

2022年1月18日

ユニットテーマ提案書

1. テーマ名

ハイパワーレーザーにより創り出す連成するエネルギー変換の系（プラズマ量子プロセス）

2. 核融合としての課題

NIF実験の進展から核融合研究は、核融合反応を実証するフェーズから核融合燃焼を制御し、その出力を利用するフェーズへ移行しようとしている。これは、本来は連成した物理現象を個別の物理現象として抽出して理解する研究から、個別の物理現象が組み合わさって連成している現象を自己無撞着にモデル化し、統合的に理解する研究へと移行することを意味している。

今後、レーザー核融合エネルギーの実現を目指すためには、以下に示す2つの連成する物理過程が重要である。

1. 核融合燃焼を起こし、高効率でレーザーエネルギーから核融合エネルギーへと変換する。
2. 発生したパルス的な核融合エネルギーを高効率で熱に変換する。

そのため、レーザーエネルギーから始まる複合かつ連続した非平衡開放系において連成するエネルギー変換現象、特に、レーザーとプラズマの相互作用および粒子線と物質の相互作用の研究・モデル化、その連成する物理現象のコントロールが課題となる。

3. 学術的な特徴づけ（なんの研究だといえるか）

NIFによる1.3MJ核融合出力の実証により核融合研究は効率化の段階へと移行する。その効率化について、これまでにGXII/LFEXにおける高速点火の実験において中心点火方式と比較して約10倍の効率での核融合積を実証するなど、国内の研究が重要な役割を果たしている。さらに、ハイパワーレーザーを用いた研究では核融合研究の進展だけに留まらず、レーザー加速による中性子・イオン加速の実証研究が進んでいる。

レーザーと物質との相互作用による現象は、非常に短い時間に完結する複合・連続したエネルギー変換過程であるが、これまで個々の変換現象を切り出して、実験とシミュレーション結果を比較することにより、その個別現象を理解してきた。

これまでに理解した個別の物理現象を複合かつ連続した非平衡開放系において連成するエネルギー変換現象へと発展させ、特に、レーザー研と連携してレーザーとプラズマの相互作用のモデル化、粒子線と物質の相互作用の研究を進め、その連成する物理現象のコントロールに挑む。

4. アプローチ（定式化）

レーザー核融合に関連する現象をハイパワーレーザーが創り出す連成するエネルギー変換の系として捉える。個別の物理現象を理解するだけでは全体の効率化を考えることはできない。連成する現象では、構成する各現象が理解できたとしても、それらの単純な組み合わせでは自分たちが望む状態を創り出すことはできない。必要な段階に必要な反応を実現することで反応をコントロールする必要がある。このように個別の物理現象を理解し、それらをコントロールすることで連成するエネルギー変換の系全体としての効率化を考える。

レーザー核融合に関係するエネルギー変換過程は多くの場合、複数のエネルギー変換過程が連成した非平衡開放系の現象である。レーザーが物質に照射されると、そのエネルギーは様々な過程を経て、電子、イオン、中性子、光子及び熱等のエネルギーに変換される。つまり、レーザーと物質の相互作用によりエネルギー変換過程の複合や連鎖の系を創り出すことができるため、この実験系を利用して研究を推進する。

5. 学際的展開

これまでにGXII/LFEXにおける高速点火の実験において中心点火方式と比較して約10倍の効率での核融合積を実証するなど、国内の研究が効率的な核融合反応の研究推進に重要な役割を果たしている。さらに、ハイパワーレーザーを用いた研究では核融合研究の進展だけに留まらず、レーザー加速による中性子・イオン加速の実証研究が進んでいる。レーザーを利用した実験の最大の利点はプラズマ（線源）が極小で、想定されるモデルの模擬実験をそのプラズマに合わせた実験系で実施可能なことにある。その結果、将来を想定した様々な規模の連成するエネルギー変換の系を既存の実験装置でコンパクトに実現可能であり、レーザー核融合に関連するエネルギー変換反応の系毎の要素研究として実施することができる。

ハイパワーレーザーにより創り出す連成するエネルギー変換系は、磁場核融合を対象とした「異相連成現象」ユニットテーマが想定する系と概念的に類似の現象を含むため、相互協力することによって連成する現象の総合的な理解が期待できる。また、「計測」ユニットテーマにより研究される新たな計測方法を採用すれば、様々な視点からの計測が可能になり、連成する現象の正しい把握が期待できる。

そして、日本から発信する要素研究の成果は様々な応用へと展開することができる。核融合燃焼物理学、核融合炉工学を含む核融合分野の発展だけではなくレーザー宇宙物理学、超高圧物性科学、レーザー量子ビーム科学、量子真空物理学、新材料、放射線科学、同位体科学、医療や中性子リソグラフィ等の幅広い分野に貢献することができる。

将来的には高繰り返しレーザーが建設される計画があり、連成したエネルギー変換について、大量のデータによる機械学習法を用いた解析手法による研究の実施が可能になる。

6. 独自性、優位性など

大阪大学レーザー科学研究所と連携して研究を実施する。阪大レーザー研では、kJ 級ナノ秒レーザーである激光XII 号と超高強度ピコ秒級レーザーであるLFEX を同時照射可能であり、その利点を最大限に使って創り出された連成したエネルギー変換の系について、実験及び計測を実施することができる。このハイパワーレーザーにより創り出す連成するエネルギー変換の系では線源からの距離によって強力な場から自然環境までの幅広いレンジで実験環境を再現することができ、極限環境から自然界までを模擬した系を構築することが可能である。このような広いダイナミックレンジを実現できる装置を利用することで、核融合プラズマだけではなく宇宙プラズマ中における高エネルギー粒子が新たな拓く物理学に発展し、特に核融合分野においては、核融合燃焼物理学の確立および現実的な核融合炉工学の端緒になると考えられる。そして、長期的には、核融合燃焼を理解する物理研究から燃焼を制御する工学研究までの一貫した学術体系となる。