

# 論文内容の要旨

## 論文題目 Design Study on Fast-Ignition Laser Fusion Reactor with a Dry Wall Chamber

(固体壁チェンバーを用いた高速点火方式レーザー核融合炉設計研究)

氏名

後藤 拓也

### 1.序

核融合エネルギーは、将来の革新的エネルギーの有力な候補として考えられている。本研究は核融合エネルギーのひとつとして研究されているレーザー核融合方式について、実用炉の概念設計を行い、開発段階における課題を洗い出すことを目的として行った。

レーザー核融合炉設計における最大の問題は、炉心の核燃焼プラズマから発生する X 線およびイオンによる第一壁の高パルス負荷である。実用炉設計においては、経済性確保のため、許容熱容量の大きい液体金属壁が採用される傾向にある[1]。しかし、液体金属壁はその技術的成立性がまだ確立されていないばかりでなく、ショット毎発生する金属蒸気によって、照射繰り返しが制限されるという問題を抱える。近年提唱された高速点火方式[2]では、従来の中心点火方式の 1/10 程度のエネルギー入力で十分な核融合利得が得られることが指摘されており、従来は困難と考えられてきたコンパクトな固体壁チェンバーを用いた実用炉の設計に可能性が出てくる。

また、高速点火方式では爆縮に関する照射一様性等の要求が緩和され、ペレット設計やレーザー波形整形の自由度が高まるなどのメリットが生まれる。これら高速点火方式を採用することにより発現する利点を最大限生かした設計を目的として、本研究を開始した。

## 2. ポイントモデルによる設計点探索

固体壁チェンバーを実現するためには、1 パルス出力の可能な限りの低減が求められる。しかし、実用炉として成立するためには同時に核融合利得  $G > 100$  が求められる。そこでまず 0 次元物理モデルによる設計領域の検討を行った。

開発した 0 次元モデルにより求められたゲインカーブ（エネルギー入力と核融合利得の関係）をにより、アイゼントロップファクター  $\alpha = 2$ 、爆縮レーザーのカップリング効率  $\eta_c = 0.05$  という現在の実験や数値計算の結果から考えて比較的保守的な条件下でも、エネルギー入力 400 kJ（爆縮 350 kJ、加熱 350 kJ）で核融合利得 100 が達成可能なことが判明した。

これより固体第一壁としてタングステンを想定すると、温度上昇の観点からは  $2 \text{ J/cm}^2$  程度までの熱負荷が許容されると考えられる。40 MJ 出力の場合半径 5-6 m のチェンバー設計に可能性があると想像される。

## 3. 1 次元流体コードを用いた炉心プラズマ設計

前節の設計点の妥当性を確かめるため、1 次元流体コードを用いて炉心プラズマ設計を行った。

本研究で導入したコードは大阪大学で開発された ILESTA-1D [3] と呼ばれる Lagrangue 流体コードでありペレットの爆縮から燃焼までの広範な物理をシミュレートすることが可能なコードである。本研究では高速点火の効果をシミュレートするため、最大圧縮時近傍において燃料コアの電子に外的な加熱入力を加える手法を組み込んだ。

本研究では 0 次元モデルによる設計点の検証だけではなく、高速点火方式に最適化したペレット設計やレーザー波形整形についても検討を行った。高速点火方式では高圧のスパーク部生成の必要がないため、爆縮速度を下げることができ、中心点火では難しかった Rayleigh-Taylor 不安定性に強い低い初期アスペクト比(内径と厚みの比)をもったペレットの利用が可能と考えられているためである。しかし高速点火に必要なエネルギーは燃料の密度に反比例するため、流体不安定性の影響を回避しつつ高密度圧縮を図ることが必要となる。

本研究では中空ペレットの等エントロピー圧縮理論[4]から得られるレーザー波形をもとに、ペレットとしては他の炉設計でも標準的に用いられている固体重水素-三重水素ペレット採用し、ペレットの質量とレーザーの総エネルギーを 0 次元モデルと合致させて計算を行った。

図 2 に 1 次元コードと、前節のシステムコードでの計算結果の比較を示す。ここから分かるように、1 次元コードでも爆縮レーザーエネルギー 350 kJ、加熱レーザーエネルギー 50 kJ で核融合利得 100 が達成可能であることが示された。また面密度や燃焼率もシステムコードの見積もりとよく一致しており、システムコードのパラメータ仮定の妥当性が確認されたといえる。

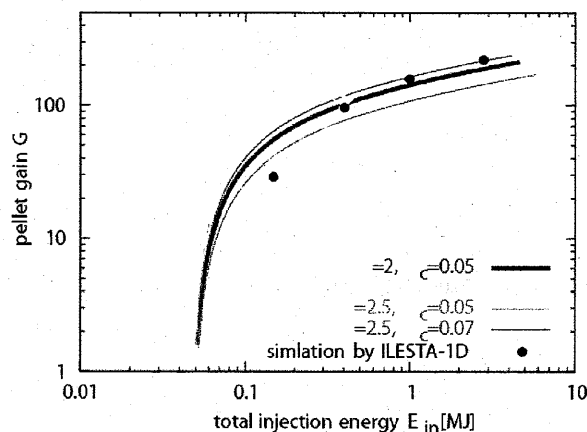


図 1 : 0 次元モデルと 1 次元シミュレーションの比較

#### 4. 固体第一壁設計

炉心プラズマに続き、本研究の主眼点でもある固体第一壁の設計を行った。本研究では、固体第一壁構造材には技術的信頼性が高い低放射化フェライト鋼 (F82H) を採用した。また第一壁表面を保護するアーマー材としてはタングステンを選択し、冷却材には水を採用した。

まず1次元熱伝導コードを開発し、それにより炉壁温度の上昇を解析した。熱エネルギー付与分布は、ILESTA-1D コードのシミュレーションから得られた X 線およびイオンのスペクトルを用いて計算した。図2に最初のショット間、図3には長時間経過後の第一壁各部の温度の時間変化を示す。これより、第一壁表面の温度はデブリイオン到達時に最も高くなり、約 1400 K に達することが分かる。その後第一壁表面温度は次第に上昇するものの、初期ショットから 10 秒程度で平衡状態に達し、最終的には 1600 K 付近で飽和することが判明した。この温度はタングステンの融点 (3680 K) や実験的に知られている roughening の閾値 (2500 K) を十分に下回っている。

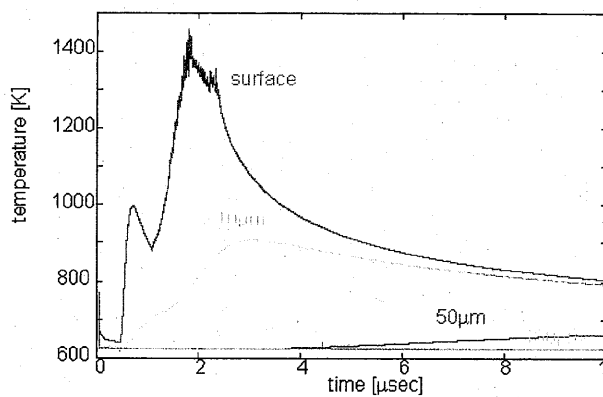


図2：初期ショット間の温度変化

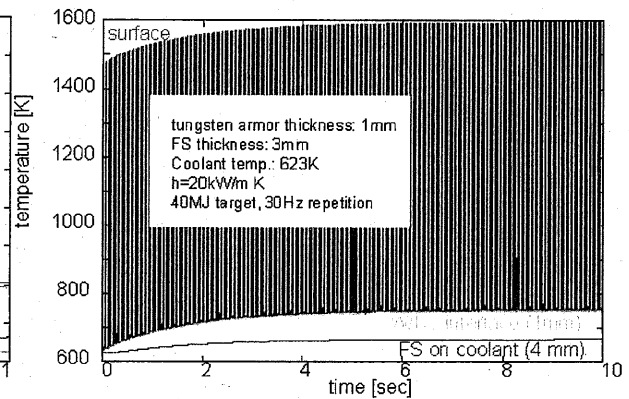


図3：初期ショット後 10 秒間の温度変化

次に市販の有限要素法コードを用いて熱応力を計算した。計算の結果表面に近い領域 ( $<5\mu\text{m}$ ) では温度上昇時だけでなく、温度下降時にも塑性変形が生じ、低サイクル疲労破壊が懸念される。レーザー核融合炉では年間のショット繰り返し数は  $10^9$  回レベルに達するため、 $10^5$ - $10^6$  回で破壊に至る低サイクル疲労破壊が起これば設計上致命的となる。

しかし、レーザー核融合炉では、ひずみ速度が  $10^4 \text{ s}^{-1}$  にも達し、変形のメカニズムが静的変形の場合とは大きく異なる[5]。このような場合、通常の変形時とくらべて降伏応力や破壊応力が数倍以上に高くなることおよび、結晶粒サイズがそれらの特性応力値に大きく影響することが知られている。このため、結晶粒の小さな材料であれば、高い破壊強度が期待できる。

また第一壁は熱負荷だけでなく、高エネルギー粒子の照射も受ける。これらの影響として顕著なのが、ヘリウム蓄積によるブリストリングである。米国のレーザー炉設計研究である HAPL 計画の実験結果[7]では  $10^{22} \text{ He/m}^2$  程度のフルーエンスでヘリウムの飛程に相当する層が剥離すると見積もられており、これによるタングステンの損失は年間で 2mm から最大で 12 mm に達するとも予測され、とても許容できない。

ただし、微細粒材料では、粒界に沿った欠陥やヘリウムの移動度が大きいと考えられること、ヘリウムのトラッピングサイトとなる粒界等の密度が高いため、集積が起こりにくいことなどから、ヘリウム蓄積やブリストリングが抑えられるとの指摘がある。

現在機械的合金化法を用いた超微細粒タングステン[7]の開発が進められており、高い機械強度を

もつことを合わせて、レーザー核融合炉第一壁材料候補として大きな可能性が期待できる。

## 5. 炉システム設計

ここまでの検討により、5-6m の固体壁チェンバーを用いた高速点火レーザー核融合炉の設計の実現可能性が確認された。ここでは全体システム設計とコスト解析について簡単に述べる。

本設計では、1 パルスの核融合出力が 40 MJ にとどまるため、経済性を改善するため繰り返し数を高めて電気出力を増大する必要がある。固体壁チェンバーは液体壁チェンバーのような本質的な繰り返し制約はもたないと考えられるが、チェンバー排気およびペレット入射の繰り返しから 50Hz 程度が限界と考えられる。本設計では保守的に 30Hz を採用し、電気出力 400MWe が確保できるものとした。建設費は 4000 億円程度と現行の軽水炉の 1.5-2 倍程度にとどまる見通しだが、低出力のため発電原価は 30 円/kWh 近くになる。しかし初期炉を想定し技術的信頼性が高いこと、ある程度の負荷追従運転が可能なことなどから、実用炉としての運用の可能性も大いに考えられる。

## 6. まとめ

高速点火方式の特性を生かしたレーザー核融合炉の概念設計を行った。流体シミュレーションの結果から、高速点火方式を生かした安定な爆縮により 40MJ という低出力での核融合利得 100 が達成可能と見られるが、このような低出力であっても熱応力や粒子負荷による固体壁への影響は大きい。微細粒タングステンなどの新材料によるブリスタリングの抑制が鍵となる。30Hz 繰り返しにより、中規模プラント並みの出力が確保可能であり、比較的低い建設費等を生かした運用が想定される。

## 参考文献

- [1] 「高速点火レーザー核融合発電プラントの概念設計」, 大阪大学レーザーエネルギー学研究中心ター, (2006).
- [2] M.Tabak, J.Hammer, M.E.Glinsky *et al.*, Phys. Plasmas 1 (1994) 1626-1634.
- [3] H.Takabe, Nucl.Fusion 44 (2004) S149-S170.
- [4] S.Atzeni, J.Meyer-Ter-Vehn, *The Physics of Inertial Fusion*, OXFORD, 2004.
- [5] T.Dümmer, J.C.Lasalvia, G.Ravichandran, M.A.Meyers, Acta.Mater. 46 (1998) 6267-6290.
- [6] S.B.Gilliam, S.M.Gidcumb, D.Forsythe *et al.*, Nucl.Instr.Methods B 241 (2005) 491-495.
- [7] H.Kunrishita, Y.Amano, S.Kobayashi *et al.*, J.Nucl.Mater. 367-370 (2007) 1453-1457.