

Engineering Approaches to Laser Fusion Energy Reactors岩本 晃史^{1,2}、重森 啓介²、兒玉 了祐²
Akifumi Iwamoto, Keisuke Shigemori, and Ryosuke Kodama¹核融合研、²阪大レーザー研
NIFS, ILE Osaka Univ.**はじめに**

米国国立点火施設 (NIF) 実験により、レーザー核融合による点火・燃焼が現実になりつつある。プラズマ実験から見ると、この燃焼プラズマの実現を一つの大きな到達点として考えることができる。一方、核融合燃焼を利用する立場から見ると、その利用を考えるスタート地点にすぎない。つまり、これまでの核融合燃焼を目指したプラズマ物理研究主体のレーザー核融合研究から、人々にとって有益な生産物を提供するための工学研究へと発展し、システムの総合的な研究を展開する必要がある。

工学的な課題

NIFのレーザー核融合実験では、一度の反応を確認したにすぎない。工学的には、その燃焼反応を数Hzで24時間365日継続するシステムの完成が目標になる。長期間安定にエネルギーを取り出すためには、定常的にショットを繰り返すことで初めて見えてくるレーザー核融合システムで最も弱い部分を見つけ出し、その弱点を克服する必要がある。つまり高繰り返し実験が工学研究の要である。実機と同等のシステムを長期間運転し、実機と同様な環境における実験により次のような工学的な課題に対する検討が必要である。

1. システム構成の検討とプラズマだけではないシステム全体の効率化
2. 複合する過酷条件（放射線、デブリ、温度など）下での材料や性能劣化や課題
3. 予想と現実の乖離から想定していなかった現象の発見
4. 予想していない課題の抽出
5. 課題を克服する材料や方法の検討など

これらの工学的な検討結果は核融合プラズマ研究へフィードバックされ、物理研究から核融合炉を目指した工学研究を包括するレーザー核融合の総合研究と発展することができる。

工学的研究のための装置

レーザー核融合エネルギー炉の工学的研究のためには、実機に採用される全ての過程を含む、又は模擬できる装置が必要である。その一つのアイデアが未臨界状態の核融合反応を利用するレーザー核融合未臨界研究炉 (L-Supreme) の概念設計 [1] である。建設当初はレーザー核融合炉に最低限必要な炉心、レーザー系、ターゲット供給系、燃料回収系で構成され、小さな核融合炉装置となっている。

L-Supremeは阪大レーザー研と量研機構関西研が提案しているパワーレーザーインテグレーションによる新共創システム (J-EPoCH) を利用することで可能になる。J-EPoCHでは施設の一部にレーザー核融合実験が可能なレーザー配位を提供できるエリアが予定されている。10 kJ級レーザー出力で最大100 Hzの高繰り返しが可能である。実際の核融合炉で想定されているレーザー出力には及ばないが、高繰り返しについては核融合炉以上の性能を持っている。

工学研究から考えるレーザー核融合反応の利点は点光源である。線源からの距離によって放射線やその他の環境を変化させることが可能で、実環境に近い環境も模擬することができる。さらに、想定しているレーザー核融合システムは炉心を軸にレーザーシステム、ターゲットシステム、燃料回収システムなどで構成され、システムごとの交換が可能である。研究の進捗に併せてシステム毎の更新が可能な点もレーザー核融合の利点である。これらの特徴からレーザー核融合システムに必要な様々な模擬環境を提供し、工学的な研究を実施可能な汎用装置が近い将来に実現可能で

ある。

L-Supremeの仕様

L-Supremeは次の2つの実績を元に設計されている。Large diameter High Aspect Ratio Target (LHART)[2]は直径1 mmガラスシェルにガス状のDT燃料を数気圧に加圧し封入したターゲットで、既にレーザー核融合実験で使用された実績がある。そのターゲットを使用した激光12号の実験において1ショット当たり 10^{13} 個の中性子発生に成功している[3]。J-EPoCHの高繰り返し能力を利用することで1Hz以上の高繰り返し連続運転を可能にする設計となっている。L-SupremeはDT核融合反応により発生する核融合中性子と α 線がそれぞれ 10^{13} 個利用可能なシステムとなる。その核融合反応を利用するための炉心を線源の周囲に配置することで核融合炉に関連するいろいろな実験が可能になる。実験の目的に合わせて炉心材料を交換可能な構造とする。さらにターゲットの連続供給装置を変更すればプラズマ実験も可能である。これまでと比較してプラズマの実験回数を飛躍的に増加させることができる。これによって統計学的なデータの解析や機械学習による予測が可能になる。Fig.1にその概念図を示す。

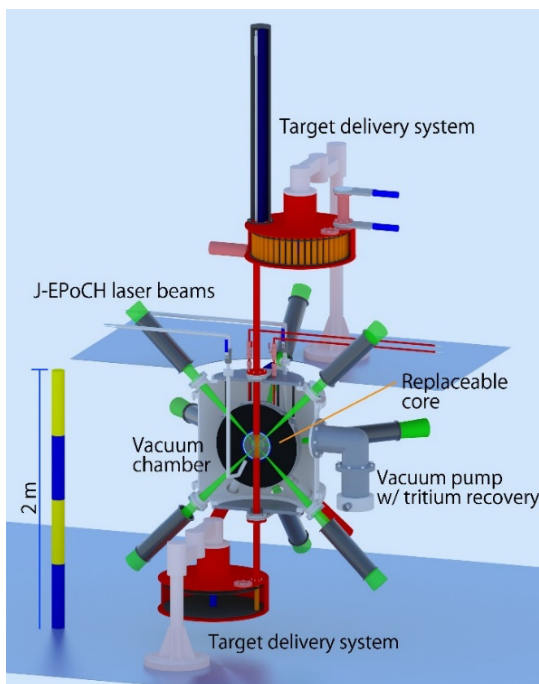


Fig.1 L-Supremeの概念図 [1]

L-Supremeを使った工学実験テーマ

現在想定している実験テーマを挙げると次のようになる。ただし、それ以外のテーマ提案を阻害するためにテーマを挙げているのではない。

- I. 連続ターゲット導入装置による長時間高繰り返し実験
 1. α 線の影響
 2. 未利用レーザー光の影響
 3. DT燃料の回収率
 4. ターゲット材料などデブリの影響
 5. 中性子を利用した材料研究
 6. トリチウム増殖研究
 7. 熱変換研究
 8. 発電実証
 9. 機械学習によるプラズマ研究
 10. プラズマ加熱の効率化研究の加速
- II. システムの弱点の抽出
- III. システム全体の効率評価
- IV. 未検討課題の抽出

レーザー核融合による水素製造プラント構想 (Hyperion)に向けたL-Supremeの役割

これまでの核融合炉設計では、トリチウム増殖と電力供給が同時に実現される構想であった。しかし、いずれも炉心を含めた全システムが同時に完成して達成される極めて難易度の高い設計が必要になる。燃焼量や繰り返し頻度によって出力を調整可能であるレーザー核融合炉の長所を生かすと、数10MWの核融合出力からの熱利用も可能である。この領域の出力に必要なDT燃料の量はITERで使用されるDT燃料量と同じオーダーであり、トリチウム増殖率1以上に拘らずトリチウム増殖技術の確立に先行して熱利用が可能になる。Hyperionは1ショット当たり40 MJの核融合出力を想定している。水素製造に使用される炉心に並べてトリチウム増殖研究用の炉心を用意し、水素製造と並行して実環境を利用したトリチウム増殖の研究を行う想定である。

並行してHyperionに向けたレーザーとターゲットに係わる研究・開発は必要であるが、様々な工学実験が可能でL-SupremeはHyperionに必要な技術を飛躍的に発展させるはずである。特にL-Supremeが提供する模擬環境では熱回収及びトリチウム回収に特化した研究を実施可能であり、その知見は直接Hyperionの設計に役立てることができる。

[1] A. Iwamoto, et al., Nucl. Fusion, 61 (2021), 116075.

[2] T. Norimatsu, et al., J Vac. Sci. Technol. A 6 (1988) 2552.

[3] H. Takabe, et al, Phys. Fluids 31 (1988), 2884.