

国际热核实验反应堆计划 及其对中国核能发展战略的影响

潘 垣[†] 庄 革 张 明 王之江 丁永华 于克训

(华中科技大学电气与电子工程学院 聚变与电磁新技术教育部重点实验室 武汉 430074)

摘 要 随着世界人口增长和经济持续发展,能源短缺问题变得越来越严峻,世界各国都在努力寻找煤、石油、天然气等化石能源的替代能源.核聚变能具有清洁、高效、资源丰富等优点,是最有希望解决人类能源问题的途径之一.文章指出了发展核聚变能的重要性,回顾了磁约束聚变研究的历程,简述了国际热核实验反应堆(ITER)计划的进展及中国的相关研究情况,最后对中国核能发展战略作出展望.

关键词 国际热核实验反应堆(ITER),磁约束聚变,核能战略

The ITER program and its impact on China's nuclear energy development

PAN Yuan[†] ZHUANG Ge ZHANG Ming WANG Zhi-Jiang DING Yong-Hua YU Ke-Xun

(Key Laboratory of Fusion and Advanced Electromagnetic Technology of Ministry of Education,
College of Electrical and Electronic Engineering, Huazhong University of Science and Technology, Wuhan 430074, China)

Abstract Due to the increasingly intensive impact of population growth and economy development, energy shortage is becoming more and more severe, so countries around the world are searching for substitutes for the fossil energy resources of coal, oil and gas. Nuclear fusion energy, characterized by its cleanliness, high efficiency and inexhaustibility, is considered to be one of the most possible ways to solve the energy problem. This paper outlines the importance of the development of fusion energy and reviews the history of magnetic confinement fusion research, with a brief introduction to the progress of the international thermonuclear experimental reactor program and related research in China as well. The prospect of this strategy for China's nuclear energy development is given at the end.

Keywords International Thermonuclear Experimental Reactor(ITER), magnetic confinement fusion, strategy of nuclear energy

1 引言

随着世界人口不断增加与经济持续发展,人类对能源的需求日益增长.以化石能源为一次能源的主要能源消费模式,面临巨大的挑战.煤炭、石油、天然气三者之和在世界能源消费结构中约占 93%,一次能源的大量使用导致了大气污染、温室气体排放等严重

的环境问题;更令人担忧的是,随着能源消耗的持续增长,现有已查明的一次能源资源将远远不能满足人类对能源的需求.2007 年 11 月公布的《2007 年世界能源展望》报告指出,如果不采取措施限制能源消耗,未来 20 多年内世界能源消耗量将剧增 55%,因而寻找替代新能源成为各国解决能源问题的根本措施.新

2009-08-04 收到

[†] 通讯联系人. Email: panyuan@mail.hust.edu.cn

能源指太阳能、风能、生物质能、地热能、水力和海洋能等可再生能源和核能,其中太阳能、风能、海洋能等由于受到环境条件和目前科技水平的限制,难以大规模开发利用,故在世界能源资源日趋紧张、环境保护要求日趋严格的今天,大规模发展核能是世界各国解决能源供应问题的重要手段。

核能主要有裂变能和聚变能两种。裂变能反应条件容易达到,发展较为成熟,已经开始大规模的商业化利用。但是裂变能核废料放射性强,难以处理,且公众对其安全性持有不完全信任的心理;同时铀-235的储量有限,在资源上长期保障有一定困难。与裂变能相比,聚变能具有原材料储量(主要是海水中的氘、锂等)极为丰富,聚变反应堆不会产生污染环境的硫、氮氧化物,不释放温室气体,反应产物无放射性废料以及反应释能效率高等优点,成为目前人们认识到的最终解决人类能源问题的最重要的途径之一。但是要产生聚变反应,就必须克服长程的库仑排斥力,使得作为燃料的轻核(氘、氚等)靠近到短程的核力作用范围内才有可能。因此,实现聚变能的利用,就需在可控制的条件下将轻核加热到很高温度,并能够约束足够长的时间,这时燃料粒子充分电离成由原子核和电子构成的等离子体状态,大量带电粒子以极高速度频繁地发生碰撞,产生聚变反应并释放出能量。

由上可知,为了维持聚变反应的持续进行,不但需要足够大的等离子体密度和足够高的等离子体温度,而且还需要足够长的约束时间,以保证碰撞频繁进行。实现上述这些条件,要解决的首要问题是高温聚变等离子体的约束问题。目前人们发现,可约束等离子体发生聚变的方法主要有惯性约束和磁约束两种,其中磁约束热核聚变是利用特殊形态的磁场,把处于超高温的热核聚变等离子体约束在有限的体积内以发生反应。这种方式是当前最有希望实现聚变能应用的途径^[1]。

2 磁约束核聚变的发展历程^[2,3]

受控磁约束研究可追溯至上世纪中叶。早在第二次世界大战结束时,欧美各主要国家就开始着手进行磁约束核聚变的相关研究。一些可控聚变的观念及相应的实验装置如仿星器、箍缩装置和磁镜装置等均在20世纪50年代提出。但上述装置的性能不是很理想,如在箍缩装置上,等离子体仅能维持几个微秒。

与此同时,前苏联也在进行受控磁约束的探索。物理学家塔姆(Tamm)和萨哈罗夫(Sakharov)认为,将环形等离子体中感应电流产生的极向磁场跟外部环向磁场结合起来,可以实现维持等离子体平衡的位形。根据这种概念,莫斯科库尔恰托夫研究所阿齐莫维奇的领导下开展研究,制作出第一个托卡马克(Tokamak,意思是“环形磁室”)装置。其最初的实验结果也并不理想,放电时间仅维持了300 μ s。但随后研究人员对装置进行了改进,整体性能有了很大的提高。

1968年8月,在新西伯利亚召开的第三届等离子体物理和受控核聚变研究国际会议上,阿齐莫维奇公布了托卡马克T-3上的最新实验结果。该结果表明,等离子体电子温度达到了1keV,等离子体约束时间长达几个毫秒。这在当时是一个令人震惊的结果,因此令不少人怀疑。次年,英国卡拉姆实验室主任皮斯(R. S. Pease)使用当时最先进的红宝石激光散射系统对T-3的数据进行了验证,结果表明,电子温度确实达到了1keV。这一鼓舞人心的结果立刻引起了世界范围内的托卡马克研究热潮。

从20世纪70年代开始,托卡马克进入了快速发展的时期。到70年代中期,第二代托卡马克已经建成,并成功投入运行。理论研究也从纯粹的基础理论转入到理论与实验相结合,一些重要的物理过程和机制先后被发现和了解,杂质控制和辅助加热等技术也得到了很大的发展。TFTR、JT-60、JET和T-15等一些有很大影响力的大型托卡马克也是在这一时期开始建造的。

进入20世纪80年代以来,托卡马克实验研究取得了很大进展。1982年,在德国ASDEX装置上,发现了高约束放电模式,该结果对于建设商用反应堆具有重大的意义;1984年,JET装置公布的实验结果显示,其等离子体电流达到3.7MA,并能够维持数秒。

有了以上这些基础,人们于20世纪90年代进行了受控聚变能获取的真正尝试。1991年,在JET上进行了第一次氘-氘放电试验,成功地输出3.4MJ的聚变能。1998年,在日本原子能研究所JT-60U托卡马克装置上,进行了氘-氘反应的实验,其等效的氘-氘聚变反应的能量增益因子Q(能量增益因子定义为聚变反应产生的能量与输入装置的能量之比)已达到1.25,这些突破性进展宣告了以托卡马克为代表的磁约束核聚变的科学可行性在实验上已经得到了证实。

人们通过近 50 年的研究发现,等离子体的总体能量约束时间随着等离子体电流、加热功率、纵场强度、等离子体密度等因素变化而变化.在大量物理实验的基础上,总结出了能量约束时间与装置参数之间的经验公式即定标律.根据这种定标关系外推,商用反应堆所需的参数均较现有实验装置有极大提高,要建造这种装置显然耗资惊人,超出了单一国家的经济和科技承受能力,因此一个联合世界主要经济与科技力量的国际热核实验反应堆计划应运而生.

3 国际热核实验反应堆(ITER)计划简介与进展

国际热核实验反应堆(international thermonuclear experimental reactor,缩写为 ITER)计划是由前苏联领导人戈尔巴乔夫和美国前总统里根在 1985 年日内瓦峰会上共同倡议并在国际原子能机构的赞同下提出的,主要目的是通过 ITER 计划的开展进一步验证聚变能的科学性和技术可行性,并最终使其成为一种取之不尽、用之不竭的能源,以造福人类.1988 年至 1998 年,欧盟、日本、俄罗斯和美国完成了 ITER 的概念设计和工程设计,但由于预算过高,出于内部原因及主要观念分歧,美国宣布退出 ITER 计划.为了削减工程造价,欧盟、日本、俄罗斯等三方对 ITER 进行了设计改进,在维持主体物理和工程目标前提下,将聚变功率、等离子体运行参数等进行缩减,使造价减少到约为原来的一半^[4].2003 年,中国和韩国加入 ITER 计划,美国也宣布重返 ITER,ITER 成员扩大到六方.2005 年 6 月,在经过一年多的争论后,各方代表在莫斯科达成协议,ITER 落户法国南部马赛附近的卡达拉舍(Cadarache).2006 年 11 月,ITER 六方代表在法国巴黎正式签署了国际热核聚变实验反应堆计划联合实施协定及相关文件,这标志着 ITER 计划进入了实质性的正式执行阶段.2007 年 10 月,ITER 组织宣告正式成立.随后,印度正式加入,ITER 成员扩大到七方.

作为一个国际合作项目,ITER 总费用约 100 亿欧元,其中工程造价约 50 亿欧元,运行费用约 50 亿欧元,由欧盟、日本、美国、中国、俄罗斯、印度、韩国 7 方共同承担.截止到目前,各成员国都已签订了 ITER 材料及设备的采购协议.

ITER 计划的主要目标包括^[5]:

- (1)对于感应驱动的等离子体,要求等离子体能够在 $Q \geq 10$ 条件下持续燃烧,同时不排除控制等离子体点火的可能性;
- (2)实现 $Q \geq 5$ 的情况下的非感应驱动,以演示稳态运行;
- (3)展示重要聚变技术的有效性和集成性;
- (4)开展未来反应堆组成元件,包括高温增殖氘包层模块的实验研究与性能测试.

表 1 列举了 ITER 等离子体的部分相关参数^[5].

表 1 主要等离子体参数和尺寸

总聚变功率/MW	500(700)
$Q = \text{聚变功率/加热功率}$	≥ 10
平均 14MeV 中子壁负荷/ MWm^{-2}	0.57(0.8)
等离子体感应燃烧时间/s	≥ 400
等离子体大半径 R/m	6.2
等离子体小半径 a/m	2.0
等离子体电流 I_p/MA	15(17*)
垂直拉长比@95%磁面/分支点 κ_{95}	1.70/1.85
三角变形@95%磁面/分支点 δ_{95}	0.33/0.49
安全因子@95%磁面 q_{95}	3.0
纵场强度@6.2m 处 B_T/T	5.3
等离子体体积/ m^3	837
等离子体表面积/ m^2	678
辅助加热/驱动功率/MW	73**

* 通过限制其他参数(如脉冲长度),可使等离子体电流达到 17MA;** 运行后期,总的等离子体加热功率也许会增加至 110MW;@表示注释“在某处”

ITER 装置的剖面图如图 1 所示^[6].

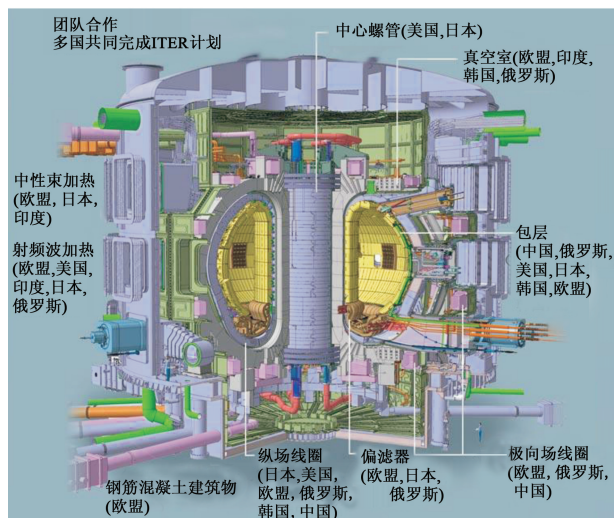


图 1 ITER 装置的剖面图

从图 1 可以看出,ITER 整个装置主要由以下

11 个部分组成^[6]: (1) Nb₃Sn 超导线圈绕制的中心螺管(central solenoid); (2) 用 9 段不锈钢焊成的双层真空室(vacuum vessel); (3) 421 个模块构成的第一壁/包层(first wall/blanket); (4) NbTi 超导线圈绕制的 6 个极向场线圈(poloidal field); (5) 54 个箱体组件组成的偏滤器(divertor); (6) Nb₃Sn 超导线圈绕制的 18 个纵场线圈(toroidal field); (7) 不锈钢构成的冷屏(cryostat); (8) 托卡马克冷却水系统(tokamak cooling water system); (9) 冷冻站(cryoplant), 为磁体和偏滤器线圈的低温泵提供液氦(温度 4.5K), 同时为隔热层提供温度为 80K 的氦气; (10) 加热和电流驱动系统(additional heating and current drive), 由电子回旋加热系统、离子回旋加热系统、低杂波加热系统、中性束注入系统等组成, 初期总功率为 73MW, 最终可达 110MW; (11) 供电系统(electrical power supply), 总的脉冲有功功率/无功功率为 500MW/400Mvar, 总的稳态有功功率/无功功率为 110MW/78Mvar.

目前, ITER 的各系统部件的研究和设计工作都在有条不紊地进行之中, 专家组也就近年发现的一些问题对 ITER 设计做了详细的修改, 包括等离子体边缘局域模控制、垂直稳定性的改善等^[7]. 从 2013 年开始的 4 年时间内, ITER 将完成系统总体安装; 2018 年开始运行, 得到第一次等离子体^[8]; 2026 年, 进行氘氚聚变反应实验.

ITER 是人类和平利用聚变能的进程中最重要里程碑. 它的成功将直接指导聚变示范电站(DEMO)的建造, 最终实现聚变能商用化.

4 ITER 计划在中国

4.1 中国的聚变研究力量和已开展的聚变研究

我国的受控核聚变研究始于 1958 年. 1964 年我国建立了第一个专业聚变能源科研机构: “核工业部 585 所”(后更名为核工业部西南物理研究院), 其后又于 1978 年组建了中国科学院等离子体物理研究所. 在约 50 年的发展中, 我国先后研制了 CT-6B, HL-1(M), HT-6M, HL-2A, HT-7, EAST, J-TEXT 等托卡马克装置, 其中尚在大中型装置有 EAST, HL-2A, HT-7 和 J-TEXT 4 个装置.

HL-1 装置是我国首台大科学工程规模的托卡马克装置, 由核工业部西南 585 所于 1970 年开始研制, 并于上世纪 80 年代初在“三线”建成, 它几乎与国际同步, 参数在当时也较先进.

HT-7 装置是我国第一个纵场超导托卡马克装置, 由中国科学院等离子体物理研究所对前苏联赠送的 T-7 装置进行大幅度改造完成, 其主要工程目标是获得并研究长脉冲及准稳态高温等离子体. HT-7 在 2008 年 3 月 21 日连续重复实现了长达 400s 的高温等离子体放电, 电子温度超过 1000 万度.

HL-2A 是我国第一个具有先进偏滤器位形的非圆截面的托卡马克核聚变实验研究装置, 它的真空室及磁场线圈来自于德国的 ASDEX 装置, 于 2002 年底建成. 2007 年, HL-2A 装置观测到低频带状流的环向对称性, 并观测到与理论预言一致的准模结构, 还观测到自发粒子输运垒的存在. 在 2009 年春季实验中, 在 HL-2A 装置上实现了高约束放电模式, 为国内首次.

EAST 是我国自行设计、研制并成功投入运行的世界第一台大型非圆截面全超导托卡马克装置, 于 2006 年完工, 并在当年 9 月 26 日获得了电流大于 200kA, 时间接近 3s 的高温等离子体放电. 它将成为世界上第一个可实现稳态运行、具有全超导磁体和主动冷却第一壁结构的托卡马克. 该装置的工程建设和物理研究将为 ITER 的建设提供经验.

J-TEXT 装置的前身是美国的 TEXT-U 装置, 属于常规中型托卡马克, 于 2005 年在华中科技大学开始重建, 并于 2007 年获得第一次等离子体, 目前已获得 200kA/300ms 稳定的等离子体放电. J-TEXT 作为教育部的托卡马克装置, 其主要任务是培养聚变专业人才和进行聚变等离子体物理基础研究.

我国聚变研究已经持续了半个世纪, 在部分技术和科技问题的研究上取得了很大的成绩, 但由于科技和工业基础薄弱, 就整体而言, 与国际先进水平相比仍有不小的差距; 就目前的研究水平来看, 要达到“实验堆”的建造, 还需要多年的努力. 如果我国单独建造实验堆, 不但会花费上百亿的资金和数十年时间, 还会进一步拉大与国际先进水平间的差距. 因此, 参加 ITER 的建设和实验, 全面掌握 ITER 的知识和技术, 培养一批聚变工程和科研人才来配合国内聚变堆科学与工程技术研究, 有可能用较短时间和较小投入实现跨越式发展, 为我国自主地开展核聚变示范电站的研发及聚变能的商业化应用奠定基础.

4.2 中国参与 ITER 计划相关研究及目前已取得的成果

依照 ITER 材料及设备的采购协议, 在 ITER 装置的建设期间, 我国负担约 10% 的费用和设备制造任务. 根据系统和部件的集成性, ITER 分解形成

22 个采购包,97 个具体包.中国承担其中的 6 个采购包,12 个具体包,主要包括:磁体超导体与校正场线圈、超导接头、电源系统、第一壁和屏蔽包层、重力支撑构件、气体加料系统、辉光放电清洗系统,以及 X 射线相机、中子注量监测器和偏滤器朗缪尔探针为代表的先进诊断系统等项目.这些项目涵盖了 ITER 制造中核心的超导磁体技术、中子屏蔽技术、交直流变流器和高压设备技术等.在 ITER 工程量的任务分配中,中国承担了包括铌钛超导体 69% 的项目、全部大型超导校正场磁体、全部超导馈线系统、40% 的屏蔽块以及 10% 的第一壁材料、62% 的变流器和全部高压设备等等.这是我国首次在大型的国际合作项目中承担如此多的核心技术研发.

与西方发达国家相比,我国参加 ITER 计划较晚且没有开展过相关方面的预研工作,国内工业技术储备不足,设备的制造任务相对较困难,需要在“十一五”期间完成欧、美、日等国十几年完成的研发工作,以达到需要的技术水平和设计深度,任务既艰巨又紧迫.虽然面临诸多困难,但截至目前为止,我国已在部分预研方向取得了令人满意的成果,如:2008 年 10 月,中国科学院等离子体物理研究所顺利制作完成我国第一根长 18m 的 ITER 纵场超导 CICC 导体.导体成型后截面尺寸精度控制在 $\pm 0.08\text{mm}$ 以内,完全满足 ITER 提出的 $\pm 0.2\text{mm}$ 的精度要求.同年 12 月,中国科学院等离子体物理研究所进行的高温超导大电流引线低温通电实验的电流峰值达到 90kA,并持续 4min 时间,创下了高温超导电流引线实验的世界最高记录.由中核集团西南物理研究院牵头的 ITER 屏蔽包层及磁体支撑系统研发工作取得重大进展,其研制的屏蔽包层模块样品已送到国际专业机构检验,而研制出的高纯铍等材料也填补了国内技术空白.

4.3 中国围绕 ITER 的聚变能发展计划

我国参与 ITER 计划的战略规划大致为:以全面参加 ITER 计划,消化吸收 ITER 技术,搞好国内磁约束核聚变研究,积累聚变堆科学和工程技术知识,加强人才培养等为近期目标;以进行聚变堆单项技术攻关,开展示范堆设计研究,建造聚变堆部件验证工程试验平台,积累并最终具备设计和建造聚变示范堆能力为中期目标;以设计建造中国第一个聚变示范堆,实现核聚变能源商用为远期目标.为了实现这些目标,我国的聚变能研发工作分为以下 4 个阶段:

(1) 在 ITER 的建设阶段:国内应利用 HL-2A 装置和 EAST 装置开展前沿物理实验研究,利用 J-

TEXT 装置开展等离子体物理基础研究.同时,通过参加 ITER 的工程建设,消化、吸收和掌握聚变堆关键技术,尤其是反应堆级的超导磁体、包层技术,大功率加热和驱动、控制及安全运行技术、先进诊断和聚变材料技术等,开展聚变堆设计研究和聚变、裂变混合能源堆的预研,并锻炼队伍,培养聚变人才.

(2) 在 ITER 装置处于有感电流驱动物理实验阶段:除派人参与 ITER 的运行和物理实验研究外,国内的研究应着重于长脉冲燃烧过程、先进偏滤器技术和先进托卡马克运行模式;开展聚变堆关键技术、关键材料和关键工艺或关键部件预研或攻关;筹建工程试验平台,用以验证聚变堆和混合能源堆单项技术和关键零部件.

(3) 在 ITER 装置进入稳态燃烧物理实验阶段:国内应对“持续燃烧”先进运行模式、氦自持及壁循环、粒子及功率排出、低活化材料和关键技术进行研究,并对聚变堆零部件进行全尺寸组合验证.在纯聚变能源商用化之前,作为中间步骤,探讨聚变、裂变混合能源堆的可行性.

(4) 在 ITER 装置进入高参数运行和退役期:根据核聚变研究的发展情况和当时的国际环境,我国核聚变能源开发将有两种发展途径:一种是继续走国际合作之路,联合建造 DEMO(示范堆),另一种是完全靠自力更生独立建造 DEMO,最终实现核聚变能源的商用化.

5 对我国的核能发展战略的思考

核能的和平利用已经超过半个世纪,我国也在 1991 年建成了第一座裂变电站——秦山核电站.截止到 2007 年,我国核电装机容量已达 9.1GW,占全国总装机容量的 1.2%,但这与世界平均水平仍有很大差距(注:目前核电比重在发达国家为 25%,世界平均为 16%).为改善我国能源结构,国家将核能定为我国能源发展战略的重点,预计 2020 年核电装机容量发展到 70GW,占总装机容量的 5%;2030 年超过 200GW,占 10%.

我国的铀资源还是比较丰富的,储量超过 200 万吨.但目前核电站大量使用以 U-235(或 Pu-239)为燃料的热中子堆,由于天然铀中 U-235 仅占 0.72%,热中子堆只能使铀的燃耗(U-235 + U-238)在 1%左右,因而我国的铀资源难以支持热中子堆的大规模发展,需要发展其他形式的反应堆.快中子堆可以把铀资源的利用率提高到 60%以上,

但快中子堆的初始装料量较大(3吨左右),倍增时间较长(一般大于10年),且须很强的后处理能力(必须进行U-Pu分离),故快中子规模不易很快扩大,成为能源生产的主力堆型还需要相当一段时间。

随着ITER计划的开展,数百兆瓦功率的等离子体燃烧问题会逐步得到解决,基于聚变、裂变混合能源堆概念的堆型设计也成为可能。它可以采用ITER技术建造的兆瓦量级的聚变堆,利用堆芯产生高能中子,并通过倍增来维持氙的自持燃烧与生产燃料钷-239,钷-239将在包层中进行裂变反应,并释放能量。混合堆型作为纯聚变堆大规模应用之前的过渡是值得考虑的。它与目前我国核能发展战略并不矛盾,对于我国核能战略的总体发展可能是有益的。

从长远来看,我国核能发展基本上是按热堆、快堆、聚变堆三步走的战略部署实施的,这一发展规划无疑是正确的。当前,我国既要加强国际科技合作,学习和掌握世界先进聚变技术,同时也应独立自主地研发聚变堆技术。ITER是中国第一次以平等的身份参加的国际大科学研究项目,我们要利用ITER计划的契机,带动国内核能技术的发展,为实

施我国核能战略,解决我国未来的能源问题奠定基础。

参考文献

- [1] 宫本健郎著,金尚宪译. 热核聚变等离子体物理学. 北京:科学出版社,1981 [Kenro Miyamoto (Jin S X trans.). Plasma Physics for Nuclear Fusion. Beijing: Science Press, 1981 (in Chinese)]
- [2] 朱士尧. 核聚变原理. 合肥:中国科学技术大学出版社,1992 [Zhu S Y. Principles of Nuclear Fusion. Hefei: University of Science and Technology of China Press, 1992 (in Chinese)]
- [3] 丁厚昌,黄锦华. 自然杂志,2006,28(3):143 [Ding H C, Huang J H. Chinese Journal of Nature, 2006, 28(3): 143 (in Chinese)]
- [4] Aymar R *et al.* Nuclear Fusion, 2001, 41(10):1301
- [5] Shimomura Y, Spears W. Appl. Supercond., 2004, 14(2): 1369
- [6] Fusion dreams delayed. <http://www.nature.com/news/2009/090527/full/459488a.html>
- [7] Ned Sauthoff. ITER Project Status. FESAC February 19, 2008, Gaithersburg, MD
- [8] Kaname Iketa. Missions of ITER and Challenges for the young. 2nd ITER International Summer School: Confinement