

レーザー核融合実験炉概念設計の現状

Conceptual Design of Laser Fusion Experimental Reactor

乗松孝好¹、神前康次¹、白神宏之¹、藤田尚徳¹、岡野邦彦²、炉設計委員会委員

¹ 大阪大学レーザーエネルギー学研究センター

¹ 慶應義塾大学

【1】 初めに

平成 24 年よりレーザー核融合技術振興会・IFE フォーラムの支援の下に神前康次を委員長として各分野の専門家の協力を得て発電実証と半年程度の連続運転を目標とする高速点火方式のレーザー核融合実験炉 LIFT の概念設計を進めている。実験炉は繰り返し核融合利得の発生を実証する Phase I、発電実証を行う Phase II、半年程度の連続運転を実証する Phase III で構成されている。基本方針は 1) 必要なターゲットインジェクション、トラッキング、レーザーの要素技術は統合する前に独立して開発。2) 必要なレーザーは一挙に製作する。従って、必要なターゲット構造等は基本的に共通で、目的とその目的に合った炉構造、運転モードを考える。3) 追加熱レーザーの爆縮コア加熱効率は 10~20% を想定する。(磁場の無いモデルで 7% × 自己生成磁場で 2.8 倍の改善効果) レーザーは 2 ω で 75~150kJ を考える。

この実験炉プロジェクトがスタートする要件は炉心プラズマにおいては単ショットベースで点火燃焼が実証されていること、ターゲットの精度、レーザー照射精度の利得に対する影響のスケールアップができていくことである。レーザーでは半導体励起の冷却 Yb:YAG セラミックレーザーで出力規模は 1/10 程度のレーザーシステムが実証され、フルスケール化への技術的見通しが得られていることである。燃料ターゲット関係では炉心グループから示された精度を満足する実サイズのターゲットの量産・投入への技術的見通しが得られていることである。炉システムでは 1 ビームでマーカー程度の出力のレーザーによる実サイズターゲット照射システムでの技術検証が終わっていること。50 から数キャンペーンを消耗品交換程度で運転できる材料、構造の見通しがあること、トリチウムの供給、安全管理、メンテナンスなどに技術的見通しがあること、などである。これらの要件が独立した技術開発で実証されているものと仮定して各 Phase の概要を以下に示す。

【2】 各フェイズの概要

Phase I では 1 Hz で 100 個のターゲットを連続照射し、発電実証に必要な核融合利得が安定に得られることを実証する。炉は半径 2 m 程度のステンレス鋼で、ブランケット、冷却装置などは持たない。100 ショットは炉の温度上昇と、1 バッチで燃料を充填処理できるターゲットの個数で決められた。最終光学系は透過型のオプティクスが使用可能で、炉周りのイメージは現在の実験施設とほぼ同様である。使用したトリチウムは回収されるが、リアルタイムでの再使用はない。放射化レベルは 1 時間の冷却で人がアクセス可能なレベルである。これらの概要を表 1 に示した。

表1 実験炉のミッションと基本スペック、運転シナリオに影響する放射線効果

項目	Phase I	Phase II	Phase III
ミッション	繰り返し核融合燃焼実証	発電実証	長時間運転の実証
圧縮レーザー	500kJ, 3 ω		
加熱レーザー	75~150kJ, 2 ω		
ターゲット	直径2.5mmシェル、30度コーン付き	直径2.6mmフォーム断熱シェル30度コーン付き	
繰り返し	1Hz	1~4Hz	4Hz
核融合エネルギー	40MJ		
連続運転時間	100秒	1週間	半年
チェンバー	固体壁	固体壁	液体壁
第1壁半径/材料	2m/SUS316 Wアーマ無し	3m/フェライト鋼	1.5m/液体LiPb
1シリーズ運転での総中性子数	1.5×10^{21} 個	$9 \times 10^{24} \sim 4 \times 10^{25}$ 個	1×10^{27} 個
1シリーズ運転後の第1壁中性子フルーエンス	3×10^{19} 個/m ²	1.3×10^{23} 個/m ²	4×10^{25} 個/m ²
1シリーズ運転後の表面/構造材への影響予想	特に問題なし	表面にパルス熱負荷によるクラック。クラックは表面にとどまり強度に影響しない。条件によっては α 粒子によるプリスタリング発生し初める	第1壁直下の構造材にHe生成による変形
最終光学系@距離	透過型オプティクス@5m	多層膜ミラー@20m	多層膜ミラー@20m
交換期間	100シリーズ毎	100シリーズ毎	1シリーズ毎
トリチウム回収等	真空系に設置。運転中の再利用なし。	真空系に設置。運転中に再利用。同位体分離は検討中。	真空系、熱ループに回収系。運転中に同位体分離も行い、再利用。
1シリーズ終了後の放射レベル	終了後1時間、チェンバーより50cmで10mSv/h。被ばく管理の上でアクセス可能。	LiPb表面で100~200Sv/h。1年冷却で約1/100。数分で被ばく管理上限値。	LiPb表面で300Sv/h。1年冷却で約1/100。数分で被ばく管理上限値。

Phase IIの目的は発電実証であり、将来のレーザー核融合発電所に必要なすべての機能が要求される。ブランケットは既に磁場核融合で多くの技術的蓄積のある固体増殖材を用い、ヘリウム熱伝達で、水冷却の方式を採用する。これにより、液体ブランケットの不確定要因をさげ、早期に発電実証を行うことを目的とする。繰り返しは1~4Hzで運転時間は1週間程度を想定する。燃料ターゲット容器は大量生産方式で作られ、チェンバー周辺で連続的に燃料を充填し、供給される。トリチウムは回収され、再利用される。同位体分離過程がこの段階で必要かどうかは今後検討を行う。

Phase IIIは半年程度の連続運転が目的で、同時にトリチウム増殖、材料試験を行う。半年間という期間は多層膜最終光学系の寿命できまる。炉は液体壁を考え、商用炉と同じフルーエンスにするため、炉の半径は1m程度を想定した。これにより、液体壁の排気、チェンバークリアランスを検証する。さらに液体壁固有の課題である最終光学系への金属蒸気の影響、エロージョン、コロージョンなどを検証し、液体壁を用いた商用炉の可能性を検討する。