

韩国的核聚变研究现状及发展战略*

康卫红**

(核工业西南物理研究院,成都 610041)

摘要:韩国是世界上开展热核聚变研究较晚的国家,从上世纪60年代小规模实验室等离子体研究,到70年代晚期大学开展聚变研究,先后研制并创建了若干托卡马克装置。上世纪90年代,韩国政府提出让韩国的聚变研究腾飞,走在聚变科学和技术的最前沿。为此,韩国超导托卡马克先进反应堆(KSTAR)项目应运而生。本文介绍了韩国政府为支持本国的核聚变能源发展制定的能源政策与方向、KSTAR项目建设及主要成果、韩国ITER国内机构及其承担的ITER项目,以及韩国未来的核聚变战略规划。

关键词:韩国;热核聚变;KSTAR;K-DEMO

中图分类号:G353.1 文献标识码:A doi:10.3969/j.issn.1006-6055.2014.02.024

Nuclear Fusion Research and Development Strategy of Korea*

KANG Weihong**

(Southwest Institute of Physics, Chengdu 610041)

Abstract: The history of thermonuclear fusion research in Korea is rather short compared to that of advanced countries. Korea has been involved in small scaled laboratory plasma experiments since 1960s, fusion research in Korea began at universities during the late 1970s, with several Tokamak devices developed and built successively. In 1990s, Korea government embarked on an ambitious strategy that would vault the research effort to the forefront in fusion science and technology. Therefore, the Korean Superconducting Tokamak Advanced Research (KSTAR) emerged at its proper moment. In this paper, fusion energy strategy and direction for the development of the nuclear fusion energy developed by Korean government are introduced, describing KSTAR construction and its main achievements, presenting ITER Korea Domestic Agency, its ITER project undertaken, and the strategic plan of Korea for developing fusion energy.

Key words: Korea; thermonuclear fusion research; KSTAR; K-DEMO

1 引言

韩国是一个自然资源贫乏的国家,97%的能源依靠进口。预计到2035年,能源需求的年平均增产率为2.3%。韩国的电力需求增长迅速。从1980到1999年的20年间,电力需求增长大约为7倍,年平均增长率为10.3%。预计到2015年,电力需求的年平均增长率为4.9%^[1]。为了保证能源供应,韩国政府在70年代末开始寻找可替代能源^[2]。在诸多新能源中,核聚变能源因具有清洁、资源丰富的特点,被公认为是可替代化石能源最有前景的新能源。核聚变发电成为21世纪初世界各国合作开发的一项重要技术。为此韩国迫切需要寻求诸如商业聚变反应堆这样可选择的能源供应方式。核聚变能源技术已被时任韩国总统的李明博政府列入确保国

家主导技术的核心竞争力之一的重点培育技术^[3]。

韩国是世界上开展热核聚变研究起步较晚的国家,但是到21世纪初已具有一定的技术实力。在韩国面向21世纪科技发展战略与重点中,韩国超导托卡马克研究计划被列入其中,韩国希望通过这一计划使自己的核聚变研究迅速崛起,取得参加国际热核聚变实验反应堆(ITER)计划所需的科学知识和制造技能。2003年韩国加入ITER计划,促使韩国将发展自身所需的聚变技术,保障未来的能源生产能力作为本国的能源政策的一部分。目前韩国的目标是,21世纪40年代建成本国的核聚变发电站。

2 韩国的聚变能源政策与预算投入

韩国的核聚变研究始于上世纪60年代小规模的实验室等离子体实验,70年代晚期已经在大学开展核聚变研究^[4]。先后建造了SNUT-79, KAIST, KT-1, HANBIT等托卡马克装置,这些小规模的对启动韩国真正的托卡马克项目具有重要意义,并开发了韩国聚变计划所需的人力资源。参与韩国核

2013-10-24 收稿,2013-12-4 接受

* 科技部国家软科学(2009 GXS1B138)资助

** 通讯作者,E-mail:kangwh@swip.ac.cn

聚变研究的主要单位首尔大学和韩国高等能源研究院均拥有规模不同的中小型托卡马克装置。研究重点是高真空技术、电源、放电清洗以及基本等离子体诊断系统。1995年,韩国基础科学研究院根据美国MIT的TARA串级磁镜建造并安装了中型装置HANBIT,目前还在全面运行。HANBIT主要用于开展基础等离子体研究,如基础等离子体诊断、射频/微波加热法的开发。因为该装置属于国家装置,所以它的运行吸引了韩国大学和研究院所的20多个研究工作组^[1,5]。

KSTAR是韩国聚变研究进程的重要步骤。90年代中期,韩国政府开始制定一项雄心勃勃的政策,要让韩国的聚变研究腾飞,走在聚变科学和技术的最前沿。韩国超导托卡马克先进反应堆(KSTAR)项目就是这项新计划的核心,该计划被列入“高科技发展中间进入战略”框架。在KSTAR建造期间,韩国聚变界开始集中国内的聚变资源和人力,为建造下一代超导托卡马克开发聚变能源做准备^[4]。

2005年韩国制定国家核聚变能源发展路线图(图1),目的是建造一个合理实用、具有挑战性的拥有自主技术的韩国聚变电站(KFPP)。韩国KSTAR计划取得的良好进展和加入ITER计划成为制定该发展路线图的强大推动力^[4]。

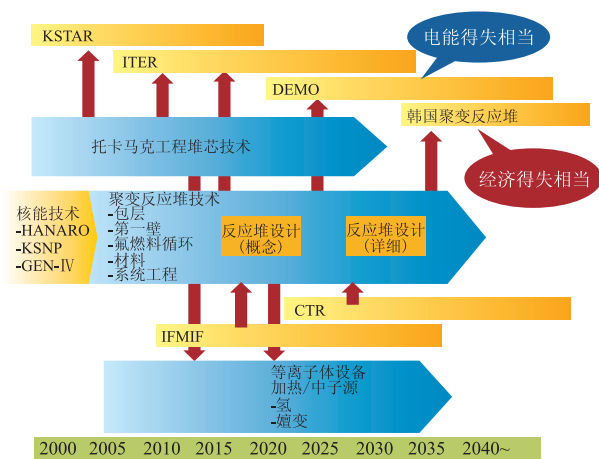


图1 韩国发展聚变电站的国家路线图

Figure 1 Korean roadmap to develop a fusion power plant

2005年12月,韩国政府制定了《国家核聚变能源开发计划》^[6]。2006年韩国政府制定《核聚变能源开发促进法案》支持聚变界。当时的韩国政府副总理担任新成立的管理委员会的负责人,负责决定和批准国家聚变能源发展政策的重大事项。韩国科技部也成立了一个新的部门,支持和促进聚变能源的各项研发活动。为了及时有效地为聚变能源的发

展铺设平道路,该部门开始在协调国内与国际聚变研发活动方面发挥作用。那时韩国还没有把核聚变作为候选能源列入长期能源政策,但是政府决定要定期观察其发展状况,评价其技术的成熟性和面向市场的准备。政府指定韩国国家聚变研究所(NFRI)为国内主要从事聚变电站自主技术基础研发的研究单位,建立承担KSTAR和ITER项目的相关数据库,协调国内和国际聚变能源发展计划。

2006年韩国科技部出台的“聚变能源开发振兴法”,是本年度韩国出台的3部科技法规之一,2008年韩国再次修订该法律,进一步完善国内聚变研究相关法律内容。修订后的聚变相关法增加了“为审议聚变研究开发的重要事项,在教育科学技术部部长之下,设立国家聚变委员会”的内容。韩国本身已经有原子能法律,为推进核聚变研究开发,又专门制定了聚变相关法规。2009年聚变相关法规的具体内容逐渐明朗化。根据韩国制定的聚变相关法律,为促进聚变能源的研究开发工作,政府必须编制《国家核聚变能源开发计划》,在该计划中明确规定政策目标和基本方向、推进体系和战略、基础扩充、投资计划和所需经费的筹集、专家的培养和有效使用以及国际合作等内容。

2006年12月韩国科技部公布了对“未来国家有希望的21项技术”的调查评价结果,在21项被调查的技术中,韩国核聚变技术研究水平被评价为接近世界最高水平的73.7%,处于21项被调查技术的第2项。调查报告认为包括核聚变技术的其他各项技术只落后于世界最高技术3~5年,将有可能在近期达到世界最高水平。

2007年韩国科技部公布的重点工作计划中,能源事业方面列出了4项计划,其中3项与核聚变相关,它们是:切实地投身于“国际热核聚变实验堆计划(ITER)”共同开发事业(2007~2015年预计投资8615亿韩元);2007年8月竣工的下一代超导核聚变研究装置(KSTAR)将被灵活运用为国际性的核聚变共同研究设施;在政府的各个层面上推进与核聚变能源开发有关的支持措施^[7]。

2008年2月,李明博就任韩国总统后推出了一系列科技新政。核聚变能源技术作为确保国家主导技术的核心竞争力被列入七大技术研发领域的50项具体技术之中。

进入21世纪,韩国核聚变研究预算一直稳步增长,主要原因是政府对ITER项目的极大兴趣和对

能源需求不断增长的认可。总的来说,每年划拨用于研发的预算最高增长幅度为10%,2005年年初韩国为国内最新的核聚变研究装置KSTAR划拨的经费预算为286亿韩元(2780万美元),韩国计划从2007年开始的10年时间内投入8380亿韩元(相当于ITER总建设费用50多亿欧元的9.09%)参与ITER的建造。8380亿韩元中16%为现金出资,剩余部分则为国内生产部件的实物出资。2007年韩国政府表示,在未来18年中,每年将追加350亿韩元用于KSTAR试验。

2012年1月3日,韩国教育科学技术部确定了第二次核聚变能源开发振兴基本计划(2012~2016年),该计划更加趋于成熟和理性。根据该计划,韩国国家核聚变能源开发路线图第2阶段(2012年~2021年)的目标由原来的“成为核聚变能源技术5大强国”修改为“开发成熟DEMO反应堆技术”。按照韩国政府确定的方针,其目标首先是实现KSTAR的高性能等离子体和确保掌握ITER的核心技术。同时,KSTAR等离子体维持时间目标是增加到1MA,50秒以上,争取接近示范堆(DEMO)和商用聚变堆开发所必须的300秒以上的目标。计划还明确了韩国政府将利用韩国下一代超导核聚变研究装置KSTAR和国际热核聚变实验堆(ITER)的相关成果,正式启动核聚变领域的技术研发。

韩国第二个(2012~2016年)核聚变能源开发振兴基本计划计划投入一万亿韩元(约合45亿人民币),研究人员2369人,并强化等离子体理论和模拟的相关研究,进一步扩大国际合作,争取ITER国际组织的更多技术服务和订货。同时计划将向ITER国际组织派遣的人员由21人增加到28人。

3 韩国 KSTAR 项目

3.1 项目建设与目的

20世纪90年代中期,韩国政府制定了以KSTAR项目为聚变计划核心的政策。随后,韩国的部分高校、企业和科研院所积极地投入到该项目的建设。KSTAR项目是韩国政府在大田研究基地国家聚变研究所(NFRI)投资3090亿韩元(人民币25亿元)建造的核聚变研究装置,1995年投入建造,2007年9月14日竣工,耗时12年。KSTAR是世界上第一个采用新型超导磁体(Nb3Sn)材料产生磁场的全超导聚变装置,其产生的磁场是采用铌钛系统产生磁场强度的3倍多,稳定性很好。2008

年,KSTAR投入运行并成功产生初始等离子体。

KSTAR的建成是韩国迈向“能源独立”的第一步,并将为2040年建设韩国核聚变发电站奠定基础。KSTAR被看作是ITER研究工作的一部分,其任务是研制一个在尺寸上类似于德国ASDEX-U和美国DIII-D的全超导中型托卡马克。

KSTAR的主要研究目标是验证具有高性能先进托卡马克(AT)模式的稳态运行性能。为了实现这个目标,韩国制定了KSTAR运行到2025年分4个阶段的实施计划:1)初始运行阶段(2008~2012年),包括基本的性能实验。2)长脉冲运行阶段(2013~2017年),韩国计划2017年将控制时间延长到300秒,为国际热核实验堆的计划进行初步研究。到那个时候,其他研究人员和科学家也会使用KSTAR进行实验。3)高 β AT运行阶段(2018~2022年),将持续到2022年,计划完成高性能电离子的研究。4)高 β 稳态运行阶段(2023~2025年),进行核聚变工程实验^[8-10]。

为了满足KSTAR的任务和研究目标,设计的主要特点确定为:全超导磁体;被动致稳器;真空容器内控制线圈作为高功率等离子体致稳;长脉冲运行能力;灵活的压强和剖面控制;灵活的等离子体形状和位置控制;先进的剖面控制和诊断。其性能和特点的完美结合将使KSTAR装置成为下一个10年托卡马克研究的正确选择^[9]。KSTAR装置全貌及辅助系统如图2所示。

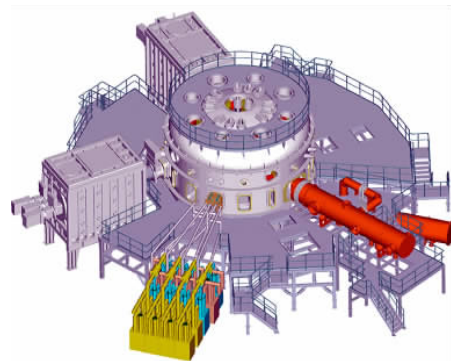


图2 KSTAR装置及辅助系统

Figure 2 Schematic layout of the KSTAR tokamak and ancillary system

KSTAR装置由内室部件、真空室、热屏蔽、超导磁体系统、低温恒温器和辅助系统构成。真空室为D形双层壁结构。超导磁体系统由16个环向场(TF)线圈和6对极向场(PF)线圈组成。该装置具有强变形的等离子体横截面和双零偏滤器。最初由极向磁体系统提供的脉冲长度为20s,但通过非感

应电流驱动脉冲长度可以增大到 300 s。等离子体加热和电流驱动系统包括中性束、离子回旋波、低杂波和电子回旋波,它们都可以用于灵活的剖面控制。全套诊断设备计划已用于等离子体控制和特性计算,以增加科研人员对物理学的了解。KSTAR 装置是一台具有极好配套能力的核聚变研究试验装置。

KSTAR 初始运行阶段的主要研究计划是,通过欧姆、L 模和 H 模等离子体实验,建立从相对短的脉冲长度提升到 20 s 的超导托卡马克的基础运行技能。KSTAR 具有进行 ITER 相关物理学和工程研究的重要性能。首先,从物理学的观点看,KSTAR 可用来测试和优化 ITER 运行方案,MHD 控制系统,等离子体-壁相互作用系统等。特别是,KSTAR 具有与 ITER 类似的等离子体位形,内室控制线圈系统和长脉冲运行条件,可以解决不同于现有托卡马克装置的若干有趣的 ITER 相关的物理学问题。从工程学的观点看,KSTAR 是唯一采用与 ITER 类似的超导磁体线圈 Nb₃Sn 的装置。因此,KSTAR 可用作 ITER 的试验床,获取研制和维护类似 ITER 超导磁体线圈的经验。比如,对 KSTAR 磁体系统 Nb₃Sn 的性能与限制分析,可用于今后几年内 ITER 磁体接口的生产制作。类似 ITER 的加热系统和电流驱动系统,如 170 GHz ECH、5 GHz LHCD 系统和其他系统的技术都可以在 ITER 之前在 KSTAR 上进行

试验。KSTAR 作为国际合作装置,利用该装置获得的技能和经验也将有益于 ITER,因为 ITER 也将以类似的方式运行^[10]。

3.2 KSTAR 主要成果

2009 年 12 月,KSTAR 在 1 000 万摄氏度的温度下成功获得了电流为 320 kA 的等离子体放电,持续时间约 3.6 s,达到 KSTAR 设计性能的 30%。此后,KSTAR 成功实现了摄氏 2 000 万度的等离子体和核聚变,并将其稳定维持了 6 s,并且成功探测到氘氦聚变反应生成的带有 2.45 MeV 级能量的中子。2010 年 11 月,KSTAR 比预计时间提前一年首次实现 H 模。2012 年 11 月,在 KSTAR 上成功验证了 ITER CODAC(控制、数据存储与通讯)技术对托卡马克实施控制的能力,所测试的系统性能良好,与 KSTAR 本身的控制系统非常吻合,证明了 ITER CODAC 采用或将要考虑的技术对托卡马克设备控制是适用的,即 CODAC 正朝着正确的方向前进。

3.3 KSTAR 研制过程中开发的 10 大科学技术

KSTAR 装置经过多年的研制,开发了以下 10 大科学技术成果,可划分为 3 类:最先开发的处于世界领先地位的技术(4 项);核心技术开发及国产化成功的技术(3 项);市场先行获得应用的技术(3 项),如表 1 所示。

表 1 KSTAR 研制过程中开发的 10 大科学技术

Table 1 Ten Major Achievements in KSTAR Technologies

	技术开发	产生的效果
最先开发的处于世界领先地位的技术	1) 开发了世界最佳性能超导线材制作技术;线材表面采用了 10 铬薄膜均匀涂层技术;与 ITER 同级配置,达到电流密度性能。	提供国内生产的 ITER 超导线材,占总量 20%;预计可达到 710 亿韩元国内生产规模。
	2) 开发了 34 kA 低损耗型“铅黄铜电流引入装置”制作技术,开发了 40 kA 大电流馈电用超导铅黄铜装置及安装技术。	利用国产化制作技术,实现 100 亿韩元的收益。
	3) 开发了 3 维曲面真空室制作技术;适于大型镀膜技术;开发了热屏蔽技术。	计划为 ITER 提供国内生产的 ITER 真空室、所有端口及热屏蔽。
	4) 利用旋转工法,最先开发了 TF 超导磁体精密组装技术;最先开发了分割型、螺线管线圈保护式前置载荷转嫁技术。	总体负责 ITER 组装技术;所有 ITER 组装设备由国内生产。
核心技术开发及国产化成功的技术	5) 开发了“大型超导磁体”制作相关的所有工程技术;确保出色的运行安全性;“前置载荷转嫁组装技术”取得成功。	利用开发的技术,可确保 ITER TF 磁体及部件的市场竞争力(5 000 亿韩元的规模)。
	6) 开发了超导磁体相关的超低温冷却试验技术;大型超导磁体的超低温冷却实验与强场实验取得成功	确保超低温冷却性能试验技术的先导地位。
	7) 开发了测量等离子体轨迹的自行诊断传感器等,开发了超导核聚变装置运行控制系统的集成技术。	引导等离子体诊断及装置相关精密控制技术;通过共同研究与远程运行,有望提高装置效率。
市场先行获得应用的技术	8) 利用 IGBT 半导体元件,开发了高效率供电装置制造技术;“2007 年获得工业技术振兴协会蒋英实”奖。	用于废物处理及放射工业领域;为 ITER 提供 38% 的国产电源设备。
	9) 开发了大容量离子源及高频率传输天线制作技术;“中性束注入系统”国产化取得成功。	确保 100 keV,55 A 大容量离子源制作技术;确保加热装置运营技术,可先行获得 ITER 运行的实验技术。
	10) 超低温(4.5 K)9 kW 国内最大规模氨冷冻机设计与安装;采用热缓冲系统,稳定热负荷。	该项技术在 ITER 等核聚变装置与加速器尖端领域上方应用

4 韩国参与的 ITER 项目

2002年,尽管韩国还没有像 KSTAR 那样大型的核聚变研究设施,但是世界上已有多个国家参与到了国际热核聚变实验堆 ITER 计划的谈判中来,这让韩国政府意识到核聚变能源开发与利用的无限前景,因此,在2002年12月,韩国政府向国际聚变界表示了愿意参与国际合作的热核聚变实验堆 ITER 计划的兴趣。

2003年5月30日,韩国科技部部长致信美国能源部秘书长,提出韩国政府希望正式加入 ITER 计划联合实施协议谈判的要求。为确保谈判进程的顺利和及时完成,韩国愿意完全接受当时参与谈判的各个伙伴国已经达成的知识产权的结论与结果,包括 ITER 工程设计活动的参照设计和成本评估。此外,韩国表示愿意为 ITER 联合实施协议做出重大贡献,也愿意加入 ITER 过渡性安排协议。2003年6月韩国加入 ITER 计划^[11]。

2005年6月28日,韩国及中国、欧盟、日本、俄罗斯、美国等6国在经过谈判最终达成一致意见,确定法国卡达拉奇为 ITER 计划场址。2005年10月韩国成立“国家核聚变研究中心(NFRC)”。2006年11月21日,韩国与中国、欧盟、印度、日本、俄罗斯和美国等7方的政府代表,在法国巴黎正式签署了 ITER 计划联合实验协定及相关文件,ITER 计划全面启动。2007年3月27日,韩国实施“核聚变能源开发促进法案”。2007年4月2日,韩国国民大会批准通过“ITER 联合实施协议”。

在 ITER 项目的总采购包中,韩国承担了以下采购包任务:环向场磁体导体(20%),含包层和水连接的真空室主体(20%),真空室赤道窗口(100%),真空室上部窗口(76%),包层第一壁(10%),主机的安装工具3~11(100%),热屏蔽(100%),氦的存储与排放系统(SDS)(88%),AC/DC 变流器(38%),诊断系统(3.3%)^[12,13]。

5 核聚变研究给韩国企业带来的机遇

加入 ITER 计划对韩国意义重大。韩国 ITER 国内机构负责人郑基正说,以他个人的观点来看,这是聚变能的第二个时代,是今后实现聚变商业化的开端。韩国在 ITER 计划的发展中同样发挥了非常重要的作用。韩国政府提出将聚变研究作为国家的一项长期战略计划。2006年韩国副总理兼科学技

术部部长金雨植强调:通过加入 ITER 计划,将可以使韩国无偿享受具有与先进国家同等权力的核聚变资源,从而奠定使韩国发展为能源大国的坚实基础。

韩国聚变计划的目标是通过 KSTAR 托卡马克向 ITER 计划提供有用的技术信息,从而促进聚变能源的开发,加入可预见的未来聚变电站的发展道路。作为 ITER 的试运行装置,KSTAR 装置所获得的经验将成为 ITER 装置设计、采购和初始运行的重要技术基础。韩国国家聚变研究中心期望,由于 KSTAR 长脉冲 D 形等离子体特征及其适中的运行成本,KSTAR 可作为 ITER 运行前的一个可利用的试验性实验装置。预计,ITER 联机运行前 KSTAR 可望高功率长脉冲运行4~5年,这可为 ITER 运行提供有用的技术知识和数据。

韩国超导托卡马克装置 KSTAR 的建造以及参与 ITER 项目为国内工业企业的发展带来了不少机遇。KSTAR 实际上是由韩国国内企业和高校以及海外研究机构共同开发,其中包括三星 SDS(主控制系统开发)、斗山重工业(超导磁体结构物制作)、高丽制钢(超导线材铬镀)等30多家韩国企业。KSTAR 装置有望为韩国企业开辟新的市场。韩国企业通过 KSTAR 装置获得的技术,预计可确保在商用聚变电站市场占有率有100亿美元以上的份额。核聚变作为大型科学项目,还会对其他各种工业领域产生影响。

韩国对国内聚变能源发展和所参与的国际合作项目 ITER 给予的大力支持,促进了韩国聚变研究发展的惊人速度。专家认为,韩国和日本在核聚变领域的投入水准基本相当。韩国 KSTAR 装置的建成和实验取得的成果,以及作为 ITER 的试运行装置将要开展的一系列实验,可以确保韩国在聚变领域独自技术的地位。

6 韩国未来核聚变发展战略

为确定聚变电站的技术细节,探索和协调韩国聚变能的研发活动,2006年,韩国启动 K-DEMO(韩国聚变堆示范装置)聚变电站的前概念研究。计划2011年前制定发展 K-DEMO 探索性里程碑的概念定义,2021年前完成概念和工程设计,2022年以后最终完成建造设计。K-DEMO 的设计要求类似于美国、欧盟和日本早期研制的聚变电站模型。K-DEMO 应当可提供巨大规模的发电,表明其经济可行性,证明燃料自身的可持续性和运行的可靠性,并保证

即使发生最严重事故也无需撤离。

韩国聚变堆示范装置 K-DEMO 是韩国实现商用聚变电站前的最后一步。韩国是世界上第一个为聚变能源发展制定法律基础的国家。2008 年韩国政府颁布聚变能源开发促进法 (FEDPL), 表明韩国 DEMO 发展迈出了决定性的一步。在此框架内, 韩国政府于 2012 年底启动了本国聚变堆示范装置的研发计划项目, 已与美国普林斯顿等离子体物理实验室 (PPPL) 达成协议, 由韩国大田国家核聚变研究所与 PPPL 合作开发韩国聚变堆示范装置 K-DEMO 的概念设计。K-DEMO 设定的最终建成时间在 2037 年底之前, 预计投资 9.41 亿美元。K-DEMO 第一运行阶段将作为部件测试设施, 从 2037 年运行到 2050 年左右。第二运行阶段, 计划始于 2050 年, 为了全稳态运行和发电, 将更换大部分内室部件。K-DEMO 应当是在技术与性能上距离商业聚变电站仅一步之遥^[14,15]。

韩国 K-DEMO 阶段性实施发展计划包含以下 4 个阶段的子计划: 2007 ~ 2011 年, 筹备阶段子计划; 2012 ~ 2021 年, DEMO 研发子计划; 2022 ~ 2036 年, DEMO 建造子计划; 2037 ~ 2050 年, 聚变动力电站子计划。其中, K-DEMO 阶段性实施发展计划第二阶段研发计划的范畴包括以下 3 个方面: 1) 开发 DEMO 系统和部件设计、生产和建造的各项技术; 2) 完成 DEMO FEED, 证明其在经济和技术上的可行性; 3) 建造验证测试设施, 验证设计方法。该阶段里程碑预测如图 3 所示。

K-DEMO 阶段性实施发展计划第三阶段建造计划的范畴: 1) 设计和建造聚变 DEMO 电站; 2) 测试材料、部件和系统; 3) 验证发电。该阶段里程碑预测如表 2 所示^[16]。K-DEMO 将采纳大多数 ITER 工程的结果, 作为 DEMO 增殖包层研发的组成部分,

以便加速实验包层模块的研发活动。K-DEMO 研发必需解决的主要问题是偏滤器和包层。韩国将尝试在可能的范围内与 ITER 参与国合作解决。不过, 这些问题最终将在 K-DEMO 第二运行阶段得以解决。

表 2 K-DEMO 第三阶段建造计划里程碑预测

Table 2 The 3rd phase-DEMO Construction Program, Milestones Forecast

2022 年	2024 年	2025 年	2029 年	2033 年	2035 年	2036 年
建造许可证	挖掘动工	材料选择	主要部件安装	调试	运行	首次发电

韩国现阶段 K-DEMO 的三个设想方案: 大半径分别为 6.0 m, 6.65 m 和 7.15 m。大半径 6.65 m 的托卡马克是今后详细研究的主要目标。环向场峰值约 16 T, 等离子体芯部的环向场约 7.6 T。

7 结束语

开发核聚变能源解决能源紧缺问题是既充满希望又富有挑战性的前沿科学研究课题。韩国的早期核聚变研究尽管局限在小规模实验室及小规模装置的实验上, 但近年来, 韩国瞄准世界核聚变研究的前沿, 迅速突起。随着韩国大型超导托卡马克装置 KSTAR 的建造和投入运行, 韩国的核聚变技术研发在短短的时间内取得了惊人的飞跃性进步。这一切无疑与韩国政府高度重视和支持核聚变研究项目密切相关。由韩国政府制定的《国家核聚变能源开发计划》、《核聚变能源开发促进法案》为韩国的核聚变研究提供了强有力的政策支持、科学的规划和可靠的法律保障。2007 年韩国科技部公布的重点工作计划中, 能源事业方面列出 4 项计划, 其中 3 项与核聚变相关。同时, 韩国积极参与核聚变国际合作, 重视核聚变高端人才的培养, 大量选拔人才派遣到 ITER 国际组织和 ITER 建造现场工作, 为韩国真正



图 3 K-DEMO 第二阶段研发计划里程碑预测

Figure 3 The 2nd phase-DEMO R&D Program, Milestones Forecast

消化和吸收 ITER 建造及管理技术,提供了长期的人才保障。

韩国利用其独自的技术,建造了全超导托卡马卡聚变装置 KSTAR 并成功实现了等离子体放电,这将使韩国踏上开发清洁无限能源的旅途,并让世人刮目相看。ITER 国际组织前任总干事池田要曾高度评价 KSTAR 相关研究单位的开发能力,认为 KSTAR 虽然规模不大,但却派生出大量的共通技术,这对于韩国积累经验和储备技术以及推进 ITER 计划的开展将发挥重要的作用。韩国将通过自主开发研究和参与国际热核聚变实验堆合作计划,与其他 ITER 参与国携手,在核聚变科学研究及探索世界能源问题的解决上发挥越来越重要的作用。

致谢:感谢核工业西南物理研究院科技信息研究室主任张一鸣研究馆员在本文撰写过程中给予的指导和帮助。

参考文献

- [1] KIN C S, CHO S, CHOI D I. ITER Participation and Possible Fusion Energy Development Path of Korea [C]. 1st IAEA TM First Generation of Fusion Power Plants: Design and Technology, Vienna, Austria, 2005.
- [2] 谢晶仁. 韩国开发利用新能源的现状及对我国的启示 [J]. 新能源产业, 2010, 432(12): 6-9.
- [3] 王玲. 韩国李明博政府的科技政策之探究 [J]. 全球科技经济瞭望, 2009, 24(6): 52-56.
- [4] KWON M, NA Y S, HAN J H, et al. A strategic plan of Korea for developing fusion energy beyond ITER [J]. Fusion Engineering and Design, 2008, 83(7-9): 883-888.
- [5] CHOI D I, CHO S, LEE H G, et al. Korean ITER Participation and Activities in ITER Transitional Arrangement [C]. Fusion Engineering 2005, Twenty-First IEEE/NPS Symposium on, Knoxville, TN, 2005.
- [6] 富贵. 2006 年韩国科技发展综述 [J]. 全球科技经济瞭望, 2007, 22(6): 29-32.
- [7] 韩国科技部公布 2007 年重点工作计划 [DB/OL]. 2007, <http://www.5doc.com/doc/575494>.
- [8] Y-K OH, PARK K R, LIM B S, et al. Status of the KSTAR Tokamak Construction and Assembly [J]. Journal of the Korean Physical Society, 2006, (49): S1-S6.
- [9] KIM K, PARK H K, PARK K R, et al. Status of the KSTAR superconducting magnet system development [J]. Nuclear Fusion, 2005, 45(8): 783-789.
- [10] Y-K OH, YANG H L, KIM Y S. Completion of the KSTAR construction and its role as ITER pilot device [J]. Fusion Engineering and Design, 2008, 83(7-9): 804-809.
- [11] ITER Korea Office. About ITER Korea [DB/OL]. 2009, <http://www.iterkorea.org/>.
- [12] KIJUNG JUNG. Status of ITER Korea and its Activities [C]. ITER Business Forum 2007, Nice, France, 2007: 10-12.
- [13] BAK J S. ITER Korea and its Procurement Activities [C]. Monaco ITER International Fusion Energy Days (MIIFED), Le Méridien Beach Plaza Hotel, Monaco, 2010.
- [14] PRINCETON UNIVERSITY. PPPL teams with South Korea on the forerunner of a commercial fusion power station [DB/OL]. 2012-12-21. <http://www.princeton.edu/main/news/archive/S35/60/40I47/index.xm>.
- [15] The ITER Organization. Korea aims at completing a DEMO by 2037 [DB/OL]. 2013-02-04. <http://www.iter.org/newsline/255/1481>.
- [16] KWON M. On Korean Strategy for Fusion Energy [C]. International Workshop on MFE Roadmapping in the ITER Era, Princeton, NJ, USA, 2011, 7-10.

作者简介

康卫红 (1967-), 女, 副研究馆员, 主要研究方向: 核聚变与等离子体物理科技信息。