



Title	Characterization of Solid D-T Fuel for Inertial Confinement Fusion Reactor Using Refractive Index Distribution Measurements and Thermofluid Simulations
Author(s)	張, 佳琪
Citation	大阪大学, 2025, 博士論文
Version Type	
URL	https://hdl.handle.net/11094/101673
rights	
Note	やむを得ない事由があると学位審査研究科が承認したため、全文に代えてその内容の要約を公開しています。全文のご利用をご希望の場合は、大阪大学の博士論文についてをご参照ください。

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

<https://ir.library.osaka-u.ac.jp/>

The University of Osaka

論文内容の要旨

氏名 (ZHANG JIAQI)	
論文題名	Characterization of Solid D-T Fuel for Inertial Confinement Fusion Reactor Using Refractive Index Distribution Measurements and Thermofluid Simulations (屈折率分布測定と熱・流体シミュレーションを用いた慣性核融合炉用固体D-T燃料の特性評価)
論文内容の要旨	
<p>This dissertation explored methods for the characterization of solid D-T fuel homogeneity for inertial confinement fusion (ICF), using the refractive index distribution measurement and thermofluid simulations of the solidification process.</p> <p>In the First chapter, the current situation of the global energy industry and nuclear fusion was analyzed, the principles of fusion reaction and overview of ICF were introduced briefly, and the objective of the dissertation was clarified. Nuclear fusion is a promising energy source for electricity generation in the future. ICF is an approach to confine plasmas. A critical technology for ICF is the design and manufacture high-quality solid deuterium (D)-tritium (T) fuel targets. This study was performed to contribute to improving the performance of fuel targets.</p> <p>The Second chapter explained the basics/issues of ICF fuel target and this study's background. ICF primarily uses the solid D-T fuel pellets as target. The cryogenic properties of hydrogen isotopologues are essential in target fabrication. Isotopologue fractionation can cause inhomogeneous distribution of D and T in the solid layer, leading to a deterioration in the implosion process. It is a detrimental issue, but it has not received sufficient attention. To address this issue, firstly, it is necessary to characterize the degree of homogeneity, and then the mechanism of composition distribution during solidification needs to be deeply understood, finally, methods of fuel homogenization can be explored based on the mechanism. This study explored methods for the characterization of homogeneity for solid D-T fuel layer, using optical measurements of the refractive index distribution and thermofluid simulations of the solidification process.</p> <p>The Third chapter showed a simple, accurate, and non-destructive method for the characterization of hydrogen isotopologue mixtures at cryogenic temperature by using the refractive index distribution measurement to evaluate the compositional distribution and homogeneity. To evaluate without tritium decay effects, hydrogen (H_2) and deuterium (D_2) were prepared for measurement, serving as a quasi-experiment for D-T measurement. The experiments investigated the temperature and wavelength dependence of the refractive index for hydrogen isotopologues, and the spatial homogeneity of the H-D mixture. This chapter detailed the experimental approach, devices used, validity and reliability of the devices, the data collection and analysis process, and analyzed findings compared with literatures. Experiment results showed that H and D were spatially inhomogeneous in solid H-D, verifying that the effect of isotopologue fractionation existed, proving that the method of characterization using refractive index distribution was effective. This characterization method has the potential to characterize of solid D-T fuel for ICF in the future.</p> <p>The Fourth chapter presented thermofluid simulations of hydrogen isotopologue mixture during solidification process, performed to investigate the mechanism behind component distribution and to analyze the factors affecting the homogeneity. A numerical simulation was conducted to model inhomogeneity formation during the solidification of hydrogen isotopologue mixtures in a 3D wedge-shaped cavity. The simulations revealed inhomogeneities in H_2-D_2, D_2-T_2, and D_2-DT-T_2 mixtures during solidification. For an H_2-D_2 mixture, the simulation reproduced the experimental results, validating the computational model. Furthermore, the simulation predicted the homogeneity on a 3D model of the solid D-T target, revealing that the ratio of D_2 and T_2 in D-T gas deviated significantly from the ideal 50:50 ratio. These findings are expected to contribute to improving the target manufacturing process and refining ignition predictions.</p> <p>In the Fifth chapter, the conclusion of this dissertation was provided.</p>	

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏名 (ZHANG JIAQI)		
	(職)	氏名
論文審査担当者	主査	教授 重森 啓介
	副査	教授 村田 熊
	副査	准教授 山ノ井 航平

論文審査の結果の要旨

核融合発電では、磁場閉じ込め（磁場核融合）、慣性閉じ込め（レーザー核融合）の双方において、トリチウムと重水素からなるDT固体燃料の開発と核融合炉の燃料部分の設計が大きな課題である。トリチウムは水素の同位体であり、高い透過性や反応性を持つ常温常圧でガス状の放射性物質であり、取り扱いが難しく知見が乏しい。本論文では、水素同位体が固化する20K以下の極低温での挙動を実験及びシミュレーションの双方で明らかにし、レーザー核融合における燃料作成手法の課題の明示、検査手法及び作成手法の提案についてまとめている。

第1章では、核融合の原理・概要を解説し、レーザー核融合の燃料開発の課題を挙げ、本研究はDT燃料の性能向上に資することを目的に実施したことを述べている。

第2章では、レーザー核融合の基本概念（ターゲット・レーザー・爆縮プロセス）について概説し、特に、DT燃料に求められる仕様、核融合炉における燃料サイクル、現状の固体DT燃料ペレットの作成手法の概要を詳しくまとめている。また、新しい課題として、水素同位体の固化温度が異なることが原因で固体DT燃料の作成過程において、トリチウムと重水素が空間的に分離してしまう可能性を提示している。空間的に分離する場合、レーザー核融合では爆縮時に点火部及び燃焼部のトリチウムと重水素の比が1:1にならないため、点火効率や燃焼効率が落ちてしまう可能性があることを述べている。また、磁場核融合では固体DT燃料ペレットを高速で射出するために、表面が壊れて中心部分がプラズマ中に到達する設計になっており、プラズマに到達するトリチウムと重水素の比が固体DT燃料ペレット作成時とずれてしまい、燃料効率が落ちる可能性を提示している。

第3章では、水素同位体の屈折率が異なることを利用し、屈折率の分布を測定することで同位体の分布をする手法を提示し、軽水素と重水素を用いて固化過程での水素同位体の分離の有無を実験的に研究している。液体及び固体状態の軽水素の屈折率と重水素の屈折率の温度依存性を高い精度で測定している。特に重水素でのデータは過去のデータと比べて高い精度で測定ができている。これらの軽水素と重水素の屈折率データを用い、軽水素と重水素の混合気体を極低温で固体へと変化させ、屈折率分布を測定することで軽水素と重水素が分離している事実を定量的に明らかにしている。また、屈折率分布測定が水素同位体の分布測定に活用できることを示し、核融合炉におけるトリチウムと重水素の分布測定手法への応用を提示している。

第4章では、数値流体力学計算(CFD計算)によるシミュレーションを行い、トリチウムと重水素の分離過程の解明と分離が発生しにくい作成手法の提案を行なっている。第3章で得られた軽水素と重水素の結果を3次元のシミュレーションで再現することで、シミュレーション手法の妥当性を評価し、トリチウムと重水素の挙動へと拡張している。また、本種シミュレーションを元に分布が発生しにくい固化手法として、T₂分子とD₂分子の2成分ではなくT₂分子、DT分子、D₂分子の3成分を用いること、固化時間を可能な限り短くすること、が提案されている。さらに、現状のレーザー核融合で用いられる中空のカプセル形状のDT固体燃料ペレットでは、点火部となる中心の気体部分のトリチウムと重水素の比が7対3程度になってしまふ恐れがあることを提示しており、現状のレーザー核融合の点火効率が低くなっている可能性を示している。

第5章は結論であり、本研究を総括している。

以上のように、本論文は核融合炉開発における最も重要な課題である固体DT燃料の作成手法の開発において、実験及びシミュレーションによって、固化過程での水素同位体の分離挙動の解明と核融合燃料への影響を明らかにし、その解決方法と検査手法としての水素屈折率分布計測手法を示しており、核融合炉での炉設計の性能向上に資するものである。よって本論文は博士論文として価値あるものと認める。