本大学の自由電子レーザーの構成図を示す。図8には色々な加速器を使って稼働中である世界の主な自由電子レーザー装置の波長領域と光強度を示す。

自由電子レーザー波長の同調は、ウイグラーと電子加速器の設計によって決まり、色々な種類のウイグラーにより、光スペクトルが遠赤外から紫外線の波長領域まで広がって運転されている。加えて、電子エネルギーを変えることによって、広い波長領域にわたって自由電子レーザーを同調することが可能となる。

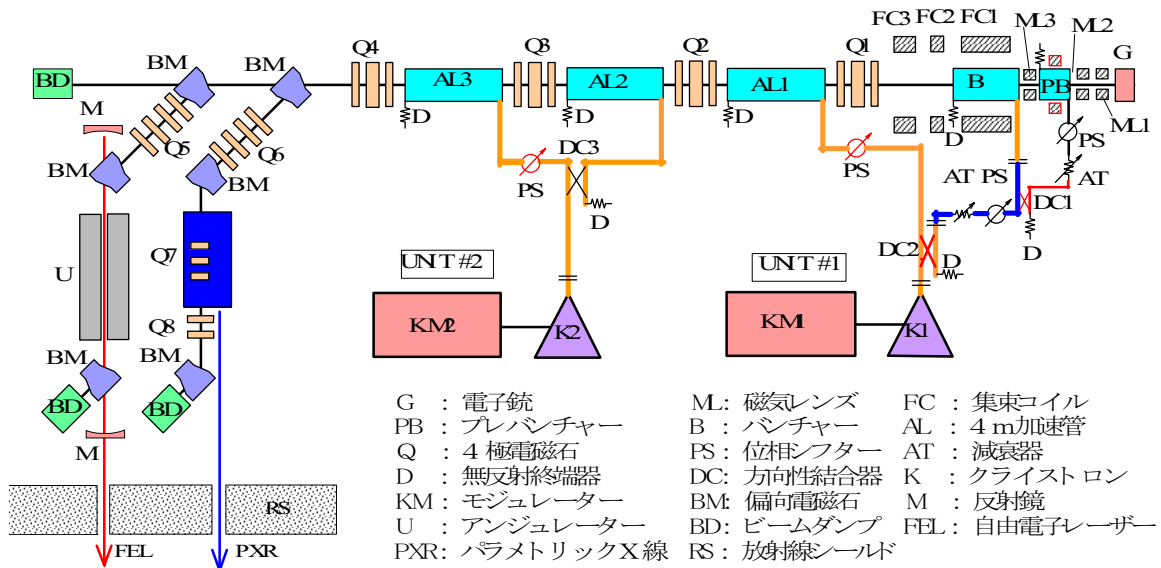


図7 日本大学電子線利用研究施設の125MeV電子線形加速器

スタンフォード大学、ロスアラモス国立研究所、カルフォルニア大学サンタバーバラ、自由電子レーザー研究所（FELI：大阪大学工学部）における実験では、図8に示すような波長の範囲が達成され、それぞれのタイプのレーザーによって達成された幅広い同調幅^{17,18,19}も同時に示してある。自由電子レーザーと通常のレーザーを比較した場合、自由電子レーザーのもう一つの重要な利点は、出力電力が大きいことである。この尺度比較に対して、つぎの2つの理由が上げられる。

第1の理由は、通常のレーザーでは膨大な量の熱が発生する。

自由電子レーザーでは熱の発生が少なく、例え発生しても簡単に取り除くことができることである。例えば、自由電子レーザーでは、通常のレーザー媒体物に発生する熱に相当するものは、高速度で流れるガスより約百万倍も早い速度で動く電子ビームの中で処理される。電子線は数十億分の1秒の間にレーザーを放出し、電子線と一緒にその熱を運んでしまう。通常のレーザーでは、入力エネルギーが消費熱に変換される。レーザーはレーザー媒体を冷却して再稼動することが出来るが、最も強力なガスレーザーの場合、高温ガスを高速でレーザーの外に運び出さなければならないために、レーザー出力が制限を受ける。

ロスアラモスでは、自由電子レーザーのエネルギー効率²⁰を上げるために、レーザー発生に使った電子線を減速してマイクロ波エネルギーを取り出し、そのマイクロ波を電子線の加速に再利用している。この方法で、電子線に残ったエネルギーの70%を回収している。

第2の理由は、自由電子レーザーでは大電力レーザーを発生できる。その理由は大電力加速器を利用出来るからである。加速器は自由電子レーザーから非常に高い性能をもつ電子ビームを要求されるが、現在もそのための開発研究が続けられている。

自由電子レーザーの最大の欠点は価格が高いことである。高性能の電子加速器は高価であり、小さな加速器でもその価格は1億円以上である。加速器は小さいレーザー装置のように借りたり簡単に移動するわけにはいかない。しかし、非常に大きな自由電子レーザー発

生装置では、レーザー電力の単位価格で、通常のレーザーと自由電子レーザーの利用は先端的な開発研究のような高価格を担う専門化された研究を進める環境に制限されるであろう。しかし、将来は、これを使って幾つかの重要な応用実験がされるであろう。

自由電子レーザーの初期の発展は理論によって左右されてきたが、その後、夥しい数の実験成果によって、そのポテンシャルの高さを証明してきた。多くの実験結果は理論的な予測を証明したが、しかし、その目的を達成するために、幾つかの過激で重要な技術革新を加速器に要求してきた。最近実験の成熟度が高まり、実験結果はしばしば理論をリードするまでになった。

レーザーの幅広い波長領域は、電子の広いエネルギー領域を使うだけでなく、技術と同様に色々な種類の加速器を使い色々な型のウイグラーを使うことにより拡がり、自由電子レーザーの用途は拡大している。

参考資料として、図9には10MeV以上の電子線形加速器による外国の自由電子レーザーを、図10には10MeV以上の電子線形加速器による日本の自由電子レーザーを示した。

尖頭電力 (GW)

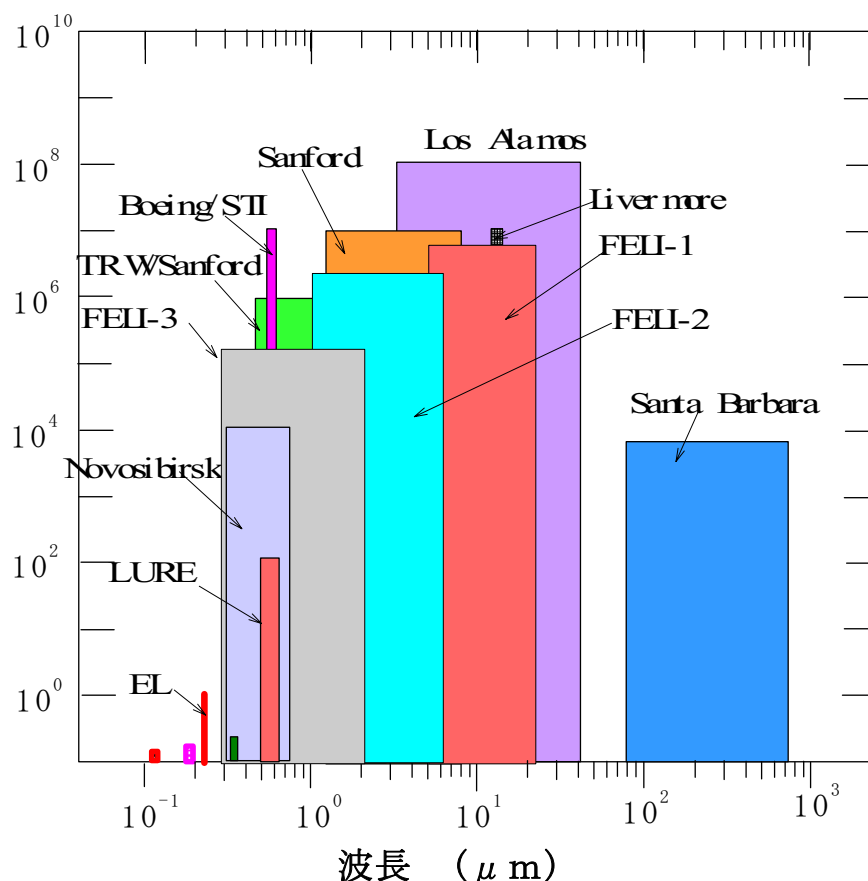


図8 世界の主な自由電子レーザー装置

赤：電子線形加速器（発振）

黒：テスト実験中

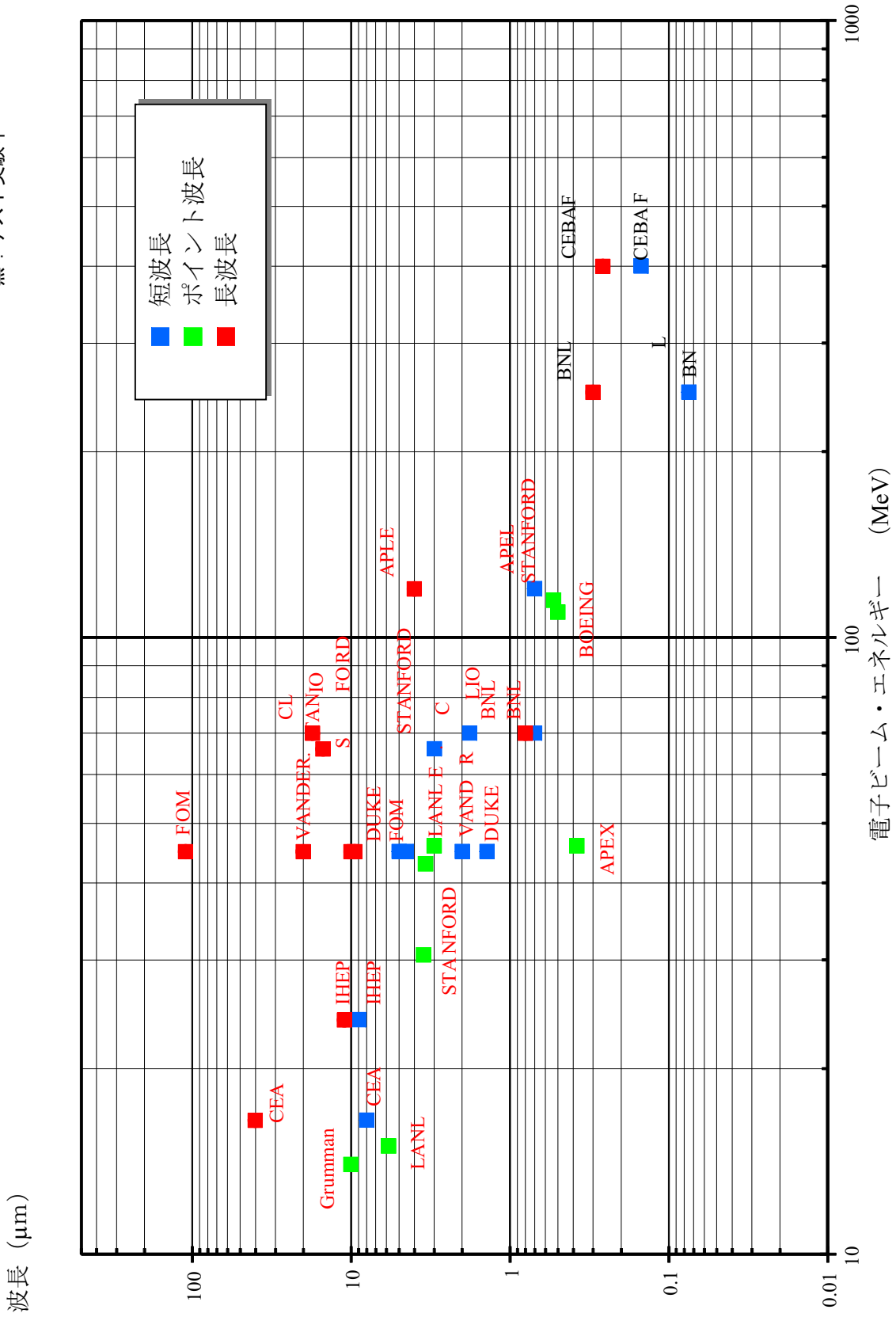


図9 欧米の自由電子レーザー（10MeV以上）電子エネルギーとレーザー波長

赤：電子線形加速器（発振）

青：電子リング（発振）

黒：テスト実験中

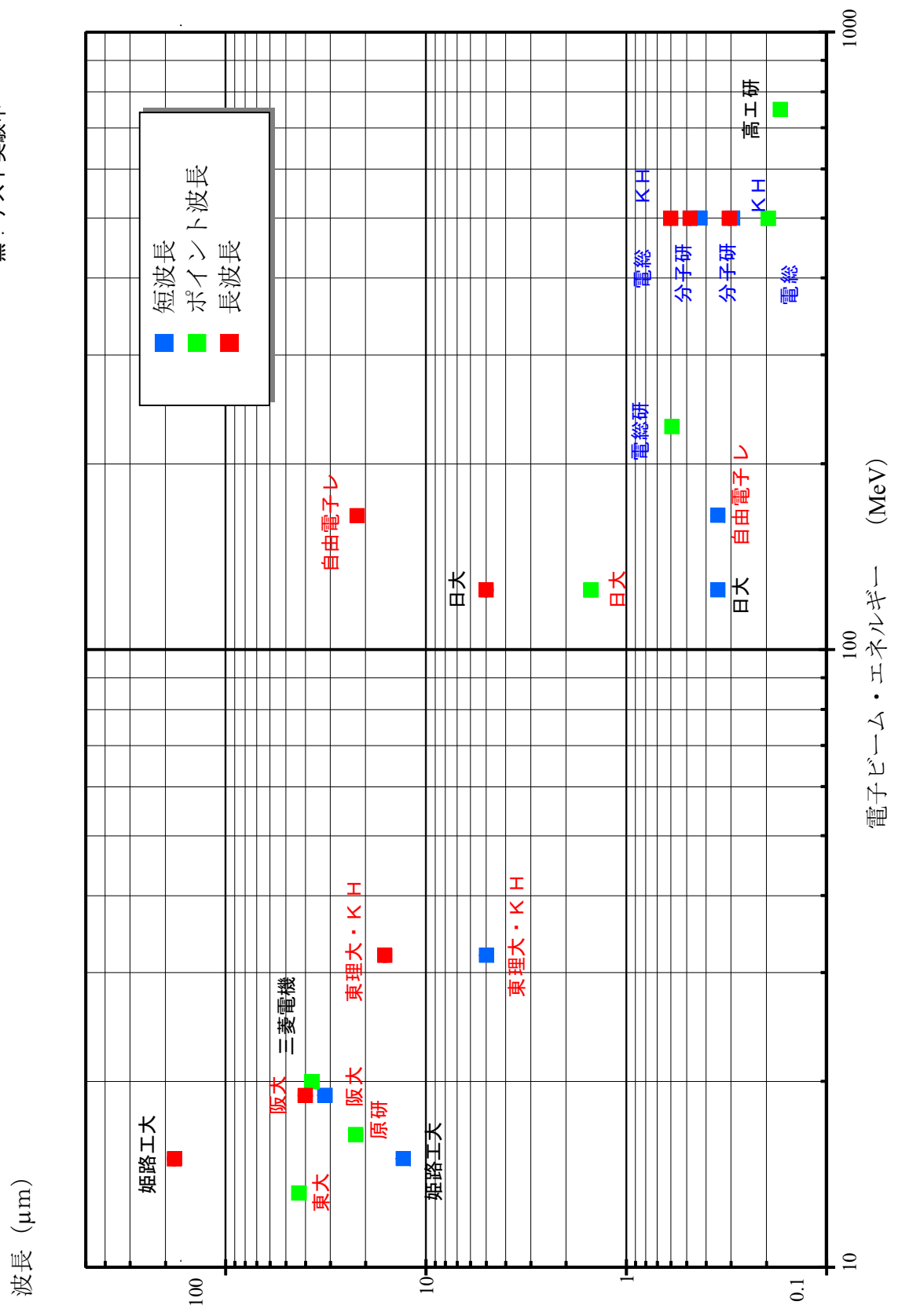


図10 日本の自由電子レーザー（10MeV以上）電子エネルギーとレーザー波長

自由電子レーザーが要求する電子ビームの性質

光共振器を使った自由電子レーザーでは、ウイグラーに入射される電子線の時間的な連携作用によって、高輝度のコヒーレント光（密着光）が得られる。先発の電子線がウイグラー磁場の働きで蛇行運動するとき加速度を受けて放射する光を共振器に蓄積し、後続の電子線が同様に蛇行運動するとき、電子線の電荷が蓄積光の電場に作用して、光電場を増幅するメカニズムを利用している。

電子線と光電場の相互作用を有効にするには、電子線のエネルギーの拡がり幅が光電場のポテンシャルと同じ程度でなければならないし、電子線の空間的な拡がりも又光空洞共振器の蓄積光の空間的な拡がりと同じ程度でなければならない。更に、光空洞の長さとその光損失係数は、パルス電子線の持続時間とビーム電流強度を規制する。即ち、自由電子レーザーにおける光増幅過程は、電子線に対する性能仕様として、エネルギー拡がりとエミッタンスが小さく、尖頭電流の大きい長パルスを要求している。

P.スプランゲルによると、コヒーレントな放射光発生メカニズムは電子線の進行方向の集群(バンチ)を基本にしている。集群できる電子線には強い作用特性がある。即ち、電子線の基本的なエネルギー拡がりエミッタンスであり、これは電子線の特性を独立に定義するのに必要な値である。エミッタンスは角度拡がりを持つ電子線による。電子線の基本的なエネルギー拡がりエミッタンスは電子線の軸速度分散を生み出す。一般に、波長、利得、効率も電子線の軸速度分散によって制限される。自由電子レーザーメカニズムにおける共鳴条件は $\{\omega - v_z(k + k_w) \equiv 0\}$ 、電子線の軸速度分散 Δv_z が

$$\Delta\beta_z \ll \frac{\lambda_p}{L} \quad (13)$$

を満足しなければならないことを含んでいる。

ここで、 $\Delta\beta_z = \Delta v_z / c$ 、 λ_p は放射光、 L は電子線と放射線の相互作用距離、 $\omega = ck$ は角周波数、 v_z は軸上の電子速度、 k_w は $k_w = 2\pi / \lambda_w$ で与えられ、 λ_w はウイグラー波長である。

電子線の軸速度分散²¹⁾は

$$\Delta\beta_z = \left[\left(\frac{\Delta E}{E} \right)^2 + \left(\frac{\varepsilon_n}{2r_b} \right)^2 \right]^{\frac{1}{2}} \frac{1}{\gamma_0^2} \quad (14)$$

で記述できる。

ここで、 $\gamma_0 = 1 + E/m_0c^2$ はローレンツ因子、 $\Delta E/E$ は基本的エネルギー拡がりの分散、 ε_n は規格化エミッタンス、 r_b は整合した電子線の半径である。(14)より、(13)の不等式は

$$\lambda > \left(\frac{2\pi L}{Z_R} \right)^{\frac{1}{2}} \left(\frac{\varepsilon_n}{\gamma} \right) f^{-\frac{1}{2}} \left[1 + \left(\frac{2r_b^2 \frac{\Delta E}{E}}{\varepsilon n^2} \right)^2 \right]^{\frac{1}{4}} \quad (15)$$

で与えられる。ここで、 $Z_R = \pi r_0^2 / \lambda$ は真空中のレーリー距離、 r_0 はガウス分布している光の最小スポット半径、 $f = 2r_b^2 / r_0^2$ は充填係数、即ち、電子線の断面積と放射光の断面積の比である。

利得が小さい系では、 $f \sim 1$ と $L \sim Z_R$ は回折効果を最小に利得を最大にすることを要求される。利得の大きい系では、電子線の包絡線が真空中のレーリー距離と等しくなり、放射光は光学的に導かれる。即ち、 $f \sim 1$ に対して $L \sim Z_R$ である。多くの場合、電子線の特質はエミッタンスの寄与によって制限されるがエネルギー拡がりの項には制限されない。即ち、 $\Delta E / E \ll (\varepsilon_n / r_b)^2 / 2$ である。このような場合には、自由電子レーザーの波長制限は

$$\lambda > (2\pi)^{1/2} \frac{\varepsilon_n}{\gamma} \quad (16)$$

で簡単化される。

「参考文献」

- 1) H.Mozt, J.Appl.Phys.22,527 (1951).
- 2) H.Mozt,W.Thon and R.N.Whitehorst,J.Appl. Phys. 24, 826 (1953).
- 3) R.M.Phillips,IRETrans.Elec.Dev.7,231(1960).
- 4) N..M.Kroll and W.A.McMullin, Phy.Rev. A17, 300 (1978).
- 5) John M.J.Madey, J.Appl.Phys.42,1906 (1971).
- 6) F.A.Hopf, et al., Opt.Communic. 18, 4 (1976).
- 7) W.B.Colson, Phy. Lett. 59A, 187 (1976).
- 8) L.R.Elias,et al.,Phys.Rev.Lett.36, 717 (1976).
- 9)D.A.G.Deacon,etal.,Phys.Rev.Lett.38,892 (1977).
- 10)M.Billardon,etal.,SPIE,Bellingham,WA, (1984).
- 11) J.A.Edghoffer,et al.,Phys.Rev.Lett.52,344 (1984).
- 12) R.W.Warren, et al., Proceedings of Int. Conf. on Lasers 1983.
- 13) D.B.McDermott, et al., Phy.Rev.Lett.41, 1368 (1978)
- 14) I.B.Drobnyazko, et al.,Proc.Inter.Conf.on Free- Electron Lasers Naples, FL, August 28 1989.
- 15)T.J.Orzechowski,etal.,Phys.Rev.Lett.54,889 (1985)
- 16) B.E.Newnam, et al., SPIE 453, 1984
- 17)S.V.Benson,etal.,11th Inter.Conf.FEL. Naples, FEL, August 28 1989.
- 18)B.E.Newnam, et al., IEEE J. Quant. Electron. QE-21, 867 (1985)
- 19)L.R.Elias,IEEE,J.Quant.Electron. QE-23, 1470 (1987)
- 20)D.W.Feldman, et al., IEEE J. Quant. Electron. QE- 23, 1470 (1987)
- 21)P.Sprangle,etal,Nucl.Instr.Meth.,A331,6(1993)

4. 各作業グループからの報告

レーザービームライン

研究代表者

日本大学 原子力研究所 教授 佐藤 勇

研究従事者

日本大学 原子力研究所 教授 佐藤 勇
日本大学 原子力研究所 教授 早川 建
日本大学 原子力研究所 助教授 田中 俊成
日本大学 原子力研究所 助手 早川 恭史

研究目的

レーザービームラインは自由電子レーザーを各レーザー照射実験室に効率よくレーザーの優れた特性を損なわずに輸送し、必要に応じて、同時に各実験室で使えるようにすることを目的としている。自由電子レーザーは可変波長高輝度単色レーザーであり、波長領域は広く（赤外線～紫外線：5～0.35 μm ）大強度である。また、自由電子レーザー発生装置から最も近いレーザー照射実験室までは約 20m、最も遠いレーザー照射実験室までは約 55m である。したがって、各照射室に均等に輸送するには、レーザービームを平行光線にすることが重要であり、これらの機能を満す特殊光学系も併せて開発する。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

自由電子レーザーは高性能の高エネルギー電子線を蛇行運動させる時に発生する放射光を光空洞共振器に蓄積し、後続の蛇行電子線が蓄積放射光に作用し誘導放射することによって発振状態に成長する。したがって、自由電子レーザーには、ポンピング媒質を必要とする通常のレーザーのように出力パワーが制限される要素がないために、大電力を出力することが可能である。しかし、出力パワーは光空洞共振器に蓄積される光強度に対する反射鏡の耐性に制限される。自由電子レーザーは波長可変な高輝度単色光でかつ大電力であり、この優れた特性を持つレーザーを各実験室まで効率よく優れた特性を損なわず輸送するには光学素子に開発要素を伴う。

「現地工事」

レーザービームラインは加速器棟の光源から新実験棟の各実験室（9つ）に設置される。レーザービームラインには分岐ラインが設けられ、レーザーはそれぞれの照射室に輸送するが、新実験棟の竣工は平成12年3月末となった。したがって、平成12年度内に構成部品を製作し納入し、現地工事は実験棟の竣工後に行うために、ビームラインの平成12年度内の完成は物理的に不可能であった。一方、現地工事は、実験棟にビームラインを設定し、アンカーボルトを埋め込み、架台を据付け、その上に、真空容器を組立てみ立て、光学システムを導入し光学的に調整してからフランジ封入し真空にする。これらの一連の工事には最短で約2ヶ月半の作業期間が必要となり、新実験棟のビームラインの完成は平成13年6月下旬～7月上旬になる。

「特殊光学系」

自由電子レーザー装置から出力される球面波を平面波に変換し各実験室で効率よく使えるようにするには、特殊な光学系を設計し非球面光学要素を製作する必要がある。その設計から製作まで1年以上の年月を要し、単年度で完成することは困難であり、平成12年度は特殊光学系の設計のみを行い、製作は平成13年度に移行することにした。

「球面波から平面波の変換」

この光空洞共振器に直径0.5mmの穴をあけて、レーザーを取り出すと発散角が最も大きくなる最大波長5 μm では、発散角が約 $5 \times 10^{-3}\text{rad}$ である。そのまま、最も遠いレーザー照射実験室（55m）まで光を輸送するとレーザー直径が約275mmとなる。これでは実質的に光輸送が不可能である。そこで、回転楕円面の一方の焦点を点光源とし、その像をもう一方の焦点に結像させ、この点を放物面の焦点とする球面波を平面波にして光学系を検討した。これは、X線光学に於けるウォルター型に近い光学系である。この光学系により、波長5 μm の赤外線は約30mm直径の平面波として輸送できる。

「光学ミラーの耐性」

本研究施設の自由電子レーザーの平均出力は波長領域が5～0.3 μm では世界最大級である。ビーム電流が200mAで自由電子レーザーが飽和点に達すると、自由電子レーザーは、マクロパルス当たり最大2ジュールの光エネルギーを約10マイクロ秒の間に発生する。この場合、マクロパルスの最大電力は200kWとなる。更に、電子ビームが2ピコ秒に集群している場合には、光のピーク電力は35MWになる。即ち、この光（電磁波）が直径30mmの平面波で輸送されると仮定すると光の電界強度は4.3MV/mとなるが、金属平面鏡はこの光強度に十分に耐える。しかし、尖頭出力がMWを超えるために、反射率の高い耐久性に優れた特殊な光学系を使用することは必須の条件である。

「レーザービームラインの輸送システム」

共通研究施設では複数の実験が同時に進行することが多い。9つのレーザー照射実験室は実験棟に分散している。9ヶ所の実験室で同時にレーザーを使用する場合、レーザーを直列に配分するとレーザー電力の減衰は終端に近いほど大きくなる。そこで、ビームラインの途中で2系統に分岐され、1系統は2つの実験室に、もう1系統は7つの実験室に、それぞれレーザーを輸送することにした。レーザービームラインは、実験室の障害に成らないように、実験室の床下ピットに封入した。また、実験室のレーザーレベルの高さは実験者の目の高さより低く押さえ、900mmに設定した。実験棟1階に設置されたレーザービームラインの配置を図1、実験棟2階を図2、各レーザー照射実験室のレーザー導入装置の断面を図3にそれぞれ示してある。

「分岐ライン」

共通研究施設では各実験者が本番実験に向けて常時実験準備を行いながら待機している。実験準備のためには本番実験に必要なレーザーからずれた波長で弱いレーザーでも供給されると非常に役に立つ。このように複数の実験が同時に進行する条件にも対応できる光学系の開発とその遠隔制御が重要であり、各実験室には2枚の鏡を個別に動かして、光を導入する方式を選択した。

反射鏡は全反射と素通し平面鏡（ビーム・スプリッター）の2種類である。全反射鏡は、5～0.35 μm の波長領域で比較的反射率が一定に近い、アルミ蒸着平面鏡を採用した。ビーム・スプリッターには、この波長領域で透過率が平坦なフッ化カルシウム（CaF₂）やサファイアの平面鏡の何れかを採用することにした。ビーム・スプリッターにフッ化カルシウムを採用すると、平面鏡の透過率は約95%であり、反射率は5%以下となる。分岐点の光配分を4対5とすると各系統の終端でも約40%のレーザーパワーを享受できる。

赤外線領域のレーザーは大気中を輸送すると大気による減衰が大きく輸送効率が低下し、湿度によって減衰率も大きく変化する。また、大気には小さいが屈折率がありレンズ作用をもつ。大気の揺らぎはレンズ作用によりレーザーの揺らぎになり、レーザーは不安定になる。

「レーザー照射室の安全」

大気中のゴミなどの異物は高電力レーザーを反射し、吸収する。これらの照射物は燃えたり発煙するだけでなく、反射光は目や皮膚を損傷し危険である。以上の理由から、レーザーは真空ダクトを用いて輸送することにした。赤外線レーザーが出力されている場合、目で感知出来ないために、外から入室する者は損傷の危険が伴う。この危険防止のために各照射実験室のレーザー出力窓にはシャッターを設け、照射実験室の入り口にレーザー照射中の表示を設けその動作をシャッターの開閉と連動させた。

「平面鏡の面精度」

一方、自由電子レーザーは加速器室の光空洞共振器から複雑な経路を経て実験棟のレーザー照射実験室まで輸送される。レーザーは光源から12個の反射鏡で偏向されて照射実験室に導かれるが10個の反射鏡は平面鏡である。平面鏡は平坦度からのズレや平面粗度がレンズの働きをする。この影響を避けるために、レーザービームラインの上流には導入される平面鏡の平坦度は $1/20\lambda$ とした。実験室に近いレーザーラインに導入される平面鏡は高精度の平坦度を必要としないので $1/10\lambda$ とした。平面鏡の温度変化は母材の伸縮により変形し、平面鏡はレンズの働きをもつ。この性質を避けるために、平面鏡の母材には、線膨張係数の小さいゼロデュアか石英のどちらかを用いることにした。

「平面鏡の調整機構」

自由電子レーザーを各照射実験室まで導入するには、レーザービームラインに設置される平面鏡を微細に調整する駆動機構が必要である。平面鏡は真空容器に封入されるために、真空容器の外部から駆動することになるが、平面鏡は非常に僅かな応力でも変形するために、そのホルダーの構造には色々な面から検討し細心の設計を行った。また、平面鏡を収納する真空容器も排気すると変形する。したがって、最終調整はレーザービームラインを排気を完了した後に行うことにした。建設コストの制限から、外部から制御する平面鏡の調整機能は2軸に限定し、ビームラインの分岐点、直角偏向点、照射実験室の最終偏向平面鏡にとどめることにし、微調整は真空用の回転機構で行うことにした。したがって、各照射実験室の分岐平面鏡と反射平面鏡は、大気中でアライメント・レーザーを使って、排気前に半固定調整を行った。各レーザー照射実験室では、ビーム・スプリッターと全反射鏡を外部から駆動できるが、この制御方式については、利用者研究連絡会で最適な方法を検討して結論を出すことにした。

「真空排気システム」

真空紫外線レーザー用真空容器、並びに、レーザービームラインには多くの平面鏡が導入される。鏡の油膜汚染を避けるためには、極高真空の領域を維持できなければならない。また、レーザー照射実験室にも多数の鏡が設置されている。粗排気装置は新実験棟に設置されたダクトに接続して屋外に排気する機能を持たせた。したがって、ビームライン並びに各種真空容器の排気の際にロータリーポンプから排出されるオイルミストは実験室に排出しないように徹底することにした。

実験計画（平成13年度以降）

平成13年度は、球面波を平面波に変換して平行ビームにする特殊光学系の光学反射鏡を製作する。これらの光学系を設置する真空容器は平成12年度に製作したが、取り付ける支持枠、並びに、駆動システムは、まだ定まっていない部分があり、これらの詳細が決定さ

れ次第、製作に取りかかる手筈に成っており、反射鏡の最終仕様に照らし合わせて製作を開始することになる。

平成 13 年 5 月 26 日、最初の自由電子レーザー発振に成功した。しかし、レーザー飽和に達していないが、パルス幅が広く、マクロパルスの間引いていないので、世界最強のレーザー電力になる可能性があり、どんな事態が発生するか予測出来ない面がある。したがって、これからの実験結果に依存するところが多いので、当面は成り行きに任せることになる。

実験備品等

特殊反射鏡	2 面
ハーフミラー	10 面

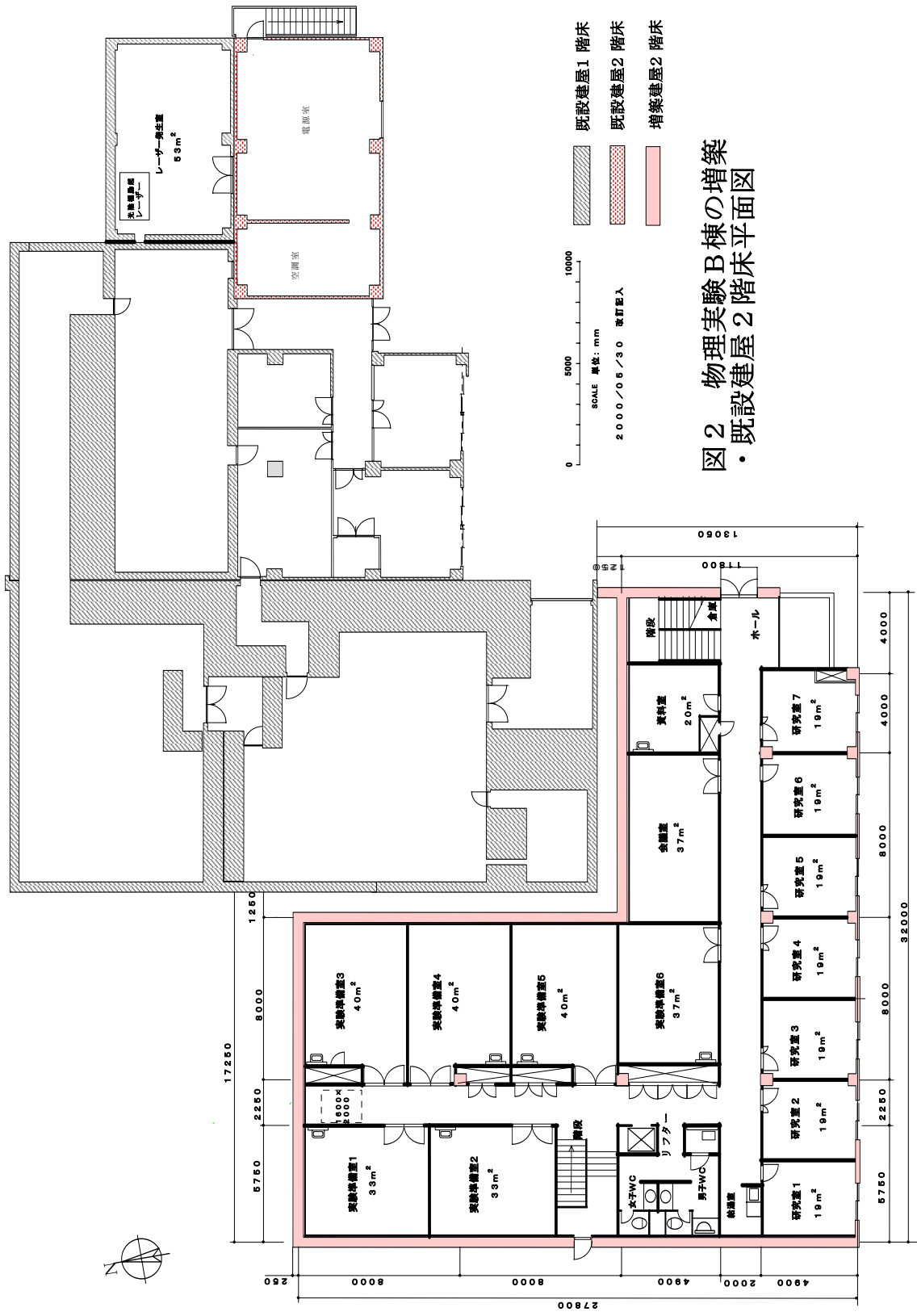


図2 物理実験B棟の増築
 ・既設建屋2階床平面図

増築実験棟: 2階床面積 (609.6 m²)

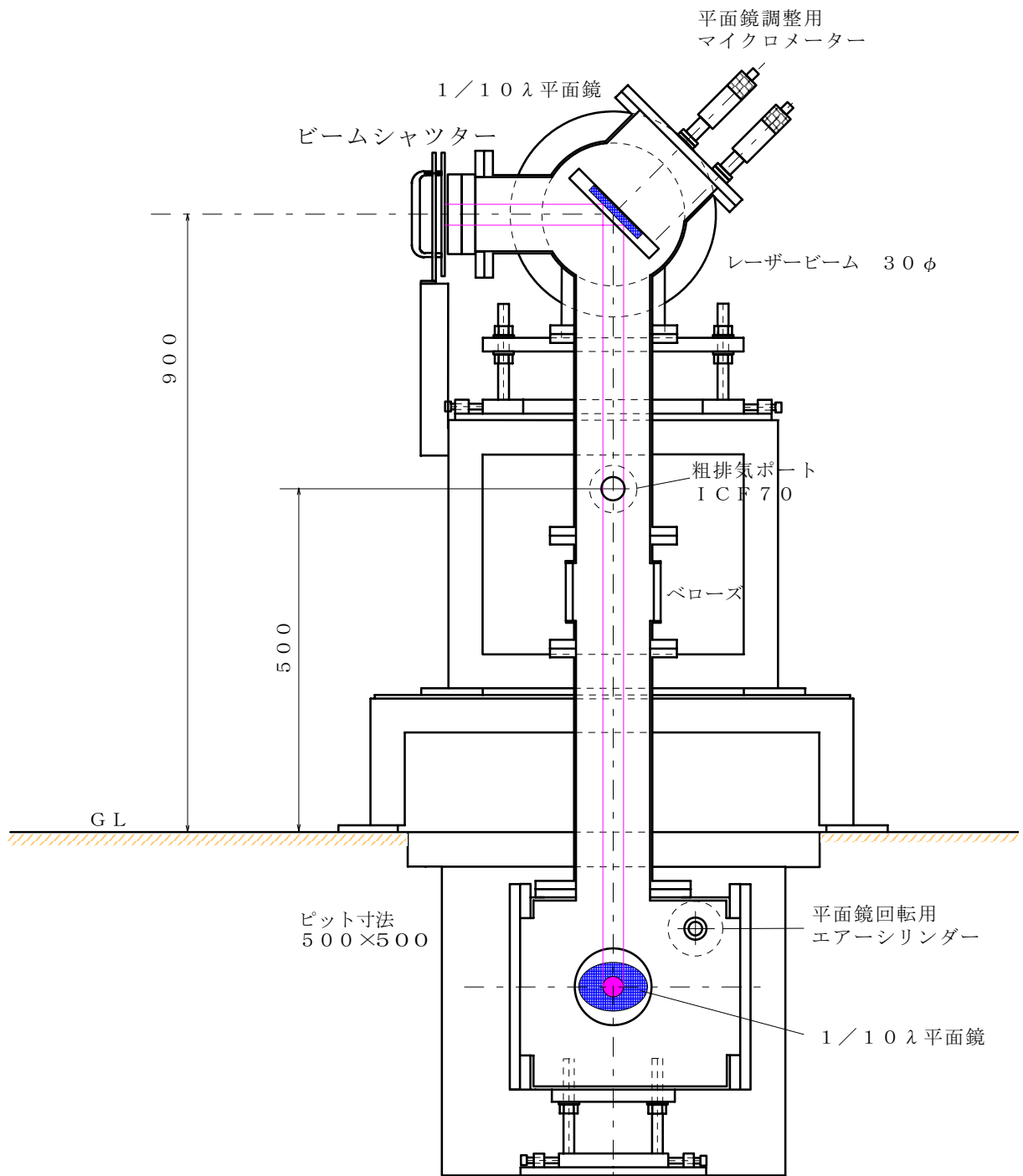


図3 自由電子レーザー出力ポート側面の断面図

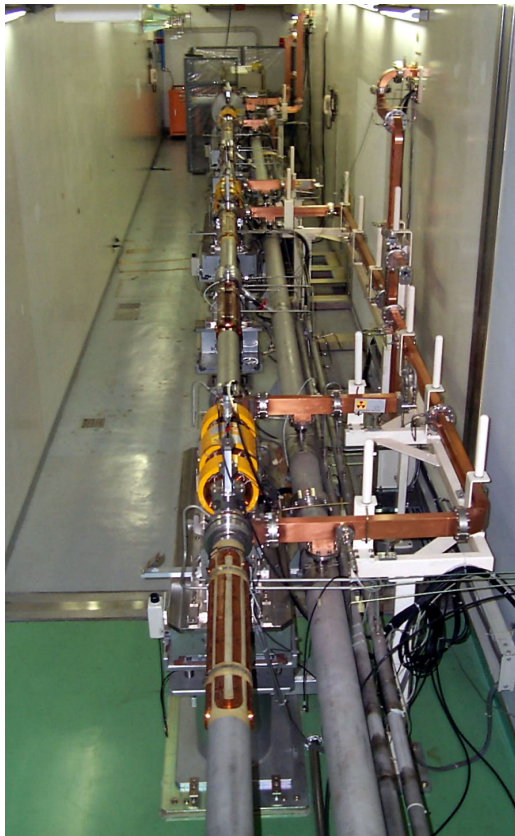


図4 125MeV 電子線形加速器

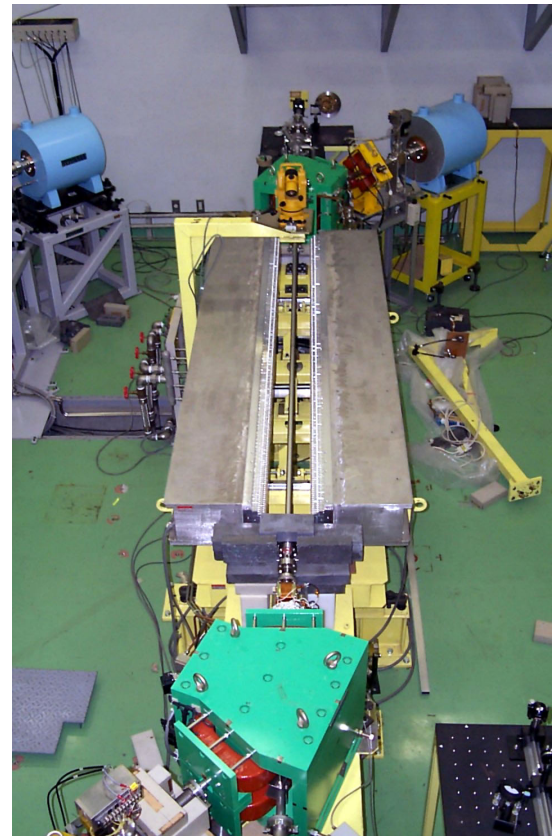


図5 アンジュレーター

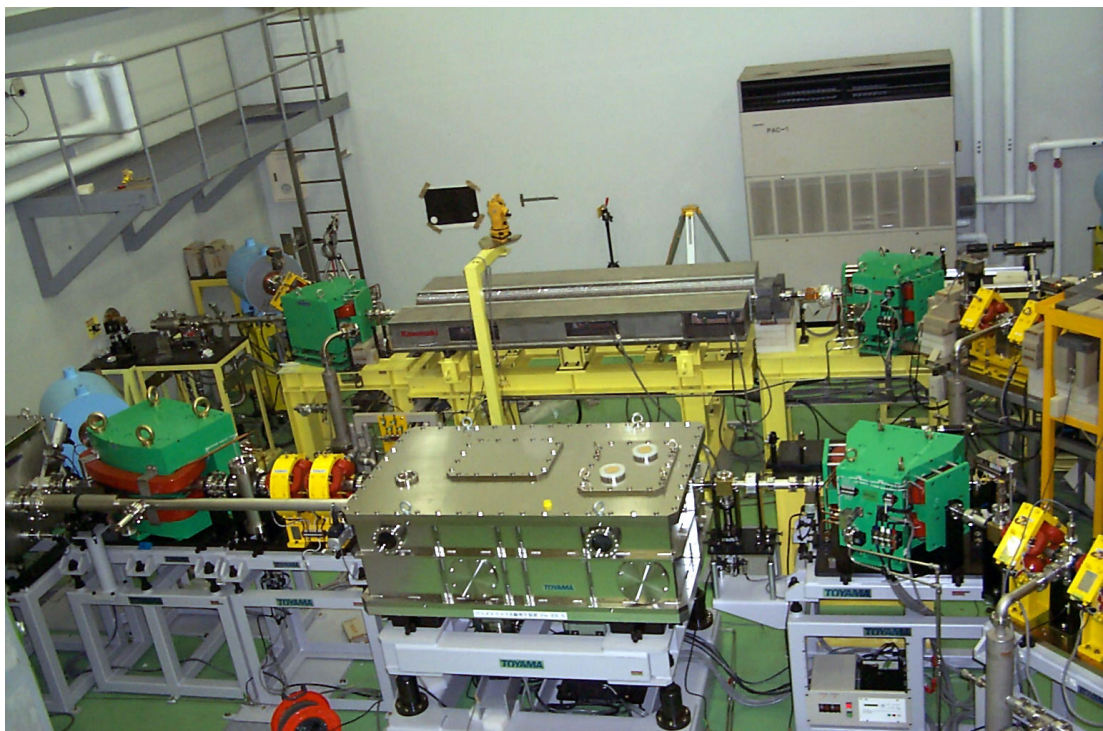


図6 アンジュレーター (上) とパラメトリック X線発生装置 (下)

フォトカソードマイクロ波電子銃の開発

研究代表者

日本大学 原子力研究所 教授 早川 建

研究従事者

日本大学 原子力研究所 教授 早川 建
日本大学 原子力研究所 助教授 田中 俊成
日本大学 原子力研究所 助手 早川 恭史
日本大学 理工学研究科 量子理工学専攻 博士課程後期3 横山 和枝
日本大学 理工学研究科 量子理工学専攻 博士課程後期1 菅野 浩一
日本大学 理工学研究科 量子理工学専攻 博士課程後期1 境 武志

研究目的

本研究は、可視から紫外領域の自由電子レーザーを発生させるために必要な、フォトカソードマイクロ波電子銃を開発することを目的とする。

可視から紫外にかけての短波長の自由電子レーザーは、赤外・遠赤外の場合に比べて、さらに良質の電子ビームが要求される。電子線形加速器のビームの特性は主に、低エネルギー部の、空間電荷効果が顕著に現れる領域で決まる。すなわち、電子銃における陰極からの電子の引き出し電圧が高ければ高いほど良質なビームが期待できる。現在赤外の自由電子レーザーの発生に使用している静電場を用いた電子銃では、放電による制約のため、5~10MeV/m 程度の電場で、100~200kV の加速電圧が上限となっている。これに対して、マイクロ波共鳴空洞を利用した電子銃では、これより一桁以上大きい電場と加速電圧を、放電させることなく作り出すことができる。

マイクロ波電子銃では、この大きな電場と加速電圧により低エネルギー領域を速やかに通過させ、空間電荷効果による電子ビームの質の低下を最小限に抑えることができる。また、フォトカソードを組み合わせることにより、熱陰極を使った場合に問題となるバックバンブドメントによるパルス幅の制限を取り除くことができる。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

マイクロ波共鳴空洞及びビームトレースのシミュレーションコードを用いて、空洞内電磁場分布及び、その電磁場による電子ビームの軌道の解析を行い、最適な空洞形状を求めた。これに基づいて、マイクロ波電子銃の設計を行い、前年度に製作を完了した。

フォトカソードをドライブするレーザーは、量子効率を考慮して、YAG レーザーの 3 倍高調波を増幅して使うことにした。パルス幅約 55psec、繰り返し 89.25MHz、パルス列の長さ 20µsec、パルス当たり 40µJ のエネルギーを持つドライブレーザーを製作した。

実験計画（平成 13 年度以降）

マイクロ波電子銃の低電力試験を行い、空洞内に励振される電磁場分布の確認及び、導波管との結合係数の調整等を行う。次に、大電力試験を行うためのテストベンチを組立て、大電力投入時の熱的変形、空洞内放電の有無などの確認を行う。

加速マイクロ波を 32 分周した信号により、ドライブレーザーにトリガーをかけ、マイクロ波に同期したレーザーパルスになるように調整する。

ドライブレーザーをフォトカソードに照射し、量子効率を測定する。

マイクロ波電子銃を加速器に組み込むためのレーザービームラインを設計する。

実験備品等

消耗品

旅費

パラメトリック X 線放射による波長可変単色 X 線源の開発

研究代表者

日本大学 原子力研究所 助 手 早川 恭史

研究従事者

日本大学 原子力研究所 助 手 早川 恭史
日本大学 原子力研究所 教 授 佐藤 勇
日本大学 原子力研究所 教 授 早川 建
日本大学 原子力研究所 助教授 田中 俊成

研究目的

125MeV 電子線形加速器を用いた単色 X 線源を開発し、応用研究に利用できるように実用化することを目的とする。電子エネルギーの制約から、従来の制動放射を利用する方法では単色 X 線源の実現は困難であるため、高エネルギーの電子線を結晶性物質に照射することによって生じるパラメトリック X 線放射 (PXR) という現象を X 線源の素過程として採用する。PXR は単色性、指向性に優れ、結晶の角度によって波長の選択が可能である。ビーム電流の大きい線形加速器と組み合わせることにより、ピーク強度に優れた単色パルス X 線源の実現が期待できる。PXR による X 線源を実用化するために、専用ビームラインや PXR 発生装置を開発、X 線ビームラインの整備を行う。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

平成 11 年度までに PXR の理論計算などを行っており、それに基づいて平成 12 年度から PXR 発生装置の開発に着手した。実用化を意識して線形加速器に専用のビームラインを新たに設置することにし、必要とされる電子ビームの質を計算してビームラインの設計を行った。また PXR 発生装置本体は、X 線の取り出しポートを固定したまま動的な波長選択を可能するために二結晶型の装置を考案し、具体的な設計を行った。平成 12 年度後半には PXR

発生装置の製作と PXR 用のビームラインの設置を開始し、平成 13 年 3 月に竣工するに至った。これと並行し、この PXR 発生装置で得られる X 線ビームの特性を数値計算でシミュレートし、それに基づいて X 線の集光光学系の設計を行った。また、装置の主要部であるゴニオメータをイーサネットでリモート制御するためのシステムの開発も行った。

実験計画（平成 13 年度以降）

PXR発生装置自体は完成するに至ったので、平成13年度から実験的な基礎研究を開始する。リモート制御システムの動作確認も含めて、まずは電子ビーム電流の少ない状態でX線の発生の確認を行う。その後、負荷の少ない状態での基礎研究として得られるX線ビームの形状、エネルギー分散やスペクトル、結晶回転角による波長の変化などの質的な特性を詳細に調べ、そしてビーム電流と得られるX線強度との対応などの量的な研究に移行していく。この基礎研究の段階で問題が生じなければ、大電流の照射による結晶の熱負荷の影響などより実際的な研究を行い、X線源の実用化に繋げていく。この過程で集光系の整備や性能のチェックも行っていく。

これと並行し、パルス線源である利点を生かすために X 線的高速測定システムの導入を図り、パルス同期での時間分割測定やピコ秒オーダーでの時間構造測定を可能にし、応用の可能性を広げる。基礎研究として X 線源自身の時間構造を高速測定システムによって調べていく。

自由電子レーザーの炎症メディエーター産生への影響

自由電子レーザーの歯根膜細胞の発痛、骨吸収因子産生への影響

研究代表者

日本大学 松戸歯学部 教授 安孫子 宜光

研究従事者

日本大学 松戸歯学部 教授 安孫子 宜光
日本大学 松戸歯学部 講師 平塚 浩一
日本大学 松戸歯学部 講師 多田 充裕
日本大学 松戸歯学部 助手 五関 たけみ

研究目的

低出力レーザー照射は創傷、難治性潰瘍に治癒効果があると報告されて以来、炎症、疼痛に対する抑制作用、骨折の治癒促進作用も証明されている。このような背景からレーザー照射の積極的な応用が期待されるが、その作用機序には未だ不明な点が多く、レーザー治療をさらに開発、推進するためには、レーザーの生物学的効果の機序の解明を実証科学的に発展させる必要がある。本研究では、細胞培養系を応用してレーザー照射による炎症メディエーター産生への影響を検討するために、自由電子レーザーによる種々のレーザー波長による生物学的効果の影響をとくに遺伝子発現プロファイルをモニターリングすることで解明することを目指す。

研究経過（平成12年度）実験準備の状況など

実験装置等：

初年度では、可変波長を提供できる自由電子レーザーが未だ得られないことから、Ga-Al-As (830nm)の低出力レーザー装置を用いて予備実験を進めた。また、原子力研究所で細胞培養関連の装置が設置されていないことから、当面、松戸歯学部共同研究室で実験を進めた。ただし、初年度（平成12年度）にマイクロアレイ解析システムが購入されているので、その予備実験を始めている。

研究経過：

歯肉炎、歯周病は、口腔の特異細菌の感染によって発症する。そこで、歯肉細胞の感染モデルとして、歯周病原細菌であるCampylobacterrectusから内毒素であるLPSを分離し、ヒト歯肉線維芽細胞の培養系に添加して、炎症メディエーターの産生が増大する実験系を設置した。そして、この実験系にGa-Al-As(830nm)のレーザー照射を試み、炎症メディエーターの産生に対する影響を検討した。その結果、このレーザー照射は、歯周病原菌の内毒素によって産生されるPGE2、IL-1bを低下させた。そして、この機序はPGE2産生経路の律速酵素であるシクロオキシゲナーゼ、IL-1b、の遺伝子発現を抑制することよることがRT-PCRにより明らかとなった。

研究成果：

1. Nomura K, Yamaguchi M, Abiko Y: Inhibition of interleukin 1b production expression in gingival fibroblasts by low-energy laser irradiation. Lasers Med Sci, in press. 2001
2. Sakurai Y, Yamaguchi M, Abiko Y: Inhibitory effect of low-level laser irradiation on LPS-stimulated prostaglandin E2 production and cyclooxygenase-2 in human gingival fibroblasts. Eur J Oral Sci, 108(1): 29-34, 2000.

実験準備の状況：

初年度に購入した、マイクロアレイ解析システムについては、すでに試運転を始めており、現在、約70遺伝子のPCR産物をガラススライドにスポットしてDNAマイクロアレイの作成を進めている。また、細胞から抽出したmRNAを蛍光色素cy3、cy5で標識し、ハイブリダイゼーション、スキャンし満足のいく解析結果をえている。

実験計画（平成13年度以降）

使用実験室名

資料分析室3、レーザー照射実験室（医用1）

アンジュレーターの周期長の制限から赤外線領域を想定して、5 μ m～0.8 μ mの自由電子レ

レーザーの照射が実現する予定であることから、資料分析室3に細胞培養装置を設置し、ひとの歯周組織細胞を培養する。レーザー照射実験室（医用1）に運び、ただちに歯周病原細菌内毒素であるLPSを培養系に添加して、同時に自由電子レーザーを種々の条件で照射する。細胞からmRNAを回収し、マイクロアレイ解析システムを用いて、関連遺伝子の同定と遺伝子発現レベルの変化を調べる。

必要機器

細胞培養装置CO2インキュベーター
クリーンベンチ
ベンチトップ遠心機
冷却小型遠心機
オートクレーブ
フリーザー
冷蔵庫
細胞破碎機

必要機器については他の研究グループと共同に使用できるものについての調整が必要と考えられる。（安孫子、清水、田中研究グループで重複するものがあるが複数機必要であるものもある。）また、昨年以後に必要と考えられるものおの追加も必要と考える。（細胞、組織からRNA抽出するのに必要な細胞破碎機）マシンタイム、レーザー波長、光強度等培養細胞が準備できる時期にあわせて各波長、各光強度で10-20分間ずつ照射する。

どのレーザー波長、光強度がえられるかは、不明であるので試行錯誤的に行わざるを得ない。

われわれのこれまでの予備実験では830nmのGa-Al-Asの低出力ダイオードレーザーで生物学的効果が得られているので、この波長を中心に5000nmまで拡張し、長波長域でより良い効果が得られるか実験を進める。

平成13年度以降の実験計画

アンジュレーターのさらなる開発の進展によって、短波長の自由電子レーザーを同様の細胞培養実験系で検討していく。遺伝子発現プロファイルから興味深い遺伝子群について表現系的な実証を確かめていく。

実験備品等

細胞培養試薬等
mRNAサンプル蛍光標識試薬
マイクロアレイ用スライド
遺伝子プローブ（Custom full Set human PCR Product 26）

本研究グループ（松戸歯学部）と歯学部の清水グループの研究アプローチは、共にこのマイクロアレイ解析システムを応用したトランスクリプトーム研究が根幹となる。しかしながら、この研究ではスポットする遺伝子のプローブが成功の鍵をにぎるが、現在、Amersham Pharmacia Biotec 社から、ひと遺伝子 10000 種類の PCR DNA プローブセット（現在、入手可能で最大の遺伝子数）Custom full Set human PCR Product 26 が供給されている。消耗品としてこの遺伝子プローブキット購入は是非とも実現したい。他の研究グループでもこのマイクロアレイ解析システムを応用するところがあれば、協力をお願いしたい。

レーザーの波長の違いが歯の硬組織に及ぼす影響

研究代表者

日本大学 松戸歯学部 教授 池見 宅司

研究従事者

日本大学 松戸歯学部 教授 池見 宅司

日本大学 松戸歯学部 大学院生 飯田 浩雅

日本大学 松戸歯学部 大学院生 木村 大

研究目的

現在、歯科臨床で応用されているレーザーは CO₂、Nd-YAG、Er-YAG、Ar および半導体レーザーで、保存修復学の分野では硬組織を対象としたレーザー研究が進められている。歯質削除には主として Er-YAG、Nd-YAG が用いられ、CO₂ や半導体レーザーも試みられている。しかし、現在の齲蝕治療に求められている罹患歯質の選択的な除去や歯質の削除能の面から考えると、現状ではエアタービンやエンジンによる切削に勝るものは見あたらない。また、齲蝕予防の観点から、レーザーによる歯質強化に関する研究もなされているが、フッ化物との併用による報告が多く、他の発想が展開されていない。さらに、Ar による生活歯の漂白やコンポジットレジンの重合硬化への応用が研究されているが、これらについてもレーザーの応用で特別改善されたとの報告は得られていない。しかし、レーザーには無痛的な歯質削除や罹患歯質選択的除去の可能性を有しており、局所的に熱エネルギーを与えることが出来るという歯科医療の将来にとって非常に魅力的な長所を持っている。そこで、基礎的にエナメル質や象牙質あるいは修復材に与える影響について、それらの組成の吸収波長を基にしてアブレーションとアニーリングの両面から研究を行う。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

レーザー用機器として、XY 軸ラックオピニオンステージ、Z 軸インパルスステージ、自

動ステージ（シグマ光機）等は既に準備している。表面形状測定器（キーエンス）、色差計（ミノルタ）及び光沢計（試作）は歯質表面の形状や耐酸性を調べるために準備してある。SEM は松戸歯学部施設を使用する。また、試料表面の元素分析には生産工学部の ESCA を利用させていただく。平成 12 年度の研究では CO₂ レーザーのスーパーパルスと NaF の併用で歯質表面に耐酸性が獲得されたことを確認している。

実験計画（平成 13 年度以降）

歯質削除用に主に使用されている Er-YAG レーザーの 2.94 μ m と Nd-YAG レーザーの 1.06 μ m の波長を中心として、0.1W～5W の出力で照射した際の牛歯エナメル質、象牙質及び各種修復材料に及ぼす影響を調べる。削除能と表面構造の変化を表面形状測定器と SEM にて測定、観察する。さらに、半導体レーザーの応用を考慮して 820nm の波長を主とした、0.1～5.0W の出力を使用して行う。その際、罹患象牙質は染料による染め出しを行って、レーザー照射による削除性能について調べる。Ar レーザーに相当する 488nm の波長では、漂白に使用した際のフリーラジカル量を測定し、効果的な漂白法の確立を目指す。さらに、表面の色調変化と構造変化について色彩色差計と SEM で調べる。また、天然歯だけでなく漂白後の歯質耐酸性の向上にフッ化物との併用処理を行い、耐酸性獲得試験を行う。罹患歯質染色材はその染色剤の赤外吸収波長を参考として選択し、罹患象牙質のアブレーションを目的とした実験を行い、フッ化物の種類については、レーザー照射でアニーリングされる材料を検討し、実験を行う。

実験備品等

消耗品

旅費

MIS 構造素子の放射線照射効果に関する研究

研究代表者

日本大学 理工学部 電子情報工学科 教授 大西 一功

研究従事者

日本大学 理工学部 電子情報工学科 教授 大西 一功

日本大学 理工学部 電子情報工学科 専任講師 高橋 芳浩

研究目的

宇宙空間は放射線環境であり、宇宙飛行体に搭載する半導体素子には高い耐放射線性が要求される。特に半導体集積回路の基本構造である MIS 構造の放射線照射効果の把握は、耐放射線性素子開発の上で非常に重要である。これまでに、MIS 構造の絶縁膜として酸化膜・窒化膜の多層構造を有する MNOS 構造は耐放射線性に優れているという報告があるが、その詳細なメカニズムや各絶縁膜厚の最適化等については、ほとんど議論されていない。そこで我々は、放射線照射による MNOS 絶縁膜中での電荷発生および固定電荷（捕獲電荷）の変化に注目して研究を行ってきた。放射線照射に起因した絶縁膜中電荷の変化は、トランジスタのしきい値電圧変動の主要因であり、電荷捕獲メカニズムの定量的な解明はデバイスの信頼性確保の上で非常に重要となる。本研究の目的は、MNOS 構造を用いた MIS 構造の放射線照射効果の詳細な検討、および耐放射線強化構造としての最適化である。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

我々は絶縁膜の傾斜エッチング法を提案し、放射線照射前における絶縁膜中の固定電荷分布評価を行った。さらに MNOS ダイオードを作製し放射線照射実験を行い、照射前後におけるミッドギャップ電圧（固定電荷密度を反映する電圧）の変化量 ΔV_{mg} の評価を行った。測定結果の各絶縁膜厚及び照射中のゲート印加電圧依存性について検討するため、照射時の電荷発生・捕獲に対する計算モデルを構築し、計算結果と実験結果とを比較した。その結果、シリコン-酸化膜界面近傍の酸化膜中には正孔トラップが、また酸化膜-窒化膜界面近傍の窒化膜中には正孔及び電子トラップが局在し、各絶縁膜及び半導体空乏層中

で照射により発生したキャリアの一部がそれらのトラップに捕獲すると仮定したモデルを用いることにより、測定結果を精度良く表現できることが明らかとなり、本モデルの有効性を確認した。また、提案したモデル計算によるシミュレーションを用いて、耐放射線性素子としての最適絶縁膜厚に対する評価を行った。その結果、照射中正のゲート電圧が印加された場合、 $\Delta V_{mg}=0$ となるような最適膜厚が存在すること、また絶縁膜の酸化膜換算膜厚が 100nm 以下の場合には、最適膜厚は全吸収線量および印加電圧に大きく依存しないことを示し、MNOS 構造の耐放射線性素子としての可能性を明らかにした。一方、ランジスタ構造を用いた照射実験を目的に、理工学部特別推進研究費により購入したマスクアライナー及び RTP (Rapid Thermal Processing) 装置を用いて、ランジスタ作製方法の基礎プロセスの評価を開始した。

実験計画（平成 13 年度以降）

これまでに構築したモデル解析の結果、放射線照射により窒化膜中で発生する電荷密度は、酸化膜に比べて非常に小さいことが予測された。本年度は、これらモデル解析により得られた電荷発生・捕獲に関する各パラメータの直接評価、及び MNOS トランジスタの作製プロセスの評価を目的としている。放射線照射による各絶縁膜中での発生電荷密度は、各絶縁膜を有する MIS ダイオードの放射線誘起電流の測定により評価する。放射線照射実験は、当原子力研究所におけるパラメトリック X 線、ないしは特性 X 線（加速電子を利用）を用いて行う。誘起電流の絶縁膜厚及び印加電界依存性を解析することにより、電荷発生密度の電界依存性についても評価を行う予定である。これらの実験により得られた結果を基に、MNOS 構造素子の放射線照射効果について、より詳細な評価を進め、耐放射線性素子としての最適化について検討を行う。一方、MIS トランジスタ構造の作製プロセスは大別して、拡散層作製、フィールド絶縁膜作製、ゲート絶縁膜作製、電極作製に大別される。本年度は、MIS 構造の基本となる MOS トランジスタの作製・特性評価を目的に、各プロセスの評価・検討を行う。作製・評価の一部は、当原子力研究所内のクリーンルームを使用して行う予定である。

実験備品等

購入希望備品：

フーリエ変換赤外分光装置（Nicolet社：Nexus470）

エッチングドラフタ

純水供給装置（ピューリックMX-IISC他）

消耗品：

シリコン基板、材料ガス、薬品など

トランジスタ作製用ガラスマスク

金属タンパク質の NO 捕捉能に関する研究

研究代表者

日本大学 生物資源科学部 教授 奥 忠武

研究従事者

日本大学 生物資源科学部 教授 奥 忠武

研究目的

窒素酸化物 (NO_x) は、大気、酸性雨などの環境汚染の元凶物質であり、その中心は、亜硝酸 (NO_2^-) や一酸化窒素 (NO) である。その低減には、現在の工業的技術のみでは不可能となってきた。そこで我々は、これら NO_x の還元、除去を行う分子の検索を行った結果、本来呼吸鎖電子伝達体として機能しているシトクロム *c* が亜硝酸還元酵素と同様に、亜硝酸から一酸化窒素を経由し、迅速にアンモニアにまで変換することを見いだした。また、シトクロム *c* に熱などのタンパク質変性処理を行うと、その活性が更に向上することを明らかにしてきた。これは、一般のタンパク質、酵素が熱などの変性処理を施すと失活するという事実から考えると、従来の化学の常識とは逆の大変ユニークな結果（化学と生物 **34** (12)、784–785 (1996)) であり、各種生物のシトクロム類の NO 捕捉能や優れた変性法について検討する必要がある。

そこで本研究では、 NO_x の還元のための優れた変性方法の検索、放射線や電子線の有効利用を目的として γ 線や電子線を照射した金属タンパク質の亜硝酸還元活性について検討を行う。また、これら以外の高活性の金属タンパク質の検討を行う。これらの検討は、今後、金属タンパク質の X 線結晶構造解析を基に高亜硝酸還元、高 NO 捕捉を示す人工分子の作出を行うことで自然科学、生理学分野への応用を行うための基礎研究の一貫である。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

亜硝酸還元酵素は、分子中に鉄又は銅をもつ非ヘム分子である。我々は、亜硝酸還元酵素ではないがヘム核をもつ鉄タンパク質の数種について Co^{60} - γ 線を照射し、その亜硝酸還元活性について検討を行った結果、ウマ心筋ヘモグロビン、ミオグロビン（ともに鉄の 5、6 配位子はヒスチジン）は、若干の活性向上を示した。一方、ウマ心筋シトクロム *c* (5 配

位子はヒスチジン、6 配位子はメチオニン) 同処理を行い活性を測定したところ、約 10 倍の活性上昇を示した(線量 0.25 kGy)。その構造を検討した結果、第 6 配位子のメチオニンよりメチオニンスルフォキシドの生成を確認し、鉄とイオウの結合が解離することに起因することが判明した。また、シトクロム *c* の亜硝酸還元活性発現のための最適な照射条件について検討を行うため、照射線量 (0~10 kGy) の条件で照射を行った(食品照射 35, 44-48 (2000))。その結果、最適な照射条件は、線量 1.0 kGy であり非照射シトクロム *c* ($k_{cat}=15.206 \times 10^{-3} \text{ s}^{-1}$) に比べ約 40 倍の活性を示した(照射シトクロム *c*: $k_{cat}=0.669 \text{ s}^{-1}$)。更に、各線量で照射したシトクロム *c* の二次構造の変化を見るため CD スペクトルを用いて α -ヘリックス含量を算出したところ、線量の上昇とともに α -ヘリックス含量は減少しており、 γ 線を照射することによりペプチド鎖のアンホールディングを確認した。以上の結果から、シトクロム *c* に γ 線照射を行うことによりペプチド鎖のアンホールディングが起り、活性に関与しているヘム核が溶媒面に露出、それに伴い第 6 配位子メチオニンの解離のため NO_2^- 、 NO との衝突確率が高まり、活性が向上したものと考えられる。また、変性方法としての γ 線や電子線照射は極めて有用な手段であることが明らかとなった。

また、各種生物のシトクロム類の NO 捕捉能について検討を行ったところ、紅藻スサビノリ由来シトクロム α_6 や緑藻由来シトクロム α_6 、光合成細菌シトクロム α_2 などが高い活性を示すことが明らかにした。中でも高活性を示した紅藻スサビノリ *Porphyra yezoensis* (*P. yezoensis*) 由来シトクロム α_6 は、SPRing-8 にて X 線結晶構造解析を行った (*Acta Cryst.*, D56, 1577-1582 (2000))。

実験計画 (平成 13 年度以降)

照射ウマ心筋シトクロム *c* は、極めて高い亜硝酸還元活性を示したことから亜硝酸還元を行う分子の有用なモデル分子になりえることが期待される。更に、高亜硝酸還元及び高 NO 捕捉能を示す人工分子の創成を目的として、以下の検討を行う。(1) 遺伝子工学的に第 6 配位子メチオニンを人工改変した変異体を作製し、同活性測定を行う。更にこの変異体の X 線結晶構造解析を行う。(2) 高活性を示した照射シトクロム *c* の結晶化を行い、X 線結晶構造解析を試み、これより決定された立体構造から照射シトクロム *c* の亜硝酸還元活性における構造生物学的解析を行う。上記の紅藻スサビノリ *P. yezoensis* 由来シトクロム α_6 の X 線結晶構造や(1)、(2)で解析された立体構造より、高活性を示す最適なタンパク質構造のデザインし、これらデータを基に人工分子の創成を行う。

現在までに高亜硝酸還元、高 NO 捕捉のための人工分子を創成したという研究報告は見当たらない。そのため構造生物学的解析を基に高亜硝酸還元、高 NO 捕捉能をもつ人工分子(人工タンパク質)の創成を行うことが出来れば、地球環境の改善のみならず、 NO の生理学的解析も可能となり、ヘムタンパク質の機能性を利用した新技術となりうる。

実験備品等

消耗品

結晶化関係

- ・結晶化用プレート × 5
- ・マイクロピペット × 2

微生物培地関係

- ・セレクトペプトン化 × 4
- ・セレクト酵母エキス粉末 × 4
- ・セレクト寒天粉末 × 2

照射用金属タンパク質関係

- ・Hemoglobin from Horse × 5
- ・Myoglobin from Horse Heart × 5
- ・Cytochrome from Bovine Heart × 5
- ・Cytochrome from Horse Heart × 5
- ・ β -NADH × 5
- ・ β -NADPH × 5

ガラス器具関係

- ・反応用特殊セル(特注) × 10
- ・照射用特殊アンプル(特注) × 100

自由電子レーザー一回転コヒーレンス分光法を用いた様々な van der Waals 錯体の構造決定 — ピレン・ベンゼン 1 : 1 錯体について —

研究代表者

日本大学 工学部 物質化学工学科 助教授 奥山 克彦

研究従事者

日本大学 工学部 物質化学工学科 助教授 奥山 克彦
日本大学 工学部 物質化学工学科 専任講師 沼田 靖
日本大学 工学部 物質化学工学科 卒業研究生 本白 正周
日本大学 工学部 物質化学工学科 卒業研究生 宮澤 洋介

研究目的

二つの中性分子の間にはたらく代表的な分子間力のひとつに *van der Waals* 力がある。この力は分子が π 電子系や非結合電子対をふくむ場合、電荷バランスの揺らぎで生ずる瞬時的な分極による引力である。それゆえ極めて弱く、分子間ポテンシャルの井戸は浅く結合距離は長い、さらに結合の異方性も小さい。しかし、極低温状態で分子が固体になるのは、この力による凝集力である。したがって、分子性結晶では晶形を定めることになるし、分子の配向によっては 1 次元的な導電性を発生することもある。

本研究では、このような凝集過程の第一歩になる 1 : 1 *van der Waals* 錯体の構造を回転コヒーレンス分光で求めることを目的としている。先にも示したようにこの力は結合の異方性が小さいことから、1 : 1 錯体ではいくつかの異性体を発生する場合がある。結晶成長過程では対称性やパッキングエネルギーの問題である程度淘汰が起こり一種類の配向に落ち着くと考えられるが、このような異性体全てについて分子間ポテンシャルが求められれば、微細な分子間相互作用やその中での電荷移動または励起子移動についてより定量的かつより具体的な予測も可能になると考えられる。さらに、このような 1:1 錯体について、光励起後の分子動力学的ふるまいは従来の分子線分光によりある程度詳細に報告されている。しかし、その考察の基になる錯体構造は *ab initio* などの力場計算に委ねられているの

が現状である。当然そのような計算ではスペキュレーションも入るし、検証は不可欠である。実験的に構造を求めるためには、マイクロ波分光法やリングレーザーを駆使した高分解能分光が要求されるが、前者は1:1錯体を分離観測することが難しく、後者は要求される光源の単色性が極めて高くなることから不可能に近い。その一方、90年代から P. M. Felker により確立された波長可変ピコ秒レーザーを光源とする回転コヒーレント分光では、電子遷移による分子構造変化が小さい系（ベンゼン二量体やナフタレン三量体など）では時間スペクトルから錯体の回転定数が直接求められ、極めて良質な結果が報告されている。

我々が第一の研究対象と定めているピレン・ベンゼン系においても電子励起による構造変化は小さく、さらに光励起後のふるまいについても興味深い結果が報告されている。

研究経過（平成12年度）実験準備の状況など

これまでの研究状況は主に装置開発である。特に測定系の充実を行ってきた。具体的に説明すると、自由分子噴流をスキミングした分子線発生装置の製作である。そのため、2段の差動排気系を備えた $\sim 10^{-9}$ Torr. の到達真空度を目標にした真空槽をふたつ製作した。さらに、その真空装置に装着する形で高分解能質量分析装置リフレクトロンの購入とセッティングも行った。調整は行っていない。また、同時に光励起の際発生する光電子を捕捉しエネルギー分析を行うために ZEKE 光電子分光装置も宝化成機器株式会社と共同で開発製作し、この真空槽に装着している。この装置が駆動できれば、構造決定と同時にその構造における励起状態ダイナミクスもさらに正確に追跡することも可能になると考えられる。

実験計画（平成13年度以降）

平成13年度10月までは自由電子レーザーの発振を待ちながら、機器の整備調整に費やされるであろう。特にリフレクトロン及び光電子分光装置は現有設備であるナノ秒YAGレーザーを用いて十分に調整可能であり、万全の体制を整えて時間的に限られたマシンタイムを有効に使うべきであると考えている。また、レーザー発振が得られたら、はじめにマクロパルスからシングルピコ秒パルスをスライスするポッケルセルの調整を可能な限り早い時期に行いたいと考えている。

実験室は光電子分光照射レーザー実験室の使用を希望したい。また、使用する光源条件は365~390 nm の範囲を連続波長掃引することのできる 1 cm^{-1} 程度の単色性もったレーザー光、光強度はポッケルセルに損傷を与えぬ程度で最大のものを要求したい。また、マシンタイムにつきましては、講義期間ではない夏季（8月1日~9月中旬）、冬季（12月20日~1月10日）、春季（2月中旬~3月24日）ならば1週間を単位に可能な限り多く、講義のある期間中は金曜日から月曜日までの土日を含めた4日間を単位として年間12回程度を考えている。

実験備品等

消耗品

- ・ポッケルセル
- ・シングルパルススライサー

旅費（工学部（郡山市）—理工学部船橋校舎）

（1回のマシンタイムで実験を行うのは2人から3人、今年度は12回のマシンタイムを予定）

高輝度 X 線源を利用した生体物質・インプラント界面の構造と組成研究と応用

研究代表者

日本大学 松戸歯学部 助教授 寒河江 登志朗

研究従事者

日本大学 松戸歯学部 助教授 寒河江 登志朗
日本大学 松戸歯学部 講師 早川 徹 (追加)
日本大学 松戸歯学部 講師 三島 弘幸 (追加)
日本大学 松戸歯学部 講師 鈴木 久仁博 (追加)
朝日大学 講師 飯島 まゆみ (追加)
名古屋工業大学 教授 虎谷 秀穂 (追加)
明海大学 歯学部 講師 笥 光夫
東京理科大学 理学部 教授 中井 泉
NewYork 大学 歯学部 教授 LeGeros,R.Z.

研究目的

生体は常に代謝による物質交換を行っており、これは骨においても改造現象を通じて生涯行われている。1 説によると、人体の骨は 3 年で全て入れ替わっていると言われる。生体代替材料が生着するか否かは、材料自体の性質と伴に、このような変化に富む生体物質との界面の状態がキーポイントであると考えられる。界面の状態・性質の研究は微小領域であるため、特別な研究方法の開発が必要であり、本研究では高輝度 X 線を用いた超微小領域 X 線回折法の開発と応用を目指している。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

研究の初年度にあたり、予備実験用の X 線回折装置の導入を行い、本格実験に向けた装置改良の検討と、試料調整方法の検討を行った。また、本格実験に備えて、生体試料および各種インプラント材料の収集と試料調整を行った。

実験計画（平成 13 年度以降）

予備実験を微小部X線回折装置（106実験室）および粉末・薄膜X線回折装置（102実験室）で行う。平均で週3日程度それぞれの装置を使用する予定。

本格実験（X線発生施設内）は、高輝度X線が発生した後、直ちに実施予定。週2日程度（昼間、試料交換が多いため。試料自動移動装置があれば夜間可能）利用予定。

実験備品等

- ◎位相差・偏光・正立倒立顕微鏡（専用）
 - 同付属TV画像処理装置
 - レーザー3D計測器（硬組織・結晶観察）
- ◎超音波ホモジナイザー（洗浄機）（共用可）
- ◎遠心分離器（共用可）
- ◎超純水製造機（共用可）
- ◎作業台（3台）
 - 薬品保管庫（3台）
- ◎電子デシケーター
- ◎データ解析コンピュータ（粉末、微小部）2台
- ◎冷凍冷蔵庫（専用。4-5ドア）
- ◎卓上ドラフトチャンバー（専用）
- ◎pHメータ
- ◎自記温度計
- ◎孵卵器（恒温槽）
- ◎スターラー 大・小（加温）

- ◎消耗品
 - 薬品類
 - めのう乳鉢ほか試料調整器具
 - 硬組織細胞関連
 - コンピュータ関連

その他 学会参加費、出張費など国内、海外）
RAあるいは研究補助者（アルバイト）

歯科用合金の金属疲労に関する研究

研究代表者

日本大学 歯学部 助教授 佐藤 吉則

研究従事者

日本大学 歯学部 助教授 佐藤 吉則

日本大学 歯学部 助 手 深瀬 康公

日本大学 歯学部 助 手 永井 栄一

日本大学 歯学部 助 手 秋山 逸馬

研究目的

本研究は、歯科臨床で用いられている合金の機械的強さの耐久性向上を目的として、合金の結晶構造から金属疲労を解明する。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

金属加工に関して、研究発表は行った。また、金属の内部応力については、現有機器として、有限要素法による解析が可能である。

実験計画（平成 13 年度以降）

- 1) 粉末 X 線解析装置および微少部 X 線解析装置により、金属疲労の解析を行う。
- 2) レーザーの使用が可能になり、実験動物の生態計測が可能になれば、動物実験による血流測定を行いたい。

実験備品等

歯科用材料

交通費

国内学会発表旅費

海外学会発表旅費

パラメトリック X 線源を利用した高分子物質の構造解析

- (1) ハ虫類のヘモグロビン高次構造の解析
- (2) 環形動物巨大ヘモグロビンの高次構造の解析
- (3) 共同研究テーマ
 - ・節足動物ヘモシアニンの高次構造の解析
 - ・金属酵素・金属タンパク質の NO 捕捉反応とその X 線構造解析
 - ・カルシウム結合タンパク質の高次構造解析

研究代表者

日本大学 医学部 講師 宋倉 文夫

研究従事者

日本大学 医学部 講師 宋倉 文夫

日本大学 原子力研究所 博士研究員 桑田 隆生

共同研究者：

日本大学 生物資源科学部 教授 奥 忠武

東北大学 理学部 助教授 高木 尚

徳島大学 総合科学部 教授 後藤 寿夫

筑波大学 生物科学系 教授 杉田 博昭

研究目的

パラメトリック X 線を線源にして、X 線回折装置 (R-AXIS iv) でタンパク質の結晶を解析し、高次構造を構築する。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

（1）研究材料に関する準備状況

a ハ虫類のヘモグロビン構造研究のための実験準備状況

現存している 2 種類のゾウガメのうちアルダブラゾウガメのヘモグロビンについて、2 種類のヘモグロビンを分離精製し（ヘモグロビン A と D ; Hb A, Hb D）、それらの構成グロビン鎖（Hb A には α 鎖 2 種類、 β 鎖 1 種類；Hb D には α 鎖 2 種類のうち 1 種類、 β 鎖 1 種類）のすべてについて、アミノ酸配列を決定した。

<参考文献>

Hb A の一次構造の論文：Zool. Sci., 18:515-526 (2001)

Hb D の一次構造の論文：準備中（一次構造のデータはデータバンクに登録済み；PC7112, PC7113, PC7115, PC7116, PC7117）

残る現存 1 種、ガラパゴスゾウガメ、のヘモグロビンについては今年度 3 月より実験を開始、Hb A の α 鎖と β 鎖および Hb D の α 鎖と β 鎖の一次構造を決定した。

<参考>

「ゾウガメ 2 種のヘモグロビンの一次構造の比較」のタイトルで論文執筆中

b 環形動物の巨大ヘモグロビン構造研究のための実験準備状況

環形動物の巨大ヘモグロビンについての構造研究はおもに米国デトロイトでの研究を継続展開している。平成 12 年度は進展がなかった。しかし、高次構造の解析のための基盤になる研究（おもに一次構造）について、今までの（私たちの）研究成果を下に挙げる。

- Biochim. Biophys. Acta, 869: 314-321 (1986) A disulfide-bonded trimer of myoglobin-like chain is the principal subunit of the extracellular hemoglobin of *Lumbricus terrestris*.
- Biochemical J. 241: 441-445 (1987) Two globin strains in the giant annelid extracellular haemoglobins.
- J. Biol. Chem., 262: 3123-3131 (1987) Amino acid sequence of the monomer subunit of the extracellular hemoglobin of *Lumbricus terrestris*.
- J. Mol. Evol., 27: 236-249 (1988) An evolutionary tree for invertebrate globin sequences.
- Zool. Sci., 13: 551-558 (1996) Amino acid sequence of the monomer subunit of extracellular hemoglobin of the earthworm, *Pheretima hilgendorfi*.
- Zool. Sci., 13: 849-856 (1996) A comparative study on the earthworm hemoglobins: An amino acid sequence comparison of monomer globin chains of two species, *Pontodrilus matsushimensis* and *Pheretima communissima* that belong to Megascolecidae.
- Zool. Sci., 14: 923-930 (1997) Leech extracellular hemoglobin: Two globin strains that are akin to vertebrate hemoglobin α and β chains.

c 共同研究者による高分子構造研究テーマと準備状況

- ・節足動物ヘモシアニンの高次構造の解析
- ・金属酵素・金属タンパク質の NO 捕捉反応とその X 線構造解析
- ・カルシウム結合タンパク質の高次構造解析

テーマの準備状況については、各々の共同研究者により準備が進められている。

(2) 博士研究員の採用

高分子高次構造解析グループでは、研究の実動を担う博士研究員として桑田隆生氏（平成 13 年 3 月、筑波大学院博士課程生物科学研究科生物物理化学専攻 修了）を採用した。実験室の備品、装置などが整い次第、実験を開始するため、日本大学原子力研究所・電子線利用研究施設へ赴任して頂く。現在、筑波大学の杉田博昭研究室で当該研究のための準備をおこなっている。

(3) 実験準備室に関する準備状況（実験装置等を含めて）

a 大型研究支援装置の導入について： 高分子高次構造解析実験準備室には X 線回折装置（R-AXIS iv）、ダイナプロ（DynaPro）結晶作成支援装置、および構造解析用プログラム類を搭載したコンピュータを順次設置している（既に搬入を終了した機器もある）。

それらの講習会は下記のように計画されている。

- ・ X 線回折装置（R-AXIS IV）の説明会：6 月 27 日（水）／午前と午後
- ・ ダイナプロ（DynaPro）結晶作成支援装置の説明会：7 月 4 日（水）／午後のみ
- ・ コンピュータに搭載する構造解析用プログラム類の説明会：7 月 18 日（水）／午前と午後

b 当該研究をすすめる上での実験準備室（電子線利用研究施設内）の整備状況について： 博士研究員ならび施設利用研究者が当該施設（日本大学原子力研究所・電子線利用研究施設）内の実験準備室で、1) 精製後の高分子タンパク質から結晶を作成し、2) その結晶の X 線回折をおこないデータを蒐集し、3) コンピュータで構造を解析する一連の研究プロセスを実施することを可能にする準備室を構築中である。大型研究支援機器は C1 項目を参照。実験台、椅子、小型の実験装置などについてはリストを作成し、申請中である。

実験計画（平成 13 年度以降）

・平成 13 年度

- | | |
|----------|--|
| 7 月～10 月 | リゾチームを用いて R-AXIS IV で構造解析技術の習熟。ハ虫類のヘモグロビンの結晶化、共同研究者との共同研究の実施 |
| 11 月～2 月 | ハ虫類のヘモグロビンの構造解析、共同研究者との共同研究の実施 |

3月～4月 ハ虫類のヘモグロビンの構造解析まとめ、共同研究者との共同研究の実施

- ・平成14年度 環形動物の巨大ヘモグロビンの構造研究、共同研究者との共同研究の実施
 - ・平成15年度 環形動物の巨大ヘモグロビンの構造研究、共同研究者との共同研究の実施
 - ・平成16年度 共同研究者との共同研究の実施
- ・使用実験室名、マシンタイム、レーザー波長、光強度等を含む：検討中

実験備品等

- ・平成13年度

実験費

試薬（共同使用可） / ガラス・プラスチック器具などの消耗品

国内共同研究者研究補助費＝他のグループに準ずる

旅費

国内共同研究者旅費補助費

4人（他のグループに準ずるが、徳島市と仙台市在住の共同研究者それぞれ一人有り）

医学部⇔電子線利用研究施設（2人/桑田、宍倉 × 20回）

自由電子レーザーの組織再生効果に関する研究

研究代表者

日本大学 歯学部 助教授 清水 典佳

研究従事者

日本大学 歯学部 助教授 清水 典佳
日本大学 歯学部 歯科臨床系（矯正学）大学院生 石丸 透子
日本大学 歯学部 歯科臨床系（矯正学）大学院生 和田 みずき

研究目的

低出力レーザーには創傷治癒作用や、骨修復促進作用があることが報告されている。我々も *In vivo*, *In vitro* の実験で半導体レーザーに骨形成促進作用があることを報告している。しかし、レーザーは光の物理的性質により種々の生物学的作用を引き起こすことが報告されているため、低出力レーザー照射により骨形成を最大に発揮するレーザー照射条件を見出すとともに、レーザーの骨形成促進メカニズムを解明することにより低出力レーザーの歯科臨床応用をはかる。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

自由電子レーザー光が未だ得られていないため、初年度は低出力半導体レーザー照射器を用い、実験を試みた。培養骨芽細胞に連続照射と 1、2、8 ヘルツのパルス照射を行い培養皿中に形成される骨様結節を定量すると、連続照射に比べ 1 及び 2 ヘルツパルス照射が有意に骨様結節形成を促進していた。またこれらの作用は照射量依存的であったことから、レーザー光の物理的性質の違いは異なった生物学テク効果を引き起こすことが明らかとなった。

研究成果

- 1) Ueda Y, Shimizu N, Pulse irradiation of low-power laser stimulates bone nodule formation; J Oral Science 43,55-60, 2001.
- 2) Kawasaki K, Shimizu N, Effects of low-energy laser irradiation on bone remodeling during experimental tooth movement in rats; Lasers in Surg Med 26,282-291, 2000.

実験計画（平成13年度以降）

ヒト顎骨から採取した骨芽細胞を培養し、種々の波長のレーザー照射を数秒から20分行い骨様結節形成を定量し、骨様結節形成を最大に促進する条件をいくつか見出す。その条件で培養骨芽細胞にレーザー照射を行い、細胞からmRNAを回収し、マイクロアレイ解析システムを用い遺伝子発現レベルの変化を検討する。

マシンタイムは数秒から20分を実験に合わせ数十回照射。

レーザー波長は830nm半導体レーザーで骨形成促進作用が得られているので、まずこの前後の波長を使用する。その後試行錯誤でいくつかの波長を検討する。

高強度は4J/cm²を考えている。

実験備品等

必要機器

- ・CO₂インキュベーター
- ・クリーンベンチ
- ・コールターカウンター
- ・遠心機
- ・冷蔵庫
- ・フリーザー

実験費

- ・培養器具
- ・培養液、血清
- ・mRNA抽出試薬
- ・蛍光標識試薬
- ・マイクロアレイ用スライドグラス
- ・スポット用遺伝子

（ただし、スポット用遺伝子(ETS1220,ヒト9000遺伝子)は、今後4年分を松戸歯学部・安孫子教授と共同で購入する予定)

原子力研究所交通費

パラメトリック X 線を用いた高圧下における XANES 研究

研究代表者

日本大学 文理学部 教授 滝沢 武男

研究従事者

日本大学 文理学部 教授 滝沢 武男
日本大学 文理学部 助教授 高橋 博樹
東海大学 開発工学部 講師 松下 裕亮

研究目的

磁性体、超伝導体、半導体の物理的性質には、内部の電子状態が大きく反映される。例えば、現在、多くの研究者の興味を引きつけている高温超伝導体は、共通の性質として Cu-O ネットワークを有し、このネットワーク中の Cu の電子状態（価数）は、酸素量や構成元素により影響を受け、ある価数の条件のもとで超伝導を示す。また、金属磁性の本質を見極めるために精力的に研究が進められているヘビーフェルミオンといわれる物質群においては、伝導電子と局在電子との相互作用が磁性の発現の根幹であると考えられ、その電子状態の実験的解明は重要であり、また、大きな期待が寄せられている。さらに現在の情報通信基盤を担う多元系半導体の開発においても構成元素の電子状態を調べることが多い。このように原子価数に関する情報は物質開発、物性評価には欠かせないものである。しかしながら、元素置換では置換量が限られ、ランダムネス等の副次的な効果が混入するため本質が見えてこない場合がある。これに対し、高圧力技術を利用した実験では物質を静水圧的に圧縮することにより連続的に原子間距離等の構造を変化させながら電子状態の変化を調べることができる。高圧下の電気抵抗、帯磁率測定による超伝導転移温度 TC、磁気転移温度の圧力効果など非常にたくさんの圧力下の物性が報告されている。しかし、これらを解釈するための電子状態に関する情報が極めて少ない。特に高温超伝導体では圧力をかけることによって HgBa₂Ca₂Cu₃O₁₀ が世界最高の TC= 164K を示すことが報告されているが、メカニズムに関する理解は進んでおらず、電子状態に関する実験データもほとんどない。それ故、Cu の圧力下の電子状態に関する実験への期待は大きい。高圧下で光学的に電子状

態を調べるためには、光学的測定のほかX線吸収実験(XANES)が考えられる。特にX線吸収実験では特性吸収端付近に現れるスペクトルの微細構造が元素の電子構造や対称性を強く反映することから、価数などの電子状態に関する情報が得られる。現在、ダイヤモンドアンビル高圧発生装置を用いることによって100万気圧以上の圧力下での実験が可能である。このような流れの中で、本研究グループ(高橋)は、すでに磁性体Yb4As3の磁性の起源を調べるために高エネ研PFで高圧下のXANES測定を行い、Ybの価数の圧力効果を調べた。この物質は圧力下で様々な電氣的・磁氣的測定が行われておりXANES測定からは物性理解のための基礎データが得られている。そこで本プロジェクトでは波長可変でエネルギー分解能に優れたパラメトリックX線を光源とする高圧XANES測定システムを構築し、共同利用施設として整備すると同時に、磁性体、超伝導体、半導体の電子状態に関する基礎データを蓄積する事を目的とする。

研究経過(平成12年度)実験準備の状況など

予算がゼロなので、XANES測定の実験準備は進んでいない。

測定する物質に関しては酸化物超伝導体、ヘビーフェルミオン物質など圧力下での電気抵抗、帯磁率測定を進めている。

実験計画(平成13年度以降)

【システム構築】

高圧XANES測定システム構築のためにダイヤモンドアンビルセル(DAC)を購入しBeをガasketとして加圧試験を行う。圧力測定にはDAC内にルビーのチップを入れ、その蛍光波長を測定することによって行う。そのための蛍光測定システムを購入する。DAC中の試料は微量であるので光学系は顕微分光としルビー蛍光の励起用にはアルゴンイオンレーザーを用いる。日本大学電子線利用施設のパラメトリックX線ビームラインにXANES測定用のX線検出システムを構築する。試料の前後にビームの強度を測定する検出器をおき前後の強度比から吸収係数を求める。大気圧中でいくつかの典型的な物質のスペクトルの測定を行う。低温測定ができるように4Kまで冷却できる冷凍機を購入し、冷却テストを行う。低温での圧力テストも行う。DAC内にセットした試料について吸収係数の測定を行う。マシンタイムは週1日必要。レーザー波長は可変で6~13keVを希望する。

【物性測定】

1. 温超伝導体中のCuのXANESを高圧下で測定し超伝導転移温度TCとCu価数との関連を調べる。特に最高のTCを示すHg系酸化物超伝導体について高圧下で測定を行う。CuのXANES測定ではX線はダイヤモンドに対し透明ではないのでガasketのBe

を透過させるようにする。

2. ビーフエルミオンと呼ばれる物質群について高圧下でのXANES測定を行う。Yb、Tmの化合物については実績がある。Ce、Euの化合物など価数変化によって電氣的・磁氣的性質が大きく変化し注目を集めている物質のXANES測定を行う。Ce、Euの吸収端のX線はダイヤモンドを通さないでBe製のガスケットを透過させるようにする。
3. 圧力下で半導体-金属転移を示す物質の金属の価数変化を調べる。半導体-金属転移は様々な要因で起こることが知られているが、価数を圧力下で調べた例はなく、転移機構解明に新たな情報を提供できる。

実験備品等

- (1) 消ガス駆動式型ダイヤモンドアンビルセル (協和製作所・GC-DAC-KY02-1型)
ガスコントローラー (協和製作所・GC-DAC-KY02-CR1型) 1台
- (2) ダイヤモンドアンビル 5組
- (3) Ar レーザー (NEC-GLG3101)

自由電子レーザーを用いた歯質切削条件に関する検討

研究代表者

日本大学 歯学部 歯科理工学教室 教授 西山 實

研究従事者

日本大学	歯学部	歯科理工学教室	教授	西山 實
日本大学	歯学部	歯科理工学教室	講師	菊地 久二
日本大学	歯学部	歯科保存学Ⅱ	助手	小森 規雄
日本大学	歯学部	歯科保存学Ⅱ	助手	勝呂 尚
日本大学	歯学部	歯科理工学教室	歯学部助手	塩田 陽二

研究目的

歯科領域へのレーザー応用は比較的早い時期から行われ、1965年に歯にルビーレーザーを照射して齲蝕の除去を試みて以来、様々な波長の各種レーザーが導入され、その効果が注目されている。歯科用レーザーは、各メーカーが作製したものを使用し、歯科臨床に応用した報告は数多い。よって予め設定された波長を用いてのレーザー照射であるため、照射物本来の選択的吸収波長を特定する事はできない。そこで今回、自由電子レーザーを用い、とくに歯質切削に着目し、各種波長を可変することにより得られる歯質切削条件に関する検討を行う。

研究経過（平成12年度）実験準備の状況など

なし

実験計画（平成 13 年度以降）

エナメル質や象牙質の光吸収波長のピークは、主として歯質を構成するハイドロキシアパタイトのリン酸イオン基による $10\mu\text{m}$ 前後によるものと、次に大きい OH 基による $3\mu\text{m}$ 前後の吸収ピーク波長であるとされている。現在、歯質切削に最も適しているレーザーは、Er:YAG レーザーと言われ、 $2.94\mu\text{m}$ の波長を持つレーザーである。

本研究では、波長及び出力を可変する事によって歯質切削を行い、最適な波長の検討を行う。歯質の試料としては、ウシ下顎前歯を使用し、レーザー照射条件を変化させた場合の切削量（蒸散量）及び表面性状の観察を行い、波長と歯質切削との関係を明らかにする。また、より効率の良い歯質切削法について、側方照射の可能なファイバーの開発などの検討も併せて行う。

実験備品等

実験道具一式（試料、フィルム等、ピンセット等）

作業用道具一式（机、椅子、棚、工具道具、資料整理ケース、パソコン、パソコン付属品一式、冷蔵庫等）

旅費 5人×30日

クラスターの光誘起構造相転移

光誘起化学反応の解明と新光機能材料の探索への応用

研究代表者

日本大学 文理学部 教授 望月 章介

研究従事者

日本大学 文理学部 教授 望月 章介
東京大学 物性研究所 助教授 末元 徹
日本大学 文理学部 助教授 石田 浩
日本大学 文理学部 助教授 浅地 哲夫
日本大学 文理学部 助手 中西 太宇人

研究目的

クラスターには固体にない特異な物性（量子サイズ効果、表面効果）、特異な原子的構造（フラレン構造、構造縮重性等）、顕著な反応性・光触媒性が見られる。これらは基礎科学における新規な研究対象となるばかりでなく、新しい機能性材料としても工業的応用が期待されており内外で盛んに研究されている。我々は、クラスターを容易に大量に生成できる希ガス中蒸発法と時間分解・空間分解分光法及びレーザーによる選択的励起分光法を結合させて、アルカリ金属クラスターと炭素フラレン粒子の核生成・成長機構、電子状態を研究してきた（望月研究業績参照）。

そして最近、炭素フラレンを多孔質ガラスの細孔中に吸蔵させた試料では紫外レーザー光(325nm)照射により異なる光スペクトルの状態に転移できて、これが長い間維持でき、青色レーザー光(442nm)照射で元の光スペクトルの状態に戻せる事を室温の実験で発見した（望月研究業績4及び日本物理学会2000年年会・分科会発表済み）。これが光誘起構造相転移なのか光誘起化学反応なのか今のところ不明であるが、フラレン吸蔵多孔質ガラス

が光制御可能なメモリ機能を有する新素材となり得る事を示唆している。このように光のクラスターに対する効果には面白い有用な現象の多くが未だ発見されないままにあると考えられる。

この研究では以上の我々の最近の発見とクラスター研究の成果を基礎に、日本大学、東京大学、東北大学のクラスター、光物性・高速分光、放射光（自由電子レーザー）等の研究者を結集して「気相状態、細孔中に捕えられた状態、半導体・金属基板結晶上に担持された状態等の金属クラスターや酸化物クラスター」について、本学原子力研究所の高輝度単色ピコ秒パルス列光源を用いてクラスターの構造縮重性由来する光誘起構造相転移や光誘起化学反応を研究する。そして、以下の二つの事柄を解明する。

(1) 気相、細孔中に捕えられた状態及び固体表面上のクラスターの光誘起可逆的構造相転移のダイナミクスの解明と転移相の固定化法の確立

クラスターには同一環境の下で複数の原子的構造を取り得るという構造縮重性がある。このクラスターを強い光子場の下に置いて電子的励起状態をつくと電子・格子相互作用により全く異なった物性を持つ別の状態に転移させる事ができる。また、この状態になったクラスターを別の適当な波長の強い光子場に置くと元の状態に戻せる可能性もある。このような事が可能になり、各々の状態を固定できれば新しいタイプの光メモリーへの開発に道が開けるであろう。このような観点に立って光誘起構造相転移が期待できる金属、酸化物のクラスター、フラーレンのサブナノ粒子等を対象に光誘起可逆的構造相転移のダイナミクスの解明と転移相を固定化する方法を探索する事を目的とする。

(2) 気相、細孔中に捕えられた状態及び固体表面上のクラスターの光誘起可逆的化学反应のダイナミクスの解明と反応相の固定化法の確立

クラスターを適当な波長の強いパルス光で多段階・多光子励起して種々ある化学反応経路のうち特定の反応経路を選んで選択的に化学反応を起こさせてある生成物をつくる。また、これを別の波長の適当な波長の強いパルス光で励起して元に戻す事ができて、各々の反応物を永続的に固定できれば上記(1)と同様に新しいタイプの光メモリー素子への開発に道が開けるであろう。このような観点に立って光誘起構造相転移が期待できる金属、酸化物のクラスター、フラーレンのサブナノ粒子等を対象に光誘起可逆的化学反应のダイナミクスの解明と反応物を固定化する方法を探索する事を目的とする。

ところで、最近是有機物や酸化物の固体の光誘起構造相転移現象は多くの研究者の注目を集めている。固体でのこの現象は構造相転移温度近傍でのみ起こる現象を指すことが多い。

我々が対象にしている小さな系であるクラスターには本質的に構造縮重性（構造多重安定性）があり、系のサイズが小さい為に固体より容易にかつ高速に構造転移を起こせる点に特長があると考えられる。このような観点に立った研究は独創的であり国内外を見ても少ない。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

これまでに、上記研究目的遂行の為に「イメージインテンシファイアーシステム」を購入・設置した。現在、これをビームラインに接続するための課題と光学系を設計中である。

実験計画（平成 13 年度以降）

- (1) 使用レーザー波長：320nm付近の紫外レーザー光、数十ミリワット以上
- (2) 紫外レーザー光、X線を用いて Eu_2O_3 の光誘起・X線誘起物性変化現象を実験する。

実験備品等

- (1) クラスター原料（希土類金属酸化物 Eu_2O_3 ）その他
- (2) ミラー・レンズ類（ビームラインとの接続用）
- (3) 実験機1台
- (4) 伸縮実験台：(株)サカエ製の「リフター：ミニタイプGLM-100-46W」
- (5) パソコンラック1台
- (6) 旅費（桜上水・電子線施設間）

自由電子レーザーによるスーパー・ダイヤモンドの合成

研究代表者

日本大学 理工学部 電子情報工学科 教授 山本 寛

研究従事者

日本大学 理工学部 電子情報工学科 教授 山本 寛
日本大学 理工学部 電子情報工学科 助手 岩田 展幸

研究目的

巨大炭素分子フラーレンの発見とその合成法の進歩は、まったく新しい物質科学の領域を切り開き、現在すでに化学、物理にまたがる幅広い基礎研究、あるいは工学的応用に関して活発な研究展開をみせている。例えば、アルカリ金属やハロゲン等のドーピングによる超伝導や強磁性の発見に見られるように、フラーレン分子表面はグラファイトと類似しており、一方その分子をダイヤモンド的結合により集合体とすれば、まったく新しい夢の素材となることが期待される。

本研究の目的は、高圧下で C60 集合体に強力な放射光、自由電子レーザー光を照射することにより、ダイヤモンド的結合による 3 次元フラーレンポリマーを合成し、その驚異的特性を実験的に明らかにするところにある。得られる 3 次元的 C60 ポリマーはまさにダイヤモンドを越える、スーパー・ダイヤモンドと呼ぶにふさわしい特性をもたらすと期待される。

研究経過（平成 12 年度）実験準備の状況など

平成 12 年度は下記の図にまとめるように、真空中にて試料に高圧をかけながら、自由電子レーザー光を照射出来る、真空チャンバーを設計、試作することを行った。

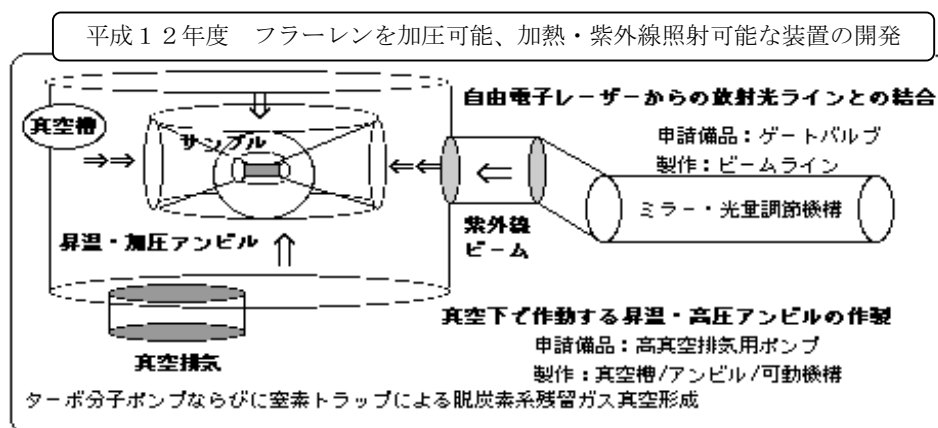


図 1 実験設備の概要と説明

チャンバーはステンレス製とし、真空排気にはターボ分子ポンプを用いることとした。今年度は、チャンバーの製作を終えた。また、試料に圧力を印加するための高圧アンビルを現在試作中である。このアンビルには直径約 1mm の貫通した穴を設けており、高圧力下での光照射を行うことが出来る設計とした。

実験計画（平成 13 年度以降）

本研究の最も著しい独創性は強力な紫外線により、フラウレン分子をダイヤモンド的な炭素結合体に変換することを目指すところにある。この種の実験は未だ世界中でどのグループも試みていない。よく知られているように、高圧・超高压下でのダイヤモンド合成法は基本的には確立し、工業的応用にも普及している技術と言えるが、えられる結晶のサイズには限界があった。

一方、ダイヤモンド的に結合した C60 分子ポリマーは理論的にはダイヤモンドを上回る強度を持つことが指摘されている。また、紫外線による C60 分子のポリマー化反応については既に幾つかの実験事実が報告されている。しかし、大量のフラウレンをポリマー化するに足る、強力な紫外線は容易にうることはできなかった。申請者は所属する機関において開発されつつある自由電子レーザーから放射される、波長が一定で強力なる紫外線に応用することに着目した。光による合成では、従来のように高温を必要としない。したがって、高圧アンビルの形状・サイズのサンプルを得ることができる。ダイヤモンドを上回る強度と、グラファイト並の粘りを持つ全く新しい夢の材料が実現することになる。

平成 13 年度は先に示した図 1 における、放射光ライン導入部の設計・製作を中心にて実験設備の立ち上げを目指す。また、この設備の製作と平行して、図 2 に示されるように、

フラーレンの光重合過程を重水ランプによる通常の紫外光を用いて予備的に検討する。

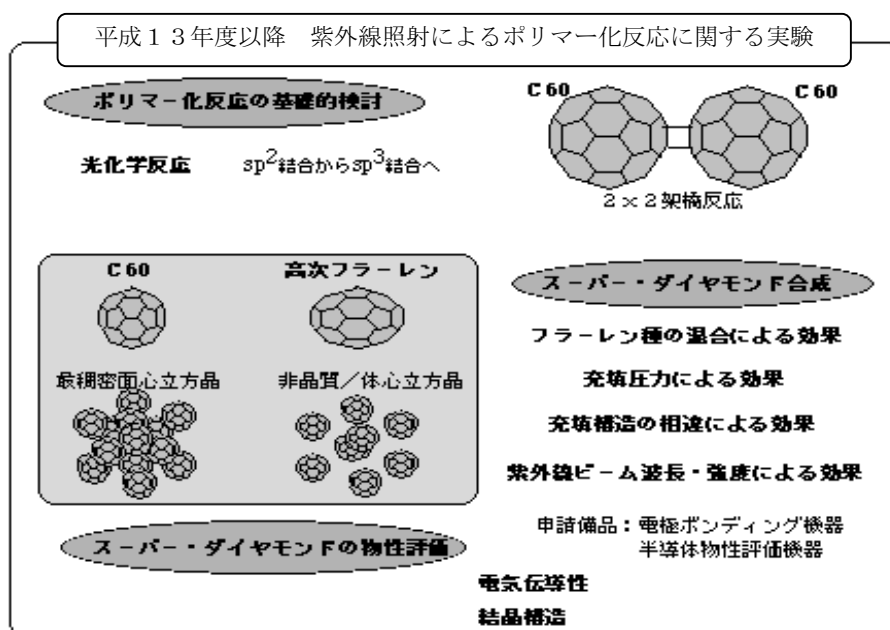


図2 主たる実験計画と概略の説明

実験室としては、主として「光励起極限プロセス反応用レーザー室」を使用する。光重合反応は数秒から数十秒の範囲で進行する。しかし、サンプルをセットし、再び真空排気し、光照射後、サンプルを真空チャンバーより取り出し、次のサンプルをセットし、再び真空排気する行程が必要である。こうした行程を考え、複数のサンプルについて一連の重合条件のもとで実験を行うため、少なくとも、1回の実験に当たっては約2日間程度必要となる。また、試料の準備等の時間を考慮しても、月に2～3回のサイクルで実験は遂行できる。こうした実験を進めるにあたり、マシンタイムは月平均約10時間程度と見積もられる。

用いるレーザーは重合反応エネルギーに対応する波長（紫外線域）を希望している。光強度は可能な限り幅広く光強度は変化させながら実験を行うので、特に指定しない。

実験備品等

光導入部の製作のため備品

消耗品

国内学会出張旅費（研究従事者2名）

発行日 2001年8月 (2002年9月改訂・増刷)
編集・発行 日本大学電子線利用研究施設
〒274-8501 千葉県船橋市習志野台7-24-1
日本大学工学部船橋校舎 物理実験B棟
TEL:047-469-5489 FAX:047-469-5490
<http://www.lebra.nihon-u.ac.jp>
発行責任者 佐藤 勇