

文章编号: 1007-4627(2013)01-0089-05

## 美国激光惯性约束聚变能源研究综述

刘成安, 师学明

(北京应用物理与计算数学研究所, 北京 100088)

**摘要:** 简要地介绍了美国激光惯性约束聚变能源(LIFE)的研究现状与发展前景。基于美国国家点火装置(NIF)的近期进展, 美国利弗莫尔实验室提出了激光惯性约束聚变能源设想, 并开始了分解研究。设想用新型二极管泵浦固体激光器产生1.4~2.0 MJ的激光能量, 靶丸聚变增益25~30, 打靶频率10~15 Hz, 实现350~500 MW聚变功率, 相当于聚变中子源强 $1.3 \times 10^{20} \sim 1.8 \times 10^{20}$  n/s。以此驱动次临界裂变包层, 使能量再倍增4~10倍, 实现1 GW电功率的输出。采用创新设计的燃料元件, 包层可达到90%以上的燃耗深度, 形成一个安全、无碳、燃料资源丰富、核废料少、可持续发展的新型核能源系统。

**关键词:** 激光; 惯性约束聚变; 裂变; 混合堆; 燃耗

**中图分类号:** TL62      **文献标志码:** A      **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.30.01.089

### 1 引言

近年来, 美国一直在积极探索激光惯性约束聚变, 并以此为基础提出了发展激光惯性约束聚变能源(LIFE), 以期尽早为人类提供一条干净、安全、可防核扩散和能可持续发展的核能源<sup>[1]</sup>。

2010年, 美国国家点火装置(NIF)<sup>[2]</sup>进行了首次综合点火实验, 用350 nm波长、能量为1~1.3 MJ的激光束, 间接驱动中心热斑靶(HSI)聚变。设想聚变能量增益 $G$ (聚变能与驱动激光能之比)达到10左右, 但未达到预想的结果。之后, NIF一直在改进点火试验设计方案。2012年3月, NIF通过最后一个聚焦透镜的激光能量已达到2.03 MJ, 射向靶室的能量已达1.875 MJ。目前正在准备2.0 MJ激光“点火”实验。如果成功, 将是激光聚变能源发展的一个新的里程碑<sup>[3]</sup>。

据分析, 实现纯聚变能源要求: 激光能量达到2.5 MJ,  $G$ 为100, 打靶频率10 Hz以上。考虑到纯聚变的困难, 美国利弗莫尔实验室提出了聚变裂变混合的LIFE概念, 下文的LIFE均为此含义。

如图1所示<sup>[1]</sup>, 设想激光能量1.4~2.0 MJ, 打靶频率10~15 Hz,  $G$ 为25~30, 实现350~500 MW的聚变功率。在裂变包层内使能量再放大 $M$ (约4~10)倍, 可产生2000~5000 MW的热功率, 输出电功率1000~2000 MW。LIFE采用一次通过的方式, 通过长期辐照使包层燃料达到极深燃耗, 大大减少核废料, 减少核扩散的风险。

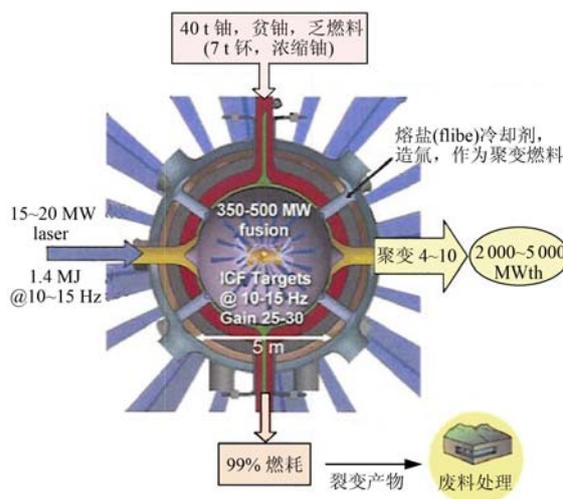


图1 LIFE系统的能量平衡与结构示意图

收稿日期: 2012-07-23      修改日期: 2012-09-13

基金项目: 国家磁约束核聚变研究专项资助项目(2010GB111001, 2012GB106001); 中国工程物理研究院科学与技术发展基金资助项目(2011B0103030)

作者简介: 刘成安(1936-), 男, 河南息县人, 研究员, 从事先进核能系统研究; E-mail: liu\_chengan@iapcm.ac.cn

通信作者: 师学明, E-mail: sxm\_shi@iapcm.ac.cn

<http://www.npr.ac.cn>

## 2 聚变-裂变系统的构成

### 2.1 聚变系统

#### (1) 激光系统<sup>[4]</sup>

为实现 LIFE 的目标, 拟开发高能、高功率  $N_d$  玻璃和高能二极管泵浦固体激光技术, 以增加激光强度和频率。要求未来电能转换为激光能的效率达到 10%~15%。激光器由 192 路独立的激光束流组成, 每束激光束能量为 100 kJ 量级, 波长 350 nm, 激光束对聚焦点的聚焦要达到最佳的运行状态。激光器件用高速流动的氦气冷却。

#### (2) 聚变靶

设想用间接驱动方式实现热斑点火 (HIS)。高能激光束入射于靶室的内壁上, 在高  $Z$  的金属室壁上转换为 X 光, X 光在靶丸上形成内爆压缩激波, 内爆压缩有高度的对称性, 使靶丸达到高温和高密度。要求在靶球内 D-T 燃料的中心部位 1% 内点火, 避免中心外燃料混进热斑, 造成熄火。

#### (3) 靶室

靶室采用球形设计, 半径 2.5 m。室壁 (即包层第一壁) 由低活性纳米结构的氧化奥氏体钢构成, 以承受高能中子的辐照损伤。室壁的表面覆以 250~500  $\mu\text{m}$  的钨, 以承受 X 射线形成的 1 000 K 以上的高温。

靶室和光束通道内充以 Ar 和 Kr 气体, 以吸收大部分 X 射线, 阻止聚变产生的带电粒子。气体在两次内爆之间由激光通道泵出。爆室半径与内爆放能的平方根成正比。爆室外的包层需 1 m 左右的厚度, 以减少中子的漏失。

LIFE 聚变系统要解决的问题是, 第一壁材料在高温下不蠕变, 能抗辐照损伤, 抗肿胀, 抗氢脆裂。在高温氟盐作用下, 抗腐蚀, 不产生裂纹。预计第一壁材料每年的中子辐照损伤为 35 dpa (原子平均位移)<sup>[1]</sup>, 商业运行需要开发能耐受 150~300 dpa 的新型材料。第一壁采用液态金属 LiPb 冷却。

#### (4) 聚变靶控制系统

聚变靶控制系统须能以 200~400 m/s 的速度, 每天发射  $10^6 \sim 10^7$  颗靶丸。要求靶丸以高精度到达靶室中心指定的位置, 靶丸测试、跟踪和定位的精度要求也很高。这种精度与弹道导弹防御系统击准太空飞行的弹道导弹相当。

激光聚焦点须精确到十分之几微米, 并能承受靶室环境中, 靶丸内爆残留物的影响。现在已经用靶作了实验, 靶飞行速度已达 400 m/s, 发射频率 6 Hz, 并有很高的重复度。

### 2.2 裂变包层系统

包层由第一壁、铍增殖层、裂变燃料区以及屏蔽层组成。第一壁和 Be 要经受强流高能中子的辐照, 它们需要定期更换。由于燃料中易裂变核素浓度低, 需要在第一壁后布置 15 cm 厚的铍球床来增殖中子, FliBe 熔盐在球床中流过以冷却铍球床<sup>[5]</sup>。Be 的用量成为制约混合堆发展规模的一个重要因素<sup>[6]</sup>。LIFE 大部分能量是裂变区中产生的, 必须设计出能实现极高燃耗 (90% 以上的原子分数燃耗)、以高功率密度长时间稳定运行的燃料元件。这种设计不需换料, 只需在包层裂变燃料消耗殆尽时作一次后处理。随着中子的辐照, 易裂变核素浓度会出现先增加后缓慢减小的过程, 但在整个寿期内系统的有效增殖系数  $k_{\text{eff}}$  均小于 0.9。LIFE 包层安全性好, 失冷事故下燃料可快速排放到包层外的大型容器中, 用自然对流的方式冷却衰变余热。

#### (1) 燃料元件的构形

包层中可采用固态燃料或液态熔盐燃料。固体燃料一般采用 FliBe 熔盐冷却, FliBe 同时还是氦增殖剂。FliBe 在耐高温的固体燃料球床中流动, 将燃料核反应释放的热载带出来。球床循环的速度为 0.3 m/d, 循环一周所需时间为 30 d。燃料入口温度 610°, 出口温度 640°, 热电转换效率可达 40% 以上。熔盐有很高的等体热容量, 可达到很高的功率密度, 包层可设计得很紧凑。包层示意图详见图 2<sup>[7]</sup>。利弗莫尔实验室推荐了 3 种固体燃料<sup>[6]</sup>。

##### 1) 三层均匀结构颗粒型燃料元件

直径 1 mm 的燃料颗粒弥散在直径 2 cm 的 SiC 球囊中。燃料球呈多层结构, 称之为 TRISO (三层均匀结构) 燃料元件。这种燃料元件可承受较高辐照损伤, 较高的裂变气体压力, 因而可达到较高的燃耗深度。燃耗深度的极限主要取决于包壳、石墨能承受的 dpa 量。

##### 2) 固体空腔球形燃料元件 (SHC)

SHC 结构有利于实现更深的燃耗深度。预计可承受 99% 燃耗深度下的裂变气体压力。燃料元件外壁上

产生的应力不会超过受辐照材料所能承受的应力极限。

3) 密封的粉状燃料 (EPF)

这是由粉状燃料、基底材料和牺牲材料组成的混合物, 封装在不锈钢或其它耐辐照、耐高压材料包壳中。用牺牲材料从化学上缓解高活性裂变产物对包装材料的腐蚀, 以粉状燃料的空隙储存裂变气体, 从而降低裂变气体的压力。

熔盐燃料不会因中子的长期照射而损坏, 有望达到极深燃耗, 提供了另一种可能选择<sup>[6]</sup>。从纯技术观点上看, 甚至可达到 100% 的理想燃耗深度。熔盐燃料可在线加料和后处理, 以保证燃料和裂变产物含量保持在需要的水平上。特别要注意控制的是钷及裂变产物中的稀土元素含量, 因为它们达到一定的浓度会在氟盐中沉淀。因此需要研究有关双偶盐混合物, 如 BeF<sub>2</sub>-LiF, BeF<sub>2</sub>-ThF<sub>4</sub>, BeF<sub>2</sub>-UF<sub>4</sub>, LiF-PuF<sub>3</sub>, LiF-ThF<sub>4</sub> 和 ThF<sub>4</sub>-UF<sub>4</sub> 等的相转变过程, 研究不同组分下熔盐在运行温度下的沉淀状态。

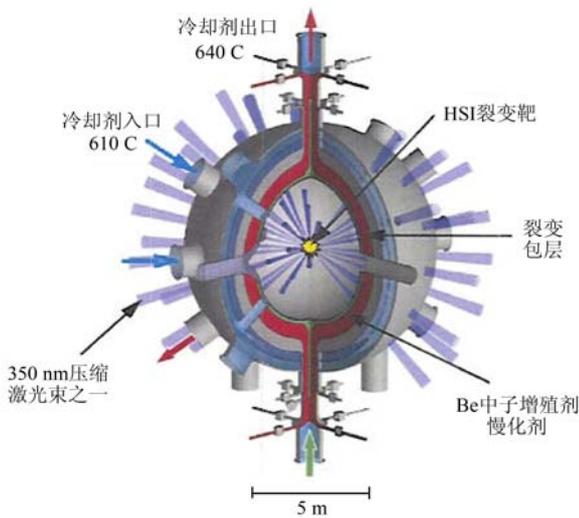


图 2 LIFE包层示意图

(2) 裂变包层能量产生

LIFE 包层的裂变燃料可采用贫铀<sup>[8]</sup>、天然铀或轻水堆的乏燃料, U 等重金属的装量为 40 t 左右, 以 2000 MW 的平均功率可运行 50 a 左右, 达到 90% 以上燃耗深度。为了处理从核武器拆卸下来的核材料, 也可以装入 7 t 武器级 Pu 或者 U<sup>[9]</sup>, 经过 7 a 左右的燃耗, 达到 90% 以上的燃耗深度。包层内也可以用 Th<sup>[7]</sup>, 实现 Th-U 循环。

进入到包层的中子发生的主要反应有:

- (1)  $Be + n \rightarrow 2n + X_1 + X_2$
- (2)  ${}^6Li + n \rightarrow T + {}^4He$
- (3)  ${}^7Li + n \rightarrow T + n' + {}^4He$
- (4)  ${}^{238}U + n \rightarrow {}^{239}U \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}Np \xrightarrow{\beta^-} {}^{239}Pu$
- (5)  ${}^{238}U + n \rightarrow X_A + X_B + \nu n + 200 \text{ MeV}$
- (6)  ${}^{239}Pu + n \rightarrow X_A + X_B + \nu n + 200 \text{ MeV}$
- (7)  ${}^{232}Th + n \rightarrow {}^{233}Th \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}Pa \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}U$
- (8)  ${}^{233}U + n \rightarrow X_A + X_B + \nu n + 200 \text{ MeV}$
- (9)  ${}^{232}Th + n \rightarrow X_A + X_B + \nu n + 200 \text{ MeV}$

其中: (1) 为 Be 的中子增殖反应; (2) 和 (3) 为造 T 反应, 实现系统 T 自持; (4) 和 (7) 分别为 U-Pu 循环和 Th-U 循环的易裂变材料生产反应; (5) 和 (6) 为 U-Pu 循环的裂变反应, 实现放能和中子增殖; (8) 和 (9) 为 Th-U 循环的裂变反应。除上述过程外, 还有部分中子被结构材料或其它次级反应吸收, 或泄漏出系统之外。包层的能量主要是核裂变产生的, 造 T、造可裂变材料和其它反应过程也有贡献。图 3 为一典型包层方案设计的能量平衡图<sup>[1]</sup>。

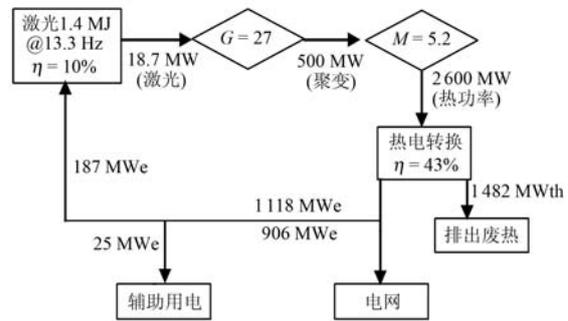


图 3 贫化铀SHC燃料设计方案的能量平衡图

在连续的聚变中子源的驱动下, 理论上系统燃耗可达 100%, 当然在极深燃耗下, 固体燃料的构型应作特殊的改进。由于易裂变材料浓度先升后降, 包层能量放大倍数及包层功率波动较大, 如图 4 的实线所示<sup>[8]</sup>。为了保持功率输出水平恒定, 可以调节 <sup>6</sup>Li 和 <sup>7</sup>Li 的相对含量。当易裂变材料的浓度较高时, 可增加 <sup>6</sup>Li 含量, 提高中子造氙率, 从而降低功率水平; 反之亦然。前期积累的氙可用于弥补后期氙的不足, 保证整个寿期内氙自持。在寿期的末端, 裂变燃料消耗殆尽, 只剩部分裂变产物, 此时主要目标不是放能而是嬗变裂变产物。

Th-U 循环中也可以采用通过调节 <sup>6</sup>Li 含量实现整个寿期的功率展平。图 5 给出了一个典型的 LIFE 熔盐

堆钍铀循环包层设计方案中功率随时间变化情况<sup>[7]</sup>。

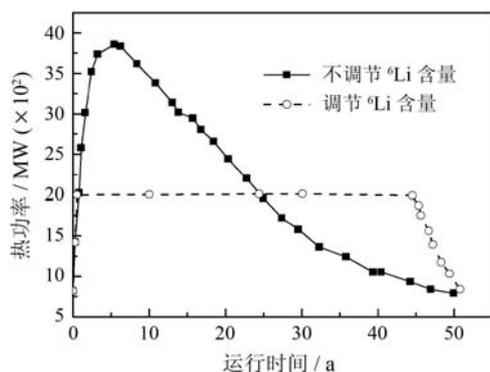


图 4 调节<sup>6</sup>Li含量展平寿期功率

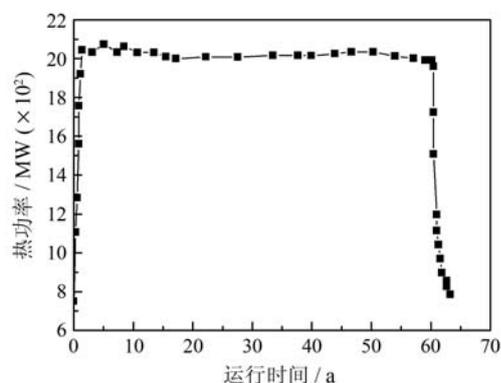


图 5 钍铀熔盐堆功率展平

### (3) 乏燃料与核扩散问题

在 99% 燃耗的燃耗深度下, 每吨乏燃料中所含铀元素不到 10 kg, 其主要成分是 <sup>246</sup>Cm, 无法用于制造核武器。在典型的压水堆乏燃料中, 每吨乏燃料中所含铀元素 970 kg。1 GW 电功率的压水堆运行 40 a 将产生约 3 200 t 乏燃料; 而同功率的 LIFE 混合堆 40 a 仅产生 0.4 t 乏燃料。这对减少核废料储存, 保护环境有重大意义。

LIFE 运行过程中, 无法从包层中提取裂变材料。以采用固体燃料的设计为例, 可裂变材料弥散在  $1.5 \times 10^7$  个燃料颗粒中。Pu 浓度最高时, 每个燃料颗粒只含 235 mg Pu, 也即需要从 34 000 颗燃料颗粒中才可提取 8 kg Pu (对制造武器有意义的量)。而这些燃料颗粒有很强的放射性, 超出了操作者可承受的极限。因而这种系统不存在与核燃料循环过程相关的核扩散的危险。

## 3 发展的前景与技术上的挑战

美国科学家设想于 2030 年将 LIFE 混合堆引进美

国的能源经济。根据美国能获得的 Be 资源量来估计, 2100 年前以 U (贫铀或天然铀或乏燃料) 为燃料的 LIFE 混合堆可为美国提供 1 000 GW 电能, 相当于美国所需电能的一半。为此, 要继续研究以克服一系列技术上的难题, 包括:

(1) 激光内爆压缩, 由 NIF 现在几小时发射 1 次, 要达到每秒发射 10~15 发。高频率的激光发射要用二极管泵浦固体激光器 (DPSSL), 而不是目前闪光灯驱动的激光器。DPSSL 的技术已多次在利弗莫尔实验室的水银激光系统上作了演示, 专家预计 DPSSL 的二极管造价会有大幅度的下降。

(2) 每年须用  $4 \times 10^7 \sim 5 \times 10^7$  个廉价的靶丸, 要发展工业规模的、廉价的靶丸制造技术。

(3) 发展高速度 (200 m/s)、高频率 (10~15 Hz)、高精度发射、跟踪和定位靶丸的技术。

(4) 进一步研究和发展新型合金钢材料, 能承受 150~300 dpa 的辐照损伤, 相当于靶室使用寿命为 4~8 a。

(5) 高燃耗裂变燃料元件设计和实验检验, 开发与之配套的混合堆技术。

虽然 LIFE 需要克服的困难很多, 但这些工作可各自独立地和同步地进行, 在模块的规模上进行演示。在模拟靶室内, 用低功率激光, 对廉价替代靶丸做发射、跟踪、定位作演示。外中子源驱动的裂变包层, 可独立于聚变过程在其它外中子场下作模拟实验。2012 年底前进行优化的 HSI 靶增益演示实验。设想在 2014 年前, 用 5 a 时间作主要次级部件的技术、经济证实性演示; 2018 年前完成综合性、全规模、10 Hz 和聚变功率为 500 MW, 并带有部分裂变包层的演示性实验; 2030 年建 LIFE 混合堆工厂。

## 4 结论

聚变技术的进展为实现 LIFE 聚变-裂变能源系统提供了可能性。LIFE 提出了一个安全、无碳、燃料资源丰富、核废料少和可持续发展的新型核能源概念, 但也面临着诸多挑战。未来 20 年将是 LIFE 发展的关键时期, 它的成功将扩大裂变能源发展的空间, 也将使人类向纯聚变能源开发跨进一大步。

### 参考文献 (References):

- [1] MOSES E, DIAZ DE LA RUBIA T, STORM E, *et al.* Fusion Sci-  
<http://www.npr.ac.cn>

- ence and Technology, 2009, **56**: 547.
- [2] EDWARD I M. Energy Conversion and Management, 2008, **49**: 1795.
- [3] Laser fusion on the horizon[EB/OL]. [2012-06-27]. <http://www.nature.com/nphoton/journal/v6/n5/full/nphoton.2012.106.html>.
- [4] STOLZ C J, LATKOWSKI J T, SCHAFFERS K I. Next generation laser optics for a hybrid fusion-fission power plant [EB/OL].[2012-06-27]. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/378209.pdf>.
- [5] DEMANGE P, MARIAN J, SERRANO M DE CARO, *et al.* Nuclear Fusion, 2009, **49**: 115013.
- [6] FARMER J C. LIFE Materials: Overview of Fuels and Structural Materials Issues Volume 1[EB/OL]. [2012-06-27]. [http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti\\_id=94-5586](http://www.osti.gov/energycitations/product.biblio.jsp?osti_id=94-5586).
- [7] MOIR R W, SHAW H F, CARO A, *et al.* Fusion Science and Technology, 2009, **56**(2): 632.
- [8] KRAMER K J, LATKOWSKI J F, ABBOTT R P, *et al.* Fusion Science and Technology, 2009, **56**: 625.
- [9] FARMER J C, DIAZ DE-LA RUBIA T, MOSES E. The Complete Burning of Weapons Grade Plutonium and Highly Enriched Uranium with ( Laser Inertial Fusion-Fission Energy ) LIFE Engine[EB/OL].[2012-06-27]. <https://e-reports-ext.llnl.gov/pdf/36-8706.pdf>.

## Introduction of American Laser Inertial Fusion Energy

LIU Chen-an, SHI Xue-ming

( Beijing Institute of Applied Physics and Computational Mathematics, Beijing 100088, China )

**Abstract:** In this paper the present study situation and prospect of the American laser-based Inertial Confinement Fusion Energy (LIFE) are briefly introduced. It is based on recent progress of National Inertial Facility (NIF) and related research have begun. On the assumption of using laser energy of 1.4 to 2.0 MJ, the target fusion gain  $G=25\sim 30$ , the repetition rate 10 to 15 Hz, the fusion power of 350 to 500 MW or neutron source power of  $1.3\times 10^{20}$  to  $1.8\times 10^{20}$  n/s could be achieved. For a sub-critical fission blanket driven by this fusion neutrons power, energy multiplication  $M$  of 4~10 and several GW of thermal power could be obtained. By novel design on fuel pins, burnup more than 90% would be achieved for heavy metals in the blanket. Inertial Confinement Fusion-fission energy is a promising concept, which characterized by inherent safety, richness in nuclear fuel resources, minimization of nuclear waste, non-CO<sub>2</sub> emitting, and it is a sustainable energy source.

**Key words:** laser; inertial confinement fusion; fission; hybrid; burnup

**Received date:** 23 Jul. 2012; **Revised date:** 13 Sep. 2012

**Foundation item:** National Magnetic Confinement Fusion Science Program in China(2010GB111001, 2012GB106001); Science and Technology Development Foundation of China Academy of Engineering Physics(2011B0103030)

**Corresponding author:** SHI Xue-ming, E-mail: [sxm\\_shi@iapcm.ac.cn](mailto:sxm_shi@iapcm.ac.cn)

<http://www.npr.ac.cn>