

国际热核实验反应堆(ITER)计划与未来核聚变能源

潘传红^{1,2,†}

(1 中国核学会 北京 100822)

(2 核工业西南物理研究院 成都 610041)

摘要 能源短缺和环境恶化是人类社会面临的共同挑战. 由于资源丰富、环境友好和零碳排放,核聚变能源是未来的理想能源. 上世纪 90 年代以来,磁约束核聚变研究取得重大进展,以建造国际热核实验反应堆(ITER)为标志,聚变能源开发进入工程实施阶段,如果 ITER 计划取得预期成果,有望在本世纪中叶实现核聚变能源商用化.

关键词 低碳经济,核能,核聚变能,国际热核实验反应堆

The International Thermonuclear Experimental Reactor and the future of nuclear fusion energy

PAN Chuan-Hong^{1,2,†}

(1 Chinese Nuclear Society, Beijing 100822, China)

(2 Southwestern Institute of physics, Chengdu 610041, China)

Abstract Energy shortage and environmental problems are now the two largest challenges for human beings. Magnetic confinement nuclear fusion, which has achieved great progress since the 1990's, is anticipated to be a way to realize an ideal source of energy in the future because of its abundance, environmental compatibility, and zero carbon release. Exemplified by the construction of the International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER), the development of nuclear fusion energy is now in its engineering phase, and should be realized by the middle of this century if all objectives of the ITER project are met.

Keywords low-carbon economics, nuclear energy, nuclear fusion energy, International Thermonuclear Experimental Reactor (ITER)

1 开发核聚变能源的必要性

能源短缺和环境恶化是 21 世纪人类社会共同面临的两大难题,此外,我国能源还存在“人均资源占有量偏低”和“能源结构不合理”两大矛盾。“能源安全”已经成为我国的核心安全问题之一. 考虑到煤、石油、天然气等化石能源最终将枯竭,而水力、太阳能、风能、潮汐和地热等能源受地域、环境和气候制约,难以成为化石燃料的替代能源,发展低碳经济和开发新的低碳的替代能源成为了本世纪世界范围

的重大课题.

作为低碳能源,核能引起人们广泛关注. 核能分为核裂变能和核聚变能,重原子核(如铀和钚)分裂时释放的能量为核裂变能,轻原子核(如氘和氚)聚合时释放的能量为核聚变能. 产生核裂变能的装置分为热中子反应堆和快中子增殖堆两类,其中热中子反应堆自上世纪 50 年代起开始工业规模应用,而快中子增殖堆目前尚在开发之中. 我国将开发先进热中子反应堆及其配套核电技术作为“核能发展规

2010-04-14 收到

† Email: panch@iterchina. cn

划”的首要战略目标,而将快中子增殖堆列为第二步战略目标.核聚变能是宇宙间所有恒星(包括太阳)释放光和热的能源,在所有的核聚变反应中,氘氚核(都是氢的同位素)的聚变反应较易于实现.氘在海水中储量极为丰富,一升海水里提取出的氘,聚变反应时可释放出燃烧 300 升汽油的能量;氚可在反应堆中通过锂再生,而锂在地壳和海水中都大量存在.氘氚反应没有放射性废物,中子对堆结构材料的活化只产生易于处理的短寿命放射性物质.可以说,核聚变是少污染、无“长寿命放射性废物”、资源无限丰富的理想能源.我国已将开发和利用核聚变能作为“核能发展规划”的第三步战略目标.

对核聚变反应过程进行控制并在有效控制的条件下实现核聚变反应,称为受控核聚变.发生氘氚核聚变反应需具备三项条件:首要条件是“高温”,燃料气体被电离成“等离子体”后,温度要达到上亿度,才能保证原子核有足够的动能彼此接近并发生核聚变反应;其次是维持聚变等离子体的“高密度”,因为过于稀薄时原子核之间碰撞或发生核反应的机会小;第三是要将高温高密等离子体的能量状态维持足够长的时间,即“长时间能量约束”,以便核聚变反应能持续进行,也就是说,等离子体的能量损失率必须尽量地小.半个世纪以来人们在探索受控核聚变的过程中,形成了两种不同的研究途径,即磁约束核聚变(MCF)和惯性约束核聚变(ICF).此外,建设和运行聚变反应堆还需要解决材料、工艺、加料、排灰、杂质限制、能量提取、产氦及安全防护等一系列科学和工程技术上的难题.

2 磁约束核聚变研究的重要进展

为了开发利用核聚变能,人类经历了半个多世纪的艰苦探索.从 20 世纪 40 年代末起,投入科学家及工程师上千人,经费总计每年超过 10 亿美元.在这个过程中,人们对开发聚变能源难度的认识也逐步深化.从 20 世纪 70 年代开始,原苏联科学家提出的“托克马克”途径逐渐显示出独特优势,成为磁约束核聚变研究的主流.托克马克装置又称环流器,等离子体被约束在“磁笼”中,形成一个中空的面包圈,并有很强的环电流.随着各国不同规模的托克马克装置的建成、运行和实验,托克马克显示了较为光明的前景.聚变等离子体温度达到亿度,等离子体约束明显改善.20 世纪 90 年代,欧洲、日本、美国大型托克马克装置取得突破性进展,得到 16MW 瓦聚变功

率输出.聚变能的科学可行性基本得到验证.

我国的受控核聚变研究始于 20 世纪 50 年代中期,核工业西南物理研究院和中国科学院等离子体物理所是从事磁约束核聚变研究的专业单位.中国科学技术大学、清华大学、中国科学院物理研究所、华中科技大学、中国原子能科学研究院、北京科技大学等单位也开展了相关研究工作.经过 50 余年的努力,我国先后共建造了 30 多台核聚变实验装置.我国自行设计建造的中国环流器一号(HL-1)装置于 1984 年在核工业西南物理研究院建成,标志着我国核聚变研究由原理性探索进入到规模化实验研究阶段,该装置获国家科技进步一等奖.1995 年又成功建造了中国环流器新一号(HL-1M)装置,该装置达到国际同类型同规模装置的先进水平.我国第一个具有偏滤器位形的大型托卡马克中国环流器二号 A(HL-2A)装置于 2002 年建成,并成功投入实验运行,等离子体电子温度达到 5500 万度.中国科学院等离子体物理研究所先后建成了 HT-6B、HT-6M 铜导体托卡马克装置和 HT-7、EAST(先进超导托卡马克实验装置),并进行了长脉冲放电实验,其中 EAST 也获得国家科技进步一等奖.中国科学技术大学、清华大学、中国科学院物理研究所、华中科技大学、北京科技大学等科研机构也在核聚变研究领域开展工作,培养聚变人才.

由于核聚变能源开发是人类共同面临的科学技术挑战,一项以验证磁约束聚变能科学可行性和工程技术可行性为目标的国际热核实验堆(ITER)计划已经正式启动,该计划集成了国际受控核聚变的主要科学和技术成果.预计 ITER 计划建设周期为 10 年,装置建成后运行 20 年,退役 5 年.ITER 计划将集成验证“稳态燃烧等离子体”科学问题和部分验证聚变电站工程技术问题.ITER 计划的实施,标志着磁约束核聚变研究已经进入实际的能源开发阶段,其结果将决定人类能否迅速地、大规模地使用聚变能源,从而影响人类从根本上解决能源问题的进程.

3 ITER 计划及其深远影响

ITER 计划是 1985 年由美苏首脑倡议、国际原子能机构 IAEA 支持的超大型国际合作项目,旨在验证磁约束聚变能科学可行性和工程技术可行性.1988 年欧、美、日、俄四方开始进行工程设计,1998 年完成工程设计.其后,依据“先进托卡马克运行模

式”的科学基础,重新对原设计进行改进和优化,并于2001年完成设计.改进后的设计称为ITER—FEAT(fusion energy advanced Tokamak),即现在的ITER计划,图1和表1分别给出了ITER装置的剖面(示意)图和主要设计参数.根据新的设计,ITER装置的造价由原来100亿美元降至50亿美元.参与ITER计划的7方于2006年11月21日签署了《国际热核实验堆联合实施协定》.根据协定,ITER装置将建在法国南部的Cadarache中心(马赛以北约60公里处),预计2018年完成建造并投入运行,设计聚变功率输出50—70万千瓦,等离子体放电脉冲500—1000s.除了等离子体指标外,该计划还涉及大型超导磁体、等离子体加热及电流驱动、堆芯部件远距离操作维修、涉氚技术等聚变堆工程技术问题.如果ITER装置如期建成并达到预期目标,百万千瓦级的示范聚变电站可望在2030年前后开始建造,并在2050年前后实现核聚变能源商用化.

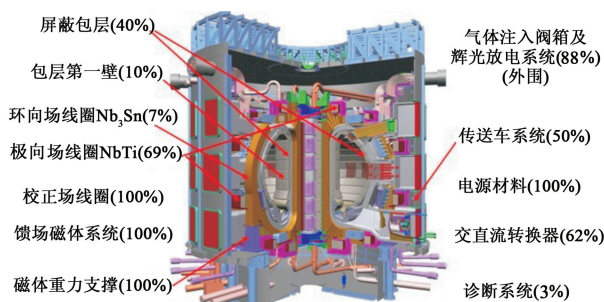


图1 ITER装置及我国承制的部件示意图

表1 ITER装置主要设计参数

总聚变功率(P_{fus})	500—700MW
中子壁负载	$0.78\text{MW}/\text{m}^2$
等离子体容积(V_p)	828m^3
等离子体大半径(R)	6.2m
等离子体小半径(a)	2m
等离子体电流(I_p)	15—17MA
椭圆度(k)	1.7
安全因子(q)	3
环向磁场(B_T)	5.3T
加热与电流驱动功率	73—130MW
偏滤器位形	单零点

ITER装置由多个系统和部件组合成,主要系统有磁场线圈系统、真空室系统、真空室内部件(屏蔽包层模块和偏滤器部件)、低温恒温器、水冷系统、

低温站、加热和电流驱动系统、供电系统、加料和抽气系统、氦系统、诊断系统等.在开展设计研究的同时,欧、美、日等国用了近16年时间,花费了约15亿美元进行了ITER部件的预研,解决了大部分部件制造的关键技术和生产工艺问题,其中包括中心螺管线圈、环向场线圈、真空室、包层模块、偏滤器、屏蔽包层模块遥控操纵系统、偏滤器遥控操纵系统等七大关键部件的攻关与试制.

根据联合实施协定,所有的部件将由7个参与方分别研制和提供,并按规定时间节点提交安装.经过分解,ITER装置的部件被拆分成22个采购包,97个子包.除少量部件用可用现金直接从市场采购外,大多数部件(采购包)需要进行研制并通过质量认证方能使用,其中的涉核部件还必须通过法国原子能委员会的审查并颁发许可证.我国承担了12个子包(分属6个采购包)的制造任务,预计研制费和加工费达40亿元人民币.涉及到的部件(材料)为:磁体支撑、包层第一壁、包层屏蔽体、气体阀门箱和辉光放电清洗系统、修正场线圈、磁体引线、高压变电站设备、交一直流转换器、环向场磁体线圈导体、极向场磁体线圈导体、传送车系统、诊断系统(中子通量测量、光学测量、朗缪尔探针)等.12个子采购包分别标于图1两侧,箭头所指为部件位置.

氦的增殖、回收、纯化与再循环是未来聚变电站核心技术之一.ITER实验包层模块(简称ITER-TBM)项目的研究目标即验证氦增殖及氦的提取与纯化.目前,各国ITER—TBM的设计方案都是基于本国的聚变能源开发战略和示范堆的定义来确定的,基本集中在以下5种概念:(1)氦冷/固态锂陶瓷氦增殖剂/铁素体马氏体钢结构材料;(2)氦锂双冷(或氦单冷)/液态锂铅增殖剂/铁素体钢马氏体钢结构材料;(3)水冷/固态锂陶瓷氦增殖剂/铁素体钢马氏体钢结构材料;(4)液态锂增殖剂自冷/钒基合金结构材料;(5)熔盐增殖剂自冷.根据国际聚变技术的发展趋势,“氦冷/锂陶瓷氦增殖剂/铁素体钢马氏体钢结构材料”(HCSB),和“氦锂双冷(或氦单冷)/液态锂铅增殖剂/铁素体钢马氏体钢结构材料”(DCLL),是示范堆(DEMO)包层首选的两种概念.图2和图3分别给出了示范堆两种包层概念设计的示意图.

4 示范堆和聚变电站技术研究

实现核聚变能源的商用,还有很长的路要走,预

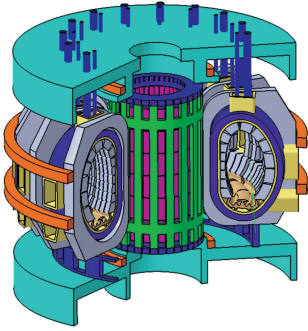


图 2 HCSB 示范堆包层示意图

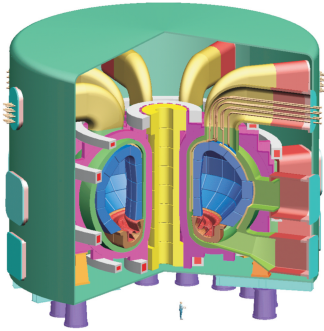


图 3 DCLL 示范堆包层示意图

计要到 2050 年,才能建成具有经济竞争力的商用聚变电站.在实现聚变能商用之前,还要经历示范堆阶段,以验证商用聚变电站的工程技术可行性、环境可行性及经济可行性.示范堆的聚变功率大致为 2—3GW,示范堆与聚变电站技术主要包括:芯部等离子体技术,包层与能量获取技术,结构材料与功能材料技术,堆级超导磁体技术,屏蔽与安全技术,诊断与控制技术等.其中包层技术是聚变堆实现“氦自持循环”与获取能量的关键技术,包层类型的选择将决定聚变反应堆的基本特征.同时,我国还长期致力于核聚变能源的“非电力应用”研究,如聚变中子嬗变(裂变堆产生的)高放废物以及聚变产氢等研究,这些应用研究将有助于推动聚变电站技术的发展,中国的示范堆计划也要验证这些应用前景.

根据我国国情,我国示范堆战略研究的要点是:(1)利用国内聚变实验装置(如 HL-2A 及其升级装置和 EAST 等),开展前沿等离子体物理研究;(2)加强聚变堆技术研究和基础技术平台与人才队伍建设;(3)全面参与 ITER 计划,消化、吸收和掌握 ITER 的设计技术和加工制造技术;(4)参与示范堆有关的国际合作;(5)开展示范堆设计与关键技术预研工作;(6)加入国际聚变材料辐照试验装置(international fusion materials irradiation facility,缩写为 IFMIF)研究计划.

欧洲提出了开发聚变能源的“快车道”计划,即从 ITER 直接过渡到示范堆的技术路线.美国则希望在 ITER 和示范堆之间建造一个部件实验装置(component test facility,缩写为 CTF),以解决示范堆的关键工程技术问题.根据我国国情,工程验证平台(ETP)可以作为从 ITER 到示范堆的过渡阶段.

5 结束语

自上世纪 90 年代以来,等离子体物理学和磁约束核聚变工程技术取得进展,以 ITER 计划的启动为标志,磁约束核聚变研究已经完成科学(等离子体物理学)可行性验证,从而进入能源开发的工程实施阶段.ITER 计划将集成验证“先进托卡马克运行模式”和稳态燃烧等离子体的科学规律,同时,还将部分验证示范堆工程技术问题.作为 ITER 计划成员国,我国通过全面参与该项目,掌握设计、制造的关键技术,分享研究成果,同时加强国内磁约束聚变研究基地建设,积极储备人才,开展示范堆战略研究和示范堆关键技术预研,以期在条件成熟时独立发展我国的磁约束核聚变能源.