

核聚变领域的全球合作:稳步进展的记录

一些国家正在一起集中资源和专业人才设计

实验聚变反应堆

T. J. Dolan, D.
P. Jackson,
B. A.
Kouvshinnikov
和D. L. Banner

地球海洋里蕴藏着足以持续使用数百万年的潜在能源。海水含有氘,即氢的一种重同位素。它是核聚变反应堆的主要燃料。一升海水中所含的氘一旦被提取出来,它可能产生的能量相当于300升汽油燃烧产生的能量。

尽管这种潜在的能源要变成现实需几十年的时间,但已经取得了重大进展。当今科学技术的发展正在使核聚变技术日趋成熟。在很大程度上,世界日益增长的能源需求、对环境的担忧和人口增长,促使聚变研究和开发迅速发展。

靠燃烧化石燃料来获取能量和发电是有限度的。特别是下面四个因素限制了对它的利用:

- 化石燃料燃烧对人类健康的影响(肺气肿,癌症);
- 环境影响(酸雨、温室效应等);
- 需要节省用作常规燃料和化工原料的碳氢化合物;
- 化石燃料(煤、石油、天然气)的储量有限。

据世界资源研究所(WRI)对全球能源供应的估计,世界探明的总能源储量约为 3.5×10^{22} 焦耳(J)。其中探明的煤炭储量估计为 2.44×10^{22} J;探明的石油储量约为

0.56×10^{22} J;和探明的天然气储量约为 0.50×10^{22} J。

此外,还有一些可利用的所谓资源的化石燃料。但是它们的回收利用比较困难。因此,从使用储量到使用资源的转变过程中,它们的价格将大大上升。

1994年,世界一次能源消耗率约为11.6太瓦(TW),其中的约87%来自化石燃料。按照这种消耗率,世界化石燃料储量也许可持续使用约120年。但是,尽管采取有效的节能措施,能源消耗率仍在增加,因为发展中国家要改善它们的生活水平。以每年能源消耗增长率为2%计算,这些化石燃料储量可能只能持续使用61年。

在今后几十年内,为了增加总装机容量满足电力需求,替换老龄电厂,以及出于与环境、健康和费用有关的原因替代化石燃料电厂,将需要建造许多新的电厂。即使在最乐观的情景下,研究人员预计,到2030年世界能源供应短缺将多于5 TW。这是一个相当惊人的数字,它相当于5000座1000兆瓦(电)(MWe)级的电厂。在今后40年内,必须开发和使用一些重要的非化石燃料能源,以便提供世界所需能量的10%以上。

大多数可再生能源——尽管在某些具体情况下可能作出重要的贡献——将不适用于生产所需的大量电力。不过有三种能

Dolan先生是IAEA物理和化学科学处物理科科长;Jackson先生是加拿大聚变计划负责人和IFRC主席;Kouvshinnikov先生是设在IAEA的ITER办事处的情报资料官员;Banner先生是IAEA物理科前科长。四位作者感谢提供资料和意见的同事。

* 参见“The need for research and development in fusion: Economical energy for a sustainable future with low environmental impact”, by B. G. Logan, L. J. Perkins, R. W. Moir, and D. D. Ryutov, *Fusion Technology* 28, pgs. 236-239(1995).

源有可能满足世界能源要求：太阳能、裂变能和聚变能。这三种能源均有其优缺点。

太阳能是发散、间歇的能源，在某些气候条件下是不合适利用的，而且通常是昂贵的。裂变增殖反应堆能延长世界易裂变燃料的供应，但是它们并不受公众普遍欢迎。聚变反应堆可能有许多人们所希望的特点，但是要把它们变为现实尚需做大量的工作。如果聚变反应堆开发成功（许多人相信它们会成功），它们便会使世界能源前景大有希望。（见右方框。）

为了提高输出功率和增殖易裂变燃料，将铀置于聚变反应堆的包层内，也有可能开发聚变—裂变混合反应堆。这种混合堆可能有经济优势，但是由于安全、环境和保安方面的担心，申请许可证将会变得更加困难。

世界需要大力发展核电，促进先进裂变反应堆和聚变反应堆在化石燃料短缺造成燃料价格上涨以前推广应用。此外，核选择将在减轻全球气候变化的威胁中起重要作用，而气候变化正越来越被人们认为是化石燃料燃烧的后果。裂变动力正在部分地代替某些碳基燃料，今后，聚变动力可能成为更诱人的能源。鉴于这些原因，全世界大约 40 个国际原子能机构（IAEA）成员国正在进行聚变的研究和开发工作。这项工作包括核聚变安全研究，以确保将来实现聚变动力的潜在安全和环境优势。

出于种种原因，全球合作一直是核聚变研究和发展的特征。这种合作已从小型实验过渡到大型热核反应堆的设计。本文介绍合作努力概况和研究工作现状。

国际合作史

聚变研究方面的全球合作是特别重要的，其理由包括：需要集中专业人才和分摊大型项目的费用；希望通过分享等离子体理论、实验结果、计算机程序、材料性质和技术开发方面的知识加速聚变研究的进展；以及希望帮助发展中国家建立聚变物理和工艺技术方面的专业队伍。

50年代，核聚变实验装置是很小的，涉

聚变动力的潜在的诱人特点

就许多能源和环境问题而言，核聚变有不少诱人的特征：

燃料供应：从水中提取氘不产生有害的副产品；所有国家都可以廉价地用这种方法获得氘。海水中所含的氘足以持续使用数百万年。

采矿：有限开采锂矿，用于增殖聚变反应堆用的氘。（海水也含 0.17 ppm 的锂。）

环境问题：聚变在环境上是安全的。

核武器扩散：不涉及铀或钚。

安全：等离子体中的燃料量很少，即使完全燃烧也不会引起爆炸。排热并不困难，因为衰变热量不很多，而且分布在一个大的容积内。精心设计可将氘的总量减至最少。在发生事故期间，潜在的厂外辐射剂量可足够低，以致不需要制订居民撤离计划。

放射性副产品：精心选择材料可将结构中的长寿命放射性产生量降至最少。钒合金、锂冷却剂和未燃烧的氘-氘燃料可再循环使用。

及的研究人员很少，而且所用经费约 100 百万美元。目前，有些实验装置大得多，它们使用数百名高科技研究人员（一个国家很难有那么多的科技人员），而且可能要花费数十亿美元。此外，还有许许多多的小型和中型聚变实验装置，这些装置为世界性的努力作出了重要贡献。

尽管如此，由于聚变动力在未来具有潜在的重要意义，一些国家也要求在国内有强有力的聚变计划，以便可以将国际合作中产生的科学和技术成果应用于自己的国家。尽管大多数聚变研究尚处在竞争前阶段，但有些技术领域，保护作出贡献的国家的知识产权也是必要的，而这种要求在确定合作安排时必须得到尊重。此外，人们对分享诸如惯性约束聚变这类有可能用于军事目的的技术有些担心。

50年代初，几个国家独立地开始进行核聚变研究。这在当时属于军事秘密。各国研究过磁箍缩、磁镜和环形装置，并观测到某些中子。当时存在着“20年内实现聚变动力”和乐观情绪。然而这种初期的乐观情绪受到下述认识的打击：观测到的中子并非来自热核反应；等离子体不稳定性正使约束性能变

坏。人们尚需要对等离子体的行为作进一步的了解,而与其他国家分享研究成果可以促进这种了解。

1956年,苏联在这方面带了头,它与西方国家分享了其聚变研究成果。1958年召开的和平利用原子能日内瓦会议,是第一次重要的聚变研究国际合作会议。就在这一年,IAEA开始进行其相应的工作。1961年,在萨尔茨堡召开了IAEA第一次等离子体物理和受控热核聚变研究会议,现在这种会议(现已改名为“IAEA聚变能会议”)隔两年召开一次。1972年,IAEA成立了国际聚变研究委员会(IFRC),其任务是就广泛的聚变研究活动向机构提供建议。

与机构的活动平行,若干年里一些国家之间签订了许多双边和多边聚变研究合作协定。从历史上看,这些合作协定常常是使新参加者参加国际聚变合作研究活动的第一步。在其他情况下,当在某些特殊研究领域要进行高水平相互合作时,这些合作协定已证明特别有用。这种合作的例子是,日本参加美国的氦系统试验装置项目和 Doublet-III 项目;加拿大通过与欧洲联盟签订的协定参加国际热核实验堆(ITER)项目。

国际能源机构(IEA)是经济合作与发展组织的一部分,它于70年代由西方工业化国家组成,是1973年石油价格冲击的产物。IEA涉及包括聚变在内的所有能源研究和发展领域,而它的姊妹组织核能机构涉及裂变方面的一些领域。

IEA合作是借助履行带有涉及某些具体研究领域的附件的协定来组织的。原则上,任何一个IEA成员国都可以通过分担相关费用作为一个缔约方参加这些协定中的任何协定;另外,非IEA成员国现在也可以作为准缔约方参加,正如俄罗斯已参与许多聚变协定那样。目前,已有若干份积极履行中的协定。它们涉及:大型托卡马克装置;TEXTOR;ASDEX改进型;仿星器;反场箍缩装置;聚变材料;聚变核技术;以及聚变动力的环境、安全和经济方面。

这些活动由聚变动力协调委员会指导,该委员会在IEA中的作用类似于IFRC。有

些成员是两个委员会共有的。近几年为了避免重复,通过这两个指导委员会为协调这两个机构的聚变活动做出了愈来愈多的努力。

ITER 项目的由来

1978年,IAEA组织了一次国际托卡马克反应堆(INTOR)学术讨论会,以便按照IFRC的建议确定下一个重要的托卡马克实验装置。这次学术讨论会收集了有关等离子体行为、截面和材料性质方面的数据,提出了参考聚变反应堆设计,并确定了要解决的关键问题。这些成果已编成IAEA系列报告,于1982—1988年发表。

INTOR在证明持续技术合作可行性方面的成功,是影响后来设立国际热核实验堆(ITER)项目的一个因素。(见19页图。)另一个因素是七国集团会议(“西方国家经济首脑会议”)已把核聚变确定为,有通过相互合作促进经济增长的潜力的领域之一。这些因素和其他因素为立即从政治上推动ITER项目提供了充分的基础。这个项目是苏共总书记戈尔巴乔夫先向法国总统密特朗,和随后在1985年日内瓦首脑会议上向美国总统里根提出的。

最后,在1988年,下列四方开始从事ITER概念设计活动(CDA):欧洲共同体、日本、苏联和美国。这些国家都有较重要的聚变研究计划。CDA活动结束后,上述四方一致同意从1992年至1998年继续进行工程设计活动(EDA)。

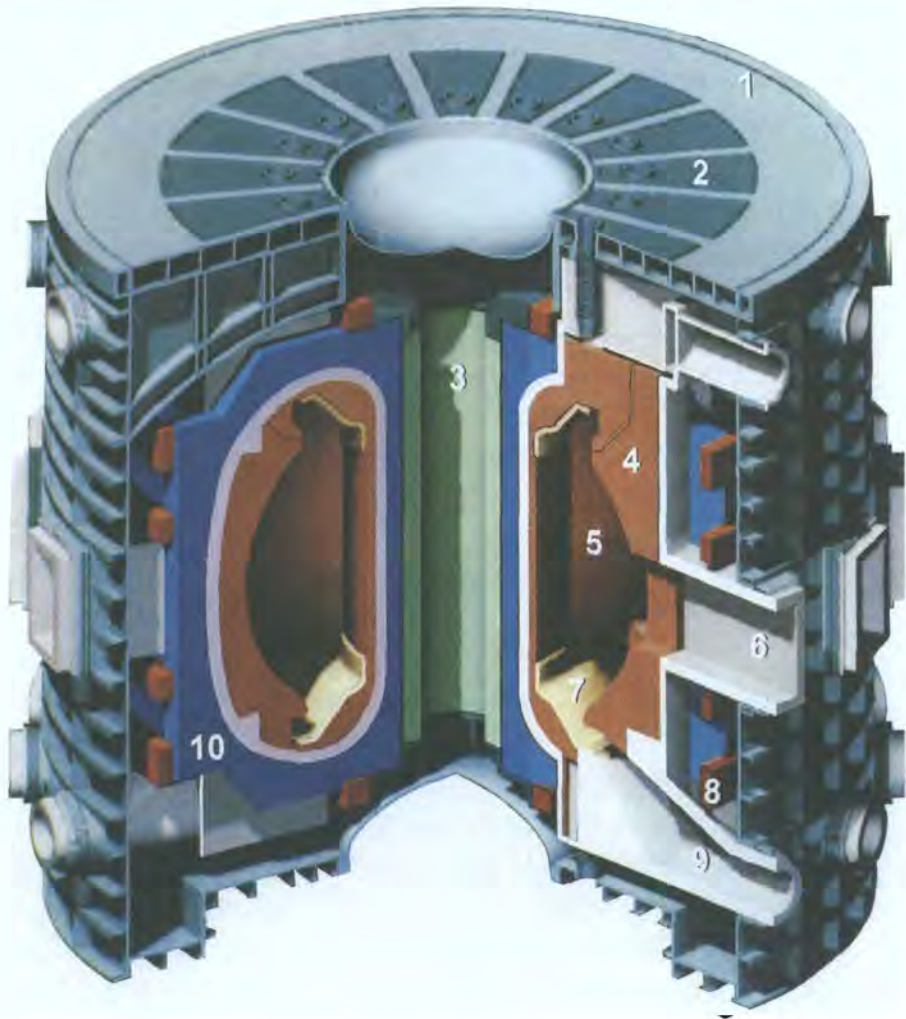
机构在确立ITER项目中起了至关重要的推动作用,它现在为四方合作提供赞助和某些方便,其中包括管理ITER共同资金和以机构核数据科进行的与ITER项目有关的技术工作作配合。

IAEA 与聚变有关的活动

除对ITER提供支助外,IAEA还有促进核聚变研究方面国际合作发展的各种其他活动。(见21页附框。)实际上,对聚变研究的这种多国合作来说,IAEA是一个重要

ITER 理事会重新取得一致意见

在设计和实验方面取得稳定进展的三十年后,参与世界聚变研究的主要四方于1992年,就核聚变作为能源开发中的最合适的下一步的目标和要求取得一致意见。四方认为,ITER是通过四方平等合伙达到这些目标的理想的工程项目。支持ITER所需的基础物理、工艺技术、专门知识和研究等方面之深入而广泛的工作,及相应的费用,均应通过国际合作由各方承担。1995年7月即ITER工程设计活动约开展一半之时,ITER理事会重新取得一致意见,重申ITER是必不可少的一步;它的目标仍然是可以达到的并且不必修改;其设计能够满足那些目标;四方合作本身表明是一种有效的体制;以及现在正是走这一步的合适时机。世界聚变研究能否成功取决于这一步,ITER应该继续从全面的国际合作中得益,这样就能集中力量于聚变物理和技术专门知识方面的工作以支持ITER,并使大量但有限的资源得到最合理的利用。



计算机产生的国际热核实验堆(ITER)模型,该聚变装置建成后的高度约为30米。图中1)为低温真空容器;2)垂直出入口;3)中心螺线管;4)包层/屏蔽层;5)等离子体室;6)通向等离子体室的出入口;7)偏滤器;8)极向场磁体;9)排气用真空泵管道;10)环形场磁体。

的联结点。

自1960年9月以来,一直出版月刊《核聚变》。机构每两年召开一次的会议涉及聚变研究方面的广泛课题,与会者通常为500人左右。IAEA核数据科职员适时更新数据库,向世界各地的研究人员分发新的资料数据,并为填补现有知识的空缺制订研究计划。IAEA收集和编评的原子与分子以及等离子体—材料之间相互作用的数据对ITER项目特别有用。IFRC负责联络成员国、联系各聚变研究专业的专家并为规划IAEA聚变研究活动提供指导。IFRC的委员由IAEA总干事委任。

在利用小型托卡马克装置进行研究等方面,每年要举行几次技术委员会会议。在聚变堆设计和核聚变安全等其他方面,两年或三年举行一次。某些技术委员会会议,以及 α 粒子物理和H模物理等方面的咨询小组会议,则不经常举行。

一些可能历时2—5年的协调研究计划(CRP),将产生概述特定领域研究现状的科学报告。通常还有一些进行中的与聚变相关的CRP,每项计划均有5—10名来自发达和发展中成员国的参加者。此外,机构的技术合作计划还包括诸如为来自发展中国家的科研人员到主要实验室的工作提供进修金等活动。正设法使IAEA成员国提出更多的要求,以便更充分利用聚变研究领域中的这项培训计划。

ITER 工程设计现状

ITER的工作和联合中心小组(JCT)分散在有电子联系的三个联合工作场地:欧洲联盟的德国加尔兴(真空室内部件);日本茨城县的那珂(真空室外部分);和美国加利福尼亚州的圣迭戈(设计一体化、环境、安全和保健)。作为监督机构的ITER理事会的正式所在地是俄罗斯的莫斯科。

此外,上述四方各有一个国内小组,其任务是支持设计工作和开展相关的研究和开发活动。ITER理事会由八名代表组成,四方各派两名,负责从大的方面管理该项目,

并委任从事务上管理ITER项目的主任。技术咨询委员会由ITER理事会从各方选定的四名一流的科技人员组成,它就该理事会要求的所有技术问题向理事会提出建议。管理咨询委员会由每方选定三名共12名代表组成,它就有关管理和行政问题向理事会提出建议。这种体制尽管复杂并分布在地,但正在很好地运作。

历时6年的ITER工程设计活动,涉及总专业人力1340人·年的设计工作,和总费用达7.5亿美元(1989年美元)的基本技术与特殊工程研究和发发展工作。ITER JCT起草了《ITER中期设计报告、费用评述和安全分析》,报告已于1995年7月为ITER理事会所接受,供ITER各方审议。报告附有详细的技术文件:《中期设计报告和设计说明文件》,总共约4350页,附图1400幅。

1996年初春,IAEA将ITER文件丛书中的《中期设计报告》作为一个单独技术出版物发表。这说明朝着大多数技术问题的解决已取得很大进展。

ITER建造阶段即从作出建造决定到产生首批等离子体,估计将用约10年时间。

今后合作的前景

在核聚变领域,虽然还将有一些将主要由一方完成的大型研究项目,但即使是这些项目也将雇用若干来自其他国家的专家。世界各地的研究人员已学会尊重彼此的专有技能,和正确评价交换观点的价值。ITER项目在国际合作中取得很大进展,证明由国家利益与自满心理、研究小组的地理分离以及文化差异等带来的问题是可以被成功地克服的。因此,ITER在大型多国项目的管理方面的经验也可能对今后其他项目有帮助。

由于诸如材料试验用14 MeV中子源和托卡马克示范堆等其他潜在的新的聚变装置将是十分昂贵的,那些项目也很可能需要几方联合筹资。因为世界各国都有要求压缩预算的政治压力,所以分摊大型聚变研究项目费用的作法受人欢迎。国际合作的另一个有利方面,使发展中国家的富有革新精神的

IAEA 与聚变研究国际合作有关的活动

出版科学月刊《核聚变》及其增刊,例如《世界受控聚变研究活动现状》(定期)和《聚变用原子和等离子体—材料相互作用数据》(年刊)。

出版《国际聚变用原子和分子数据通报》(半年刊),向机构成员国的 800 多个研究机构和研究人员分发。

组织两年一次的 IAEA 聚变能会议,和出版会议文集。

开发与聚变研究相关的核数据库(例如 FENDL)、原子与分子数据库,以及等离子体—材料相互作用数据库。这些数据已被国际上推荐用于聚变研究和聚变堆设计工作。它们被贮存在机构的核数据信息系统(NDIS)和原子与分子数据信息系统(AMDIS),而且可以通过互连网络在线存取。IAEA 的国际核信息系统(INIS)还包括一名聚变专业人员。

国际聚变研究委员会(IFRC)

有关下述之类相关课题的技术委员会会议(TCM):

- 利用小型托卡马克装置进行的研究
 - 聚变等离子体的计算机模拟方面的进展
 - α 粒子物理
 - 托卡马克装置的稳态运行
 - H—模物理
 - 聚变安全
 - 聚变堆设计
- 咨询小组会议(AGM)

● 第三世界等离子体研究

● 惯性聚变能

● 原子和分子数据处理与交换的技术问题
有关下述之类课题的协调研究计划(CRP):

● 数字模拟和数据处理用的软件开发

● 发展中国家的等离子体加热和诊断系统

● 聚变堆第一壁寿命预测

● 等离子体相互作用诱发的聚变堆材料剥蚀

● 聚变等离子体杂质的辐射冷却率

● 聚变堆等离子体面对的材料的热机性质的参考数

据

● 氘的滞留和来自聚变堆等离子体面对的部件的释放

● 供聚变堆偏滤器模拟用的原子和等离子体—壁相互作用数据

国际原子和分子数据中心网(该网由 15 个国家数据中心组成)的活动的协调。

书,《惯性聚变能》(1995 年)

《受控热核聚变的现状报告》,由 IFRC 撰写的关于世界研究现状的概况,《核聚变》周年纪念专刊 Vol. 30, No. 9 (1990 年)。

与发展中国家的技术合作项目,例如进修金培训

为国际热核实验堆(ITER)工程设计活动(EDA)提供赞助。

科研人员有可能更多地参加较大型的项目。使这些科研人员一道参加一个实验室的研究工作,不但有利于发展中国家,还可以加速聚变研究的进展。

等离子体的工业应用在全世界正在商业化。这些应用包括等离子体喷涂、表面改性、新材料的合成、化学反应增强和化学污染物的处理。IAEA 将开始实施一个旨在促进这个领域中的合作的 CRP。

世界聚变研究计划中要做的事包括:完成 ITER 项目;惯性聚变能点火实验;备选聚变概念研究;开发聚变堆材料(辐照试验需要大功率中子源);坚实的等离子体理论和模拟计划;支助大学的等离子体科学和聚变工艺技术的研究和研究生教学。国际合作有助于比个别国家自己进行更有效地满足其中的大部分需要。

总之,世界需要核聚变研究,以便提供与太阳能和核裂变反应堆配套的能源。国际合作能够:集中专业人才和分担大型项目的费用;通过分享知识加速进展;和帮助发展中国家建立它们在等离子体科学和聚变工艺技术方面的基础结构。

IAEA、IEA 和各种双边协定都在促进这种合作。IAEA 正在进行广泛的活动,其中包括出版其月刊;两年召开一次会议;原子、分子和等离子体—材料相互作用数据的协调;召开技术委员会会议;以及安排协调研究计划等。

在过去的半个世纪里,世界核聚变计划——从苏联首次倡议,通过 IAEA 的活动,到 ITER EDA ——已成为科学合作的典范。该计划将使人能够建造核聚变电站以满足世界能源和电力需求,从而造福全人类。□