

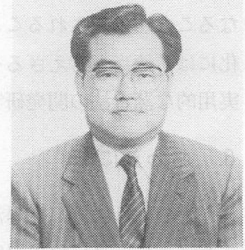
■ 展望・解説 ■

自由電子レーザーとその応用

Free Electron Lasers and Their Applications

松原 健夫*

Takeo Matsubara



1. はじめに

我国の放射線利用は、1960年電子線橋かけによる耐熱性ポリエチレン被覆ケーブルの製品化によって始まった。その後、電子線のほかにイオンビームやレーザー、シンクロトロン放射光など様々な放射線が産業に利用され実用化されている。

最近、多くの分野で応用の関心が高まり、内外で開発が積極的におこなわれている新型のレーザー「自由電子レーザー(Free Electron Lasers:FEL)」について、その特性と応用について紹介する。

この自由電子レーザーは、従来のレーザーと全く異なる原理により発生する新しいレーザーで、波長可変、大出力など従来のエキシマレーザーなどにはない優れた特長をもっている。このレーザーは、様々な先端技術産業に应用が期待され、また超電導材料の適用により、新しい展開が可能である。

2. 自由電子レーザーの原理^{1) 2) 5)}

自由電子レーザーは、従来の炭酸ガスレーザーやエキシマレーザーと異り、物質のエネルギー準位と関係なく、電子エネルギーを直接レーザーに変換する新しいレーザーである。

高エネルギー電子ビームを「ウイグラー」の交互磁場内に入射すると、電子が磁場で偏曲され光の自発放射及び誘導放射が起り、強い自由電子レーザーを発生する(図-1)。

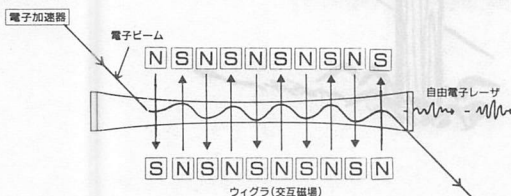


図-1 自由電子レーザーの原理

このときの電磁波の波長 λ は次のように表わされる。

$$\lambda = \frac{\lambda_w}{2\gamma^2} \left(1 + \frac{1}{2} K^2 \right)$$

λ_w : ウイグラー磁場の周期(cm)

γ : 電子エネルギーの相対論的係数

$$\gamma = \frac{E}{0.511} + 1$$

E: 電子エネルギー(MeV)

K: ウイグラー強度パラメーター

$$K = 0.0934 \times B_0 \times \lambda_w$$

B_0 : ウイグラー磁場の強さ(KG)

この式は、波長 λ は電子エネルギーの2乗に逆比例して短くなり、ウイグラー磁場の周期に比例して短くなることを示している。

次に、自由電子レーザーの発生メカニズムを説明する。このメカニズムは、次の2段階にわけられる。(図-2)。

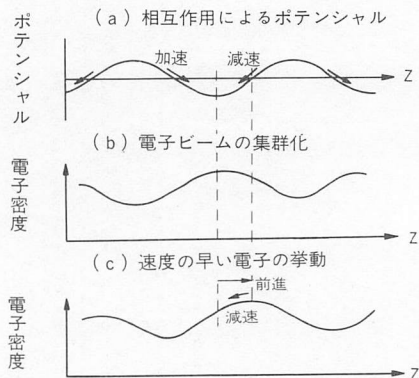


図-2 自由電子レーザー発生メカニズム

(イ) 自然放射光による電子ビームの集群化

高エネルギー電子ビームは、ウイグラーの交互磁場で偏曲され、シンクロトロン放射光を自発放射するが、ウイグラーの多くの偏曲部からの放射光が干渉し強い

* 住友電気工業(株)研究開発本部技師長

〒554 大阪市此花区鳥屋1-1-3

電磁場を生じる。これと電子ビームとの相互作用により、電子をZ方向に加速又は減速する力（ポテンシャル）が生じる。（図-2(a)）このポテンシャルにより、電子ビームの半分は加速され、半分は減速される結果、電子密度に濃淡が生じ集群化(Bunching)が起る。（図-2(b)）

(ロ) 自由電子レーザーの誘導放射

集群化された電子群内では、エネルギーすなわちZ方向の速度に巾が生じるが、速度の早い電子はこの先Z方向に進行し、ポテンシャルの減速位相に合うようになる。（図-2(c)）そして、この減速エネルギーが光に与えられ、このため全電子のエネルギーは減少する。これにより強い自由電子レーザーの誘導放射がおこる。

このように自由電子ビームの放射は、電子ビームの集群化によるが、電子ビームのエネルギーの拡がりや空間の広がり(エミッタンス)が大きいと集群化が起り難い。従って、自由電子レーザーを放射するためには、良質な高エネルギービームが必要である。

3. 自由電子レーザーの特長

自由電子レーザーは、従来の炭酸ガスレーザーやエキシマレーザーと比べて実用上極めて優れた特長を持っている。この特長を次に記す。

(1) 周波数可変

自由電子レーザーの周波数は、電子ビームのエネルギーの2乗に比例する。従って必要とする波長にチューニングすることができるし、空気に吸収されない波長を選択的に発振させることもできる。

(2) レーザー出力が大きい

従来のレーザーと比べて極めて大きい出力を得ることができる。米国では最大出力1ギガワット（平均出力数メガワット）の発振に成功している。なお炭酸ガスレーザーの世界最高出力は100キロワット程度である。

(3) ガス媒体などの劣化なく連続運転可能

自由電子レーザーは、物質のエネルギー準位と関係なく発振できるため、エキシマレーザーや炭酸ガスレーザーなどのように励起ガスが不要である。このため、装置の構成が単純で加速器と同程度の連続運転が可能である。

(4) 短波長の発振が可能

入射電子エネルギーを高くすることなどにより、短波長のレーザーの発振が可能である。エキシマレーザー(ArF 0.193ミクロン)より短い波長のレーザーの発振も可能である。

(5) 変換効率が高い

電子ビームエネルギーから、直接レーザーエネルギーに変換されるので変換効率が高く30%程度のもので得られている。今後の開発でそれ以上の効率が可能と考えられている。

4. 自由電子レーザー発生装置

現在、様々な自由電子レーザー発生装置が内外で開発されているが、産業利用の目的に合致した装置は次のようである。（ライナック＝線型加速器）

- 高出力用 → 誘導ライナック自由電子レーザー
- 小型化用 → RFライナック自由電子レーザー
- 低波長用 → 蓄積リング自由電子レーザー

これらの装置の所要電子エネルギーと波長とを図-3に示す。

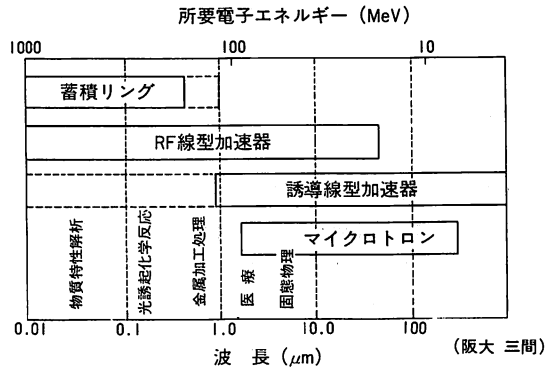


図-3 自由電子レーザー装置の所要電子エネルギーと波長

(1) 誘導ライナック自由電子レーザー

誘導ライナック（誘導線型加速器：Induction Linac）を用いた自由電子レーザー装置である。誘導ライナックは、コアの磁束の時間的変化により軸方向に加速電場を発生させるもので、出力に対する制限は理論上はないが安定性に問題がある。従って安定な誘導ライナックが得られれば高出力自由電子レーザーとして最適である。（図-4）

米国のローレンス・リバモア国立研究所では、4.5 MeVの誘導ライナック(ETA)で1GWの出力を達成している。このとき、テーパ付ウイグラーが用いられ、転換効率は30%以上と報告されている。我国においても、大阪大学レーザー研究所その他で研究がおこなわれている。なお、米国では高効率化により、ミラーなしの「One Path 自由電子レーザー」が積極的に開発されている。

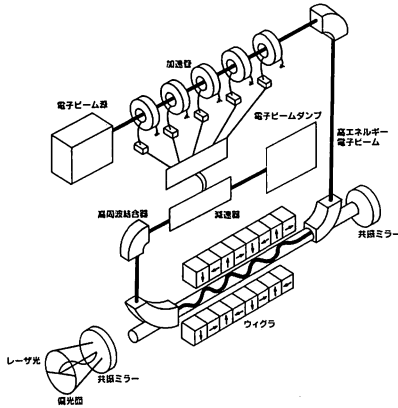


図-4 誘導ライナック自由電子レーザー装置

(2) RFライナック自由電子レーザー

通常用いられているRFライナック(RF線型加速器)は、電子ビームの品質がよくないので、エミッタンスやエネルギーの拡がりや改善して自由電子レーザーの発振に用いられている。ピーク電流は、誘導ライナック程大きくとれないが(100A程度)、単位長さ当りの加速エネルギー(MeV/m)が大きくとれるので、装置の小型化に適している。スタンフォード大学とTRWのグループは、超電動材料を用いた66MeV RFライナックで、オプティカル・クライストロンとテーパー付ウィグラーとを組合せた新しいウィグラーを開発し自由電子レーザーを発生している。

(3) 蓄積リング自由電子レーザー

蓄積リング(Storage Ring)は、良質な電子ビームを供給することができる。スタンフォード大学やパリ大学、電総研、分子研などで開発されている。ウィグラーは、オプティカル・クライストロン(Transverse Optical Klystron : TOK)が用いられることが多いが、これは円型蓄積リングのとき長い直線部をとれずウィグラー段数に制限があるとき有利である。しかし一般に、蓄積リング自由電子レーザー装置は、電子

ビームがウィグラーを通過しレーザーを発生したのちは、エネルギーの拡がりやエミッタンスが悪くなるため蓄積リングの電子ビームの安定性を悪くする。従ってあまり大電流をとれない欠点をもっている。最近ではリング中の直線部を長くした高利得型の設計が多い。スタンフォード大学で建設中の高利得型のレストラック型蓄積リング自由電子レーザー装置を図-5に示す。(蓄積電子エネルギー 1 GeV)

5. 自由電子レーザーの開発の現状^{3) 4) 5) 6)}

1977年、スタンフォード大学のMadeyらのグループがRFライナックを用いて自由電子レーザーを発振してから、世界各国で研究開発が盛んにおこなわれている。我国では大阪大学レーザー研究所が300kWの発振をしている。代表的な自由電子レーザーの発振波長・最大出力を図-6に示す。

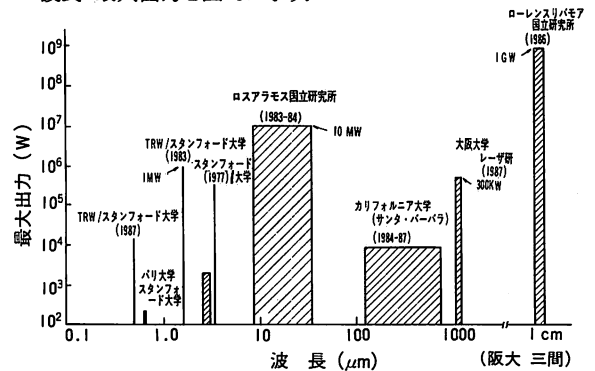


図-6 自由電子レーザー発振波長・最大出力

我国の自由電子レーザーの研究開発は、電総研・分子研・日大・理研・阪大などでおこなわれているが、全体として米国などに比べて研究施設・研究者数・開発費は極めて少ない。米国では自由電子レーザーはプラズマ加熱など実用化の段階に入りつつあるが、我国では基礎研究段階である。我国にとって、この技術開発のおくれは早急に挽回すべき重要な課題である。

なお、最近の自由電子レーザーの研究開発のテーマとしては、短波長化、高出力化、高効率化、小型化などの基本テーマのほかに、電磁波ウィグラー、マイクロウィグラー、2段階ウィグラー、ガス封入型自由電子レーザーなど極めて興味ある研究開発がおこなわれている。今後これらの研究開発が成功すると、さらに自由電子レーザーの応用が広がるものと考えられる。

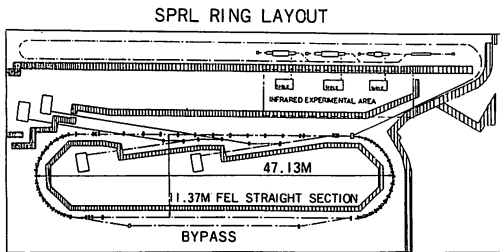


図-5 スタンフォード大学のレストラック型蓄積リング自由電子レーザー装置

6. 自由電子レーザーの応用⁷⁾

自由電子レーザーは、シンクロトロン放射光やエキシマレーザーと異り波長可変、高出力などの優れた特性をもっているため、多くの分野で期待されている。

(1) 光誘起化学反応

光分解による薄膜の生成において、エキシマレーザー(ArF 0.193 ミクロン)より短い波長が得られることは新しい反応の可能性を示す。例えば、光吸収端波長をみるとSiH₄-0.110ミクロン、CH₄-0.120ミクロンなどの新しい反応が可能となる。さらにエキシマレーザーはガス劣化のため寿命が 5×10^6 ショットと短いに対し、自由電子レーザーは加速器と同程度の極めて長時間連続運転が可能である。また所要波長に応じたDirect-Write IC加工法が開発されている。またシンクロトロン放射光と比較すれば、自由電子レーザーは化学結合の切断に必要な波長のみで投入して反応を起こすことができるが、シンクロトロン放射光では連続スペクトルのため余分な光を与え材料を加熱してしまう。このように自由電子レーザーは、高度なCVD(Cheical Vapor Deposition)に適しているし、また高出力のため高密度励起が可能である。

(2) 金属加工処理

現在、金属のレーザー加工はYAGレーザー(1.06ミクロン)とCO₂レーザー(10.6ミクロン)が主に用いられている。一般に金属加工の所要レーザー出力速度(W/cm²)は次のとおりである。

結晶微細化…… $1 \sim 10^2$ W/cm²

衝撃硬化 …… $10 \sim 10^3$ W/cm²

切断、穴あけ、溶接、焼入れ…… 10^4 W/cm²

現在のYAGレーザーやCO₂レーザーの世界最高出力は100kW程度であるが、自由電子レーザーはメガワットクラスの平均出力が可能であり、加工時間の短縮その他有利な点が多い。

自由電子レーザーの特長を生かした金属加工処理として次のものがある。

- 短波長→微細加工、薄板加工、表面処理
- 高出力密度→難加工材(高融点、高熱伝導材)の溶接、切断、硬化膜の除去
- 波長可変→複合材加工、メッキ
- 大出力→厚板の溶接、切断、高速加工

しかし、YAGレーザーやCO₂ガスレーザーとのコスト比較は、自由電子レーザー採否の重要な要因である。

(3) 原子力発電施設の廃止措置(廃炉)

原子力発電施設の廃炉作業は、残存放射能のため遠隔解体作業となる。主な解体の対象は、原子炉圧力容器、一次冷却機配管、生体遮蔽壁である。現在、原子力工学試験センターでレーザーによる原子炉圧力容器遠隔切断システムが開発されている。このときの、レーザー切断対象素材の目標厚さは次のとおりである。

低合金鋼 …… 500mm

ステンレス鋼 …… 300mm

この解体は、できる限り短時間で行う必要があるため高出力のレーザーが必要でCO₂レーザー 20kW 2台が開発に用いられているが、自由電子レーザーによるとさらに高出力化が期待できる。また生体遮蔽壁は、厚さ1cmの鋼板で内張されたコンクリート壁で、この解体は、まず放射化された鋼板のみ切断する必要があるこれらは、空気に吸収されない波長の自由電子レーザーにより、遠隔場所から切断することが望ましい。

(4) 同位体分離

様々な元素の同位体を、レーザーによる選択励起法により分離することは、古くから研究されている。自由電子レーザーは、波長可変や出力が大きいためにより同位体分離に適している。

◦ウラン濃縮

ウラン235の同位体分離である。励起波長と現用レーザーは次のとおり。

原子法——0.59 μm 銅蒸気レーザー

分子法——16 μm 水素ラマンレーザー

分子法のレーザーとして、波長16 μmの自由電子レーザーが適用できる。

ただし、スペクトルの巾(Band width)が狭い高分解能レーザーが必要な原子法ウラン濃縮については適していない。

◦トリチウム分離

重水炉の重水中に生成するトリチウムを分離する。トリチウムの半減期12.26年である。

◦ジルコニウム90濃縮

原子燃料被覆管材料のうち中性子吸収の少ないもののみで被覆管をつくる。ジルコニウム90を天然の51%から97%に濃縮すると、天然ウランの消費が40%節約される。

◦ほう素10

制御材としてのほう素のうち、中性子吸収に有効なもののみを分離する。

◦ステンレス鋼の素材(濃縮)

鉄56, 57, 58, クロム53, ニッケル61は中性子吸収が少い。これらでステンレス鋼をつくると中性子経済の優れた構造材料となる。

(5) 核融合炉のプラズマ加熱

核融合炉トカマクの高周波プラズマ加熱のうち、電子サイクロトロン共鳴加熱に自由電子レーザーが用いられようとしている。現在用いられているジャイロトロンは、周波数 200GHz以上ではむずかしいため、自由電子レーザーを用いることが、米国ローレンスリバモア国立研究所でトカマク(Alcator-C)を用いて行われつつある。この自由電子レーザーは、誘導ライナック自由電子レーザーで、10MeVのETA II 誘導ライナックが用いられる。

(6) 宇宙と地上間の信号・エネルギー伝送

レーザーレーダーやエネルギー伝送用として、空気透過度の高い波長(大気窓)(図-7参照)を選択できる自由電子レーザーを用いようという計画がある。レ-

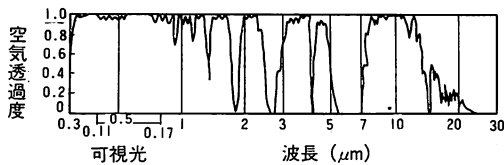


図-7 光の空気透過度と波長との関係

ザーレーダーは、地上から90km位の大気観測や、月や人工衛星の測距に利用されようとしている。また、レーザーエネルギー伝送は、マイクロ波によるエネルギー伝送に替るものとして、有人宇宙基地や人工衛星へのエネルギー供給を自由電子レーザーで行うことが計画されている。

(7) 電子加速器

ミリ波の高速場加速器に自由電子レーザーを用いる研究が進んでいる。これによると単位長さ当りの加速エネルギー(MeV/m)を大きくすることが出来、小型化が可能である。

(8) 物質特性解析

固体表面の励起状態の研究や分光用として使用される。特に極微細部の特性解析に用いられる。

(9) 医療・バイオ

スタンフォード大学で、自由電子レーザーの波長可変の特性を生かしたレーザーメスやバイオへの応用が開発されている。組織の切断は短波長で、止血は長波長の熱的効果で行うと使いわけすることが考えられている。

7. おわりに

自由電子レーザーは、上記のように様々な優れた特徴をもつため、今後の先端技術産業の基盤技術として大いに期待されている。米国始め西欧・中国などでは熱心に開発が進められているが、我国でも大阪科学技術センターの「光技術高度化懇談会」の下にワーキング・グループ(主査、阪大 三間教授)が設けられ、わが国としての開発プロジェクトの検討が行われている。この国家プロジェクトが軌道にのり、我国の自由電子レーザーの研究開発が、外国と肩を並べられるように発展することを期待すると共に、諸賢の御協力、御支援をお願いする次第であります。

参考文献

- 1) 近藤 淳; 電子技術総合研究所調査報告第200号(1979)
- 2) 三間罔興; 自由電子レーザー, レーザー研究第15巻第6号(1987)
- 3) 三間罔興: Private Communication(1987)
- 4) 豊田浩一; 自由電子レーザー, 科技厅 光科学技術の現状と将来展望(分科会資料) p.44(1987)
- 5) 河村良行; 自由電子レーザー研究における最近の進歩, レーザー研究第13巻第12号(1985)
- 6) 富増多喜夫 et al; 蓄積リングを用いる自由電子レーザー, Private Communication(1987)
- 7) 自由電子レーザーワーキンググループ(光技術高度化懇談会); Private Communication(1987)
(国際会議論文(英文)は略す。)

