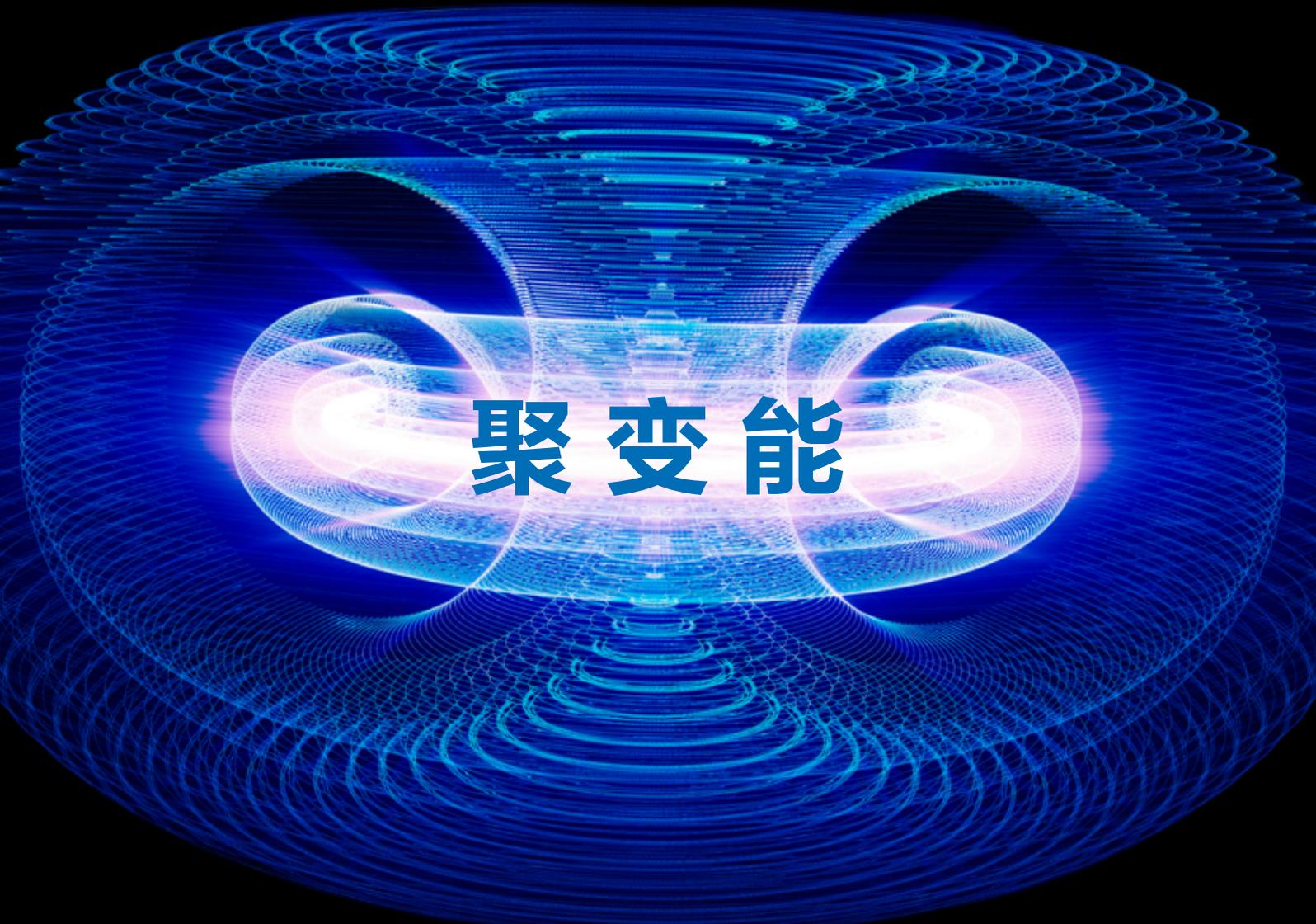


IAEA BULLETIN

国际原子能机构通报

国际原子能机构旗舰出版物 | 2021年5月 | www.iaea.org/bulletin

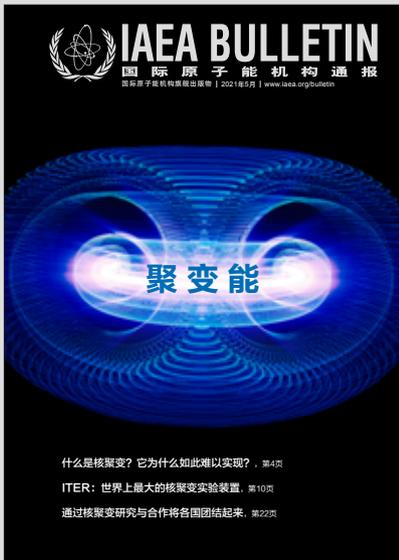


聚变能

什么是核聚变？它为什么如此难以实现？，第4页

ITER：世界上最大的核聚变实验装置，第10页

通过核聚变研究与合作将各国团结起来，第22页



《国际原子能机构通报》

主办单位

国际原子能机构新闻和宣传办公室

地址： 维也纳国际中心

PO Box 100, 1400 Vienna, Austria

电话： (43-1) 2600-0

电子信箱： iaebulletin@iaea.org

执行编辑： Michael Amdi Madsen

编辑： Miklos Gaspar

设计制作： Ritu Kenn

《国际原子能机构通报》可通过以下网址在线获得：

www.iaea.org/bulletin

《国际原子能机构通报》所载的原子能机构资料摘录可在别处自由使用，但使用时必须注明出处。非原子能机构工作人员的作品，必须征得作者或创作单位许可方能翻印，用于评论目的的除外。

《国际原子能机构通报》任何署名文章中表达的观点不一定代表原子能机构的观点，原子能机构不对其承担责任。

封面：

在托卡马克中，被加热到上亿度并被磁场约束的等离子体粒子融合在一起，产生能量。

(图/Shutterstock.com)

请关注我们



IAEA

国际原子能机构（原子能机构）的使命是防止核武器扩散和帮助所有国家特别是发展中国家从核科学技术的和平、安全和可靠利用中受益。

1957年作为联合国下的一个自治机构成立的原子能机构是联合国系统内唯一拥有核技术专门知识的组织。原子能机构独特的专业实验室帮助向原子能机构成员国传播人体健康、粮食、水、工业和环境等领域的知识和专门技术。

原子能机构还作为加强核安保的全球平台。原子能机构编制了有关核安保的国际协商一致准则出版物《核安保丛书》。原子能机构的工作还侧重于协助最大限度地减少核材料和其他放射性物质落入恐怖分子和犯罪分子手中或核设施遭受恶意行为的风险。

原子能机构安全标准提供一套基本安全原则，反映就构成保护人和环境免受电离辐射有害影响所需的高安全水平达成的国际共识。这些原子能机构安全标准的制定针对服务于和平目的的各种核设施和核活动，以及减少现有辐射风险的防护行动。

原子能机构还通过其视察体系核查成员国根据《不扩散核武器条约》以及其他防扩散协定履行其将核材料和核设施仅用于和平目的的承诺情况。

原子能机构的工作具有多面性，涉及国家、地区和国际各个层面的广泛伙伴的参与。原子能机构的计划和预算通过其决策机关——由35名理事组成的理事会和由所有成员国组成的大会——的决定来制订。

原子能机构总部设在维也纳国际中心。外地和联络办事处设在日内瓦、纽约、东京和多伦多。原子能机构在摩纳哥、塞伯斯多夫和维也纳运营着科学实验室。此外，原子能机构还向设在意大利的里雅斯特的阿布杜斯·萨拉姆国际理论物理中心提供支持和资金。

助力核聚变成为现实

文/国际原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西

1958年国际原子能机构高级官员出席第二届联合国和平利用原子能国际会议时，目睹了在那之前一直属于国家机密的東西被公开——各国试图利用核聚变动力。根据这些披露的信息，核聚变有望为社会提供近乎无限的能源。核聚变需要在一个过程中把原子核聚在一起，这个过程从相同数量的燃料释放出比原子分裂的核裂变更多的能量。

20世纪50年代末，化石燃料的未来似乎仍然是无限的，气候变化尚未得到考虑，核聚变被视为“不错的选择”：设想为遥远的未来提供能源。我们今天生活的世界是多么不同，对清洁能源的需求超过供应。这使得核聚变等清洁能源引起了决策者、投资者和广大公众的兴趣。

核聚变每千克燃料产生的能量是核裂变的四倍，比燃烧石油和煤炭产生的能量高出近400万倍。目前的国际承诺水平正使我们比以往任何时候都更接近核聚变的未来。

这方面的一个主要例子是世界上最大的核聚变实验装置ITER（见第10页文章），它将来自35个国家的科学家联合起来，寻求实现自持聚变反应。建设工作正在进行中，一旦完成，ITER有望迎来聚变能源发展的下一个阶段——核

聚变示范电厂，也称为DEMO，其目标是首次利用核聚变发电。

国际原子能机构站在DEMO发展的前沿，促进国际协调并在全球分享项目的最佳实践（见第12页文章）。国际原子能机构正在促进关于DEMO的讨论，并推动广泛的国际对话，以克服高度的技术挑战，使聚变能成为现实。

国际原子能机构出版的科学期刊《核聚变》证明了我们对于聚变研究的承诺。它是世界上历史最悠久、最权威的核聚变期刊，为全球的核聚变研究人员和工程师提供支持，每年获得50万次全文下载，一直是该领域影响力最大的期刊。

在本期《通报》中，我们介绍了各国政府的努力和私营部门对聚变的日益参与。投资者和主要能源生产商日益增加的兴趣表明，实现核聚变所需的技术进步正在加速。

用苏联时期著名物理学家Lev Artsimovich的话说，“核聚变在社会需要时就会准备好。”那个需要的时刻就是现在。应对气候变化已成为全球优先事项，而使我们的能源脱碳是我们最重要的任务之一。利用核聚变能为人类提供了一个比以往任何时候都更接近的清洁能源未来。

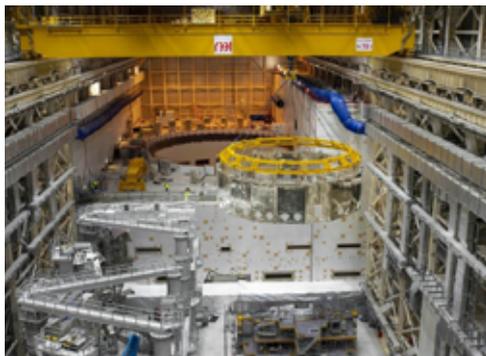


“目前的国际承诺水平正使我们比以往任何时候都更接近核聚变的未来。”

—国际原子能机构总干事拉斐尔·马利亚诺·格罗西



(图/ITER)



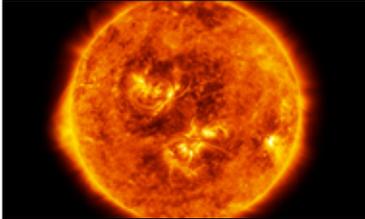
(图/ITER)



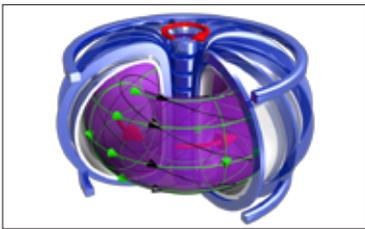
(图/ Freepik.com)



1 助力核聚变成为现实



4 什么是核聚变？它为什么如此难以实现？



6 用托卡马克和仿星器实现磁聚变约束



8 探讨磁约束的可替代方案



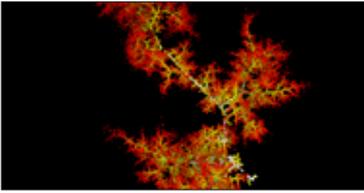
10 ITER：世界上最大的核聚变实验装置



12 核聚变示范电厂
通往大规模商业发电的石阶



14 核聚变的安全性
固有的安全过程



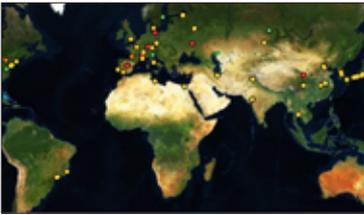
16 国际原子能机构数据库如何助力推进聚变商用研究



18 燃烧等离子体
迈向核聚变发电的关键石阶



20 缩小核聚变的材料和技术差距



22 通过核聚变研究与合作将各国团结起来

问答

24 核聚变在社会需要时就会准备好

世界观点

26 借鉴登月计划和发射成功的经验
为什么核聚变需要企业和初创企业
文/ Simon Woodruff

国际原子能机构最新动态

28 新闻

30 出版物

什么是核聚变？它为什么如此难以实现？

文/ Irena Chatzis 和 Matteo Barbarino

五百年前，位于今天墨西哥的阿兹特克文明相信，太阳及其所有的力量都是由人类祭品的血液来维持的。今天，我们知道，太阳连同所有其他恒星都是由一种称为核聚变的反应提供动力。如果核聚变能够在地球上复制，那么它可以提供几乎无限的清洁、安全和廉价的能源，以满足世界的能源需求。

那么，核聚变究竟是如何工作的？简单地说，核聚变是两个轻原子核结合成一个较重的原子核并释放出巨大能量的过程。核聚变反应发生在一种叫作等离子体的物质状态中。等离子体是一种由正离子和自由移动的电子组成的高温带电气体，具有不同于固体、液体和气体的独特性质。

为了在我们的太阳上实现聚变，原子核需要在超过1000万摄氏度的极高温度下相互碰撞，以使它们能够克服相互间的电排斥力。一旦原子核克服了这种排斥力并进入彼此非常接近的范围，它们之间的核力吸引力将超过电排斥力，从而使它们能够实现聚变。要做到这一点，众多原子核必须被约束在一个小空间内，以增加碰撞的机会。在太阳中，其巨大的引力所

产生的极端压力为核聚变的发生创造了条件。

核聚变产生的能量非常大——是核裂变反应的四倍，而且聚变反应可以成为未来聚变动力堆的基础。各种计划要求第一代核聚变反应堆使用氘（重氢）和氚（超重氢）的混合物。理论上，只要有几克这些反应物，就有可能产生一太（万亿）焦耳的能量，这大约是发达国家的一个人在60年内所需要的能量。

伸手摘星

虽然太阳的巨大引力自然会诱发核聚变，但如果没有这种力，就需要更高的温度才能发生反应。在地球上，我们需要超过1亿摄氏度的温度和强大的压力，以使氘和氚发生聚变，还需要充分的约束，使等离子体和聚变反应保持足够长的时间，以获得净功率增益，即产生的聚变功率与用于加热等离子体的功率之比。

虽然现在实验中通常已实现非常接近核聚变反应堆所需的条件，但仍需要改进约束性能和等离子体的稳定性。来自世界各地的科学家和工程师继续试验新材料和设计新技术，以获

太阳连同所有其他恒星都是由一种称为核聚变的反应提供动力。如果核聚变能够在地球上复制，那么它可以提供几乎无限的清洁、安全和廉价的能源，以满足世界的能源需求。

（图片来源：NASA/SDO/AIA）

取聚变能。

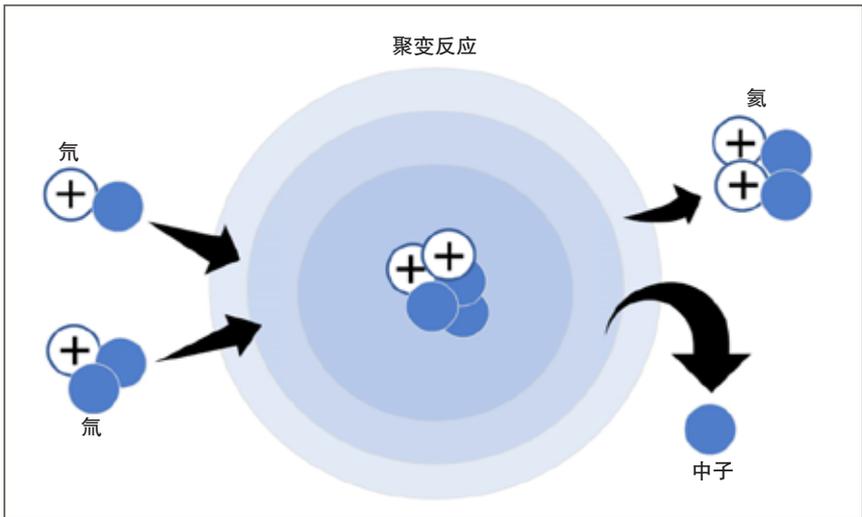
50多个国家在开展核聚变和等离子体物理研究，尽管没有证实聚变净功率增益，但许多实验已成功实现聚变反应。复制恒星的过程需要多长时间，将取决于通过全球伙伴关系和合作来调动资源。

协作历史

自20世纪30年代人们认识到核聚变以来，科学家们一直在寻求复制和利用聚变。最初，这些尝试是保密的。然而，人们很快就发现，这种复杂而昂贵的研究只能通过协作来实现。在1958年于瑞士日内瓦举行的第二届“联合国和平利用原子能国际会议”上，科学家们向世界公布了核聚变研究。

国际原子能机构一直是国际核聚变研究的核心。国际原子能机构于1960年创办了《核聚变》杂志，以交流有关核聚变进展的信息，现在它被认为是该领域的主要期刊。第一次“国际原子能机构聚变能国际会议”于1961年举行，自1974年以来，国际原子能机构每两年召开一次会议，以促进对该领域的发展和成就的讨论。

经过二十年关于国际热核聚变实验堆（ITER）的设计和地点的谈判，这个世界上最大的国际核聚变装置于2007年在法国建成，目的是论证核聚变能生产的科学和技术可行性（见第



10页文章)。ITER协定已存放于国际原子能机构总干事处。在ITER建成之后，核聚变示范电厂（或DEMO）正在计划演示受控核聚变可以产生净电力。国际原子能机构主办了多次DEMO讲习班，以促进在确定和协调DEMO常规计划活动方面的全球协作（见第12页文章）。

预计核聚变能够满足人类数百万年的能源需求。聚变燃料丰富且容易获得：氘可以从海水中廉价提取，而氚可以利用丰富的天然锂生产。未来的聚变反应堆不会产生高放射性、长寿命的核废物，而且聚变反应堆几乎不可能发生熔毁。

重要的是，核聚变不会向大气中排放二氧化碳或其他温室气体，因此，与核裂变一起，可以作为一种低碳能源在未来发挥缓解气候变化的作用。

氘和氚（两种氢的同位素）的混合物将被用来作为未来聚变电厂的燃料。在反应堆内，氘和氚的原子核发生碰撞和聚变，释放出氦和中子以及大量的能量。

（图/国际原子能机构/M. Barbarino）



用托卡马克和仿星器实现磁聚变约束

文/Wolfgang Picot

1934年，实验室首次实现了核聚变反应，成为当时一项重大突破。然而，今天，实现核聚变反应并不太难：2018年，一个12岁孩子在家成功制造了一个核聚变实验装置，作为这方面最年轻的人进入吉尼斯世界纪录。

不幸的是，这些实验产生的脉冲只持续不到一秒的时间，实现和长时间地维持这种核聚变反应仍然是一个重大挑战。只有开发出一种稳定可靠的核聚变发电方式，核聚变才能成为一

种商业可行的能源。

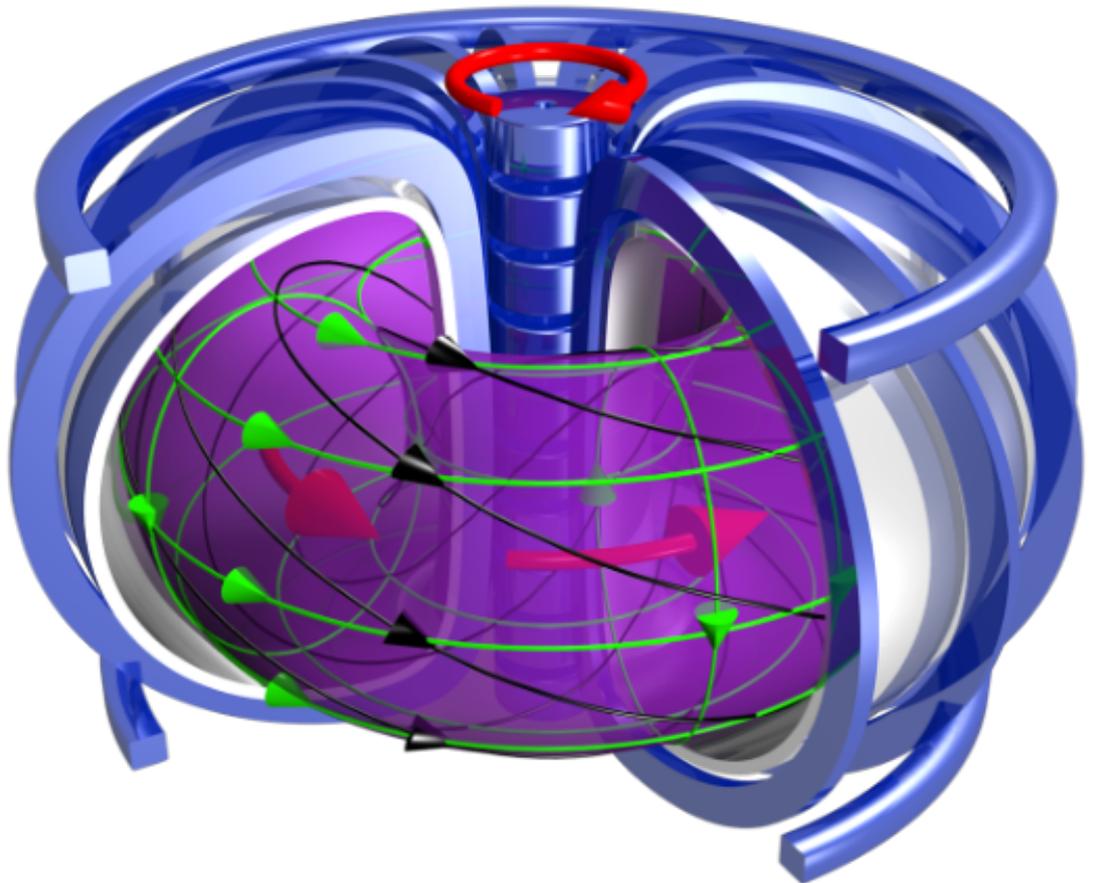
核聚变发电

核聚变发电利用轻原子核“聚变”所释放的能量。当两个轻原子核融合时，所产生的原子核质量比原来两个原子核质量之和略轻。这一质量差没有消失，而是被转化为能量。令人惊讶的是，这种微小的质量损失转化为巨大的能量，使得追求核聚变能非常值得。

物质通常有三种状态：固态、液态

托卡马克如何工作：

由变压器引起的电场驱动电流（红色大箭头）通过等离子体柱，产生一个极向磁场，将等离子体电流弯曲成一个圆形（绿色垂直圆圈）。将等离子体柱弯曲成一个圆圈可以防止泄漏，并且在一个环形容容器内这样做会形成一个真空。另一个围绕圆圈长度的磁场被称为环形磁场（绿色水平圆圈）。这两个场结合形成一个类似螺旋结构（黑色所示）的三维曲线，等离子体在其中受到高度约束。



和气态。如果气体被置于极高温下，就会变成等离子体。在等离子体中，电子被从原子中剥离出来。失去围绕原子核运行电子的原子被认为处于电离状态，并被称为离子。因此，等离子体是由离子和自由电子组成的。在这种状态下，科学家们可以激发离子，使其相互碰撞、聚变，并释放能量。

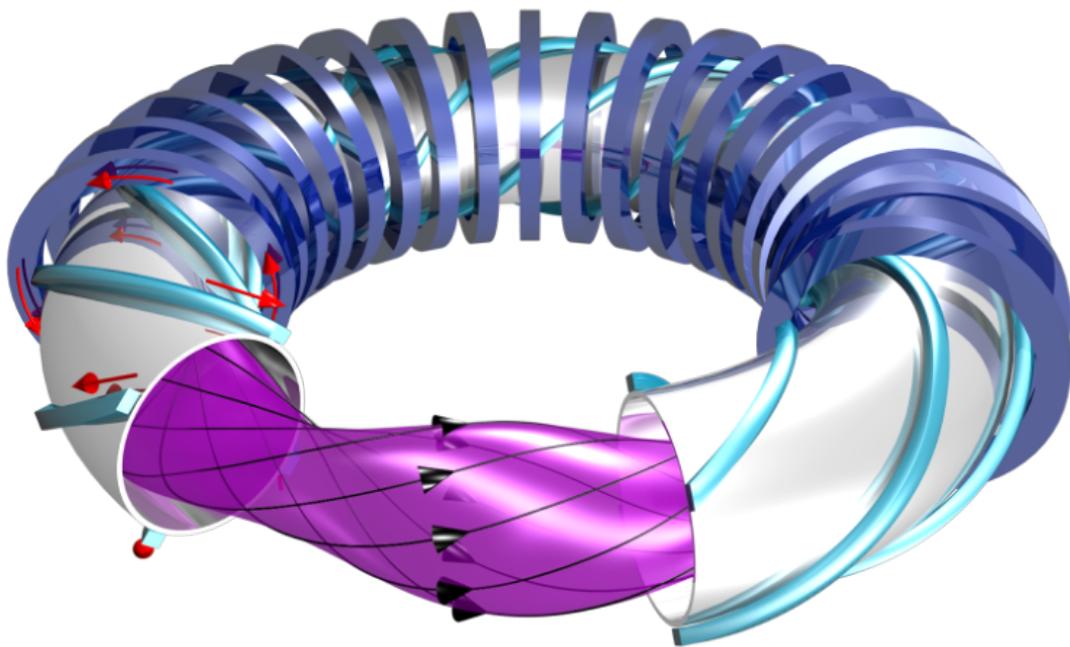
为提取能量而保持等离子体稳定，

等离子体。

同样的挑战，不同的解决方案

由于仿星器构型在建造上具有挑战性，当今大多数核聚变实验装置都是托卡马克（俄文表述简称，译为“具有磁线圈的环形真空室”）。目前大约有60个托卡马克和10个仿星器在运行。

两种类型反应堆各具优势。托卡马



在不需要变压器的情况下扭转磁铁，也可以形成螺旋状，这种构型称为仿星器。

（图/德国马克斯·普朗克等离子体物理研究所）

这比较困难。等离子体处于无序状态、超热，易发生混沌和其他不稳定性。虽然对等离子体的认识、建模和控制极其复杂，但研究人员在过去的几十年里已取得巨大的进步。

科学家们使用磁约束装置操纵等离子体。此类最常见聚变反应堆是托卡马克和仿星器。对未来聚变能电厂而言，目前这些是前景最好的概念。

这两种类型反应堆均利用带电粒子与磁力发生反应这一事实。反应堆中的强磁体使离子受到约束。电子也被反应堆的力所束缚，并在周围环境中起作用。磁力不断地使这些粒子在其环形反应堆内旋转，以防止它们逃离

克在保持等离子体温度方面更出色，而仿星器在保持等离子体稳定方面更出色。尽管托卡马克目前很流行，但仿星器仍有可能在某一天成为未来聚变能电厂的首选。

研究人员在磁约束核聚变方面已取得巨大的进步，现在可以轻松实现极高温度的等离子体。他们已开发出操作等离子体的强大磁体，并开发出能够承受反应堆容器内具有挑战性工况的新型材料。实验、理论、建模和模拟方面的进展使人们对等离子体行为有了更深入的了解，而像ITER等托卡马克和仿星器实验装置将在证明聚变能生产的科学和技术可行性方面发挥核心作用。

探讨磁约束的可替代方案

激光聚变、线性装置和先进燃料

文/Aleksandra Peeva

激光聚变是点燃核聚变反应的一种方法，是磁约束的潜在可替代方案（见第6页文章）。激光聚变通过惯性约束，使用高功率激光器加热和压缩含有氢同位素（例如氘和氚）燃料芯块的微小球形胶囊。

强烈加热胶囊表面，使燃料发生微内爆，结果燃料芯块表层被烧蚀，并发生爆炸。这个过程所产生的惯性保持燃料长时间受到约束，足以产生聚变反应。

激光聚变实验始于20世纪70年代。目前，美国劳伦斯·利弗莫尔国家实验室的国家点火装置拥有192束激光，无疑是世界上最大的激光装置。在国家点火装置中，一个称作“空腔”的圆柱形金色容器里面装有包含氘-氚燃料的胶囊，利用激光加热该容器内壁，激光与空腔的相互作用产生X射线，X射线使胶囊加热并压缩，在芯块内形成一个中心热斑，在那里发生聚变反应。

为实现点火——核聚变实现完全自持的点，国家点火装置的胶囊应该释放出比其吸收的能量多30倍左右的能量。

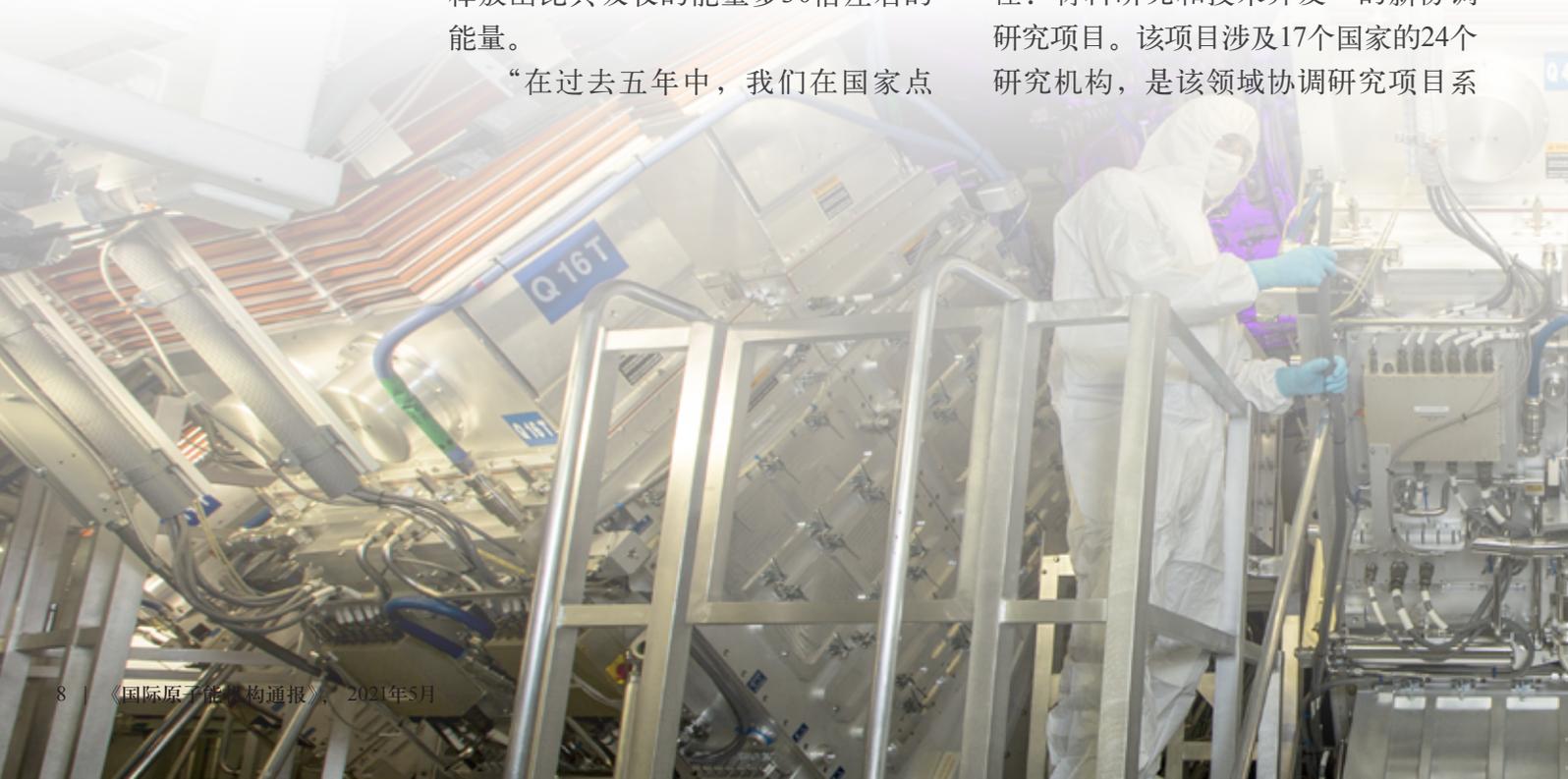
“在过去五年中，我们在国家点

火装置取得了重大进展，现在能够产生的能量比我们投入燃料热斑能量的2.5~3倍还多。”国家点火装置惯性约束聚变建模副主管Brian Spears说，“达到30倍放大增益仍然是主要目标，但这是非线性过程，我们已采取许多重要技术步骤，以实现这一目标。”

将燃料热斑内的中心压力增加到大气压力的几十亿倍，是实现商业可行的核聚变的关键。通过从塑料囊转向微晶、高密度碳囊，改进用于支撑碳囊的工程特性，以及增强用于向碳囊内填充聚变燃料的结构，国家点火装置已在该领域取得实质性进展。这使专家们能够显著提高从激光所产生能量到胶囊所吸收能量的能量耦合效率，并最终产生更多能量。

“重大科学挑战仍然摆在眼前，但最近在国家点火装置和其他装置的进展证明，我们离通过激光聚变实现点火阈值越来越近。”Spears说。

2020年，国际原子能机构启动了一个题为“从惯性聚变获得能源的途径：材料研究和技术开发”的新协调研究项目。该项目涉及17个国家的24个研究机构，是该领域协调研究项目系



列第四期项目，重点是开发高增益胶囊设计，以实现完全自持聚变。

光束碰撞产生聚变

激光和磁约束方案的另一种选择是利用由粒子加速器产生的离子束，使这些光束相互瞄准，在碰撞时便会发生聚变。这种方法的一大缺点是，粒子相互碰撞不发生聚变且不产生能量的概率很高。

美国私营TAE技术公司利用一种线性装置：一个25米长的圆柱形反应器。从反应器两端发射的两个等离子体，在反应器中央的云中发生碰撞与融合，实现聚变。然后，氘原子被点火进入云中以使云旋转，从而保持等离子体的高温和稳定性。

从可替代约束到先进燃料

通过激光器或线性装置实现核聚变的另一个优点是，这些方法可以更容易地适应使用氘和氚以外的燃料。传统上，这些氢同位素的混合物一直被用于实现聚变，因为它们可以在比其他燃料更低的温度下达到最高的反应速率。

然而，氚具有放射性，并且在自然中不会大量存在。因此，必须通过聚变所产生的中子与围绕着反应堆壁的锂之间的核反应进行“增殖”。这些中子能量也对反应堆真空容器中的

材料构成重大挑战，因为当中子与反应堆壁碰撞时，反应堆的结构和部件会变得具有放射性。这就需要注重辐射安全和废物处置方面的考虑（见第14页文章）。

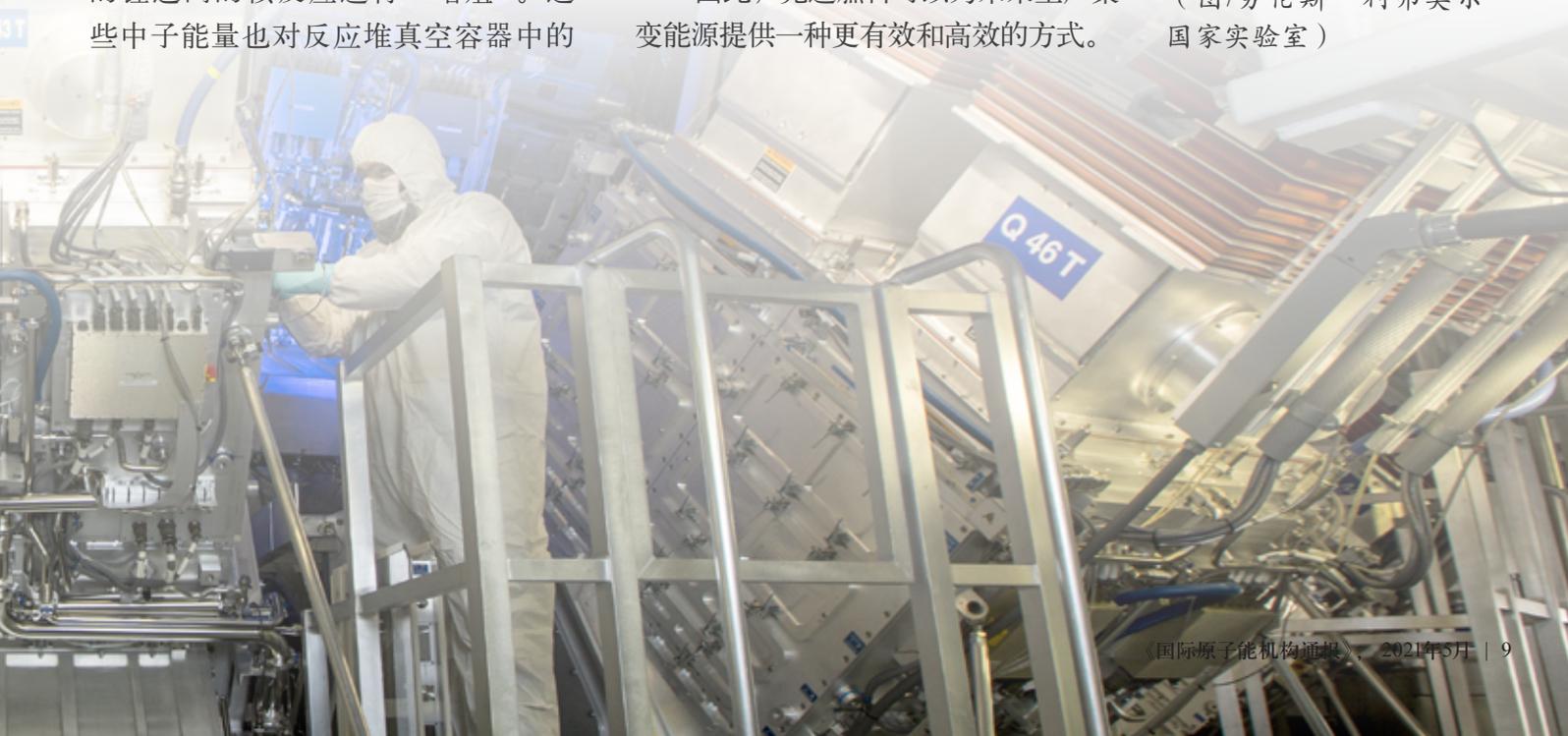
为了绕过使用氚所带来的挑战，现在一些实验使用可替代或先进的聚变燃料，例如质子与硼-11（p-B-11）聚变中的硼-11。硼-11不具有放射性，自然界中发现的所有的硼含有80%左右的硼-11，所以它很容易获得。然而，质子与硼-11聚变的主要问题是，它要求等离子体的温度比含有氘和氚的等离子体温度高一百倍。幸运的是，通过激光点火或线性装置，加热被限定于热斑，而不必使整个等离子体温度显著提高。

“硼-11是地球上最清洁、最环保的燃料来源，有足够的自然资源供地球持续使用几千年，并且质子与硼-11聚变不产生任何有害的副产品。这些因素综合起来，可以最大限度地提高聚变电厂的安全性、经济性、效率和持久性。”TAE技术公司首席执行官Michl Binderbauer说，“质子与硼-11聚变的主要难点在于它需要比其他燃料循环更高的温度来维持聚变反应。TAE技术公司已开发一种可替代约束概念来解决这一难题。”

因此，先进燃料可以为未来生产聚变能源提供一种更有效和高效的方式。

国家点火装置操作人员在例行维护期间检查一个决定性的光学组件。国家点火装置是世界上最大和能量最高的激光系统，位于劳伦斯·利弗莫尔国家实验室。

（图/劳伦斯·利弗莫尔国家实验室）



ITER：世界上最大的核聚变实验装置

文/Wolfgang Picot

国际热核聚变实验堆（ITER）重达2.3万吨，近30米高，将蔚为大观。这座核聚变反应堆将位于一个占地180公顷的场地中心，配有辅助厂房和设备。ITER在拉丁语中意为“路”，其巨大规模将显著超过目前正在运行的最大实验聚变反应堆——位于英国的欧洲联合环（JET）和位于日本的欧洲-日本联合装置JT-60SA。

但是，ITER的潜力是什么？在一个小型化和最优化的时代，为什么有必要建造一个如此巨大规模的研究装置？

ITER的主要目标之一是证明核聚变反应可以产生比启动反应过程所提供的能量多得多的能量——导致功率整体增加。ITER之类的反应堆被称为托卡马克（tokamaks，见第6页文章），它利用加热系统、强磁体和其他装置的组合，在超高温等离子体中产生释放能量的聚变反应。由此产生的磁场约

束带电粒子并使其围绕环形反应堆容器旋转，以便这些粒子能够聚变并产生聚变能。

至于尺寸问题，较大的托卡马克能提供更好的绝缘性，并将聚变粒子进行较长时间约束，因此比较小装置产生更多的能量。

反应堆性能的一个重要指标是聚变功率增益，即产生的聚变功率与注入等离子体以驱动反应的功率之比率，用符号“Q”表示。

迄今，JET已从24兆瓦加热功率产生16兆瓦聚变功率，实现的最佳增益Q值为0.67。然而，进行发电，还需要高得多的Q值。

发电的先决条件

在过去50年的聚变实验中，聚变装置的性能已提高了10万倍，但要达到发电厂所需的性能水平，还需要进一步提高5倍。为了实现这一目标，研究人员正在努力通过改变温度、密度



和约束时间来优化等离子体工况（见第8页文章）。

其中一些改进是聚变实验反应堆变得更大的结果。由于ITER的高度和半径是JET的两倍，其等离子体体积将增加10倍。ITER应用新颖设计和创新材料，还将整合一些有史以来最强大的等离子体加热装置。它的目标是，只需向等离子体注入50兆瓦的加热功率，便在每个大约5~10分钟的脉冲中产生500兆瓦的聚变功率，使Q值至少达到10。

虽然ITER的峰值性能将令人注目，但它只会在很短的时间内达到。为了成为稳定的电力来源，未来的核聚变电厂将需要持续运行。Q值为5代表临界阈值，高出这个阈值，等离子体开始自加热，以自行维持核聚变反应。为更好地了解如何实现这种自持反应，ITER的目标是在时间远远长于10分钟，最终产生并保持Q值为5。

全球协作

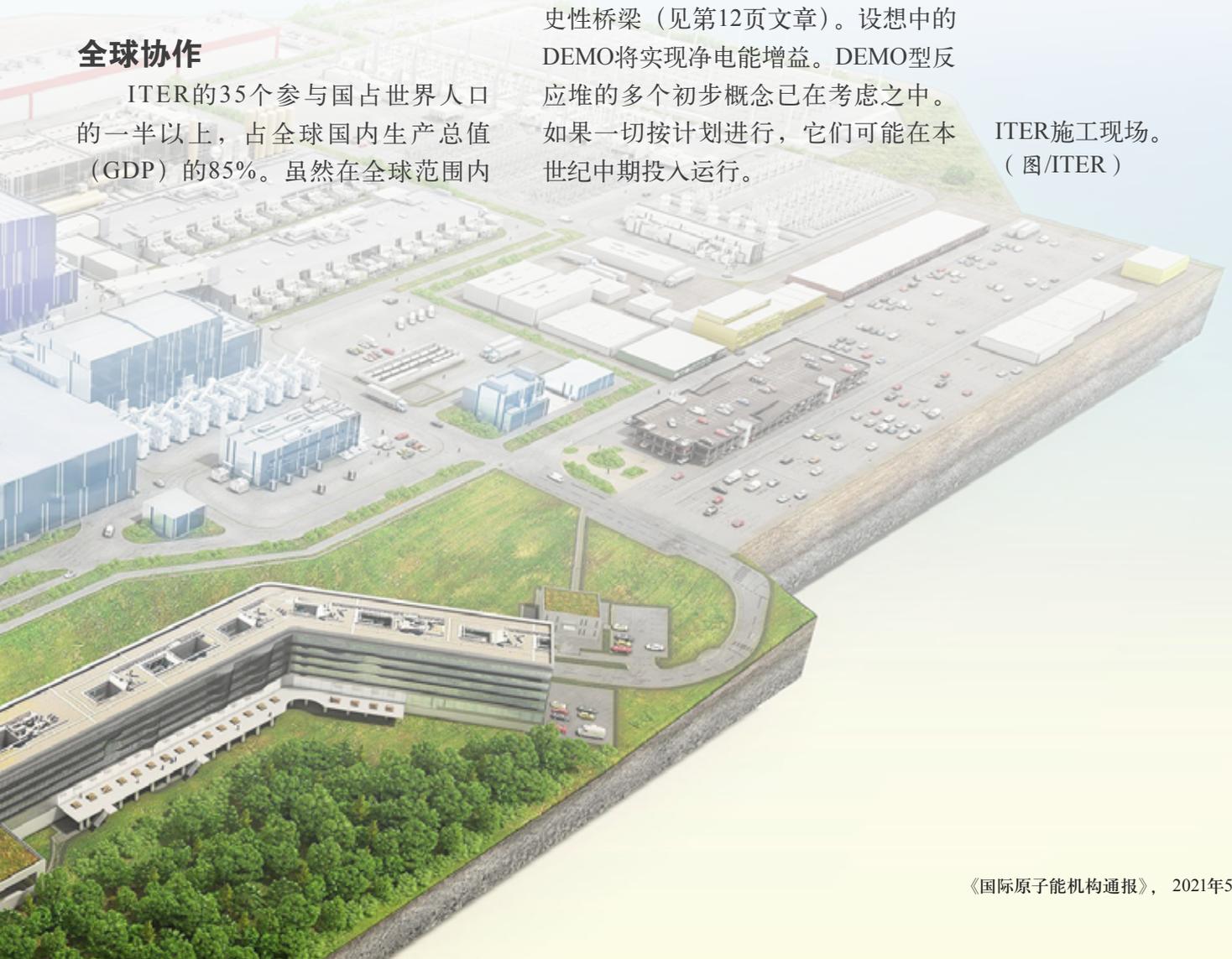
ITER的35个参与国占世界人口的一半以上，占全球国内生产总值（GDP）的85%。虽然在全球范围内

正在进行许多其他较小规模的聚变实验，但它们中的大多数仍然与ITER组织保持协调、合作或协作。

国际原子能机构和ITER组织从一开始就有着密切的关系，特别是在核聚变研究、知识管理、人力资源发展以及教育活动和外联方面。国际原子能机构还协助ITER组织与国际原子能机构成员国，包括未参与该项目的成员国分享他们在核安全和辐射防护方面的经验。今年，ITER组织将与法国原子能和可替代能源委员会一起，共同主办第二十八届国际原子能机构聚变能会议。

希望ITER将证明聚变发电的科学和技术可行性，并根据其分阶段研究计划，在2025年开始进行首次实验。全功率实验将在2035年开始。如果成功，这些发展将是一个重要的里程碑，并将代表实验研究和第一座核聚变示范电厂（或称DEMO）之间的历史性桥梁（见第12页文章）。设想中的DEMO将实现净电能增益。DEMO型反应堆的多个初步概念已在考虑之中。如果一切按计划进行，它们可能在本世纪中期投入运行。

ITER施工现场。
(图/ITER)



核聚变示范电厂 通往大规模商业发电的石阶

文/Irena Chatzis 和 Matteo Barbarino

ITER是世界上最大的核聚变实验装置，其目的是证明如何通过聚变反应获得净能量。证明聚变能可以产生净电力将是下一个重要步骤。这就是核聚变示范电厂（或称DEMO）将起到的作用。

DEMO型反应堆更像是概念设计，而不是特定的聚变装置构型。一些国家正在开发公共资助的DEMO的初步设计，但尚未最后确定。这将在ITER实验的结果出来后进行。

DEMO计划几乎连续运行，才能产生超过50兆瓦的净电力增益。它们将开始解决的关键挑战是如何使聚变等离子体保持足够长时间的稳定性，以便持续地产生能量。

虽然关于DEMO的很多事情仍未决定，但一种公认的DEMO可能是托卡马克型反应堆，并将使用重氢同位素（氘和氚）作为燃料。然而，世界上可用的氚供应有限，DEMO本身将通过所谓的“增殖区”增殖和提取氚以供应足够的氚。国际原子能机构核聚变物理学家Shila González de

Vicente认为，还需要解决氚的燃料供应、耗尽、约束、提取和分离方面的挑战。

DEMO型反应堆和现有实验反应堆之间的另一个主要区别将是增加适当的系统和技术来捕获聚变能并将其转化为电能。

“DEMO型装置需要设计和整合复杂的部件和系统，而这些部件和系统并不是现有聚变实验装置的一部分。诸如氚增殖区、发电、燃烧控制等部件都是必需的。”英国原子能管理局技术主管Elizabeth Surrey说，“DEMO的运行条件对材料特别不利，因为燃烧的等离子体会在壁上产生高中子通量和高功率密度。DEMO需要开发新的材料和技术。”

国际原子能机构的作用

各国研究小组都在探索DEMO概念和方案。国际原子能机构通过一系列技术会议，以及自2012年以来，通过其DEMO计划定期讲习班，促进国际协调和最佳实践共享。这些平台促

“DEMO需要开发新的材料和技术。”

—英国原子能管理局技术主管Elizabeth Surrey



进对物理和技术问题的讨论，推动对 DEMO 计划战略的共享，以及分析潜在的行动方案。随着时间的推移，专题重点已从广泛的愿景转向必须克服的详细技术挑战。

在 2016 年至 2019 年期间担任了 DEMO 计划过去三次讲习班主持的 Surrey 说：“通过专注于确定问题和讨论正在进行的研究和发展，国际原子能机构技术会议系列和 DEMO 计划讲习班使业界能够以协作的方式确定要求和分析可能的解决方案。例如，当需要长时间或接近连续的等离子体运行时，等离子体控制成为 DEMO 型装置的一个主要问题。”

世界各地计划

尽管仍在探索实现聚变发电的各种途径，但需要解决的科学和技术问题已得到广泛认同。虽然每个国家有不同的时间表，但科学家们普遍认为，他们可以在 2050 年前建成并运行能够发电的 DEMO 型反应堆。

在中国，中国聚变工程试验堆（CFETR）计划已取得重大进展。该装置将有助于缩小 ITER 与 DEMO 之间的差距。中国聚变工程试验堆将在本世纪 20 年代开工建设，随后将在本世纪 30 年代建成 DEMO 型反应堆。

在欧洲，欧洲聚变联盟（EUROfusion）负责开发 DEMO 设计。该项目目前处于概念设计阶段（2021—2027 年），旨在通过产生几百兆瓦的净电力证明聚变的技术和经济可行性。

印度已宣布计划开始建造一个名为 SST-2 的装置，以便在 2027 年左右对 DEMO 的反应堆概念和组件作出鉴定，然后将在 2037 年开始建造 DEMO。

日本聚变 DEMO 特别联合设计小组目前正在进行稳态 DEMO（JA DEMO）的概念研究，计划在 2035 年左右开始建设。

2012 年，韩国启动了“K-DEMO”的概念设计研究，目标是在 2037 年之前开始建设，并有可能在 2050 年开始发电。在第一阶段（2037—2050 年），K-DEMO 将被用来开发和测试组件，然后利用这些组件。在其第二阶段，即 2050 年之后，预期它将演示净发电。

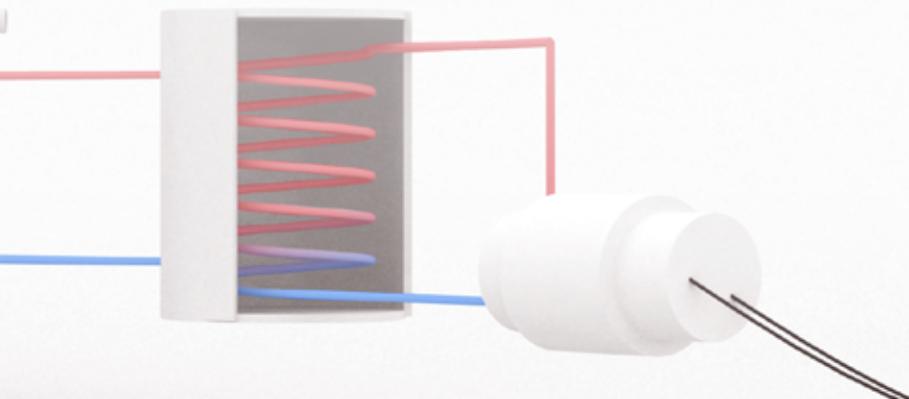
俄罗斯联邦正在规划一个名为 DEMO 聚变中子源（DEMO-FNS）的聚变-裂变混合装置，该装置将收集聚变产生的中子，将铀变成核燃料并销毁放射性废物。DEMO-FNS 计划在 2023 年前建成，是该国在 2050 年前建成核聚变电厂的快速战略的一部分。

美国的核聚变专家最近发布了两份报告，其中建议启动一项国家研究和技术计划，包括公私合作，以在 2035—2040 年最终实现核聚变的商业可行性，使美国成为核聚变领导者，并在 2050 年之前加速向低碳能源过渡。

与此同时，许多私人资助的商业企业也在发展核聚变电厂的概念方面取得了进展，利用多年来公共资助的研究和开发所产生的专门技术，并提出更加激进的时间表。

将聚变热量转化为热能和电力的核聚变电厂的艺术家的概念。

（来源/欧洲聚变联盟）



核聚变的安全性

固有的安全过程

文/Carley Willis 和 Joanne Liou

核裂变是从原子核分裂中获得能量，而核聚变则是通过将原子核结合而释放能量。虽然两种原子反应都是通过改变原子而产生能量，但它们的根本区别对安全却有广泛的影响。

启动和维持聚变反应所需的条件使基于链式反应的裂变型事故或核熔毁不可能发生。核聚变电厂将需要与众不同的条件——超过1亿摄氏度的温度，以达到发生反应所需足够高的粒子密度。国际原子能机构核聚变物理学家Sehila González de Vicente解释说，由于聚变反应只能在这种极端条件下发生，因此不可能出现“失控”链式反应。

聚变反应依赖燃料的连续输入，并且该过程对工作条件的任何变化都非常敏感。考虑核聚变反应几秒内就能停止，因此该过程本质上是安全的。“聚变是自限过程：如果人们无法控制反应，它会自行停止。”她补充说。

此外，聚变不产生高放射性、长寿命的核废物。“聚变只产生低放废物，不会造成任何严重的危险，”González de Vicente说。受污染的物项，例如防护服、清洁用品，甚至医疗管或拭子，都是短寿命低放废物，只要采取基本预防措施，就可以安全处理。

当前大多数实验聚变装置都使用氘和氚的混合物作为燃料。氚是氢的一种放射性同位素，半衰期为12.3年。González de Vicente说，核聚变反应的结果是释放中子，这些中子撞击反应堆堆芯周围墙体并被墙体吸

收，使墙体具有放射性。“中子与墙体中的锂发生反应，产生氦，然后被注入装置。”

然而，聚变和裂变装置确实有一些相似之处，例如在如何处理放射性物质以及如何使用冷却系统方面。“监管机构已在核裂变安全和安保领域拥有丰富的经验。我们正在与他们合作，以确保所有适用的知识转到聚变方面。”González de Vicente说，“然而，并不是所有的事情都能一一对应，核聚变的不同之处，例如放射性物质的数量和种类减少、不可能发生堆芯熔毁状况，以及不产生长寿命废物，都应该得到确认和解决。国际原子能机构正在协助促进这些努力。”

国际协作

ITER是世界上最大的聚变实验装置，它把来自35个国家的专家聚集一起，共同致力于实现聚变能源的目标，同时助力解决项目发展过程中的聚变安全和安保挑战。

通过把裂变方面的相关安全要求（例如国际原子能机构安全标准）适用于聚变，可以确保高度安全。例如，与核裂变反应堆一样，拟议的核聚变电厂也必须考虑剂量规定，并且装置设计应使最低剂量“合理可行尽量低”（ALARA）。然而，鉴于在事故风险方面的根本差异，为避免对聚变过程过度监管，采用分级方法是必要的。“所有现有安全标准的问题是，它们都是针对裂变的，”ITER组织安全和质量部副部长Stéphane Calpena说，“我们需要选取与聚变相关的标

准，并以与聚变风险相称的方式适用这些标准，以确保该技术不仅可行，而且确实安全。聚变是一种新的能源创造方式，而且很大程度上仍然是一项新兴技术。”

国际原子能机构正在协助促进这项技术，包括举行技术会议，使专家们共享知识，以帮助克服聚变方面的挑战，并确保聚变装置的安全。2020年11月由Calpena主持召开的国际原子能机构-ITER组织关于聚变安全和辐射防

护首届联合技术会议，重点讨论了制定用于确定聚变装置可能释入环境的放射性物质或危险物质的潜在类型和数量的方法，以及编制与国际原子能机构《安全标准丛书》第SSR-4号和第SSG-12号等同的聚变方面出版物。会议涵盖了诸如聚变装置的风险标准、设计和运行等专题。拟于2021年10月举行的“聚变废物管理讲习班”将研究如何对聚变能生产所产生的放射性废物进行分类和处置。

ITER的一个真空容器部分已安装——一个将有助于约束该装置等离子体的440吨重的部件。

(图/ITER)



国际原子能机构数据库如何助力推进聚变商用研究

文/Aleksandra Peeva

通过商业聚变利用核聚变丰富的能源潜力的前景，需要更好地了解等离子体（过热电离气体）和开发高性能反应堆材料。国际原子能机构数据库通过支持科学家研究等离子体行为并对聚变能研究中所用材料的特性进行建模，正在助力推进研究，以最终实现商业规模的能源生产。

发展聚变能的核心是实现并维持“聚变点火”——即聚变反应由自身产生的能量维持的那个点——所需的极端条件。这要求把实现反应所用的等离子体燃料在一个空间内约束足够长的时间，以形成聚变，并自加热到自持。

点火也要求工程师开发高性能的反应堆壁材料，能够承受以释放的热量和中子形式存在的稳定能量通量。这种能量会加热反应堆壁，而中子轰击会导致材料损坏——破坏反应堆壁材料的完整性，或导致材料溅射返回

等离子体并冷却它。

反应堆的材料还应该尽可能少地吸收氙——聚变燃料的氢同位素之一。吸收的氙燃料是反应的燃料损失。但更重要的是，氙具有放射性，为了尽量减少最终产生的核废物数量和放射毒性，反应堆壁最好不要吸收氙并在这个过程中变得具有放射性。

探索等离子体行为

深入了解等离子体在反应堆中的行为对于增加等离子体被磁力约束的时间是必要的。国际原子能机构数据库载有堆芯等离子体和边缘等离子体中以及为实现点火用来加热等离子体的中性束注入系统中发生的各种过程的信息，还包含为诊断目的和缓解不稳定性而故意注入等离子体的各种杂质性质的数据。

国际原子能机构的ALADDIN数据库是一个可搜索存储库，其中存储了

“只有通过从精确的计算和实验中得到的可靠数据，才能预测候选材料的相关性能。”

——国际原子能机构原子和分子数据科科长Christian Hill

核聚变相关过程的评估碰撞数据。该数据库被研究界用来进行等离子体诊断和了解重要的等离子体参数，例如温度和密度。利用ALADDIN数据库，科学家们可以更好地了解对于可靠的等离子体诊断至关重要的离子碰撞-辐射特性。

聚变材料建模

由于缺乏复制聚变反应堆极端状况的装置，因此为未来聚变电厂制造新材料变得十分复杂。利用计算建模技术、高性能计算平台和分析实验表征工具，专家们可以设计出能在聚变能环境中性能良好的材料。

通过建模，正在发现一些新材料，同时可以预测现有材料的可靠性。这对反应堆的最内壁尤其重要，因为它位于反应堆容器中最接近等离子体的位置，可以保护容器部件免受等离子体引起的损害。

“核聚变反应堆第一壁的极端环境要求谨慎地选择材料，这些材料必须能够承受高温和粒子轰击，而不会被侵蚀、变脆或具有放射性，也不会保留氢燃料。”国际原子能机构原子和分子数据科科长Christian Hill说，“只

有通过从精确的计算和实验中得到的可靠数据，才能预测候选材料的相关性能。”

研究人员利用国际原子能机构数据库开展聚变能研究和其他等离子体科学技术应用。数据由国际原子能机构通过其网络、协调研究项目和技术会议收集和评估，并通过国际原子能机构免费、可搜索和精选的在线数据库分发。

“一个精心策划的国际数据库的价值在于它作为一个永久、可依赖和可访问的评估数据库的作用，可供聚变界自由使用。国际原子能机构原子和分子数据科在其他方面也是独一无二的：它已存在40多年，在‘聚变数据年头’上算是相当老了。”Hill说。

国际原子能机构的数据库根据研究人员的具体数据需求不断改进和扩大，包括数据中不确定性的量化和影响，以及数据验证、策划和传播技术。

可在下列网址访问国际原子能机构维护的所有聚变相关数据库：amdis.iaea.org。

对导致晶体材料损坏的一连串碰撞的可视化图。

(图/阿尔托大学Andrea Sand)

燃烧等离子体 迈向核聚变发电的关键石阶

文/Matteo Barbarino

在我们的太阳核心，极端的温度和巨大引力所产生的巨大压力为核聚变创造了理想的条件。

然而，在没有恒星的极端引力的情况下，通过核聚变反应堆在地球上重现这种情况，会带来许多技术挑战。其中最大的挑战是将加热的聚变等离子体（由离子和在其中发生反应的自由电子组成的带电气体）保持在1亿摄氏度以上，将其粒子约束在一个磁场中，并保持足够长的时间，以便发生反应并产生能量。

了解和验证目前关于这种热核聚变等离子体的行为方式的假设，是聚变科学家和工程师为最终从核聚变产生电力而必须解决的关键问题之一。

温度比太阳更高的超级燃料

聚变的燃料选择是有限的。地球上性能潜力最大的燃料是由氘和氚离子的混合物制成的，氘和氚离子是氢的两种较重同位素。当在极端温度下碰撞时，氘和氚融合产生带有两个质子和两个中子的带电粒子，称为 α 粒子，以及自由中子。虽然中子逃离磁场，并且不与等离子体发生作用，但 α 粒子被磁场约束，并

进一步加热周围的等离子体。澳大利亚国立大学Matthew Hole教授说：“控制这种加热对利用核聚变发电至关重要。”

安全和可持续的聚变动力依赖这些带电 α 粒子及其能量来维持等离子体的恒定温度，从而使反应能够自持。实现这一点对于运行聚变反应堆至关重要。

20世纪90年代，聚变实验堆在不到一秒内产生了16兆瓦的能量。在这些实验中， α 粒子只提供了外部供热的10%。将通过ITER——正在法国建造的国际实验反应堆（见第10页文章）——之类的计划，探索了解 α 粒子提供更多热量时发生的情况。

“ITER将为我们提供研究‘燃烧等离子体’的机会，燃烧等离子体中至少66%的总加热量将来自聚变 α 粒子。在这些条件下，ITER将产生500兆瓦的聚变能量，持续时间长达500秒。”ITER组织科学司司长Alberto Loarte说。他说，ITER组织的实验将为燃烧等离子体物理学中的关键问题提供急需的答案，例如如何创造通过其 α 粒子的内部加热而自持的等离子体，以及如何为高聚变性能找到与反应堆壁的功率处理能力相适应的最佳运行条件。

“ITER将为我们提供研究‘燃烧等离子体’的机会，燃烧等离子体中至少66%的总加热量将来自聚变 α 粒子。”

—ITER组织科学司司长
Alberto Loarte

如何使等离子体自持

聚变反应堆性能的一个重要指标是它的“聚变功率增益”。它由等离子体的温度、密度和能量约束时间决定，是衡量磁场随着时间的推移如何有效地维持等离子体能量的一个量度。创造自持反应需要三个条件：大约1亿摄氏度的温度；比空气小一百万倍的密度；只有几秒钟的能量约束时间。

虽然所需的条件已被充分理解，但如何同时达到这些条件却远非显而易见。例如，增加等离子体密度在原则上是有利的，因为它增加了发生聚变反应的可能性。然而，美国普林斯顿等离子体物理实验室负责聚变的副主任Richard Hawryluk认为，当密度接近其最大值时，许多实验表明，等离子体约束的退化程度超过了预期。

为使ITER实验成功，需要找到解决这些问题的方案，而为此进行的许多研究需要国际合作。国际原子能机构通过其关于高能粒子物理、等离子体控制和聚变数据获取、验证和分析的一系列技术会议，为交流科学和技术成果提供了一个平台，并正在帮助开发可用于预测ITER和未来聚变动力堆中聚变等离子体行为的建模工具。

找到“最佳点”

最大的挑战之一是找到具有最大聚变功率和等离子体控制的最佳工作条件，以便在长时间内不打破运行边

界的情况下实现高性能。打破运行边界会产生问题，因为它可能导致不稳定，从而终止等离子体，这种现象被称为等离子体破裂。

“在像ITER这样的环形托卡马克型反应堆中，破裂可能会在几毫秒内迅速终止等离子体，并对反应堆部件产生巨大的热应力和机械应力。”ITER组织稳定与控制处科学协调员Michael Lehnen说，“国际原子能机构正在通过促进这一领域的实验、理论和建模工作的信息交流，帮助避免这种情况，同时特别强调将在今后几年为设计ITER破裂缓解系统奠定坚实的基础。”

最近纳入基于人工智能方法的实验和建模工作正在明确有效等离子体控制的要求，这有助于为未来聚变电厂的安全设计和运行铺平道路。”麻省理工学院等离子体科学与聚变中心研究科学家Cristina Rea说：“应用于破裂研究的强大的高级统计学和机器学习方法，可以帮助识别重要的模式，并揭示多年的实验数据中隐藏的信息。”

控制物理学家、建模师、场景开发人员和数据工程师之间正在形成富有成效的协同作用，他们正在设计新的解决方案，以避免这些破坏性的界限。Rea说，虽然评价这些数据驱动方法在ITER等项目中的适用性还需要开展更多的工作，但迄今的结果是令人鼓舞的。

高能粒子以等离子体的形式流过托卡马克型反应堆的可视化图。

(图/Shutterstock)

缩小核聚变的材料和技术差距

文/Matteo Barbarino

地球上最具挑战性的科学和工程尝试可以说是聚变。建造一座核聚变反应堆，实现自持反应，并将这种能量转换为几乎取之不尽的电力，将永远改变人类和我们与能源的关系。尽管这听起来很诱人，但进展并不容易或顺利。围绕支撑这种复杂装置所需的结构、燃料和材料的技术挑战仍然只得到部分解决。

了解当今聚变能源所面临的技术限制和知识差距，首先要研究聚变反应堆本身。

在托卡马克反应堆内（见第6页文章），超高温的电离气体或“等离子体”被加热到超过1亿摄氏度，以诱发核聚变反应。在强大磁场的约束下，反应堆壁被保护起来，免受多变等离子体的影响。

核聚变中使用的等离子体通常由氢的两种重同位素——氘和氚——组成，然后聚变产生氦和中子。在核聚变电厂中，工程师们希望通过尚未测试的锂增殖区屏蔽层，对聚变产生的中子作出反应，“增殖”或创造更多

的氦。

英国原子能管理局首席执行官Ian Chapman解释说：“聚变所产生中子的能量对聚变电厂第一壁和真空容器构成严重挑战，这意味着需要考虑辐射损伤、生物屏蔽、远程操作和安全等问题。”

工程师的主要任务是开发能够承受高温和反应产生的强中子注量的高性能材料。了解运行条件对面向等离子体的部件的影响，对于未来的大型核聚变电厂也是至关重要的。

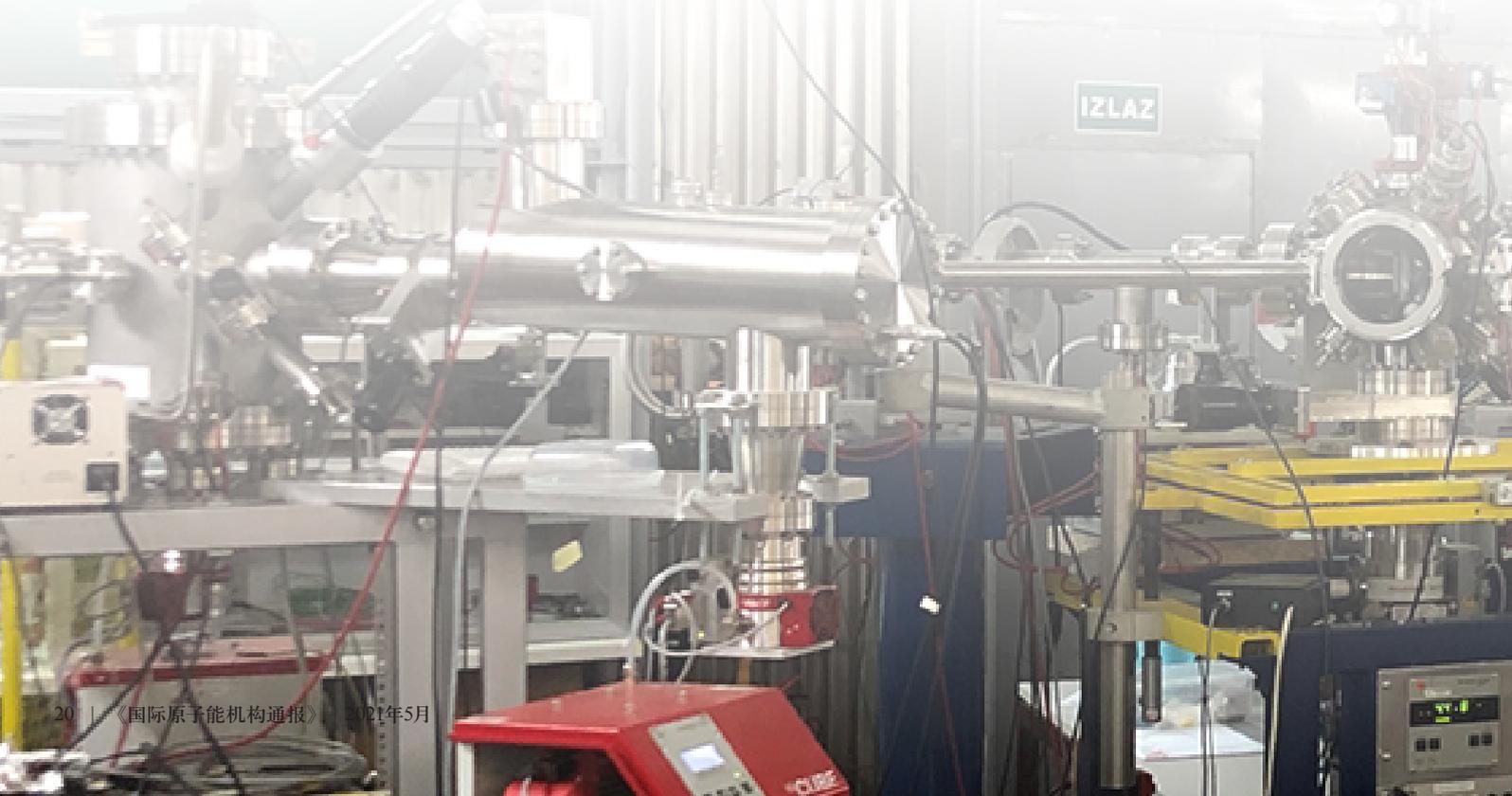
为极端情况而制造的材料

创造能够承受中子降解的结构性和面向等离子体的材料是研究人员的首要任务。这些材料需要安全特性，例如低中子诱导的放射性，以尽量减少放射性废物的产生。然而，目前缺乏在其中可以测试辐射降解机制并在必要条件下开发和鉴定材料的专门聚变辐照装置。

国际原子能机构通过协调起草基准材料测试技术的导则，并通过弥补

在国际原子能机构的支持下，在克罗地亚的鲁德·博斯科维奇研究所安装了“氦离子源和DiFU双束设施”。

（图/国际原子能机构）



设计聚变反应堆材料和部件测试设施方面的知识差距，正在协助解决与聚变材料开发和研究有关的问题。

“在国际原子能机构的支持下，2019年在克罗地亚鲁德·博斯科维奇研究所安装的双束离子装置等技术可以模拟材料在聚变反应堆中所暴露的条件。这些条件包括产品嬗变和模拟高能聚变产生的中子和粒子产生的损害。”国际原子能机构物理和化学科学司司长Melissa Denecke说。

反应堆中等离子体与反应堆容器直接接触的主要部件被称为“偏滤器”，科学家和工程师正在研究其最佳构型，以便它更好地处理所遇到的热通量。他们还利用从各种辐照实验和模拟工具中获得的知识 and 数据，为包括偏滤器在内的所有容器内部件开发和验证一个反应堆设计标准框架。

极热排除

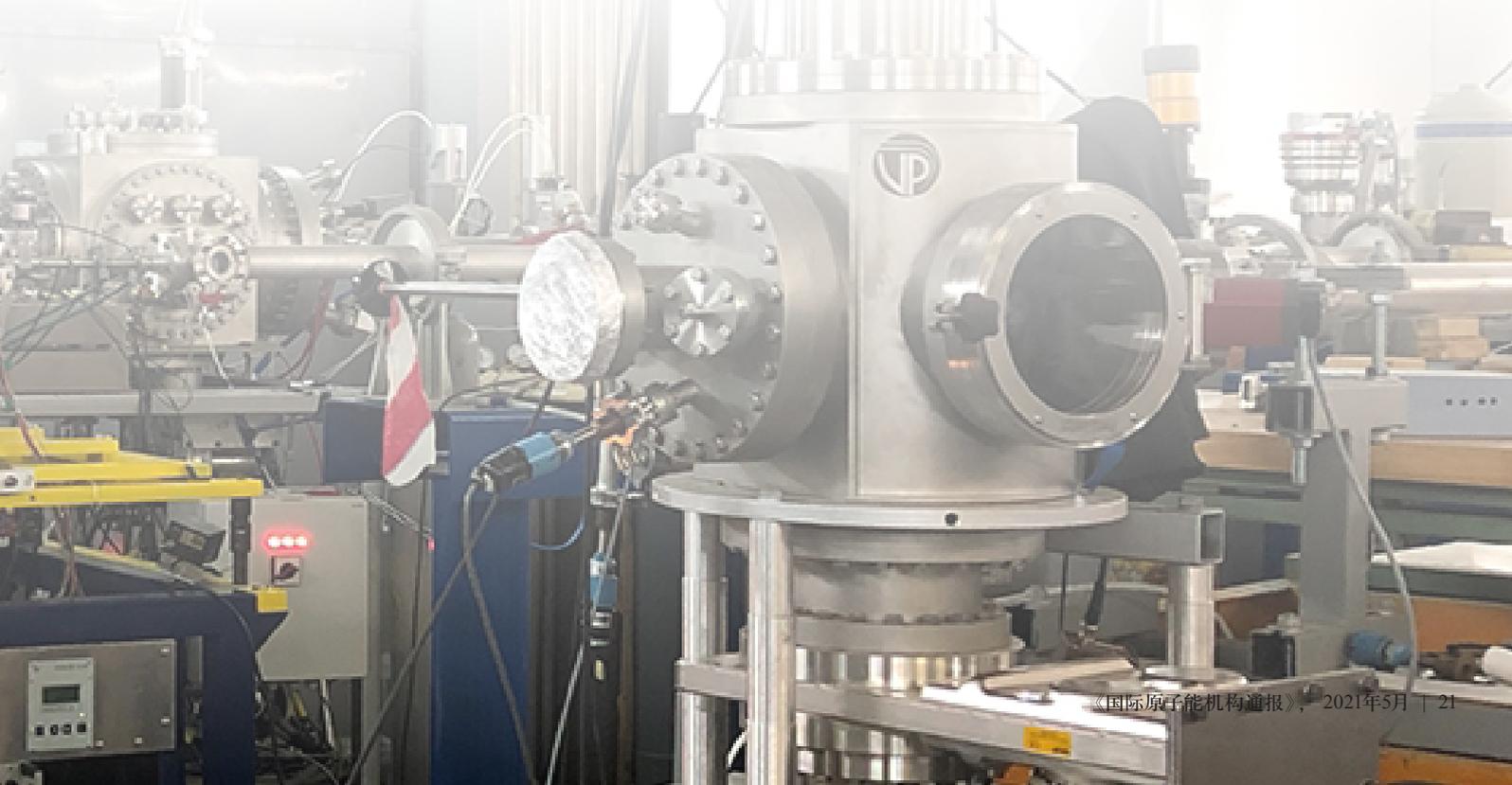
在大多数设计中，偏滤器位于反应堆的最底部，氦“灰”等杂质被偏滤到这里，偏滤器充当聚变反应堆的“排除管”，是任何过量热量被引导到的地方。这种构型有助于产生具有更好能量约束的“更纯净”的等离子

体——这是核聚变装置性能的一个关键参数，确保等离子体在足够长的时间内保持足够的温度，以便能够发生持续的核聚变反应。

在世界最大的聚变实验装置ITER中，偏滤器将由54个“箱体”组成，每个盒体重达10吨。箱体所处的条件将非常苛刻；面对每平方米10~20兆瓦的稳定热通量，部件暴露在1000~2000摄氏度的温度下，箱体将需要在装置的寿命期内通过遥控操作至少更换一次。为了应对极端的热量和破坏性的粒子，面对等离子体的部件将用钨装备，这种材料既具有低氦吸收率，又是所有自然元素中熔化温度最高的。

“尽管ITER的偏滤器设计从物理学和技术的角度反映了我们当前认识和能力的最新水平，但未来的核聚变电厂还需要进一步的发展。了解这些是ITER项目的许多重要任务之一。”ITER组织实验和等离子体运行处处长Richard Pitts说。

设计和建造未来的聚变反应堆将取决于ITER和其他完善的多国协调研究和开发活动的技术、工艺和材料成果，但我们与核聚变动力的未来之间的距离每天都在不断缩小。



通过核聚变研究与合作将各国团结起来

文/Elodie Broussard

作家诺曼·文森特·皮尔曾经说过：“上天揽月吧！即使失败，你也会跌入繁星之中。”说到核聚变，科学家们正在向星星进发，他们在试图探索是否有可能在地球上实现工业规模的聚变发电。

在全球范围内，约有50个国家的专家在致力于等离子体物理学和核聚变技术的发展研究。面对迅速增长的能源需求和因燃烧化石燃料而加速的气候变化，其中许多国家正在努力加强其聚变研究计划。

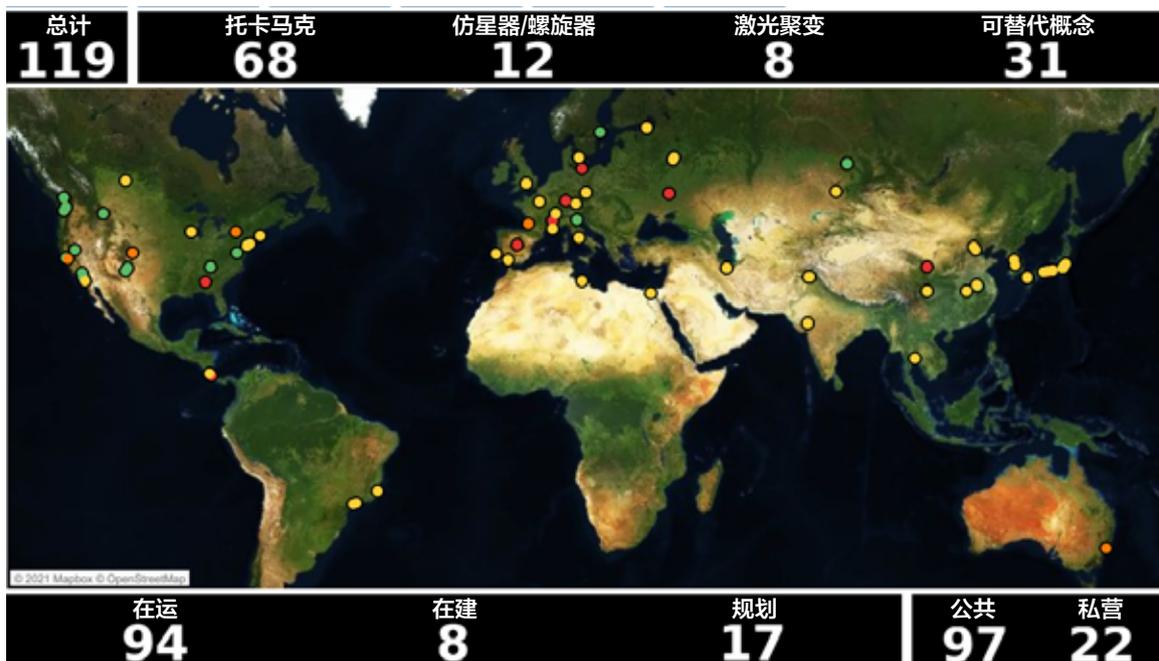
为了促进正在进行的国际努力，国际原子能机构向其成员国提供了一系列研究和能力建设活动，有时在地区一级提供，以帮助缩小各国之间在核聚变知识和经验方面的差距。

在过去的50年里，国际原子能机构通过组织各种与聚变有关的论坛，包括两年一次的“国际聚变能源会议”，支持全世界聚变研究和发展的。国际原子能机构还组织一系列关于示范核聚变电厂概念的讲习班、一系列

关于核聚变科学技术相关主题的技术会议以及协调研究活动，通过这些活动，国际原子能机构将各研究机构和科学家们聚集起来，解决共同关注的关键问题。

通过其关于聚变的出版物，例如《核聚变》杂志和其他丛书，国际原子能机构传播知识和信息，并协助促进先进知识在科学界的传播。除了维护一个核聚变门户网站和一个核聚变装置数据库外，国际原子能机构还建立了基本分子和核数据的数字数据库，这些数据对于核聚变研究和技术发展是不可或缺的。国际原子能机构还与许多合作伙伴协作，组织和支持关于聚变的教育和培训活动，包括国际和地区短训班和讲习班。

作为全球核聚变领域的新成员，哥斯达黎加得到了国际原子能机构的支持，以通过技术发展和能力建设弥补其与其他国家的差距。2019年，哥斯达黎加技术研究所国际原子能机构的支持下组织的一次讲习班，使来



目前有100多个核聚变装置（包括公共的和私营的）正在运行、建造或规划。

（来源：国际原子能机构核聚变装置信息系统）



2018年捐赠给泰国的HT-6M托卡马克是该国聚变路线图的一个主要支柱。

(图/中国科学院等离子体物理研究所)

自拉丁美洲国家的参加者有机会参加了联合实验和在操作该研究所托管的两个小型聚变装置方面获得培训。

加强核聚变领先者与捐助国之间的联系

六个国家和欧盟通过欧洲原子能联营正在世界最大的核聚变实验装置ITER方面开展合作。ITER正在法国进行建造(见第10页文章)。

“对于不属于ITER项目的国家，国际原子能机构发挥了重要的桥梁作用，将ITER知识传播给更广泛的群体，反之亦然。它通过技术会议、讲习班、短训班和电子学习材料来实现这一目标，ITER专家为所有这些活动作出了贡献。”国际原子能机构物理处处长Danas Ridikas说。

激励东南亚新一代

自2014年以来，东南亚国家联盟(东盟)等离子体与核聚变短训班一直是为在泰国启动聚变计划和推进该地区聚变研究而开展的关键活动之一。2020年1月，国际原子能机构和ITER为该短训班促进青年人才与国际领先研究人员之间的互动提供了支持。”泰国核技术研究所国际合作部负责人Kanchalika Dechates说：“国际原子能机构提供了专家，他们分享了知识和经验，极大地鼓舞了年轻一代。”来自该地区80多名年轻研究人员

参加了这次短训班。

为了加强发达国家与发展中国家研究团队之间的培训和协作，自2004年以来，国际原子能机构牵头实施了一个关于中小型聚变装置的协调研究项目，该项目汇集了来自19个国家的研究人员。泰国宋卡王子大学助理教授Boonyarit Chatthong说：“这个项目为泰国研究人员与全世界众多专家会面和合作提供了机会。”

这种长期合作关系使得有可能进行联合和比对实验，对不同机构和国家的人员进行培训，以及为新一代聚变科学家提供前沿理论和技术教育。“随着泰国将在不久的将来拥有其有史以来的首个聚变装置，这个项目将使我们能够开始自己的聚变计划。”Chatthong说。

在泰国建造一个托卡马克实验装置(见第6页文章)是该国核聚变发展计划的核心活动。它将是东盟运行的第一个核聚变装置，也是泰国和东盟研究人员的一个重要学习平台。

2018年，国际原子能机构为泰国科学家和工程师参加在印度举行的国际原子能机构聚变能源会议提供了资助。这一年，一名泰国研究人员还成为意大利国际理论物理中心-国际原子能机构等离子体物理联合学院的一员，该学院聚集了来自23个国家的约70名高级博士生、博士后研究人员和其他年轻研究人员，促进了国际协作。

“随着泰国将在不久的将来拥有其有史以来的首个聚变装置，这个项目将使我们能够开始自己的聚变计划。”

—泰国宋卡王子大学助理教授Boonyarit Chatthong

核聚变在社会需要时就会准备好

文/ Michael Amdi Madsen

自20世纪20年代以来，科学家们一直在吹捧聚变能的潜力，但直到最近，商业聚变仍是一个遥远的梦想。为了更好地理解为什么经过几十年的研究，核聚变仍未成为全球能源结构的一部分，以及为什么这种情况将发生变化，我们采访了核聚变行业协会英国理事、托卡马克能源公司宣传顾问以及《聚变能源洞见》创始人Melanie Windridge。

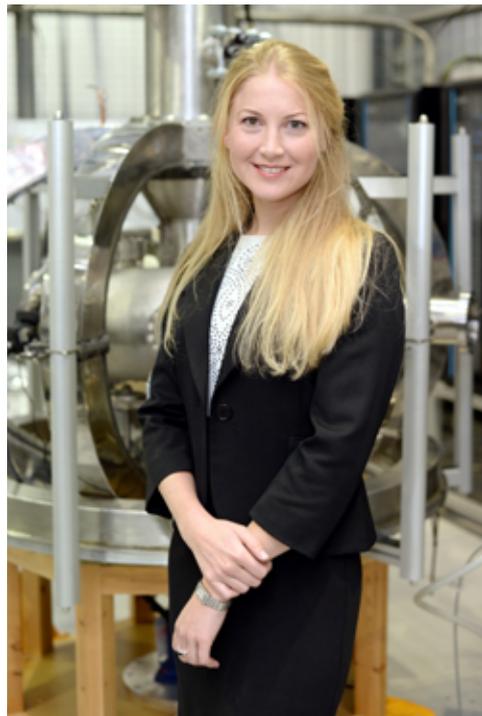
问：有一个老笑话，说“核聚变是永远属于30年后的技术”，这是真的吗？

答：虽然这是一个经典的核聚变笑话，但有点悲哀，因为在现实中，正在取得进展。今天，各种因素共同加速了核聚变的发展。首先，科学已成熟——我们现在对等离子体物理有了很好的理解，托卡马克等概念已实现核聚变反应。除此之外，还出现了新技术，例如改善等离子体模拟和建模的高性能计算，优化和控制操作的人工智能和机器学习，以及可以产生更强的磁场以更好地约束聚变燃料的高温超导体。今天，更强大、更高效的激光可以促进惯性约束核聚变，制造业的进步可以有助于降低实验和未来电厂的成本。

重要的是，现在公众对气候解决方案更加感兴趣，各国政府正在制定零排放目标。还有就是聚变私营部门，迄今已吸引大约20亿美元的投资。核聚变行业协会现在已发展到约25个会员，甚至石油和天然气公司也开始对核聚变表现出兴趣。

问：为应对气候变化，许多国家的目标是到2030年实现大规模脱碳，到2050年实现碳中和。核聚变会不会来得太晚而无法有所作为？

答：俄罗斯物理学家Lev Artsimovich曾说过，“核聚变在社会需要时就会准备好。”我认为这是真的。理想情况下，我们在30年前就解



“即使核聚变不能及时上线，为2050年的目标作出贡献，在本世纪后半叶能源需求甚至更大的时候，它还是会被需要。”

—核聚变行业协会英国理事Melanie Windridge

决了核聚变问题，今天它就可以推出了。但过去的条件不适合核聚变，也没有合适的动力或可能性。

因此，即使核聚变不能及时上线，为2050年的目标作出贡献，在本世纪后半叶能源需求甚至更大的时候，它还是会被需要。但我们现在需要大力推动，目标是在2050年前将核聚变纳入电网。

问：你认为哪些障碍会阻碍该技术的发展，如何避免这些障碍？

答：我们必须克服各种各样的挑战，它们会出现在不同的阶段。首先，从聚变反应中获得的能量比我们投入的要多。我们把这个里程碑称为“盈亏平衡”。在超过这个盈亏平衡点之后，我们需要建立一个能够发电的中试厂。一旦成功，我们就可以计划进行商业推广。

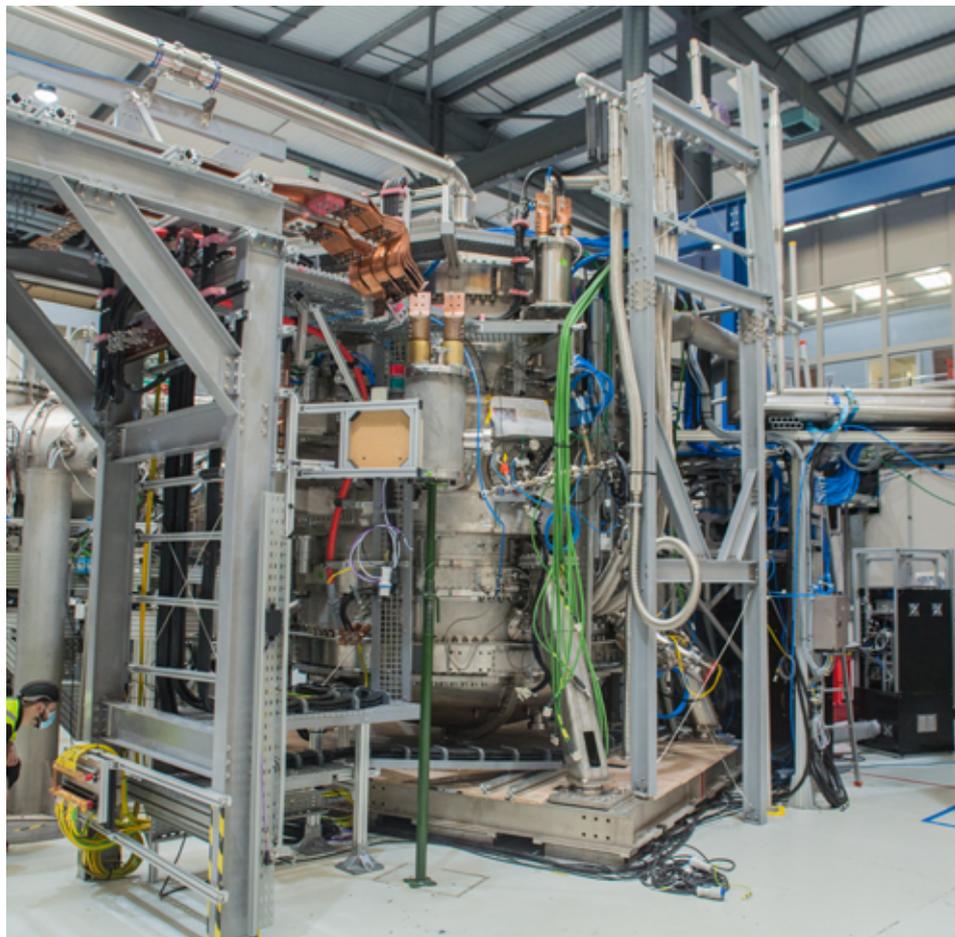
在盈亏平衡和首次发电之间存在着一些技术障碍，例如如何提取能量和增殖更多的氘燃料。核聚变的环境对材料的要求也很高。如果你使用超导磁体以及强磁场，它需要极热和极冷。然而，高能中子是最成问题的，因为它们对材料的破坏性很大。因此，我们很可能不得不不时地更换电厂的某些部件，因此我们需要设计一种能够快速、方便和经济地完成这项工作的装置。

除了物理学和工程学之外，核聚变界还需要与政府讨论监管问题，以便当我们准备建造时，不会出现许可证审批方面的障碍。最后，还有公众接受的问题，确保公众也加入到发展核聚变的行列。我们需要考虑所有这些问题，现在就开始讨论。而且，事实上，我们正在这样做。

问：今天，将近8亿人生活在没有可靠电力供应的情况下。核聚变对这些人来说是一个解决方案吗？该部门正在做些什么来让发展中国家参与进来？

答：在1985年日内瓦著名的里根与戈尔巴乔夫“炉边会谈”首次提出国际核聚变项目ITER设想时，他们说希望核聚变造福全人类，而这仍然是目标。ITER正在计划一项对所有国家开放的教育计划，目的是建立未来的核聚变工作人员队伍。如果我们计划在全世界推广核聚变，这将是非常重要的。

公私合作现在已开始形成，这将有助于降低成本和分担风险。在发展



中国家，这种公私合作将尤其重要，并可能需要政府间援助。

由私营托卡马克能源公司建造和运行的ST40托卡马克。

(图/托卡马克能源公司)

问：物理学和核能是典型的男性主导的领域。我们在核聚变方面正在做些什么来确保一个性别更加平衡的行业？

答：人们早就意识到物理学和核聚变领域的性别失衡，也有过一些改变这种失衡的举措，但这将是一个缓慢、多代人的过程。

近20年来，我一直在参与旨在试图改变性别观念的倡议。在一些大型实验室里，他们正积极尝试通过旨在提高多样性和创建网络以增加包容性的计划来解决性别问题。对于规模往往很小的私营公司来说，这更具挑战性。

不过，这不仅是实验室能做的，也是我们作为个体能做的。我最近在Instagram上创建了@womeninfusion，以展示从事该领域工作的女性，帮助鼓励下一代女孩追求物理。

借鉴登月计划和发射成功的经验 为什么核聚变需要企业和初创企业

文/ Simon Woodruff



西蒙·伍德鲁夫是美国伍德鲁夫科学公司的创始人和总裁，该公司根据与私营和公共机构的合同，研究和开发聚变技术，以加速经济聚变能源的发展。伍德鲁夫活跃在核聚变界，每年为本科生举办一次科学计算训练营，组织了聚变能科学国家讲习班，目前是国际原子能机构关于紧凑型聚变中子源和私营聚变发展的两项倡议的参与者。

私营核聚变发展的基本前提是，有许多商业化途径，企业家可以补充政府的计划。我们只需看看航天发射行业就能说明这一点。由美国政府实施的一系列巧妙的公私合作计划使航天发射的成本得到了全面节省。太空探索技术公司 (SpaceX)、蓝色起源 (Blue Origin) 和其他公司已展示如何做到这一点。

私营“核聚变初创者”也有类似的想法，他们会问：我们怎样才能让东西更便宜？我们如何利用材料、技术和人工智能的最新创新实现可行性？我们如何降低总资本成本和电力成本，使核聚变系统能够与联合循环天然气竞争？

自从1999年我在劳伦斯·利弗莫尔国家实验室做博士后以来，我一直在密切关注私营核聚变企业的故事。美国能源部实施了一个名为“创新约

束概念”的小型计划，该计划寻求更简单、更容易设计的核聚变概念。我帮助组织了一系列“创新约束概念”讲习班，与私人开发的核聚变概念有着健康的重叠。就在离利弗莫尔不远的路上，当时称作三阿尔法能源公司 (Tri-Alpha Energy) 的TAE技术公司正在建立并开始运作；在加拿大温哥华那边，通用聚变公司 (General Fusion) 正在起步，而在英国，当时称作托卡马克解决方案的托卡马克能源公司也正在成立。

2004年，我离开了劳伦斯·利弗莫尔，跟随他们的步伐，看看我们是否能真正加快实施核聚变能源系统进入商业市场的步伐。在此后的22年里，这些聚变“登月计划”总共筹集了超过15亿美元的资金来实现他们的概念，一个新兴的核聚变产业已经兴起来支持这些努力。

私营核聚变企业是乐观的——往往是令人眼花缭乱的。正是创业精神和先进技术的结合，让他们在其他行业的首席技术官和首席执行官中获得了近乎崇拜的地位。但不得不说，希望无处不在。许多私营核聚变初创者最初是在政府计划中起步的，有着20多年的发展前景，但现在却在讨论“现金中立”问题，并在一个“散乱”的创业生态系统中自力更生。他们的部分支持来自美国先进研究计划署能源部门，该部门通过一系列小型计划，例如ALPHA、BETA、GAMOW和OPEN，以及我认为未来更多的计划，努力跨越传统实验室工作与行业之间的鸿沟。

从技术到市场（T2M）现在也是核聚变面临的问题。人们经常讨论“退出”：初创企业是否被收购，是否上市，是否出售知识产权？我们能在投资基金的有效期到期之前做到吗？

自从离开劳伦斯·利弗莫尔后，我有幸在私营核聚变企业开创事业，从加利福尼亚州格拉斯瓦利谷的一家声聚变初创企业到麻省理工学院的一家衍生公司，在A轮投资中筹集了惊

人的2亿美元。显然，人们对碳中和和现金中立都重新产生了兴趣。每个企业家和企业都有不同的技术方案（但普遍来说，规模越小越好），对其商业化计划的想法也略有不同——一些人热衷于“登月计划”，所有的努力都集中于率先在市场上推出可发电的产品。但是，“登月计划”（全世界可能共有20个）只占提供支持核聚变的产品和服务的小企业生态系统的一小部分。

在美国，有一个小企业创新研究资助计划，支持数百家从事与核聚变有关的工作；无论是制造点火器或电容器，还是进行模拟，开发用于增材制造的新型材料，或研究新型诊断技术。小企业的管理费用比大实验室低。它们很灵活，可以进行调整——一年提供一个系列的产品，下一年就提出一套不同的解决方案。它们还具有创新性，牢记最重要的问题并找到解决方案，以及专注于可能最终使聚变能进入市场的东西。

总之，核聚变的现在包含聚变初创企业和小企业。小企业的未来是光明的！

高能粒子流经托卡马克反应堆的效果图。

（图/Shutterstock）



由国际原子能机构支助开发的水处理装置使约旦含水层的水能够安全饮用



水处理装置于2020年12月完工，有助于利用较老的砂岩地下水含水层。
(图/约旦水务局A. Al-Sayaheen)

在约旦，缺水问题日益令人关切，在国际原子能机构支助下开发的一个新的地下水处理装置不久将开始向该国南端亚喀巴省的数千户家庭输送优质饮用水。这是约旦的第一个此类试验处理系统，其工作原理是从地下水中清除天然存在的放射性核素，使约旦水务局能够利用以前未使用的含水层，减少对现有水源的压力。

由于低降水率的半干旱气候，以及人口的不断增长，约旦是世界上人均淡水供应量最低的十个国家之一。据世界卫生组织东地中海区域办事处预测，这种情况预计进一步恶化，除非采取有效措施，否则到2025年，约旦

将进入“极端缺水”状态。

其中一项措施是开采较深、较古老的地下水资源，例如拉姆含水层，该含水层被砂岩包围，含有大量不可能显示任何人为污染的优质淡水。然而，砂岩往往含有较高浓度的天然存在的放射性核素（主要是镭），这可能对水的消费者造成危险。

在国际原子能机构技术合作计划的支持下，同位素分析和废物技术专家帮助约旦专家测量和监测从拉姆含水层提取的地下水样中镭的浓度，并探讨水处理的若干方案。

根据水分析结果后，在水井附近建造和安装了水处理装

置。处理装置通过添加水合氧化锰过滤水，然后将水导入一系列陶瓷过滤器，从而将放射性核素浓度降低到符合约旦标准的水平。

在泵和测量装置等第一批基本部件到达后，水处理设备的组装工作于2020年2月开始，土建工程和施工于次月开始。到2020年12月，处理装置已完工，可供当地配水机构亚喀巴水务公司使用。新装置每小时可处理40立方米即每秒12.5升的水，可为大约2000人提供足够的水。

约旦水务局研究和技术服务部主任Amal Al-Sayaheen说：“我们正计划在亚喀巴市以及在安曼省南部地区一个名为Khan Alzabib地方的新地下水井建立更多的水资源处理装置。

地壳中的所有物质都含有天然存在的放射性核素。它们分散在岩石和土壤中，通常处于低放射性浓度。然而，它们会渗入地下水，并因此渗入来自地下水源和泉水的饮用水。”协助约旦开展该项目的原子能机构环境治理专家Horst Monken-Fernandes说：“放射性核素的存在可能需要仔细分析，以了解与饮用这些

水有关的放射性风险。”

饮用水中的放射性是世界上许多国家面临的一个问题。最近，原子能机构在“管理工业中天然存在的放射性物质国际会议”的范围内组织了一次题为“地下水360°”的讲习班，探讨了与地下水中天然放射性核素存在有关的各个方面。

科学

中东砂岩盆地地下水水质大多较高。然而，由于其成分，砂岩往往含有较高放射性浓度的天然存在的放射性核素。就约旦而言，这些盆地中天然存在的镭含量以及这些放射性核素的致癌性可能会损害该国地下水的水质。

文/ Omar Yusuf

然而，通过使用由碳化硅膜及膜上水合氧化锰组成的过滤器，可以去除水中的镭。

水通过过滤器时，水合氧化锰吸收镭。每隔一段时间，对陶瓷过滤器进行“反洗”，将含有吸收镭的水合氧化锰作为废物处理。

老挝土壤和养分管理改善实践提高了水稻产量



农民田间水稻示范试验。

(图/国际原子能机构M. Zaman)

水稻是老挝人民民主共和国的重要主粮作物，是粮食安全和就业的关键。全国80%以上的农民种植水稻，约占全国耕地面积的60%。然而，该国多山的地形、季风频繁的热带气候、土壤侵蚀、缺乏合适的水稻品种以及肥料使用不足，限制了水稻产量，威胁到这个农业社会的生计。由于该国72%的水稻种植面

积依赖自然降雨，由气候变化导致的日益多变的降雨模式预计将对水稻生产造成毁灭性影响。

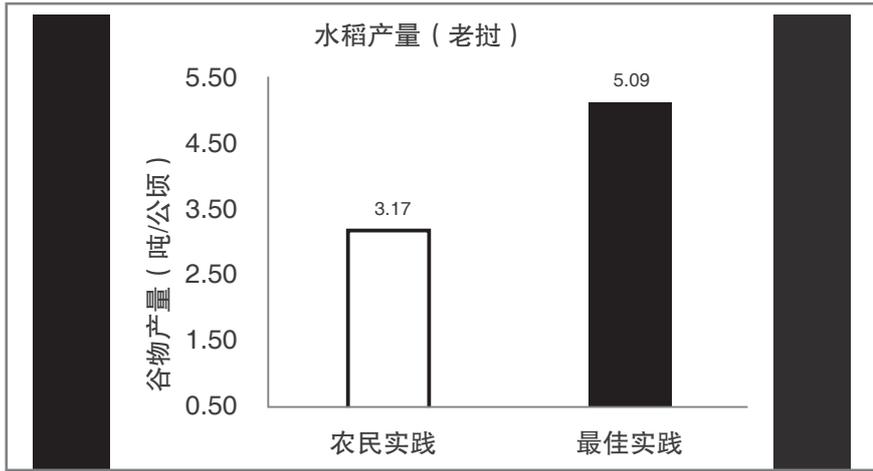
原子能机构与联合国粮食及农业组织（粮农组织）合作，支持老挝农民使用核技术确定更好的土壤和养分管理实践，从而将水稻产量提高60%（见科学栏）。在农民田间进行的试验表明，通过优化施用化肥和肥料，水稻产

量从每公顷3.16吨增加到5.1吨。

万象省Sanakarm区参与实践这些研究成果的试点项目的农民Somphet Siphandone说：“我采取这些做法已有三年，与我们的传统做法相比，我的产量提高了60%。通过所提供的培训，我们学习了高效和有效的农业技术，这些技术在我们的田间很好地发挥了作用。多亏了这项计划，我们对不断变化的气候有了更大的抵抗力，收获也更多。”

原子能机构通过其技术合作计划，对研究人员进行了使用氮-15（氮的一种稳定同位素）的培训，以量化植物从肥料中吸收的氮量，然后确定农民在作物生长的不同阶段应使用的确切肥量，以及如何最好地将当地可用的稻草和动物粪便作为养分来源纳入这些肥料中。

根据这些结果，原子能机构和粮农组织的专家帮助当地专家为农民和与他们合作的农业官员制定了一套水稻生产指南。这些



图表显示了利用土壤和养分改善实践提高水稻产量情况。

指南提供了土壤和养分管理的最佳实践，并以同位素技术的使用结果为基础。

为了接触更多的农民并传播这些最佳实践，原子能机构与国家农林研究所的专家利用水稻生产指南所载的信息，用老挝语为农民编写了一本易于使用的手册。到目前为止，万象省四个村

庄的57名农民接受了该计划试点阶段的培训。

粮农组织/原子能机构核技术粮食和农业应用联合司土壤科学家和植物营养学家Mohammad Zaman说：“这本小册子是一个完整的技术工具箱，向农民们展示了从准备播种的土地到施肥、管理杂草和昆虫，以及确保及时

收获等该做的事情。

科学

稳定同位素技术

同位素是同一元素的原子，其质子数相同，但中子数不同，因此原子量也不同。例如，氮-15与氮-14具有相同的化学性质，但多了一个中子，因此较重。科学家们可以利用标有这种同位素的肥料来了解肥料中的氮如何改变土壤、植物和水系统，跟踪并确定作物吸收氮的效率以及土壤中残留的氮量。

科学家们还可以用同位素追踪各种排放物在农业中的迁移和来源：用氮-15追踪一氧化二氮，用碳-13追踪甲烷和二氧化碳。

文/Lu Han

新的无人机技术现在可用于应急情况的辐射监测

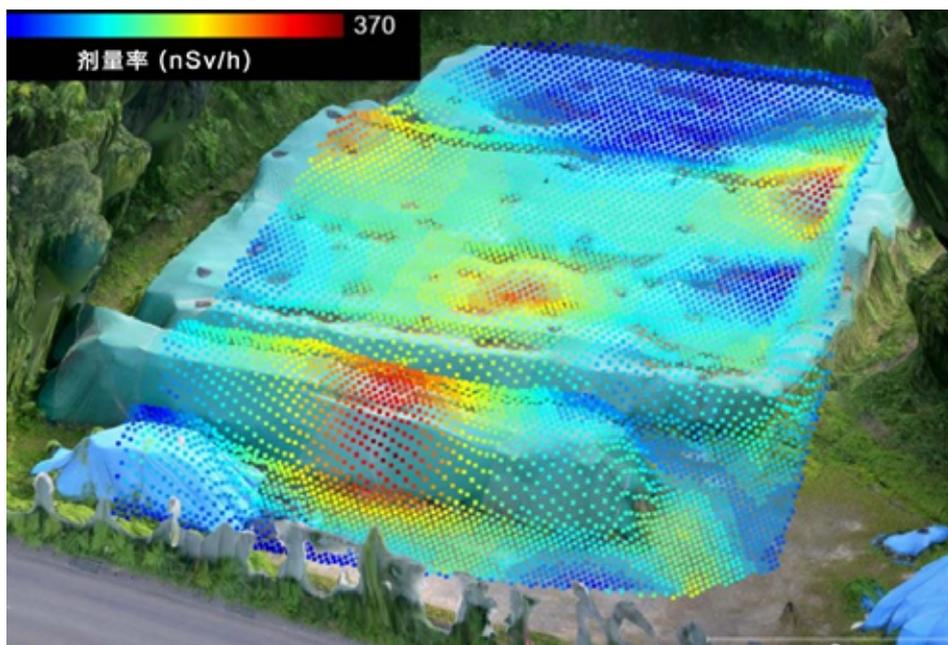


在核事故例如2011年福岛第一核电站事故发生后，反应堆附近受辐射污染的区域可能过于危险，人们无法进入该区域监测辐射。国际原子能机构为日本福岛县当局开发的一项使用无人机的新技术将使这项任务变得更容易。

原子能机构为配备辐射探测器、照相机和GPS装置的无人机开发的方法和仪器已在福岛县的实际状况下进行了测试和验证，目前可在日常或应急情况下实际使用。根据这一经验，原子能机构随时准备协助有关成员国开发

国际原子能机构为日本福岛县当局开发的一项使用无人机的新技术可以在受污染地区进行放射性测量。

(图/福岛县)



与使用单一无人机在连续两次飞行中获得的放射性地图相叠加的完整三维航空摄影测量图。

(图/国际原子能机构和福岛县)

和实用于核或辐射应急后的放射性测绘技术。

无人机成本低和避免人类受到辐射照射，是这项技术的两大显著优势。

原子能机构和福岛县于2012年首次开始合作开发和使用无人机进行辐射监测。在原子能机构“核安全行动计划”的框架内，原子能机构已通过2012年至2020年的连续两个项目向福岛县提供了援助，具体方式包括：

- 提供一套完整的基于无人机辐射测量仪器系统，一套具有数据处理和存储能力的辐射探测系统，由原子能机构核科学和仪器仪表实验室开发和建造；
- 提供测量后分析和解读方法，并在福岛县和奥地利塞伯斯多夫核科学和仪器

仪表实验室对人员进行无人机及其仪器仪表系统应用以及使用软件获取和解读数据的培训。

最近，无人机技术取得了突破性进展，预计在不久的将来会有重大发展，包括更大的有效载荷、集成探测器和传感器、改进的自导航以及车辆与其他无人机以及地面系统协同工作的能力。原子能机构目前正在进行新的改进仪器的集成和测试，包括为适应下一代无人机进行的改装。

“这些新的发展既可延长无人机的飞行时间，又可通过一次测量确定剂量当量率和伽马能谱。”原子能机构物理处处长Danas Ridikas说，“新系统在与高质量的相机功能结合时，将使用户获得与放射性地图和放射性

核素识别相叠加的完整三维航空摄影测量模型。”

原子能机构辐射安全和监测处处长Miroslav Pinak解释说，基于无人机的技术将对推进辐射监测包括加强环境测绘的应用和改进对污染地区的长期监测至关重要。

利用原子能机构开发的无人机系统收集并经福岛县验证的数据，可用于评估潜在的辐射风险，并有助于日本制定适当的治理、去污和核废物管理计划和战略。

原子能机构将公开提供一份关于项目成果的详细技术文件，包括仪器仪表校准、方法验证、原位剂量率测量和福岛县放射性废物临时贮存点的测绘。

这些技术、方法和相关培训机会可应请求提供给原子能机构成员国，并已在原子能机构的支持下在一些国家实施。

这项技术是如何工作的？

无人机配备了辐射探测器、照相机和GPS装置。无人机起飞后，辐射读数和其他相关信息将与其精确的GPS位置同步，并实时发送给地面站的飞行员，同时也存储在机上。着陆后，所有的详细数据被恢复，照片和地理信息与修正后的辐射测量值一起被重建。这些卫星照片和经过分析的辐射测量数据随后可提供给决策者，用于采取进一步行动。

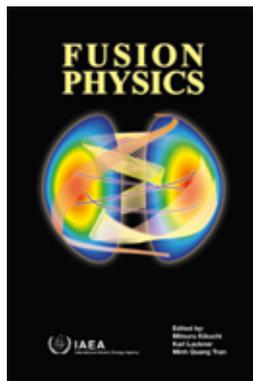
文/Alexandra Peeva



《核聚变》

本出版物是公认的世界领先的核聚变专业期刊。该杂志涵盖与受控热核聚变相关的所有研究方面，包括理论和实践研究。该杂志创刊于1960年，每年发表约400篇新文章，为聚变研究界提供了一个高质量、公正的知识共享论坛。国际原子能机构负责管理同行评审过程，并与作者和审阅人员以及期刊的学术编辑、编委会和联合出版商IOP出版公司进行协调。近年来，该杂志的内容也反映了对聚变装置所用材料的日益关注。电子期刊每年有50万次全文下载，在所有可比期刊中，它的影响力始终是最高的。

期刊；DOI：10.1088/issn.0029-5515；网络版ISSN：1741-4326；印刷版ISSN：0029-5515



《聚变物理学》

本出版物是研究生的综合参考资料，也是经验丰富的研究人员的宝贵指南。该书介绍了核聚变及其现状和前景，并以该领域领导人撰写的专门章节为特色，介绍了聚变物理学的主要研究和概念。该书首先介绍了聚变作为一种能源的发展情况。讨论了磁约束和惯性约束。专门的章节集中讨论了约束的物理学、托卡马克的平衡和稳定性、中性束和射频波的诊断、加热和电流驱动，以及等离子体与壁的相互作用。虽然托卡马克是实现核聚变的一个主要概念，但其他概念（螺旋约束和更广泛意义上的其他磁性和惯性构型）也在书中有所涉及。该出版物有1100多页，为聚变物理学家和工程师提供了无与伦比的资源。

非丛书出版物；ISBN：978-92-0-130410-0；英文版；90欧元；2012年



《聚变应用机械部件安全分类的综合方法》

本出版物是国际原子能机构第一本关于聚变应用部件安全分类的出版物。它强调了裂变反应堆和聚变反应堆在安全重要结构、系统和部件的识别和分类方面的现有差异，并提供了关于聚变应用的实用信息。该出版物还提供了关于纳入新的设计扩展工况的信息，这些工况是在福岛第一核电站事故后对国际原子能机构安全导则进行审查后补充的。

《国际原子能机构技术文件》第1851号；ISBN：978-92-0-105518-7；英文版；18欧元；2018年

欲了解更多信息或订购图书，请联系：

国际原子能机构市场和销售科

Marketing and Sales Unit

International Atomic Energy Agency

Vienna International Centre

PO Box 100, A-1400 Vienna, Austria

电子信箱：sales.publications@iaea.org

在线阅读本期和其他各期《国际原子能机构通报》：
www.iaea.org/bulletin

更多了解国际原子能机构及其工作，请访问网址：
www.iaea.org

或通过以下方式关注我们：



IAEA

国际原子能机构
原子用于和平与发展