

■ 展望・解説 ■

# 核融合とレーザーエネルギー科学

## Progress on Fusion Research and Laser Energetics

中 井 貞 雄\*

Sadao Nakai



### 1. はじめに

いま人類が、その文明が直面している最大の課題は地球環境問題であり、これはすなわちエネルギー問題である。文化的存在としての人類の未来は、核融合エネルギーの開発及び活用なくしてはありえない。それも遠い未来ではなく、間もなく来る来世紀において、地球環境を保全しつつエネルギー資源の制約から解放される核融合エネルギーこそ、技術先進国で資源のない我が国が、率先して推進すべき研究開発課題である。

核融合の方式には大別して二つの方法がある。「磁気閉じ込め」と「慣性閉じ込め」方式とである。核融合反応に必要な1億度の高温プラズマを、前者は磁気力により容器から離して真空中に保持するものであり、トカマクに代表される。後者はレーザー等により瞬時に高温高密度プラズマを発生し、慣性による有限の膨張時間より早く核融合反応を完結させエネルギー発生する。これら二つの方式は、核融合プラズマを発生する物理プロセスも、基盤とする技術も全く異なる。同じ目標に向け、相補的なアプローチとして、物理的、技術的な利害得失を比較しながら、バランスをとりつつ平行して進めるべきものと考えられている。

レーザー核融合は、レーザー技術の進歩とともに長足の進歩をみせ、核融合点火・燃焼及び実用動力炉を具体的な設計にもとづいて、スコープに捉えうる状況に達した。特に光技術、レーザー技術が、科学及び産業技術の新しい展開をもたらそうとする中で、レーザーの極限性能を追求し、それを基盤技術とするレーザー核融合は、新技術分野開拓の索引力として注目されている。米国のリバモア研究所やロシアのチェリアビンスク70等の軍事研究所が、冷戦構造崩壊後の民生主導の研究開発テーマとして、広範な関連波及分野をもつ

レーザー核融合を取り上げようとしていることは見のがせない。

### 2. 核融合エネルギー開発の現状と展望

核融合に必要なプラズマは、その密度 $n$  ( $m^{-3}$ )、温度 $T$  (度) 及び閉じ込め時間 $\tau$  (秒) で評価される。図-1、図-2に磁気閉じ込め(トカマク)、慣性閉じ込め(レーザー核融合)それぞれについての最近の進歩の状況を示す。1960年代から70年、80年代と着実にプラズマメータは向上し、核融合は当初の目的通り、新エネルギー源として利用しうろの見通しが立ち、実用化へ向けての新しい研究開発段階に達した。

炉心プラズマ工学としての最終段階である動力炉に適合した核融合燃焼炉心の実現(磁気閉じ込めでは自己点火条件、慣性閉じ込めでは高利得領域)と、技術

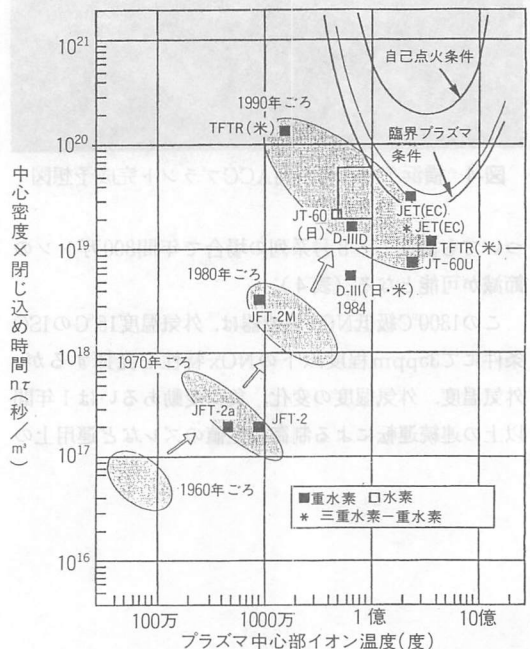
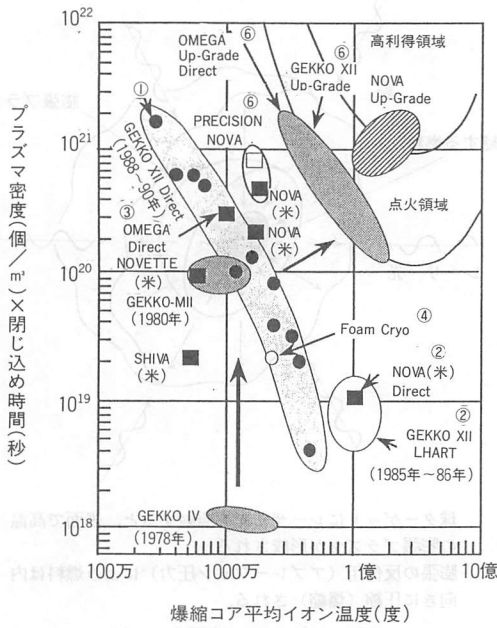


図-1 トカマク方式によるプラズマ性能の向上

\*大阪大学 レーザー核融合研究センター長・教授  
〒565 吹田市山田丘2-6

(註)平成6年4月13日第15回定時総会にて特別講演



- ① すべての ● はDT置換ポリステレン中空球
- ② DTガス封入ガラス球
- ③ DTガス封入ガラス球
- ④ 固体D₂中空球
- ⑤ NOVA, NOVETTE, SHIVA は間接照射 (ホールラウム) ターゲット
- ⑥ 現在 (1992年) 建設中 (計画中・激光XII号増力) の装置の目標値

図-2 慣性閉じ込め方式によるプラズマ性能の向上

的及び経済的成立性をもった炉概念の確立とである。この段階での炉心プラズマ発生には、実用動力炉との整合性が要求される。物理的成立性が、技術的成立性、経済性と一体として検討評価されるべき段階となったのである。

このような状況をふまえ、核融合政策の新規見直しが世界的な規模で行われている。その最も顕著な例は米国におけるそれである。徹底した現状分析と技術動向の調査、大規模な公聴会による意見集約のプロセスを経て1990年にその後の政策の基本となる答申がまとめられた。これら米国の動きを図-3に慣性核融合を中心とした世界的な研究動向とともに示す。国家エネルギー戦略 (National Energy Strategy) として1990年に出された答申において、核融合エネルギー開発が具体的な長期エネルギー戦略として明確に取り入れられた。これと平行して核融合政策諮問委員会 (Fusion Policy Advisory Committee: FPAC) が核融合研究開発プロジェクトの詳細な分析をもとに、その後の米国における核融合政策の基本となっている答申をまとめた。

FPAC答申の最重要提言は、2025年に核融合実証炉を完成すべしということである。このための具体的な方策として次の5点の実施を答申したものである。

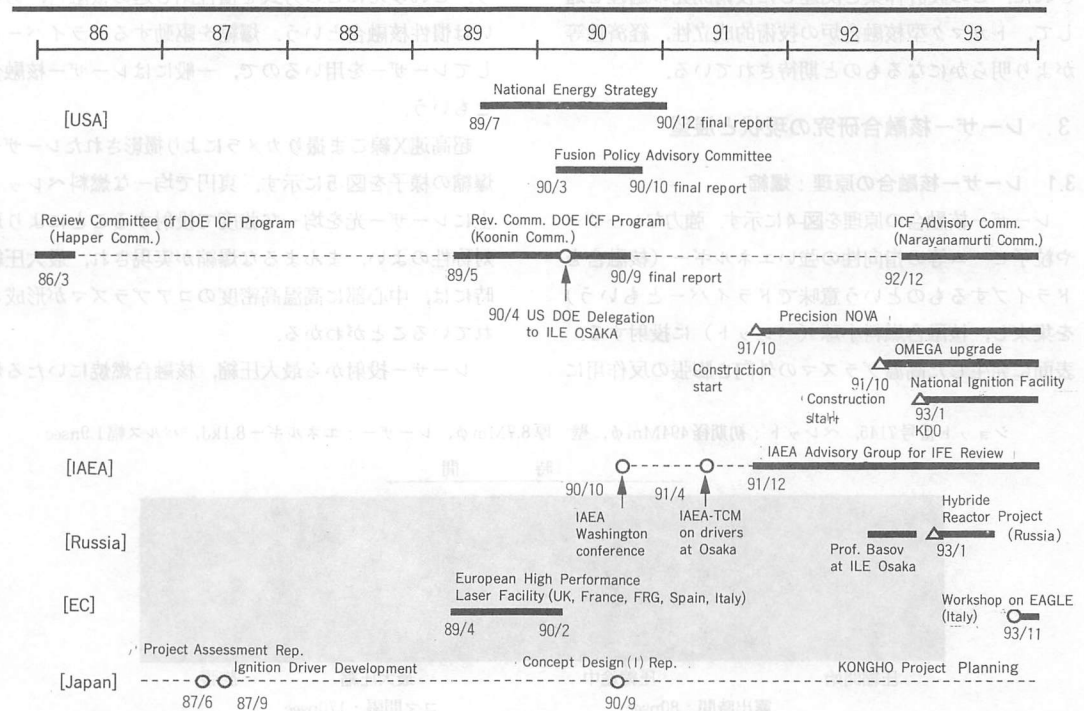


図-3 Recent Movement of Inertial Confinement Fusion in the World

(1) 磁気核融合と慣性核融合を、核融合エネルギー開発のアプローチとして平行して推進すべきこと。

(2) 慣性核融合、磁気核融合ともに、国際協力を積極的に推進すること。

(3) 磁気核融合の分野では、国際熱核融合実験装置(ITER)を国際協力により推進するとともに独自の国内プロジェクトを平行して進めること。

(4) 慣性核融合の分野では、既設のローレンスリバモア研究所のNOVAレーザー及びロチェスター大学のOMEGAレーザーの増力を行い、核融合点火実験装置を建設すること。

(5) 核融合研究開発において、産業界及び大学の協力を積極的に活用すること。

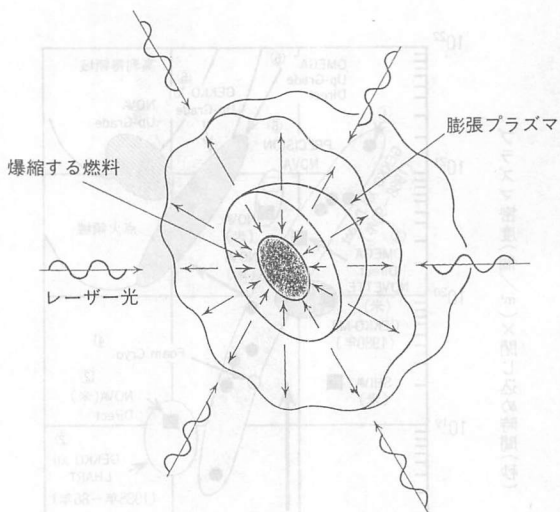
その後の米国核融合計画は、図-3に示すように、慣性核融合に関しては答申どおりに進められ、国家プロジェクトとしての点火装置(National Ignition Facility : NIF)計画が1993年1月にスタートした。これはレーザー出力1.8メガジュールのガラスレーザーを建設し、核融合点火とともにベレットエネルギー利得10~20を達成しようとするものである。

磁気核融合に関しても、国際協力によるITER計画が6年間の概念計画を終え、1993年より6ヶ年計画で工学設計(Engineering Design Activity)が開始された。この設計作業と関連した技術開発の過程を通して、トカマク型核融合炉の技術的成立性、経済性等がより明らかになるものと期待されている。

### 3. レーザー核融合研究の現状と展望

#### 3.1 レーザー核融合の原理：爆縮

レーザー核融合の原理を図-4に示す。強力なレーザーや粒子ビーム等の指向性の強いエネルギー(核融合をドライブするものという意味でドライバーともいう)を集束し、核融合燃料小球(ベレット)に照射する。表面に発生した高温プラズマの外向き膨張の反作用に



球ターゲットにレーザー光を照射すると、表面で高温の膨張プラズマが形成される。膨張の反作用(アブレーション圧力)により燃料は内向きに圧縮(爆縮)される。

図-4 レーザー核融合の原理

より燃料ベレットの中心部を圧縮し、この結果中心に超高密度・高温プラズマが生成される。これを“爆縮”という。高温・高密度下での急速な核融合反応により、有限の膨張時間(慣性による)よりも早く燃えてしまう。これゆえにこの方式を慣性閉じ込め核融合、あるいは慣性核融合という。爆縮を駆動するドライバーとしてレーザーを用いるので、一般にはレーザー核融合ともいう。

超高速X線こま撮りカメラにより撮影されたレーザー爆縮の様子を図-5に示す。真円で均一な燃料ベレット上にレーザー光を均一な強度で投射することにより球対称性のよい、まんまるな爆縮が実現され、最大圧縮時には、中心部に高温高密度のコアプラズマが形成されていることがわかる。

レーザー照射から最大圧縮、核融合燃焼にいたる爆

ショット番号7145, ベレット:初期径494Mmφ, 壁厚8.7Mmφ, レーザー:エネルギー8.1kJ, パルス幅1.9nsec

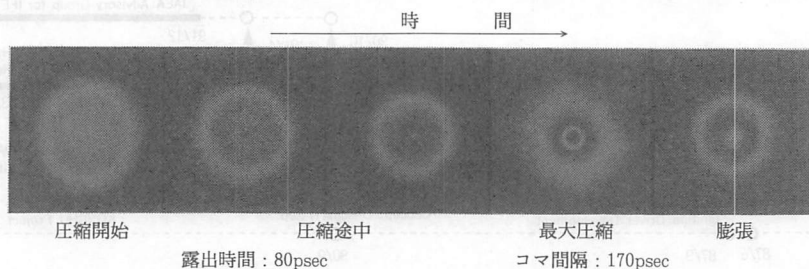


図-5 燃料ベレット爆縮のX線コマ撮り写真

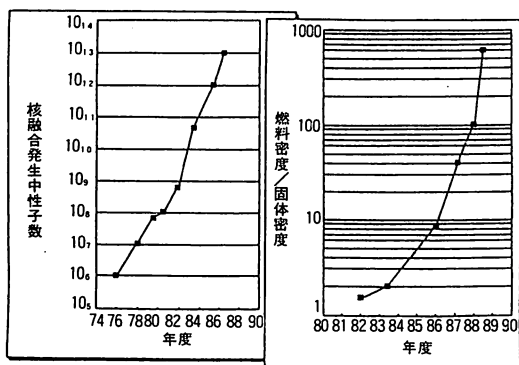


図-6 核融合発生中性子，燃料密度は飛躍的な上昇をとげレーザー核融合の物理的な可能性が明らかとなった。

縮過程には多彩な物理素過程が含まれており，基礎物理として極めて興味ある対象である。レーザー光に照射されたターゲット表面におけるプラズマ生成，強力なレーザー光とプラズマとの線形，非線形相互作用，X線の吸収，放出を伴う輻射エネルギー輸送と輻射電磁流体物理，固体表面からのアブレーションプロセス，衝撃波駆動と流体不安定性，フェルミ縮退（プラズマでありながらある種の規則性をもつ現象）など超高密度プラズマ物性，核融合点火と燃焼波などレーザー核融合が物理の新しい領域を拓きつつある。

これらの物理モデルがシミュレーションコードに組み込まれ，爆縮過程全体が正確に再現されるようになった。これにより燃料ペレットの最適化設計がなされ，爆縮プラズマパラメーターが目ざましく向上した。

図-6に大阪大学レーザー核融合研究センターにおける，爆縮コアからの核融合発生中性子数および爆縮コア密度の向上の記録を示す。10<sup>13</sup>個/ショットの中性子発生実験ではプラズマ温度1億度が観測された。初期固体密度の600倍に達する超高密度圧縮では，世界で初めて高密度プラズマにおける電子のフェルミ縮退が観測された。これにより，平均600倍，ベストショットで1000倍に達する超高密度爆縮の記録は不動のものとなり，レーザー核融合の物理的な成立性が確立された。その後米国をはじめとし，世界的にレーザー核融合推進の気運が高まった。

これまでに達成された爆縮プラズマパラメーターをプラズマ密度n，慣性閉じ込め時間τ，温度Tを用いたnτT-図として図-2に示す。1978年の激光IV号のデータ以後着実に進展してきた。激光Ⅻ号により高温モードから，高nτモードの爆縮まで広範なパラメーター

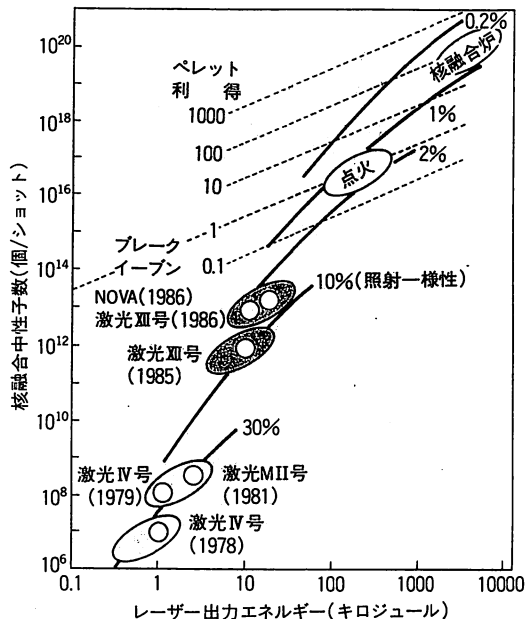


図-7 核融合臨界（点火・ブレイクイーブン），および核融合炉達成に必要なレーザーエネルギー

領域でデータが得られている。これは爆縮物理の理解が進み，ターゲット設計，レーザー制御により爆縮モードが自在に制御しうることを示している。

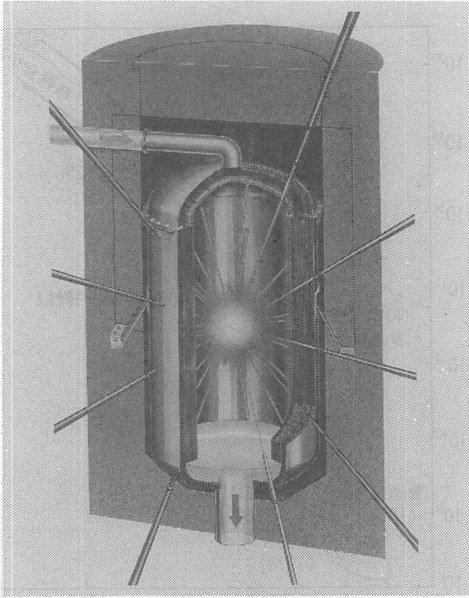
核融合点火（ignition）および核融合炉に必要なとされる高利得（high gain）領域を同図右上に，日米の次期計画の目標点と共に示す。米国の計画はすでに動きだしており，我が国の計画についても早急な着手が待たれている。

図-7にレーザーエネルギーと中性子数，核融合利得との関係につき，これまでの達成値と爆縮物理データを繰り込み，補強されたシミュレーションによる予測値を示す。100kJ級レーザーにより点火・ブレイクイーブンが，MJ級レーザーにより炉に必要なとされるペレット利得の得られることが高い確度で予測されている。

### 3.2 レーザー核融合動力炉への道

実用核融合炉の概念設計は，炉心プラズマ生成の進歩と共に，世界的にも数多く実施されてきた。我が国でも，流体Li流ブランケットを用いた「千里1号」以来，全国の炉工学及びレーザー関連研究者の協力のもと，炉設計・評価が行われてきた。実用炉構築の技術的実現性は高いものと評価されており，この事実は世界の炉工学専門家の間では広く認められている。

慣性核融合炉がエネルギーシステムとして経済的に成り立ち得るための最大の課題は，炉用ドライバーで



液体リチウム鉛が核融合エネルギーを吸収し、熱交換器へと導かれる

図-8 レーザー核融合炉「光陽1号」の炉チャンバー

ある。高効率（5～10%）、高繰り返し（～10Hz）、短パルス（～10ns）、高パルスエネルギー（～10MJ/パルス）でかつ高平均出力（～10MW）を全て満足した、低コスト長寿命ドライバーが必要なのである。このような仕様を満たしたレーザー-或は粒子ビームドライバーが開発されない限り、慣性核融合の実用化はあり得ない。KrFエキシマーレーザー、重イオンビー

ム、パルスパワードライバー等が炉用ドライバーとしての可能性をもつものとして、その開発研究が進められている。最近急速な進展を見せているレーザーダイオード（LD）励起固体レーザーが、コストを含め炉用ドライバーとして大きな可能性をもつものとして注目されている。図-8に最近設計されたLD励起固体レーザーを用いた動力炉「光陽」の炉チャンバーを示す。

図-9原型炉に至る開発戦略を示す。100kJ級レーザーによる「科学実証」、MJ/パルス・シングルショット動作レーザーによるペレット利得 $Q=100$ を示す「工学実証」、 $Q=100$ の連続動作による「炉工学試験」を経て「原型炉」の実現を目指す。

レーザー核融合炉開発の大きな特徴の一つに、レーザーシステム、炉チャンバー、燃料ペレットシステムがそれぞれ独立に開発研究が実施できること、さらにプラントにおいてもそれぞれ独立建屋として同時並行して建設が進められることがある。これらの技術要素、プラントを構成するサブシステムの開発・研究を爆縮に関する基礎研究と有機的に連係して行うことにより期間的にも、経済的にも効率のよい進展が期待される。

#### 4. レーザーエネルギー科学

レーザーのエネルギー応用は、最近のハイパワーレーザー技術の進歩に支えられ、基礎科学から産業技術に至る広範な分野で新しい展開を見せている。

最近話題となっているレーザーの高機能化は、(1)フ

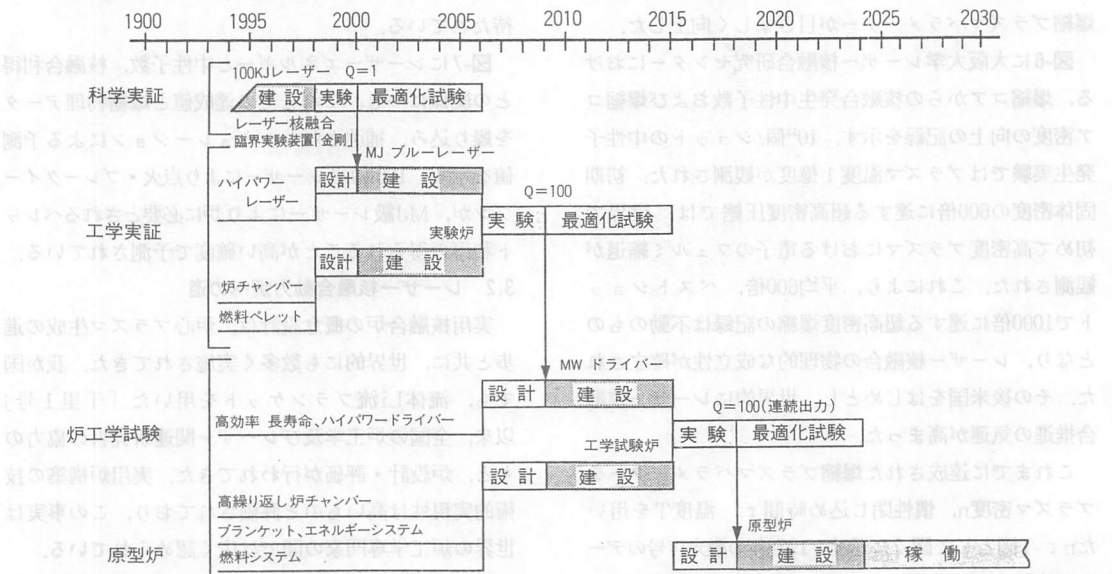


図-9 慣性核融合エネルギー開発の戦略

表1 高機能レーザーと先端科学技術

分野	技術項目	事項	レーザーの特性
エネルギー	レーザー同位体分離(ウラン濃縮) レーザー核融合 レーザー放電・プラズマ加熱 エネルギー伝送	原子法, 分子法 爆縮核融合 レーザー誘電 レーザー推進	単色性 高効率 高ピークパワー 高平均パワー 偏光特性
物質化学	レーザー化学 新素材開発・極限材料	分解, 合成, 精製 反応制御 レーザーアブレーション	単色性 可調性
加工・プロセス技術	レーザー熱プロセス レーザー光化学プロセス レーザー・X線リソグラフィ	溶接, 切断, マーキング, トリミング, 焼入れ, 合金化, 変態 L-CVD, フォトケミカルエッチング, ドーピング レーザー・プラズマX線リソグラフィ	短波長 高効率 可調性 高収束性
理化学	原子分子・原子核物理 レーザー粒子加速 X線レーザー 科学計測・工業計測・分析	レーザークーリング, レーザ分光 ビート波電子加速 コヒーレントX線 超高時間, 空間分解計測	すべての特性 が活用される
医学応用	治療 計測・診断	レーザーメス レーザー凝固装置 生体刺激 生体物理・化学計測	集光性 単色性
通信・情報	コヒーレント通信 三次元・三原色ディスプレイ	多重光通信 高速立体天然色写真	可干渉性 可調性

エムト秒にいたる極短パルス発生, (2)集光点で $10^{20}$ W/cm<sup>2</sup>にもおよぶ良質のビームでかつ高尖頭出力, (3)数100kWの安定動作が可能な高平均出力, (4)物質の光化学反応を誘起しうる光子エネルギー領域への短波長化, (5)波長可変性能とスペクトルの狭化等である。

レーザーがその特徴を生かして活用される科学および産業技術における応用分野と技術項目, 活用されるレーザーの特性をとりまとめて表1に示す。

4.1 レーザー加工・プロセッシング

原子炉燃料パイプのような特殊合金の高精度溶接にレーザーを用いる研究は, 当初より注目されてきた。最近金属, セラミックス, プラスチック等単純に分類しえないような新素材が開発され, かつ複合コン

ポーネントとして使用されるに及び, レーザー加工の汎用性, 制御性, 極限状態を作り得る能力等が注目されている。基礎となるデータベースの蓄積と相まって, レーザー加工ジョブショップも全国的に普及してきている。

美浜原子炉の冷却パイプの破損は, 原子炉工学としても, また社会的にも大きな話題となった。このような細管の補修, 補強にファイバー伝送されたレーザー光による遠隔加工, 溶接が用いられている。特に最近のNd:YAGを中心とする固体レーザーのハイパワー化は目覚ましく, 大型建造物の重加工にも用いられようとしている。この特徴は, ファイバーエネルギー伝送が可能ることによる, 加工ロボットとの整合性がよいことである。

レーザー光化学プロセスを利用した加工, 処理技術は, 熱プロセスとは全く異なる作用になる。図-10に化学結合エネルギーと各種エキシマーレーザー波長を示す。短波長を用いることにより直接化学結合を切断し, 分解することが出来る。図-11のようなアブレーション(分解除去)加工により熱変性領域のないシャープな加工が可能である。今後エキシマーレーザーのハイパワー化, 固体レーザーの高調波変換等によるハイパワー短波長レーザーの実用化とともに大きな応用分野を拓くものと期待されている。

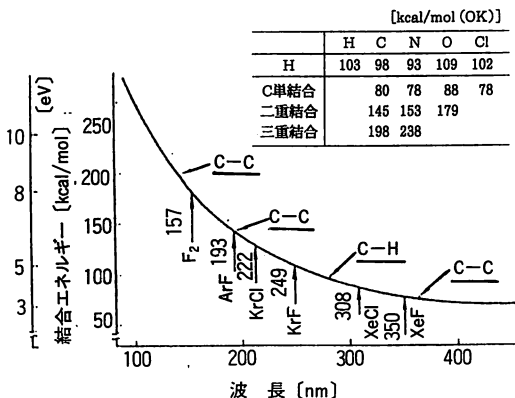


図-10 化学結合エネルギーとエキシマーレーザー波長

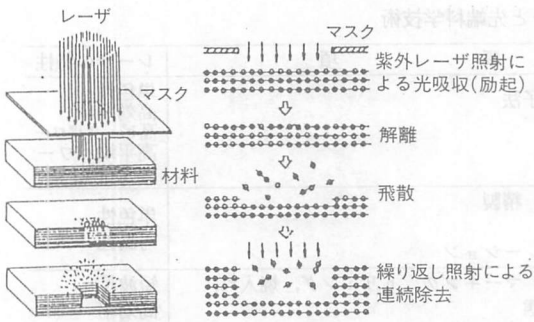


図-11 アブレーション加工の原理

物質の特定の励起あるいは解離エネルギーに波長を合わせたレーザー光を用いれば、選択的に化学反応を制御することが可能となる。また短パルスであることから急熱・急冷が可能である。偏光制御も容易であることから配向性をもった反応制御も可能である。また高温の反応容器の壁効果を取り除いたクリーンな化学合成が期待される。

短波長、波長可変、パルス波形制御可能なハイパワー、高効率レーザーが実現され、さらにホトンコストが低減されると、研究開発のみならず、化学工業において大きな用途が拓けるものと期待されている。

レーザーCVDやレーザーアブレーションによる薄膜形成、超微粒子合成、バルク化学合成等注目を集めている。

4.2 レーザーによる放電制御、レーザー誘雷

雷が所かまわず落ちる。雷雲とともにその領域も移動していく。ただ人は首をすくめて、その通り過ぎ、止むのを待つ。夏の風物詩としては何となく情緒があっ

ていいが、コンピュータ等高度精密機械が四六時中稼働している近代都市では、そうばかりも言っておれない。レーザー誘雷では雷雲の動きを電位傾度等で追いかけるながら、レーザーを照射することにより、所定の避雷塔に雷を誘導する。このための基礎研究も進められている(図-12)。誘雷に適したレーザーのハイパワー化により、実用可能となるかもしれない。光を用いた放電制御やトリガーはレーザーの初期より高電圧放電工学で用いられてきた有効な技術である。

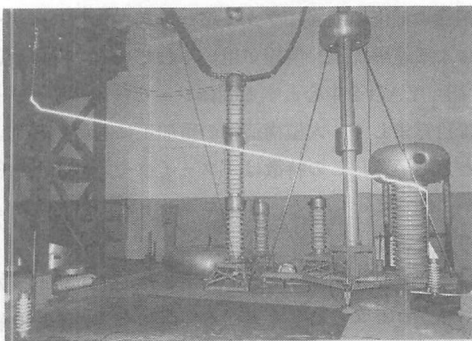


図-12 自然雷のレーザー誘雷のためのレーザー誘導放電

4.3 レーザー化学

通常の化学反応は、熱平衡の化学である。熱による基底状態からの励起による反応種の生成に依って反応が開始する。これに対し、光化学反応では光による励起体から反応が始まる。

4.4 X線レーザーと強力X線源

X線工学が新しい展開をみせつつある。これは強力X線発生技術が進歩し、エネルギー源としてX線あるいはX線ビームが利用しうようになったこと、及び原子層レベルでの超精密研磨、コーティング技術による回折・干渉素子などによるX線制御が可能になったことによる。

これまでのX線による計測、分析、診断に加え、X線環境シミュレータ、X線殺菌、半導体工業におけるX線リソグラフィ、X線化学、X線レーザーなどX線エネルギー応用の分野が注目を集めている。

レーザー核融合研究の波及効果として、レーザー生成プラズマから放射されるX線及び、X線レーザーが、大型加速器を用いた放射光とともにその産業技術及び科学への応用が注目されている。

集光した短波長レーザーでは、焦点でのレーザー強度が $10^{12} \sim 10^{14} \text{ W/cm}^2$ の範囲で吸収率は100%に近く、

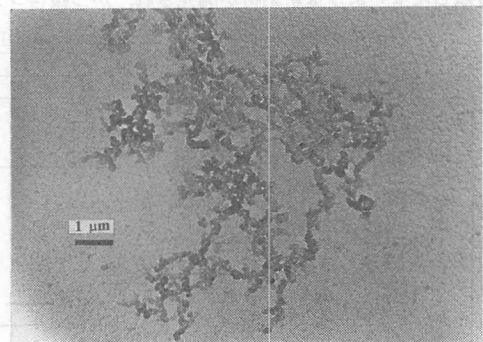


図-13 水中染色体のX線像。ウォーターウィンド領域(23Å~43Å)のX線により生体細胞の観察が可能となる。

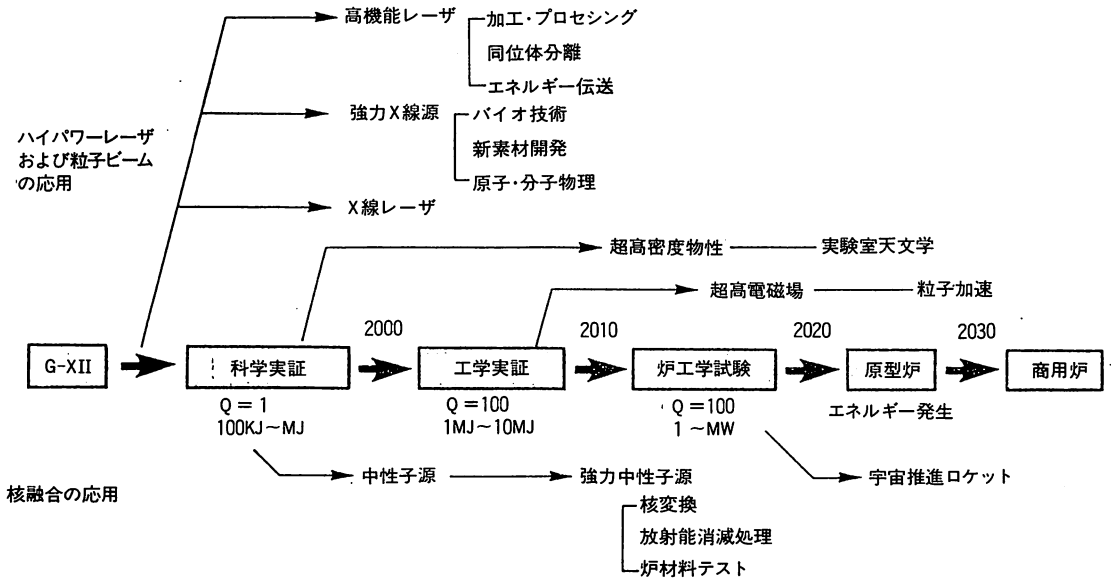


図-14 レーザー核融合の応用と波及効果

X線への変換効率は高Zターゲットを使った場合50%にも及び、かつX線の波長も10 Å (1 keV) ~ 100 Å (100eV) 近辺の軟X線であることが判明した。また上記レーザー集光点のスポットサイズに対応した高輝度微小点源であり、且つ放射時間がレーザーパルス幅程度の短パルスであること等応用上極めて有利な特徴をもっている。

高繰り返し短パルスレーザーを用いて発生した23 Å から43 Å の、いわゆるウォーターウィンド領域のX線により水中の生体組織を生きたままの状態 で高分解で観察し、かつ運動の状況を時間分解して連続的に撮影することが可能である。図-13に水中の染色体のレーザープラズマX線顕微鏡写真を示す。

レーザープラズマを用いたX線レーザーや、X線リソグラフィの開発は実用化にむけて進展しつつある。

4.5 レーザー同位体分離

レーザーによる同位体分離は、吸収スペクトルの同位体シフトを利用して、単色性のよいレーザー光により標的同位体のみを選択的に励起-電離して分離するものである。

現在ウラン濃縮の技術開発が活発に進められている。レーザー法ウラン濃縮には金属ウラン蒸気を作業物質として用いる原子法と、6フッ素ウラン (UF<sub>6</sub>) を用いる分子法とがある。米国や仏国では次期ウラン濃縮法として原子レーザー法を採用し、実用化にむけて大規模な開発を行った。我が国では電力会社を中心に

技術研究組合が設立され、レーザー (銅蒸気レーザー励起色素レーザー) や分離チャンバー等の機器開発を行うとともに、年間1tSWU規模のシステムを試作して性能試験を行うことになっている。プラントを設計するための基礎データベースの整備も重要で、大阪大学や原子力研究所、(財)レーザー技術総合研究所等で研究が進められている。

5. おわりに

レーザー核融合動力炉実現までのステップと所要時間の評価を図-14に示す。来世紀初頭には実用化の見通しが得られるまでになった。地球環境とエネルギー資源問題を抜本的に解決する技術的な切札である。実用化の技術的キーは、1~10MJ/パルスでかつ1~10Hzの高繰り返し動作可能な高効率短波長レーザーである。このような超高性能レーザー及びそれによる爆縮核融合は、新エネルギー源を開発するとともに、それ自身が先進科学技術に大きなインパクトと波及効果を及ぼすものである。いくつかの例を図-14に示す。このため欧米では、レーザー核融合を冷戦構造崩壊後の軍事研究の民生への転換、ハイテク開発の牽引力として位置付けようとしている。

フォトンと物質の相互作用は物理の基本であり、これの工学的応用はまさに今その夜明けを迎えようとしている。新しい科学技術の体系を作るものとして今後の発展が期待される。