

高速点火レーザー核融合炉への展望

神前 康次

大阪大学 レーザーエネルギー学研究中心 (〒565-0871 大阪府吹田市山田丘2-6)

Prospects for Fast Ignition Laser Fusion Reactors

Yasuji KOZAKI

¹Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2-6 Yamadaoka, Suita, Osaka 565-0871

(Received March 29, 2004)

The fast ignition concept is attractive because a high gain is achieved by small laser energy. Based on fast ignition targets the design windows of laser fusion modular power plants, which have several reactors with 100 ~ 200 MJ fusion pulse energies, and with 100 ~ 240 MWe electric powers, are analyzed. The feasibilities of a small-sized laser fusion experimental reactor suitable for developing their practical power plants are discussed. A road map for laser fusion energy and a new concept of a small-sized fast ignition experimental reactor are proposed.

Key Words: Laser fusion, Reactor design, Fast ignition, Road map

1. まえがき

レーザー核融合炉の概念とその開発の展望については、1995年にIAEAにより様々な慣性核融合炉概念がレビューされており、国内では1995年に、中心点火方式の物理とLD励起固体レーザーに基づくレーザー核融合発電プラント「光陽」の概念設計がまとめられた¹⁻³⁾。また1997年にIFEフォーラムにより、中心点火方式に基づくレーザー核融合エネルギー開発のロードマップが、ネットワーク解析方法により解析評価されてまとめられた(レーザー核融合エネルギー開発検討委員会、委員長神前康次)^{4,5)}。そこでは、50 kJ級の爆縮実験装置による高利得等価プラズマの実験から、MJ級レーザーによる高利得炉心の実験、及び実験炉を経て、実証炉に至る開発計画が提案された。

その後、高速点火方式の物理の研究が進み、2002年には大阪大学により、PWレーザーによる高速点火方式による加熱実験が成功し、2003年には高速点火方式による点火燃焼実験(FIREX)計画が開始されている。このような新しい状況を受けて、IFEフォーラムでは、国内の産官学の研究者、技術者の協力に基づいて、「レーザー核融合エネルギー開発ロードマップワーキング委員会(委員長苦米地顕、副委員長神前康次)」を設け、2003年10月に、高速点火方式を中心に据えたレーザー核融合炉開発の新しいロードマップをまとめた^{6,7)}。本解説では、この検討結果を中心として、高速点火レーザー核融合発電プラントの開発目標となるデザインウインドウ、開発のマイルス

トーン、必要な核融合実験装置、特にレーザー核融合炉技術の開発の中心となる実験炉概念、及び開発のクリティカルな課題、開発費等について述べる。

2. 高速点火レーザー核融合発電プラントのデザインウインドウ

高速点火方式は、爆縮レーザーにより高密度に圧縮した核融合燃料に、数10 psの超短パルスの超高強度レーザーを照射して、核融合点火・燃焼を引き起こす方式であり、従来の中心点火方式に比較して、爆縮・加熱に必要なレーザーエネルギーが小さい。このため小規模の実験装置で点火燃焼を実証し、さらに小型の実験炉による発電実証から、小型の核融合発電プラントの実用化へと進める可能性がある。現在大阪大学で建設が開始されたFIREX計画は、第I期で10 kJ加熱レーザーにより点火温度までの加熱を達成し、第II期で50 kJ級の爆縮レーザーと、50 kJ級の加熱レーザーにより点火燃焼を実証しようとするものである。このFIREXの規模は、米国(NIF)、及びフランスで建設が開始されている2 MJ級レーザーによる点火燃焼実験装置より一桁小型である。

レーザー核融合発電プラント成立の基本条件は、ターゲット利得(レーザーエネルギーの入力に対する核融合出力の比)とレーザー効率の積が10以上という条件であり、レーザーへの循環エネルギーを抑えて、十分な発電プラント総合効率を確保するための必要条件である^{1,8)}。

高速点火による高利得ターゲットが成立する物理的条

件は、燃料ターゲットを1500倍程度の高密度に圧縮することと高効率の加熱である。Fig. 1は燃料の密度を固体密度の1500倍にした場合の利得曲線の見通しを示す⁹⁾。点火燃焼に必要な加熱レーザーのエネルギーは、50~100 kJである。高利得にするためには、燃料のサイズを大きくして核融合出力を大きくする必要があり、燃料の質量の増加に応じて爆縮レーザーエネルギーが500~900 kJに増大する。Fig. 2には、PW実験用ターゲット、及び実用炉クラスのコーンターゲットとそのインジェクションのためのサポーターを示す。燃料ターゲットは、直径3.5 mmの球殻状の重水素とトリチウムの氷であり、リチウム鉛で出来たコーンの先端に配置されている。加熱レーザーは、このコーンを通じて、爆縮レーザーで爆縮された燃料に照射される。

Table 1には、このゲインカーブに基づく高速点火方式、及び光陽設計等の中心点火方式によるレーザー核融合発電プラントの主な設計パラメータを示す。レーザー核融合炉は、主要構成要素である炉心プラズマ、レー

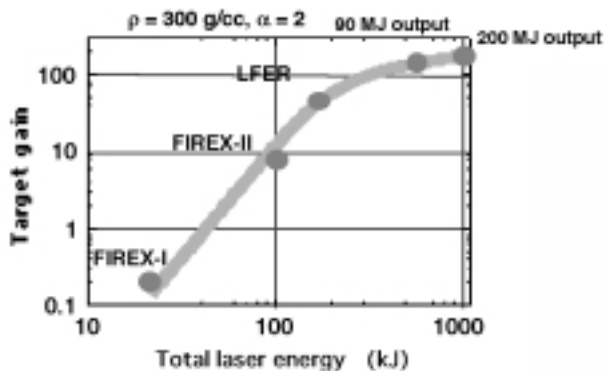


Fig. 1 Target gain curve of fast ignition.

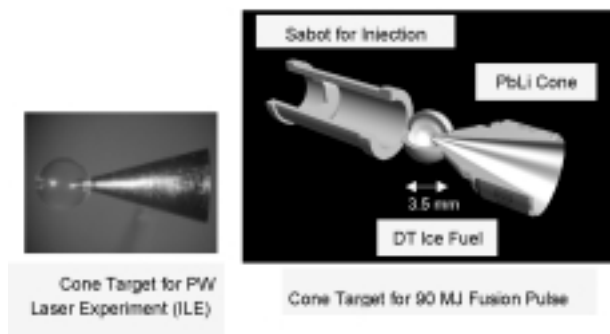


Fig. 2 Cone targets for PW laser experiment and a reactor of 90 MJ fusion pulse.

ザー、炉チェンバーの独立性が高い。またパルス繰り返し技術、かつモジュール技術という特徴を持つ。炉チェンバーのパルス繰り返し率は、パルス燃焼後に、次のレーザー照射とターゲットインジェクションが可能となる条件まで、炉チェンバーの環境が回復する時間、及びインジェクション技術の繰り返し速度に制約される。また炉1基の出力規模にも制約され、3~6 Hz程度が望ましいと評価されている^{8,10)}。他方レーザーのパルス繰り返し率は、10~20 Hzの可能性はある。表には、このような炉チェンバー、及びレーザーのパルス繰り返し率に関するそれぞれの特質を考慮して、1つのレーザーシステムで、複数の小規模の炉モジュールを駆動して、発電プラント全体の出力を600~1200 MWeとするモジュラープラントの構成を示している。

3. 開発のステップとマイルストーン

レーザー核融合炉の開発は、主要構成要素の独立性を活かして、炉心物理とレーザー技術を並行して開発すること、また目的に適合した小規模の実験装置により開発を進めることが可能である。Table 2には、開発目標、及び開発のマイルストーンとして必要な条件、核融合装置の仕様を示す。炉心物理の確立は、現在建設が始まった単ショットレーザーによるFIREXで行う。炉技術の総合試験と発電実証は、繰り返しレーザーの技術開発を着実に推進することにより、200 kJ級の繰り返しレーザーを用いるレーザー核融合実験炉(LFER)で行うという計画である。

4. 炉心物理、レーザー、炉技術の重要な開発課題

4.1 炉心物理

高速点火ターゲットの炉心物理の最も重要な課題は、超短パルスの加熱レーザーによる相対論的電子により、効率のよい局所的加熱を可能とするような高速点火の物理の確立である。またコーン装着固体燃料の高密度圧縮が必要であり、これらを評価できる統合シミュレーションコードの開発が課題である。

また実用炉では、単に高利得の炉心を達成するだけでなく、加熱レーザーのパルス幅、ビームの収束性、爆縮レーザーの帯域幅、コーンターゲットの製作、インジェクションの精度等、技術のエンジニアリング的な要求を緩和することが重要であり、このような長期的課題も考慮して炉心物理の研究を進める必要がある。

Table 1 Key design parameters for power plants based on fast ignition and central spark ignition.

	Laser energy MJ	Target gain	Fusion pulse energy MJ	Pulse rep-rates Reactor (Laser)	Net output power Mwe	
					1 reactor	Modular plant
Fast ignition	0.2 (ignitor 0.1)	50	10	1	4MWe (Small output for an experimental reactor)	100x6
	0.6 (ignitor 0.1)	150	90	3.3 (20)	100	600 MWe
	1.0 (ignitor 0.1)	200	200 KOYO-Fast	3 (15)	240	240x5 1200 MWe
Central spark	2	100	200	3 (15)	240	240x5 1200 MWe
	4	100~150	400~600 (KOYO)	~3 (6)	~600	600x2 1200 MWe

Table 2 Major experimental facilities and a goal of fast ignition power plants.

Facility	FIREX	LFER	DEMO	Commercial plants
Objectives	Phase I (FIREX-I): Heating to ignition temperature (~10 keV) Phase II (FIREX-II): Ignition and burning	Phase I: high rep-rate burning Phase II: Solid wall with test blanket, and liquid wall chamber test Phase III: Net power generation, long time operation	- Demonstration of a reactor module for practical power plants - Credibility and economics demonstration	- Economically, environmentally attractive plants (Competitive COE) - Modular plants for scale up, flexible construction
Fusion pulse energy, power output	~1 MJ (1 shot/hour)	10 MJ 10 MWth/4 MWe Net output 2MWe	100~200 MJ 330~660 MWth 100~240 MWe	100~200 MJ 3 Hz (5~10) reactors 600~1200 MWe
Laser	~100 kJ implosion 50+heating 50	200 kJ (~1 Hz)	0.5-1 MJ (~3 Hz)	0.5-1 MJ (10-30 Hz)

4.2 レーザー

レーザーの開発計画は、炉用モジュール開発が中心であり、増幅器の開発、光学技術の開発及びそれらを一体化するシステム化技術から成る。DPSSL(半導体レーザー励起固体レーザー)モジュールの仕様は、1~10 kJ×10 Hz、総合効率10%が想定されている。この仕様を達成するための開発ステップとして、10 Jから100 Jの増幅器を開発するHALNA計画が進んでいる。現在、ガラスレーザー材料のHAP4を用いて、5 J×10 Hz、8.7 J×1 Hzを達成しており、2005年には20 J×10 Hzの実現を目標にしている。増幅器の開発は、レーザー材料の最適化、レーザー材料に適したLD、ならびにレーザー材料とLDの量産化技術を、互いにフィードバックしつつ並行して開発する必要がある。特にガラスレーザー材料は、発電プラント用のレーザーとしては寿命が問題であり、Nd:YAG等のセラミクス材料の開発が重要課題である⁶⁾。またLD励起固体レーザーでは、熱の問題と同時に、蛍光寿命の長い材料を使うことが、LDのコスト低減のために重要であり、Yb:YAGを液体窒素で冷却して用いること等により、熱の問題、長蛍光寿命材料、LDのコストと寿命の問題を根本的に解決することができるかが注目される。

4.3 炉システム技術

炉システムに関する開発は、パルス出力から炉壁を保護する炉チェンバー、チェンバー排気系、ブランケットと冷却系、最終光学系の保護系、及び炉構造材料が主なものである。開発計画として、実験炉(LFER)に必要な固体壁チェンバー、実験炉で試験するテストブランケットモジュール、及び液体壁チェンバーの開発が必要である。レーザー核融合炉独特のパルス負荷に対し、固体壁方式ではパルスイオン照射と中性子照射に耐える炉壁材料の開発が課題であり、液体壁方式では液体壁からアプレートした金属蒸気の排気、及び安定した自由液面の液体壁形成方法が主な課題である。固体壁方式の設計領域は、液体壁方式より、炉チェンバーのサイズが大きくなり、小パルス出力で高繰り返し率の炉を指向する。これに対し、液体壁方式は、大きなパルス出力で低パルス繰り返し率の炉チェンバーに向く。Fig. 3には、Table 2に示す実験炉(LFER)、及び発電実証プラント(DEMO)の炉

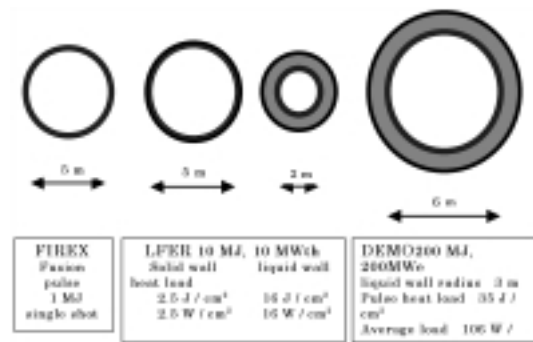


Fig. 3 Chamber sizes of major fusion facilities.

チェンバーのサイズ、及び液体壁方式と固体壁方式の条件の代表的な値を示す。

5. 高速点火レーザー核融合炉開発のロードマップ

高速点火レーザー核融合炉開発のロードマップを、Fig. 4に示す。FIREXによる炉心物理の確立、及び高繰り返しレーザー技術、ターゲットインジェクション技術、炉チェンバー技術、ブランケット技術等の炉要素技術の開発に基づき、実験炉計画を進めるのがポイントである。実験炉では、Table 2に示すようにフェーズIではブランケットなしの固体壁チェンバーにより、高繰り返し炉心の試験を行う。またフェーズIIでは、テストブランケットをチェンバーの外に設置し種々の工学試験を行う。この段階では、ブランケットが熱的に定常状態になるまでの連続的なバースト運転を行い、発電試験も行う。フェーズIIIでは、発電ブランケットを全面に持つチェンバーを設置して、連続運転試験を行う。この段階で、レーザーへの循環電力を上回る正味電気出力の実証を行う。Fig. 5には、このような実験炉の概念図を示す。爆縮と加熱の各100 kJのレーザーを配置し、液体壁(手前側)と固体壁(奥側)の2つのチェンバーをドライブする概念である。レーザー核融合炉の開発は、炉の規模が小型であるため炉本体の開発費は比較的小規模であるが、レーザーの建設費が不確実な要因であり、このコストは主にLDのコストに依存する^{6,8)}。単に量産化だけでなく、LD技術の開発を戦略的に進めることが極めて重要である。開発の各段階で必要となるLDの供給量とコスト、及びこれを含めた

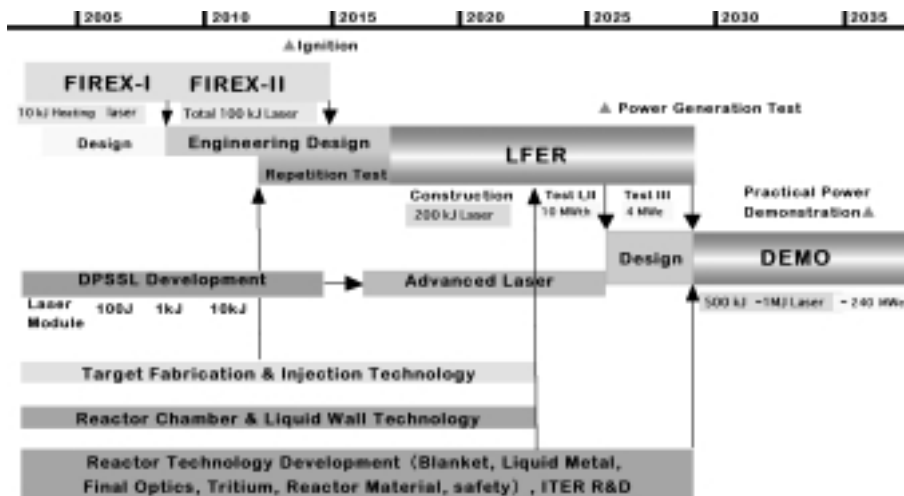


Fig. 4 Road map for fusion power based on fast ignition laser fusion.

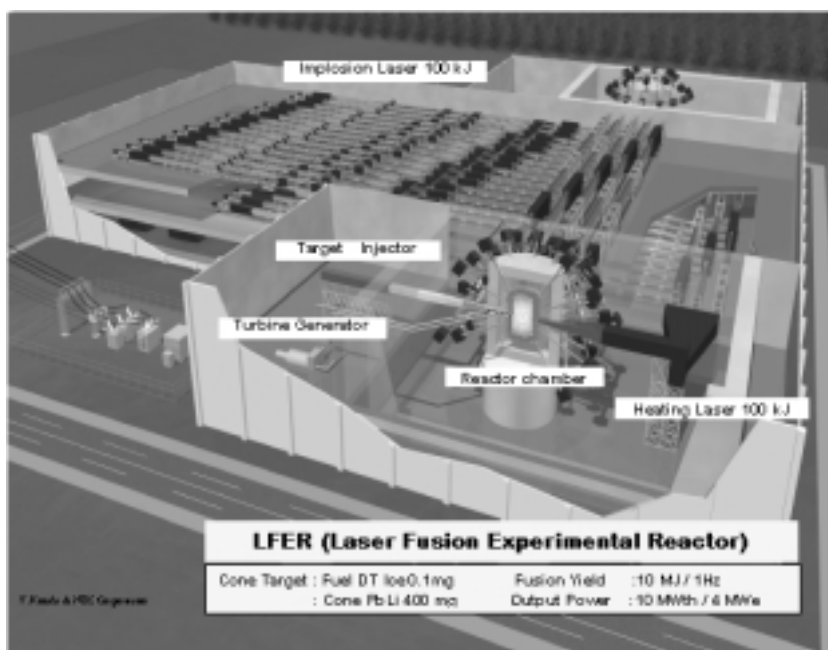


Fig. 5 Overview of LFER (Laser Fusion Experimental Reactor).

ロードマップの各段階の開発所要費用を次にまとめる。

- ・ FIREX (100 kJ単ショットガラスレーザー)：300～400億円
- ・ 炉用レーザーモジュール開発と繰り返し工学試験 (DPSSL 10 kJ爆縮, 10 kJ加熱レーザー)：～400億円 (LDが600 MW必要であり, LD単価を30円/Wとすると, LDの総コストが180億円となる。その他のレーザーシステムのコスト等に200億円程度見積もられる)
- ・ LFER (200 kJレーザー, 熱出力～10 MW, 電気出力～4 MW)：～1800億円 (LD 6 GW必要, LD単価10円/Wを開発目標とすると, 総LDコスト600億円)
- ・ DEMO (1 MJレーザー, 核融合出力200 MJ, 3 Hz, 核融合出力600 MW, 正味電気出力 200 MW)：～2500億円 (LDを6円/Wとすると, レーザーコストが～1500億円程度になる)
- ・ 600～1200 MWe 規模の商用発電プラント：モジュール増設により, 3000億円/GWe (内レーザー1000～1500億円)

を目標とする。

6. まとめ

核融合エネルギーの開発は、高速点火方式によるブレークスルーにより、小出力の核融合炉を実現できる可能性が生まれた。この小出力の核融合炉という特徴、及びレーザー核融合固有のモジュール技術、パルス炉という特徴を活かし、小出力炉からなるモジュール発電プラントを構成することが可能である。

これまで開発されてきた中心点火方式のレーザー核融合炉に比べて、高速点火方式では、一桁から数分の1の小出力の核融合炉を開発できる可能性がある。このことは開発に要する費用を大幅に低減させると同時に、中小型出力の炉による多様なエネルギー需要への対応、市場への柔軟な参入を可能にする。

またレーザー核融合炉は、炉を構成する燃料ターゲッ

ト、レーザー、炉チェンバーの独立性が高いので、それぞれの開発に適した小規模な実験装置により、並行して開発を進めることができる。この特徴、及び高速点火の特色を活かすことにより、比較的早期に、レーザー核融合発電を実用プラント規模で実証する計画を構想できる。この計画実現のためには、炉心物理の研究とレーザー等の炉工学技術の開発をバランスをとって進めることが特に重要であり、繰り返しレーザー等の炉に必要な技術の開発を、FIREX計画と並行して進めることにより、レーザー核融合実験炉の計画を具体化することが大切である。

またレーザー核融合炉のキーテクノロジーであるLD励起固体レーザーとLD技術は、先端産業を切り開く基盤技術の一つであるので、レーザー核融合炉の開発を超長期のエネルギー開発計画として進めるのと同時に、戦略的な産業技術の育成という観点からも位置づけて推進する必要がある。

参考文献

- 1) W. J. Hogan, J. Coutant, S. Nakai, V. B. Rozanov, G. Velarde, W. R. Meier, Y. Kozaki, et al.: "Energy from Inertial Fusion", IAEA, Vienna, 1995.
- 2) 三間 圀興, 他: レーザー学会レーザー核融合炉技術委員会委員「レーザー核融合炉「光陽」概念設計」大阪大学レーザー核融合研究センター, 1995.
- 3) Y. Kozaki, K. Mima, Y. Kitagawa, H. Takabe, M. Yamanaka, K. Naito, K. Nishihara, M. Murakami, and T. Yamanaka: *Proc. Seventh Int. Conf. on Emerging Nuclear Energy Systems*, Makuhari (1993) 76.
- 4) レーザー核融合エネルギー開発検討委員会: 委員会報告書, ICFフォーラム, 1997.
- 5) Y. Kozaki: "Way to ICF Reactor", *Fusion Engineering and Design* 51-52, 1087-1093, 2000.
- 6) レーザー核融合エネルギー開発ロードマップワーキング委員会: 委員会報告書, IFEフォーラム, 2003.
- 7) Y. Kozaki and K. Tomabechi: Annual progress report of Institute of laser Engineering, Osaka University, 2004.
- 8) Y. Kozaki, T. Eguchi, Y. Izawa, T. Jitsuno, T. Kanabe, H. Matsui, H. Nagatomo, S. Nakai, M. Nakatsuka, M. Yamanaka, K. Mima: "Design Windows of Laser Fusion Power Plants and Conceptual Design of Laser-Diode Pumped Slab Laser", 17th IAEA Fusion Energy Conference, IAEA-CN-69/FTP/18, Yokohama, 1998.
- 9) T. Johzaki, K. Miima, Y. Nakao, H. Nagatomo, and A. Sunahara: *Proc. of IFSA 2003*, to be published.
- 10) Y. Kozaki, H. Furukawa, K. Yamamoto, T. Johzaki, M. Yamanaka, and T. Yamanaka: 19th IAEA Fusion Energy Conference, 19th IAEA-CN-94/FTP1/25, Lyon, 2002.