



レーザー核融合炉開発のロードマップ

神前 康次

(大阪大学レーザーエネルギー学研究センター)

Roadmap for Development of Laser Fusion Reactors

KOZAKI Yasuji

Institute of Laser Engineering, Osaka University, Suita 565-0871, Japan

(Received 5 April 2005 / Revised 27 June 2005)

A roadmap for laser fusion power plants is discussed with consideration of the recent progress of fast ignition physics, DPSSL (Diode Pumped Solid-State Laser) technologies and other reactor technologies. 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 100~300 MWe electric powers, are analyzed. The feasibility of a small-sized laser fusion experimental reactor suitable for developing practical power plants is discussed. A road map for laser fusion energy and a new concept of a small-sized fast ignition experimental reactor are proposed.

Keywords:

laser fusion, reactor design, fast ignition, road map

1. はじめに

レーザー核融合エネルギーの開発のためには、その実現に必要な炉心物理だけでなく、レーザー技術等のレーザー核融合炉実現のキーテクノロジーについて、長期的な観点から体系的に開発を進めることが必要である。レーザー核融合炉を構成する炉心の方式、物理には未だ多くの未解明な点があり、またレーザー技術、炉技術にも多くの不確実な点が残されている。このため現段階では、エネルギー開発を展望してレーザー核融合炉開発のロードマップを考えるのは時期尚早との考えもある。しかし、不確実な点が多く、長期的な開発を要するがゆえに、それらの研究開発を方向づけ、戦略的に開発を進めることが重要である。そのためには、エネルギー開発の計画として、必要な物理、技術が何かについて長期的な観点から体系的に評価しながら、現在基礎的な段階にある物理、技術も含めて重点的に研究開発を進めることが必要である。

このような観点から、レーザー核融合炉開発のロードマップについて、国内ではIFEフォーラムと大阪大学レーザー核融合研究センターを中心として、1990年代から検討が始まった。1997年には、IFEフォーラムにより、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)が組織され、開発目標とする発電プラント概念と実験炉などの主要装置概念が検討され、その開発に必要な要素計画のシステムティックな抽出と評価が行われた。そこでは、レーザー核融合炉を構成する技術が、ネットワーク解析方法により体系的にブレークダウンされ、開発所要期間、開

author's e-mail: kozaki@ile.osaka-u.ac.jp

発費用、マンパワー、開発リスクなどのデータに基づいて、不確実性を含めて体系的なアセスメントが行われた。そのレーザー核融合炉開発のロードマップは、直接照射中心点火方式の炉心物理とDPSSL(Diode Pumped Solid-State Laser)技術を計画の柱とするものであり、50 kJ級レーザーによる等価プラズマ実験装置(EPOC)、MJ級レーザーによる高利得炉心実験装置、およびMJ級高繰り返しレーザーによる実験炉を経て、実証炉に至る開発計画が提案された[1, 2]。

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)計画が開始された。この成果を受けて、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がまとめられた[3, 4]。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、および開発のクリティカルな課題、開発費等について述べる(本稿では、米国のIFEの開発計画については触れていないが、USDOEのFESACによる文献[13]に詳細がまとめられている)。

なお開発の目標となるレーザー核融合発電プラントの概念については、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いる[5]。また国内では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いて、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ている[6,7]。高速点火方式については、現在発電プラント概念の検討が進められている段階であるが、以下の検討ではその中間的な検討に基づいて、高速点火レーザー核融合炉の基本的概念が議論されている。

2. 高速点火レーザー核融合発電プラントの概念

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を、原理的に小さくできる。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 のレーザーエネルギーは、米国(NIF)、およびフランスで建設が開始されている2 MJ級のレーザーによる点火燃焼実験装置より1桁小さい。

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[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1,500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1,500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0.6~1 MJ程度に増大す

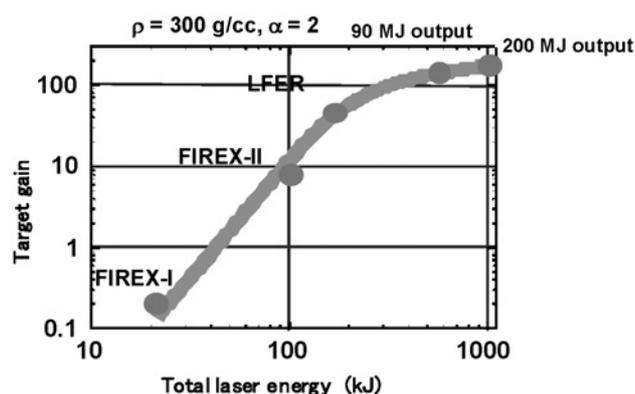


Fig. 1 Target gain curve of fast ignition.

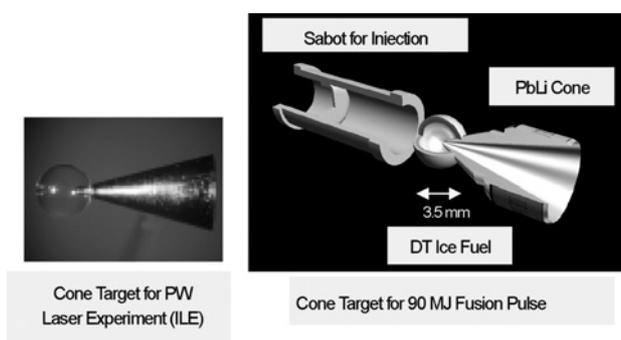


Fig. 2 Cone targets for PW laser experiment and a reactor of 90 MJ fusion pulse.

る。Fig.2には、PW実験用ターゲット、およ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ボーを示す。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、リチウム鉛ででき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（なおコーンの材料は、現在実験では金を用いているが、実用炉に適した高Z物質は、加工性、コスト、炉材料との共存性等を考慮して選択される。液体壁材料の候補であるLiPbは、コーン材料としても有力候補と考えられている）。

Table 1には、このゲインカーブに基づく高速点火方式、およ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

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	1~3	1~3	for experimental reactor
	0.6 (ignitor 0.1)	150	90	4.5(18)	150	150×4 600 MWe
	1.0 (ignitor 0.1)	200	200 KOYO-Fast	4 (16)	300	300×4 1200 MWe
Central spark	2	100	200	4 (16)	300	300×4 1200 MWe
	4	100 ~ 150	400 ~ 600 (KOYO)	~ 3 (6)	~ 600	600×2 1200 MWe

炉は、主要構成要素である炉心プラズマ、レーザー、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、およ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、10~30 Hzの可能性もある。表には、このような炉チェンバー、およびレーザーのパルス繰り返し率に関するそれぞれの特徴を考慮して、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600~1,200 MWeとするモジュラープラントの構成を示している。

3. 開発手順と必要な核融合実験装置

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、およ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。高速点火方式の炉心物理の確立は、現在建設が始まった単ショットレーザーによるFIREX-Iによる点火温度までの加熱とFIREX-IIによる点火燃焼の実証により行う計画である。この結果に基づいて、200 kJ級の繰り返しレーザーを用いることにより、炉技術の総合試験と発電実証をレーザー核融合実験炉(LFER)で行う計画である。但し、このためには実験炉に用いる繰り返しレーザー(DPSSL)、および炉技術の開発を、炉心物理研究と並行して着実に推進することが必要である。

4. レーザー核融合炉主要開発課題

4.1 炉心物理

高速度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度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。

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、光学技術の開発およ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×16 Hz、総合効率6~10%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等のセラミクスレーザー材料の開発が重要課題である[11]。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

Table 2 Major fusion facilities and milestones for fusion power.

Facility	FIREX	LFER	DEMO	Commercial plants
Milestones	Fast ignition physics establishment and ignition demonstration	Demonstration of integrated reactor technologies and net electric power	Demonstration of practical power generation	-
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
Laser	~100 kJ implosion 50 + heating 50	200 kJ (~1 Hz)	0.6~1.2 MJ (~4 Hz)	0.6~1.2 MJ (16~30 Hz)
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 ~ 300 MWe	100 ~200 MJ 4 Hz × (4~8) reactors 600 ~ 1200 MWe
Construction cost	30 ~ 40 BYen	~ 180 BYen	~ 250 BYen	300~400 BYen / 1GWe

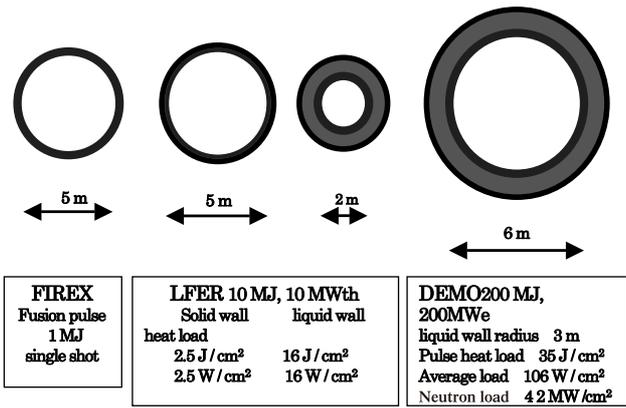


Fig. 3 Chamber sizes of major fusion facilities.

り、Yb:YbG 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、ターゲット・燃料系技術

炉システムに関する主な開発課題としては、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・トリチウム技術、最終光学系の保護系、および炉構造材料に関するものがある。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、およ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、およ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)、および発電実証プラント (DEMO) の炉チェンバーのサイズ、および液体壁方式と固体壁方式の条件の代表的な値を示す。

慣性核融合炉に特有のターゲット・燃料系技術では、特にコンターゲットの量産技術、高精度のターゲットインジェクション技術の開発が重要な課題である。

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、およ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。この段階では、レーザーに必要な入力電力を上回る電気出力 (正味電気出力の実証) を目標とする。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 [12]。

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、およびこれを含めた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)

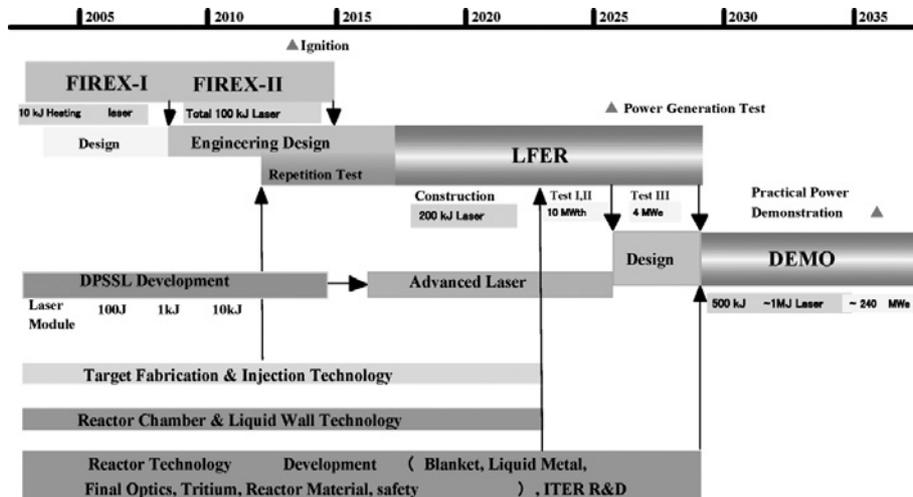


Fig. 4 Road map for fusion power based on fast ignition laser fusion.

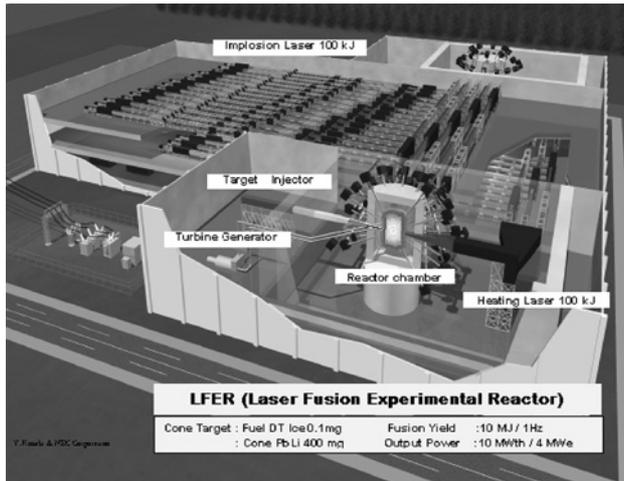


Fig. 5 Overview of LFER (Laser Fusion Experimental Reactor).

- ・ **LFER** (200 kJ レーザー, 熱出力~10 MW, 電気出力~4 MW) ~1,800 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, 4 Hz, 核融合出力 600 MW, 正味電気出力 200 MW) ~2,500 億円 (LD を 6 円/W とすると, レーザーコストが~1,500億円程度になる)
- ・ **600~1,200 MWe 規模の商用発電プラント**
モジュール増設により, 3,000~4,000 億円/GWe(内レーザー 1,000~1,500 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イクスルーにより, 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, およ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, 複数の小出力の炉からなるモジュラー発電プラントを構成することができる。高速点火方式では, 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, 1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, 炉チャ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, およ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] ICF フォーラム「レーザー核融合エネルギー開発検討委員会」報告書, ICF フォーラム, 1997.
- [2] Y. Kozaki, Fusion Eng. Des. 51-52, 1087 (2000).
- [3] IFE フォーラム「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」報告書, IFE フォーラム, 2003.
- [4] Y. Kozaki and K. Tomabechi, 'A Road Map for Laser Fusion Energy with an Experimental Reactor Based on Fast Ignition Concept', Annual progress report of Institute of Laser Engineering, Osaka University, 2004.
- [5] 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.
- [6] 三間啓興 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.
- [7] 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, pp76-80, 1993.
- [8] Y. Kozaki, T. Eguchi, Y. Izawa, T. Jitsuno, T. Kanabe, H. Matsui, H. Nagatomo, S. Nakai, M. Nakatsuka, M. Yamanaka and K. Mima, *17th IAEA Fusion Energy Conference*, IAEA-CN-69/FTP/18, Yokohama, 1998.
- [9] T. Johzaki, K. Miima, Y. Nakao, H. Nagatomo and A. Sunahara, '2-D Analysis of Ignition and Burn Characteristics for Fast Ignition Targets' *Proc. of IFSA 2003*, American Nuclear Society (2004) p.474-477.
- [10] Y. Kozaki, H. Furukawa, K. Yamamoto, T. Johzaki, M. Yamanaka and T. Yamanaka, *19th IAEA-CN-94/FTP1/25*, Lyon, 2002.
- [11] T. Norimatsu *et al.*, *Proceeding of 20th IAEA Energy Conference*, 20th IAEA-CN-FT/2-1Rb, Vilamoura, 2004.
- [12] Y. Kozaki, K. Tomabechi *et al.*, *Proceeding of 20th IAEA Fusion Energy Conference*, 20th IAEA-CN/IFP7-5, Vilamoura, 2004.
- [13] "Review of the Inertial Fusion Energy Program", DOE /SC-0087, March 2004.