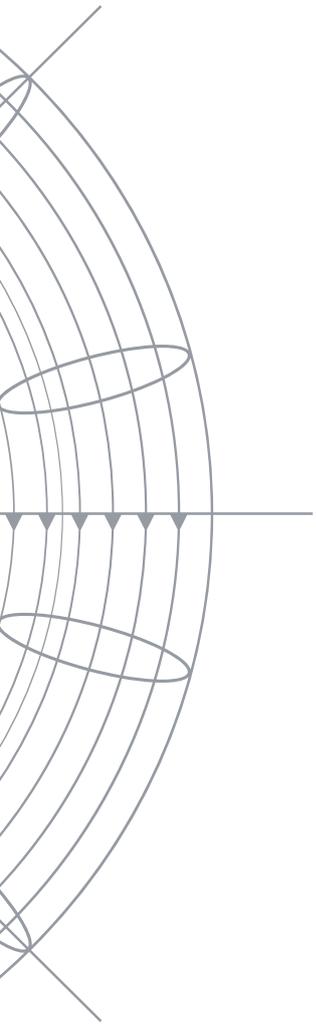


# 聚变关键要素

---

聚变能发展的共同愿景



# 聚变关键要素

聚变能发展的共同愿景

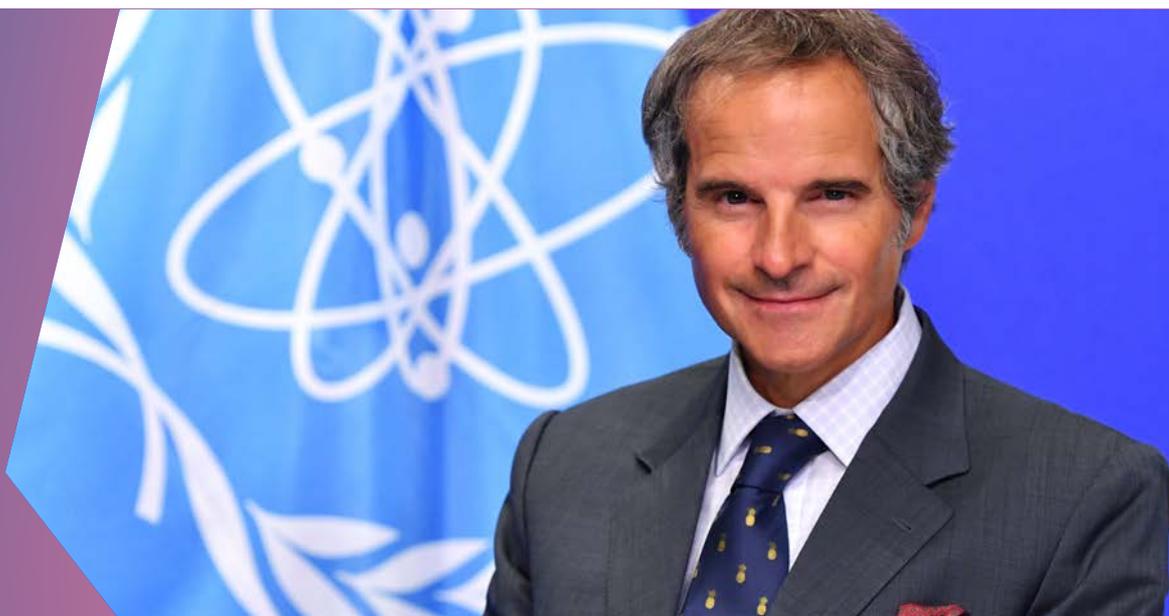
国际原子能机构  
2024年·维也纳

# 前言

几十年来，作为世界上一种潜在的长期可持续清洁能源解决方案，聚变能一直是可望不可即。现在不一样了。聚变领域最近的发展出现了新的势头，使得越来越有可能在不久的将来部署聚变电厂。

在国际热核实验堆项目等国家和国际计划的推动下，聚变领域正在经历一场前所未有的变革。科学的突破，加上私营部门投资的显著激增，催化了这一变革的发生。在我的工作中，我观察到科学家和工程师们非常兴奋、充满热情和信心，他们正在为部署聚变能源系统寻求许多创新的想法。世界正在努力应对气候变化和能源安全的双重挑战，新的清洁能源的出现对于长期解决方案至关重要。

此外，我还注意到，主要参与方热切希望以有意义的方式开展合作，并分享经验、知识和资源，以解决遗留问题，为可持续聚变能发展奠定工业基础。为此，参与聚变能发展的所有利益相关方必须对聚变能商业化的道路有共同的愿景和理解。考虑到这些目标，本国际原子能机构（原子能机构）出版物确定了一系列聚变关键要素；在未来，聚变能将在我们的中短期全球能源格局中发挥核心作用，这些要素将继续为全世界的科学家、工程师、监管者、企业家和政策制定者提供全面的路线图和宝贵的指导。



本出版物深入探讨了实现这一愿景所需的核心内容。文件内容围绕六个关键要素展开，每个要素均涉及聚变能模式的重要方面。这些要素包括：研究、发展和示范优先事项和衡量标准，以及商业化里程碑；资源、职工队伍和知识管理；安全、安保和防扩散；全球协作；利益相关方的作用；以及公众参与。这些要素共同构成一项具有凝聚力的战略的支柱，以促进驾驭聚变能发展的复杂性，并抓住其内在的机遇。

原子能机构感谢所有为本出版物做出贡献的人员，包括国际聚变研究委员会成员和其他国际专家和审稿人，感谢他们为在如此短的时间内发行本出版物做出的宝贵贡献和承诺。原子能机构继续坚定不移地支持聚变能发展，支持使我们更接近实现无限清洁能源梦想的各种倡议。让我们一起敞开怀抱迎接聚变能的到来，为所有人开辟一条通往更光明、更可持续未来的道路。

国际原子能机构总干事  
拉斐尔·马利亚诺·格罗西

# 导言

由于聚变技术有望成为满足我们未来能源需求的一种丰富、清洁和可持续的解决方案，因此全球对聚变能的追求势头正旺。直到最近，聚变能的发展主要由国家和国际计划（如国际热核实验堆项目）推动。然而，在迫切需要清洁能源来应对气候变化和确保能源安全的推动下，情况发生了重大转变。聚变科学技术的最新突破，加上私营部门的大量投资，迅速改变了聚变能的格局。显著扩大的私营部门正在补充公营部门在推动聚变能走向实际应用方面所做的努力，现已拥有40多家活跃的公司和超过70亿美元<sup>1</sup> 的投资，并将商业化作为优先事项。

尽管开发聚变能的技术方案和融资安排各不相同，但公营和私营部门都有一个共同的目标：使聚变成为一种可行的、可持续的能源来源。这一共同目标强调了加强对于加快从研究向商业化过渡至关重要的政府与私营实体之间合作的重要性。

<sup>1</sup> 截至2024年7月的状况 [1]。

虽然这些发展为在不久的将来实现聚变能注入了乐观的情绪，但在一些研究、发展和示范领域仍需要取得进一步的进展。此外，要成功采用和部署聚变能，就必须扩大产业基础，发展全球供应链，建立一支有能力的职工队伍，制定明确的法律和监管准则，并获得公众支持，而所有这些都需多方利益相关者的合作性参与。

在这样一个快速发展的领域，就聚变能的主要考虑因素达成共识至关重要。这种共识包括从研究与发展到部署和商业化的方方面面，从而为驾驭聚变能领域的复杂性和机遇奠定基础。本出版物全面概述聚变能发展共同愿景所需的六个关键要素，以有助于采用统一的方案推动聚变能成为未来能源解决方案的基石。

# 六个聚变关键要素

第8页

1. 研究、  
发展和  
示范

2.

产业化

第14页

第22页

3. 安全、  
和 安保  
防扩散

4.

全球协作

第30页

第38页

5. 利益相关方

6. 公众参与

第48页



# 一个目标

使聚变能成为一种  
可行的可持续能源

# 1.

## 研究、发展和示范 优先事项和衡量标准， 以及商业化里程碑

聚变能的商业化需要在相关科技领域取得进一步进展。继续支持研究与发展活动对于加快聚变电厂的示范和部署以及发展供应链至关重要。



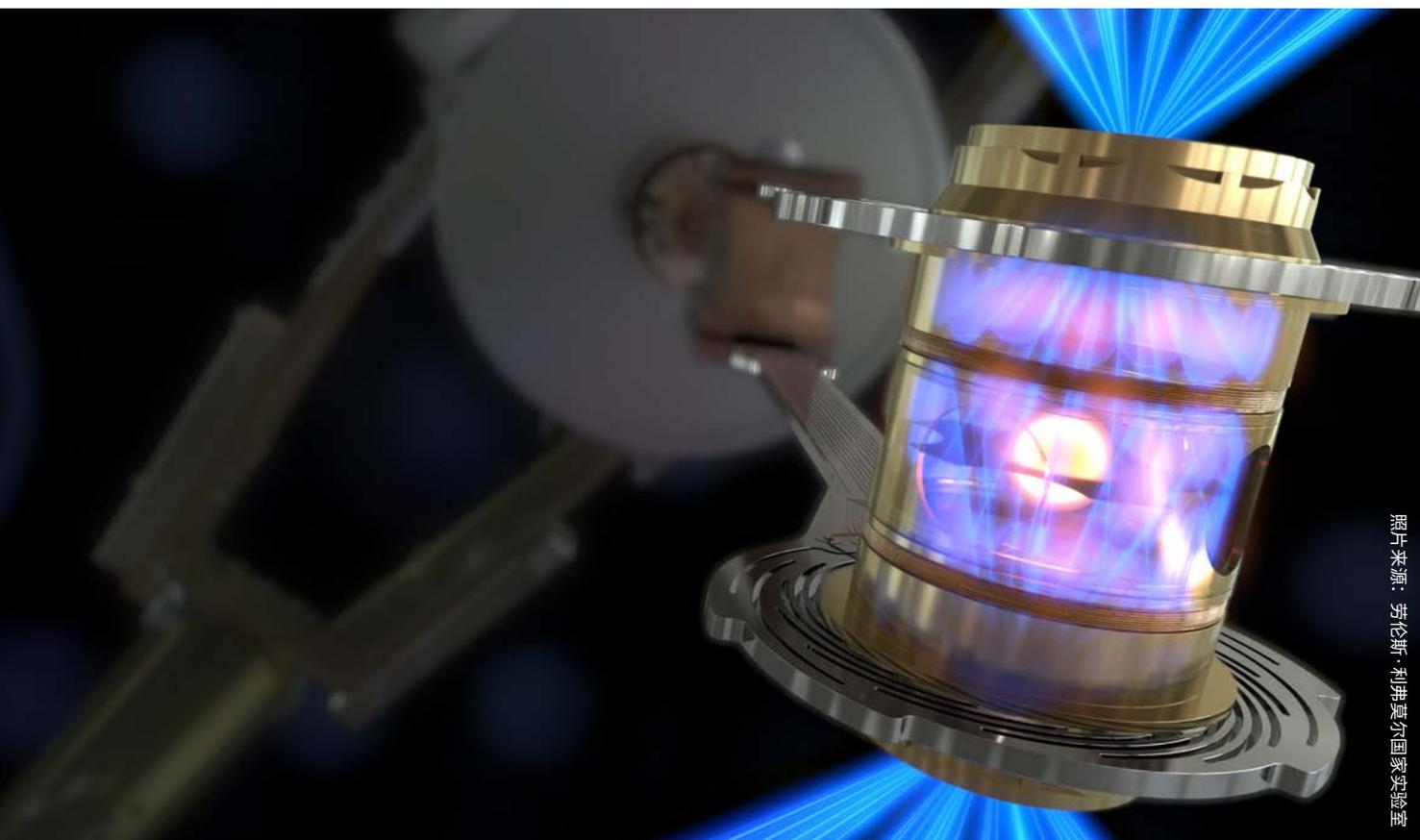
## 研究、发展和示范优先事项及记录进展

在讨论需要取得进一步进展的领域时，关键是要区分聚变电厂各种部件的成熟程度，并将它们集成到一个能够进行商业上可行的能源生产的整体系统。

建立聚变电厂所需的低技术成熟度<sup>2</sup> 主要研究、发展和示范领域如下。虽然每个领域都至关重要，但开发能适应极端条件的材料和氦燃料循环被认为是实现氘-氚聚变能生产的最迫切需求。

---

<sup>2</sup> 技术成熟度为评估不同技术及其不同部件的成熟度提供了一种标准化的客观方法。



## 能适应极端条件的材料

聚变过程中产生的大量高能中子和其他粒子使结构材料处于极端条件下。要提高聚变的商业可行性，当务之急是找到能够更好地承受这些条件的材料，同时保持结构的完整性和可接受的活化水平。这些材料还需要与保持等离子体纯度以及聚变装置内部极具挑战性的热、辐射和真空条件相兼容。液态第一壁等创新概念有可能放宽对结构材料的某些要求。同样重要的是，要解决这些极端条件对其他各种材料（包括用于增殖包层、诊断系统、加热系统、远程操作系统和偏滤器的材料）的潜在影响，并考虑一系列材料特性，而不仅仅是机械特性。

## 氚燃料循环

氚是氢的放射性同位素，是氘-氚聚变电厂的关键燃料。不过，氚的半衰期相对较短（12年），而且天然含量并不丰富。对于启动然后维持氘-氚聚变电厂的聚变能生产，至关重要的是开发高效的氚增殖和萃取技术。



## 功率排除管理

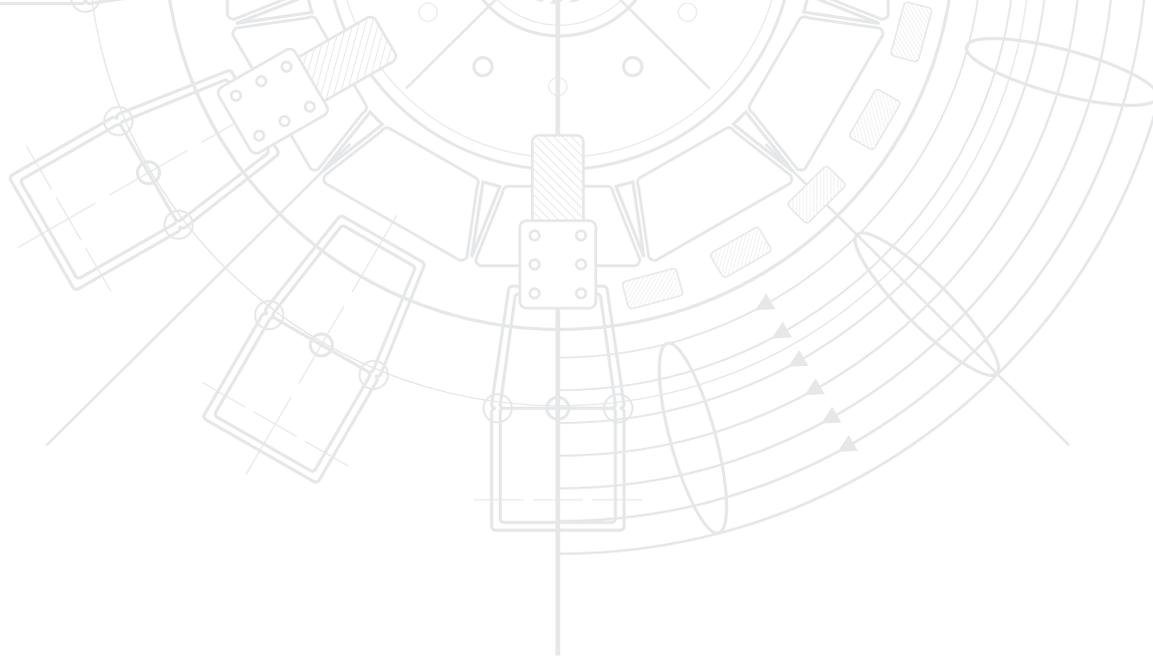
聚变电厂的主要挑战之一是管理等离子体产生的热排除和粒子排除。对于磁约束方案来说，稳态等离子体与材料的相互作用是一个额外的挑战。聚变电厂中预计会出现的极端功率密度条件给面向等离子体材料、冷却技术和部件设计等方面带来了巨大的工程挑战。推进对合适等离子体机制的研究仍是一项关键的实验需求。

## 远程操作

聚变电厂的运行环境恶劣，人类操作员无法进入。因此，维护和维修任务可能需要远程操作。有必要继续开发这些远程操作系统，包括使用先进的机器人系统，用于商业聚变能应用。

## 热提取

聚变电厂内部产生的能量需要高效提取，相应的部件也需要有足够的可用性，以获得具有竞争力的电力成本。对于利用蒸汽循环的概念，如果转换区能在更高的温度下运行，电厂的热力学效率就会提高，为此需要减少活化材料。



大多数聚变能概念都有相同的研究、发展和示范考虑因素，但针对约束技术<sup>3</sup>和燃料选择<sup>4</sup>，还需要进行一些额外的研发。在提高所讨论领域的技术成熟度之后，聚变能的成功商业化需要在聚变电厂环境中优化设计和验证部件（如耐辐射材料、辐射加固传感器），并从最初阶段就考虑安全和经济限制因素。这包括开发综合解决方案，将燃烧等离子体科学、约束技术、热管理和屏蔽结合起来。

在上文强调的研究、发展和示范以及集成领域中，协同努力至关重要。利用高性能计算、人工智能和先进制造等技术的进步，可以加快聚变能的发展，同时为更广泛的商业化铺平道路。此外，发展必要的基础设施（如设施、系统和框架）以支持聚变能的整个寿期，对其成功商业化至关重要。

最后，随着聚变能从开发走向示范和部署，聚变能领域现有的和新出现的利益相关方都必须适当地记录和分享新成果。遵循传统方法，如实施同行评审程序、确保进展情况交流的透明度、酌情保护知识产权以及通过战略交流与政府、投资者和公众进行有效接触，这些都是必不可少的步骤。

<sup>3</sup> 例如，对于惯性约束聚变而言，关键的研究、发展和示范领域还包括驱动技术和靶技术的经济扩展。

<sup>4</sup> 燃料的选择取决于所考虑的聚变过程类型；例如，氘-氘、氘-氚、氘-氦-3 或质子-硼-11。

## 研究、发展和示范衡量标准以及商业化里程碑

以下发展衡量标准可用来评定聚变能研究、发展和示范的进展情况：

- 展示高性能和连续运行（或用于惯性约束和磁-惯性聚变的高重复率脉冲运行），同时在等离子体-材料界面实现可确保压力容器内部件可接受寿期的条件。
- 对于氘-氦基聚变能概念：
  - 实现大于1的氦增值比<sup>5</sup>，可能涉及锂-6的浓缩；
  - 展示高效氦提取和再循环；
  - 为氦燃料生产开发适当的供应链；
- 显示从聚变电厂可提取的净能量增益。

聚变能商业化需要实现以下重要的里程碑：

- 同时展示单一聚变电厂的燃料充足性<sup>6</sup>和净能量增益；
- 确保聚变电厂厂址安全，并获得建造、运行和退役的执照/许可；
- 建立适当的废物管理战略和监管途径；
- 以具有竞争力的价格将聚变电厂连接到能源消耗系统或电网。

<sup>5</sup> 聚变装置中氦的总生产率与总消耗率之比。

<sup>6</sup> 自给自足或通过外部燃料供应。

# 2.

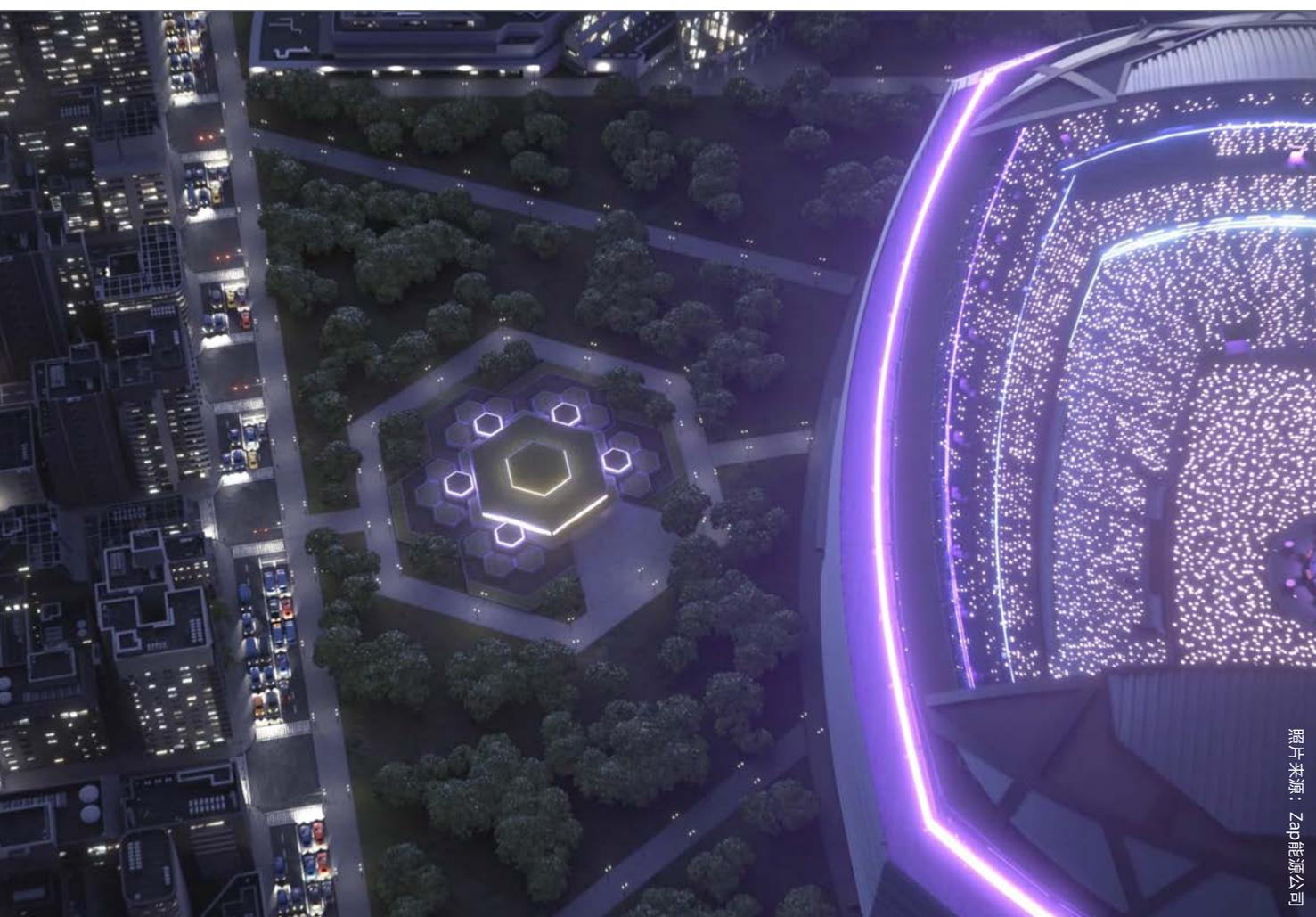
## 产业化所需的资源、 职工队伍和知识管理

要建立一个能够释放聚变潜力的成熟产业，需要有充足的资源、创造平行的收入流、建设一支有能力的职工队伍、建立有效的知识管理战略以及有明确的法律、监管和知识产权框架。



## 财政资源和筹资机制

不能低估公共和私人投资的规模，以及投资努力需要持续的时间范围。这是因为：掌握聚变具有技术上的复杂性，任何能源生产厂都需要维持的条件严苛，以及研究、开发、测试、制造和最终能源生产所需的科学和工业设施的规模巨大。





公共资源和私人资源将发挥不同但互补的作用。政府的投资将通过以下方式发挥关键作用：

### 资助研究和早期开发

聚变能仍然需要重要的研究、发展和示范工作。对于技术成熟度较低的研究、发展和示范领域，研究机构和类似的公共组织发挥着重要作用，产业的发展将需要这些机构及其计划的持续资助。私营组织虽然较少参与基础研究，但也是早期开发阶段的重要参与者，并经常通过不同的机制，如赠款、税收减免和公私合伙关系，获得公共支持。公共支持和资金对于加快研究、发展和示范至关重要，尤其是在新兴产业的现阶段。然而，这种支持的实际战略需要特别谨慎，因为过于繁琐的安排（如支持机制的分散、单项赠款的规模、与已创造的知识产权有关的安排、成本核算、报告负担）会使这种支持机制对公共和私营组织都缺乏吸引力。

### 资助示范项目

作为技术示范和（或）试验设施的项目对于建立和维持该产业至关重要，但如果不构成商业资产，则可能需要公共资金。这些项目（如**国际热核实验堆**）可以促进供应链的发展，因为公共和私营公司都竞相参与，从而发展自己的能力和产业基础。即使在出现困难或延误的情况下，也需要保持对这些项目的资助，而且这些项目需要有足够的商业相关性、持续时间和数量，以便建立和维持产业供应链。

**国际热核实验堆**目前正在法国建造，是正在进行的最大规模聚变实验。该项目是中国、欧洲联盟、印度、日本、大韩民国、俄罗斯联邦和美利坚合众国之间一项共同的国际事业。国际热核实验堆的目的是证明聚变能生产在科学和技术上的可行性。



## 支持试验工厂和(或)首创项目

一些基于国家政策和商业实践的国家聚变战略认为，私营实体而不是公共实体将主导商业聚变电厂的示范和部署。为实现这一目标，政府将需要利用适当的风险分担机制，使早期商业工厂（试验工厂和（或）首创项目）从公共部门向私营部门过渡，在这种情况下，风险与回报之间的平衡仍然需要政府提供一定的支持，以便私营部门筹集到所需的资本。这可以采取多种形式，正如其他可比的复杂产业 — 项目由通过风险分担机制<sup>7</sup>支持的公共部门或私营部门主导 — 所表明的那样。

来自私人投资的融资（股权和债务）可包括但不限于以下方面：

- 通过具体的聚变计划及其相关设备和部件，实现技术的开发和产业化；
- 发展实施此类计划所需的能力、流程（如制造流程）和工具等形式的产业能力；
- 开发试验设施（如燃料循环）和工厂项目（如试验性的第1个和第 $n$ 个工厂）。

<sup>7</sup> 此类风险分担机制的例子包括但不限于基于里程碑的开发计划、差价合同或受监管的资产基础合同。

## 职工队伍

要培养一支适合聚变能商业化的强有力的职工队伍，就必须采取一种全面的方案，这种方案要涉及公私两方面的国家举措，而且可能还要得到国际合作和知识交流计划的支持。

鉴于目前聚变界的规模有限，需要采取协调一致的努力，以吸引、教育、培训和发展一支由科学家、工程师、项目经理、操作人员、技术人员和监管者组成的、能够应对聚变技术应用所固有的各种挑战的熟练专业职工队伍，重点是培养一支广泛的职工队伍，而不是像目前这样只注重培养未来的研究人员。

聚变能产业已经在吸引其他产业的人才、能力和经验，这将极大地有利于培养这样一支职工队伍。可以通过有针对性的技能转换计划加快这一进程。然而，各产业和公共研究机构对一流科学和工程人才的竞争程度不容低估。

需要重视培养具有产业导向思维、广泛的技术专长、跨技术学科沟通能力以及跨项目周期各阶段的经验的专家。这样做是为了避免专业之间或开发、设计和实施阶段之间形成孤岛，同时也是为了支持该产业满足预期的扩展和商业化需求。此外，鉴于聚变电厂的运行将需要一个强大的供应链，其中既包括高度特定的聚变技术，也包括其他产业的共同要素，因此培养这种跨学科能力至关重要。

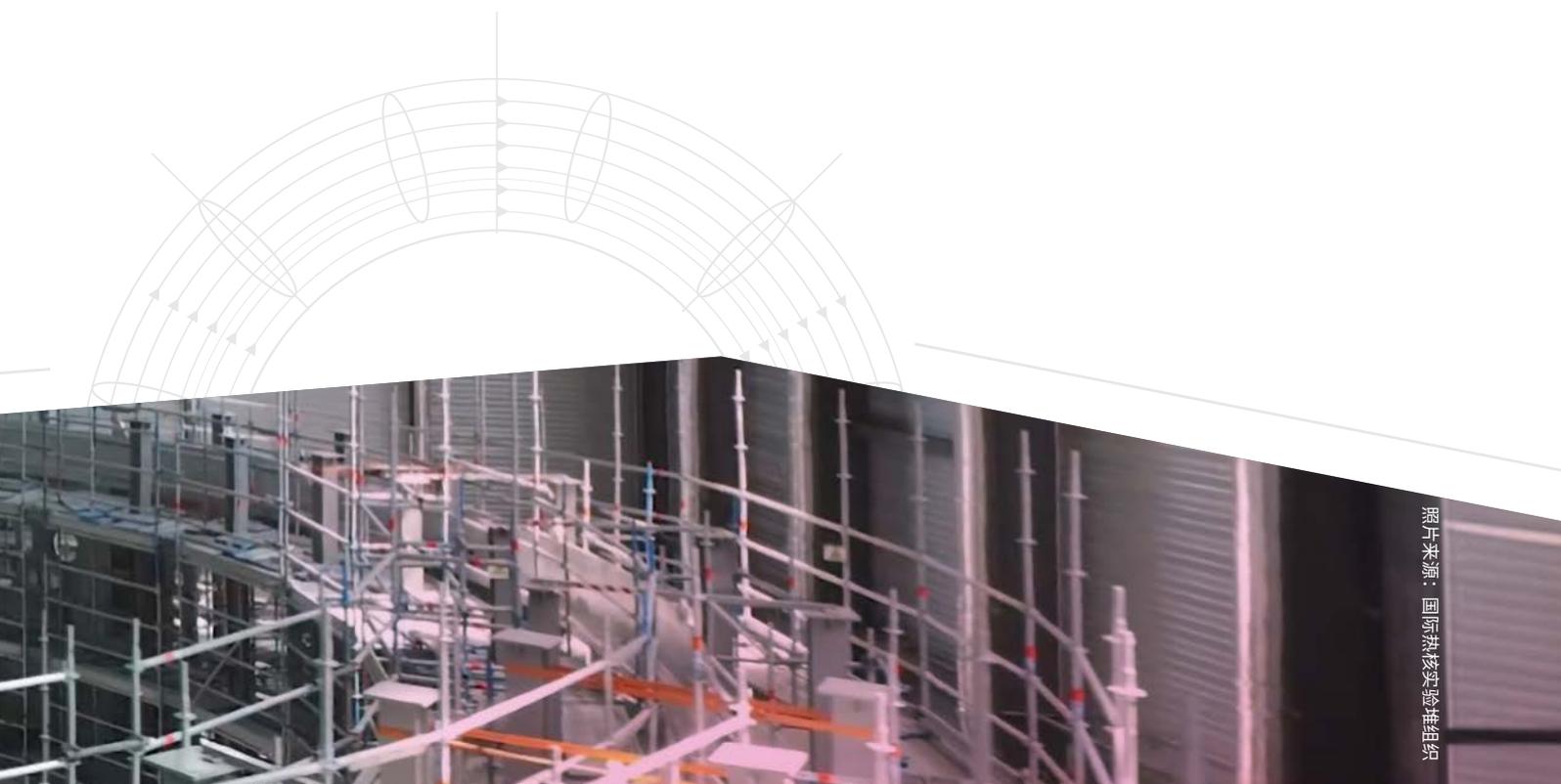


## 知识管理

聚变能产业的发展和聚变能的商业化需要创造和广泛传播科学、工程、制造和营运知识。如今，公共资助项目已成为开发和共享此类知识的重要组成部分。因此，它们需要努力最大限度地创造、记录和传播这些知识（根据适当的协议）。通过明确和健全的知识产权框架，可以促进公共和私营部门参与知识管理和共享。产业论坛也可以发挥重要作用，方法是促进对安全、安保和卓越运营等方面至关重要的信息共享，从而使所有人受益。

由于聚变能产业是一个新兴产业，同时也是一个追求多种不同技术方案的产业，因此，与同样复杂、更加成熟的产业以及在研究不同聚变约束方案的项目之间共享知识也非常重要。为此，专业机构、行业组织和监管者之间的交流计划可以发挥重要作用。

最后，通过国家和国际规范、准则和标准获取和编辑知识，以及分享导则和（或）最佳实践，也能有力地支持该产业的发展。



## 迈向产业化



尽管聚变仍是一个新兴领域，但借鉴现有能源行业的发展，很可能会出现大型集成公司、专门从事聚变电厂系统或子系统的二级公司，以及大量拥有特定部件或零件知识产权的中小型企业。要创建一个充满活力的行业，需要采取干预措施，使所有这些类型的公司都能增长聚变能方面的能力和经验。

聚变技术从研究和早期开发成功过渡到商业应用，对于建立一个繁荣的聚变能产业至关重要。传统上，大型国家和国际项目是事实上的主力租约<sup>8</sup>，对维持聚变能供应链和人力资源做出了重大贡献。为了进一步发展聚变能产业，公共部门有必要继续发挥积极作用，通过其公共计划（包括建立新的研究设施）来维持供应链，以确保在适当安排下，将公共计划中积累的专业技能无缝转移给聚变能产业。这些公共计划将补充私营部门的投资，其中可包括第17页（英文）概述的活动。此外，还需要若干关键推动因素，其中包括以下方面：

<sup>8</sup> 主力租约是政府为提供稳定的收入基础和降低私营公司的财务风险而做出的一种长期承诺。

## 清晰稳定的法律和监管框架

吸引私人资金和制定可靠的发展计划的一个重要部分是明确法律和监管框架，包括制定获得选址、建设和运营许可的程序。

## 健全的知识产权框架

在技术从研究向商业化过渡的过程中，健全的知识产权框架对于促进各方合作至关重要。

## 与聚变能和其他市场相关的技术

建立私人聚变能产业面临的一个主要挑战是，鉴于与其发展有关的时间尺度，投资者往往需要中短期的收入流。这些收入流可能来自于将为聚变能开发的技术应用于其他市场（如创新材料、机器人、医疗应用）。可以制定公共或私人发展计划来促进这一目标的实现。

## 更广泛的合作生态系统

通过创建该领域的能力中心（通常是邀请国家和地方政府及其社区参与的地区能力中心），往往可以通过一个动态环境加速知识的创造和共享以及技术的开发，在这个环境中，多个组织可以开展合作，分担开发成本，并汇集专门知识和能力。

# 3.

## 安全、安保和防扩散

对聚变电厂安全和安保的监管需要与其风险相称，同时考虑到其独有的特点，如没有链式反应以及其立即关闭的能力。同样重要的是，随着聚变能的发展，要通过设计和监管监督确保低扩散风险。



## 辐射安全基本法则

安全可靠的设计对于聚变能的成功部署至关重要。聚变电厂的安全方案需要符合原子能机构《安全标准丛书》第SF-1号《基本安全原则》[2]，它适用于所有会产生辐射风险的情况，包括在医疗领域、发电和工业应用中的使用。这一框架内的基本目标是保护人和环境免受电离辐射的有害影响。

第SF-1号的基本安全原则[2]适用于所有用于和平目的的设施和活动的整个寿期，也适用于降低现有辐射风险的防护行动。这些设施和活动包括生产、加工、使用、处理、贮存或处置放射性物质、其规模之大需要考虑防护和安全问题的任何场所 [2]。因此，这些原则可适用于聚变电厂，因为聚变电厂使用和生放射性物质的规模都需要考虑安全问题。

原子能机构《一般安全要求》第1-7部分 [3-9] 涉及安全评定和监管框架等主题。《一般安全要求》适用于所有辐射用途，包括聚变装置。

负责评定和控制辐射风险的组织需要评定和控制正常运行和事件/事故对人类和环境造成的辐射风险。这适用于设施的整个寿期，包括设计、运行、燃料和废物管理以及拆除/退役。将需要建模和诊断来支持安全论证文件。所有相关系统在设计过程之初就必须考虑安全措施。由于聚变电厂的新颖性，在进行安全分析时需要仔细考虑各种系统性能的不确定性。根据不同的技术，预计会有不同的材料相互作用（如锂、水）、放射性同位素和粒子能量，从而导致需要考虑的各种危害。聚变电厂的设计者需要考虑这些原则，以在可行的情况下减少危害和使放射性废物最少化。

## 聚变能监管方案

在原子能机构的一些成员国，已经为研究与发展（研发）发放了聚变实验许可证，并开展了聚变实验。在未来几年中，设计人员有望完成首批试点和示范项目。如果这些项目取得成功，接下来聚变电厂就会被广泛商业采用。

对于考虑广泛商业采用的设计，成员国目前正在评估与聚变电厂的风险相称的监管方案。这些评估考虑到了聚变的固有特征（如没有链式反应、失去动力后立即关闭）、所涉放射性物质的特性以及现场放射性物质的管理。这种方案反映了原子能机构的分级监管方案[10]。

成员国已经制定或正在制定与国家框架和相关危害相一致的聚变电厂和放射性废物安全管理的要求和导则。这些要求和导则既涉及安全，也涉及安保。原子能机构可以支持监管机构为聚变能制定安全要求和安保导则，这些要求和导则应与聚变能的技术和危害相适应，并能随着设计的成熟吸取经验教训，其他监管制度也是这样做的。



监管者之间的合作是有利的。在可行的情况下，各成员国采用共同的方案和一致的决策将简化申请过程，因为设计者在不同管辖区修改其申请、技术解决方案和理由的需要将减少。

在技术问题上，即使采用不同的监管方案，共同的术语和共同的立场也能帮助所有监管者。就新出现的技术挑战以及网络安全等安全主题继续开展监管合作，可能有助于分享知识和经验，从而使聚变电厂法规能够适当地解决这些领域的问题。

原子能机构等国际组织可以促进制定类似监管框架的成员国之间开展双边和多边讨论。原子能机构内部为工作的一致性和连贯性而进行的协调将支持所有成员国推进其聚变能监管结构。关于原子能机构是否需要制定聚变能安全标准的决定，可能要等到聚变电厂成熟之后才能做出。

产业标准组织可以在制定有助于简化监管审查的通用设计方案方面发挥作用。



## 向聚变电厂广泛商业化过渡

迄今为止，聚变能方面的经验仅限于研发项目。聚变能生产和商业化有望在未来实现。这将涉及聚变电厂（原型、示范和（或）商业工厂）的建设。

随着聚变技术的进一步发展，监管机构可能会采用与发展阶段相适应的过程。例如，可以采用分级方案，在每个阶段规定不同的许可证审批要求和监督。推动安全决策的差异可能包括：放射性物质库存较高；燃料的运输、贮存和加工；废物处置类别和数量；以及某些部件需要主动冷却。监管者很可能会发现，其审查和流程对于一类电厂中的第  $n$  个电厂变得更加高效。具体来说，可能需要新的许可证审批范式，以便在短时间进行大规模制造和广泛部署。



## 其他危害因素

原子能机构和许多协调聚变能项目的成员国监管者将重点放在辐射安全和安保上。鉴于系统中的高能量和潜在的有毒材料，聚变电厂还具有额外的产业和职业性质的潜在危害。对这些危害的详细讨论不在本出版物的范围之内。不过，在与公众沟通时，聚变能界可以讨论如何识别和减轻这些危害，以保护工作人员和公众。



## 防扩散考虑

聚变电厂旨在用于和平目的。因此，许多聚变电厂的设计从本质上限制了对该技术的滥用（例如，在设计设施中使用的增值区或热室时）。此外，设计人员还必须注意现行的核出口管制制度，这些制度涉及与聚变能有关材料（如氚和锂-6）以及某些技术（如分析代码）。预计监管监督将确保聚变电厂的扩散风险被证明是可接受的低风险。

对于不处理、不使用或不生产核材料的聚变设计<sup>9</sup>，原子能机构目前不采取任何保障措施，但酌情解决与各成员国提供的资料的准确性和完整性有关的问题所需的措施除外。现有的国际保障协定适用于处理、使用或生产核材料的设计。随着有关聚变电厂设计的信息越来越多，需要进一步考虑确定原子能机构保障的范围是否更广泛地适用于聚变电厂。

---

<sup>9</sup> 原子能机构保障适用于原子能机构《规约》第二十条规定的源材料或特种可裂变材料。 <https://www.iaea.org/about/statute#a1-20>。



# 4.

## 全球协作

在国际协作和私营部门日益参与的推动下，聚变能生态系统正在迅速发展。全球协作对于解决需要进一步进展的领域、建立国际供应链和发展聚变能商业化所需的熟练职工队伍至关重要。



## 不断发展的聚变能生态系统

对聚变能的追求本质上是国际性的，需要全球合作来应对剩余的研究、发展和示范挑战、建立国际供应链和发展熟练职工队伍。这种全球参与对于聚变能的商业化在可持续能源转型中发挥作用至关重要。

在过去的60年里，通过不同国家在聚变科学和技术方面的广泛合作，聚变能的发展取得了进步。国际热核实验堆项目就是这种协作精神的最好例证。在这些基础性协作努力与业界之间搭建桥梁，是使蓬勃发展的私营部门融入既有聚变能发展生态系统的关键一步。





国家倡议，如德国的“聚变2040”、日本的“聚变能创新战略”、英国的“迈向聚变能”战略和美国的“2024年聚变能战略”都是利用现有基础设施并促进国家、公共机构和私营实体间协作的政策的实例，也是将不同的产业参与者与聚变开发者联合起来的成功战略的展示。最近成立的公私联盟，如中国可控核聚变创新联合体、意大利的偏滤器托卡马克试验设施联合体和英国的英国工业聚变解决方案有限公司，正在开拓这些协作的潜力。

**“聚变2040”**是德国政府为开发聚变电厂设计而启动的一项供资计划。

**“聚变能创新战略”**是日本第一个关于聚变能的国家战略，其中包括成立一个产业团体（日本聚变能理事会），以加快聚变能的发展。

**“迈向聚变能”**是英国提供聚变能的聚变战略。它包括一个设计、开发和建造STEP（能源生产用球形托卡马克）原型聚变电厂的计划，以及英国政府的新研发计划“聚变未来”。

**“2024年聚变能战略”**是美利坚合众国的聚变战略，旨在与私营部门合作，加快商业聚变能的可行性。它包括一个拟议的聚变能公私联合体框架。

**中国可控核聚变创新联合体**是中国政府为发展和推进聚变技术而成立的产业联合体。

**偏滤器托卡马克试验设施联合体**是一个建造和运行偏滤器托卡马克试验聚变实验设施的公私联盟。

**英国工业聚变解决方案有限公司**是一个提供STEP原型聚变电厂的公私联盟。



此外，公私合作伙伴关系模式，如美国的“**基于里程碑的聚变发展计划**”和“**INFUSE**”倡议，是促进聚变产业获得技术和财政资源的有效机制的实例，进一步催化了对聚变的私人投资，加速了从基础研究到商业可行性的过程。这些计划强调合作承担风险、取得里程碑式成就和政府支持对于培育一个有活力和包容性的聚变能生态系统非常重要，以促进从早期开发到商业部署的技术转让，同时强调知识产权保护和技术方案的多样化。

**“基于里程碑的聚变发展计划”**是美国能源部的一项五年计划，旨在推进由私营部门主导的聚变试验电厂的设计和研发。

**INFUSE**（聚变能创新网络）是美国能源部的一项倡议，旨在在其资助的聚变机构的协助下，为聚变产业提供获得技术和财政支持的途径。



## 利用国际合作和公私伙伴关系

### 在健康的竞争环境中开展全球协作

国际协作是共享聚变科学和技术知识、推进可能的发展路径和加速聚变能商业化不可或缺的一部分。全球协作可以汇集专门知识，分担研究、发展和示范项目成本，通过共享信息和知识加快共同进步，并帮助各国建设与聚变技术相关的基础设施。随着解决研究、发展和示范差距领域的技术复杂性增加，对时间和资源的需求也相应增加，这突显了进行国际协作，通过分担风险和投资来迅速实现聚变部署和商业化目标的必要性。这方面的一个例子是国际热核实验堆项目的设计、研发和建造。一个促进不同聚变能发展方案之间的良性竞争的生态系统，可以使国家和私营部门的战略在全球协作的背景下齐头并进。

### 有效利用资本密集型设施

许多国家已通过国家计划建立了发展聚变能的研发基础设施。这些设施包括实验设施、燃料回收系统、贮存系统、液态金属回路设施以及材料辐照、测试和制造设施。由于其资本密集型的性质，建立试验设施对于启动聚变能计划的国家来说耗资巨大，令人望而却步。在国际范围内以及与广大私营部门的聚变产业共享基础设施，可以进一步加快聚变电厂的部署，避免重复工作。通过在两个或更多的国家之间分摊成本，就没有必要重复建设基础设施，双方以及国际聚变产业都将受益。可利用双方商定的协作协议将此类安排付诸实施。



## 共享和维护数据库

聚变界必须认识到，促进研究人员、决策者和公众更好地获取科学数据至关重要，这将提高透明度和再现性，并促进国际知识交流。为从事聚变科学和技术工作的研发团体创建一个中央数据库平台至关重要。该平台还将为所有利益相关方提供与聚变能有关的各种格式和应用的数据。

## 人员交流、职工队伍发展

国际合作提供了从资源共享和聚变界智力多样性中受益的机会。各国可以通过与其他拥有更先进聚变计划和经验的国家合作，加快技术进步，同时使它们能够改进本国的计划。更多的国际参与也增加了未来科学领军人物的来源多样性和人才储备池。通过提供适当的激励和确保知识产权的有效管理，特定聚变技术领域的协作方之间的人员交流计划将提供接触对方设施的机会。例如，这些计划可以提供操作设施的人员培训，实现互惠互利。



## 设计代码验证

设计和安全分析可能严重依赖于分析代码和方法。聚变界的设计专家可以共同确定设计人员需要遵循的方案，以符合监管要求。可以通过国际协作框架交换数据库和代码，以进行验证和核查。

## 监管协作

聚变能技术一旦成功，将超越国界，实现全球一体化。聚变能的采用和广泛接受将得益于国际统一的、专门针对聚变电厂相关风险的适当监管。可以通过全球协作实现监管控制和监管实践的加强。

## 发展强大的供应链和关键材料的供应

随着世界转向清洁能源技术，全球可持续能源应用对关键资源（如氘、氚、氦、结构材料、锂、铍、钨、铜、碳化硅复合材料）的需求预计将呈指数级增长。为了获得建造和运行聚变电厂所必需的资源，全球将出现激烈的竞争。需要考虑的关键问题是：(a) 如何提高产量以满足日益增长的需求；(b) 关键材料的潜在供应来源是什么。聚变界的协作框架使利益相关方能够共同塑造整个供应链的研发重点。这种积极主动的方案不仅能促进创新，还能减轻材料供应对实现聚变界目标的影响，确保以更高效和更可持续的路径利用聚变能。聚变界的强有力合作对于实现互利结果和确保无缝的基本材料供应链，从而保持能源系统的安全性和韧性至关重要。

# 5.

## 利益相关方的作用

各国政府、监管机构、研究机构、学术界、私营公司、国际组织和非营利实体需要协同努力，加快聚变能的采用和部署。







## 国家政府

考虑到加快聚变电厂的示范和部署所需的大量资源，以及聚变能在去碳化能源系统中能够发挥的关键作用，各国政府将必然是关键的参与者和利益相关方。因此，它们的参与可能包括以下行动：

### 发布支持建立聚变产业的国家政策和路线图

国家政府的行动需要得到所有利益相关方的充分理解，在其不同的执行机构之间保持一致并持续开展；但最重要的是，需要瞄准明确界定的总体目标和愿景。各国正在制定国家政策和路线图，概述其聚变能目标，规定具体指标、时间表和方法。至关重要的是，这些政策应承认聚变能可为应对气候变化和加强能源安全做出重大贡献，并解决至关重要的推动因素、接口和依存问题，如融资和补贴，以支持聚变能的市场进入和竞争力。这些战略的范围可以扩展到初期部署之外，详细说明在相关时间框架内迈向大规模实施的步骤。

### 界定政府的作用及其对其他利益相关方的期望

各国政府将就其通过公有实体提供资金或进行管理的活动以及主要作为推动者或促进者而期待私营部门进行投资和交付成果的活动作出重要决定。这些作用的划分、它们所包含的具体活动、对私营部门参与的期望和私营部门参与的规则都需要明确界定并具有透明度。这些因素将构成国家政策的组成部分。

## 建立法律和监管框架

各国政府的一个关键职能是迅速建立适当的法律和监管框架。同样重要的是制定选址和获得开发许可的标准。这些框架对于以正确的优先事项（如安全、安保和防扩散）指导技术开发至关重要。它们还使开发者能够提出可靠的早期设计和成本估算，同时向投资者保证，法律和监管风险明确、稳定和可控。

## 开展健康的、以事实为基础的国家 and 地方讨论

社会接受度对于新技术的开发和部署非常重要。因此，各国政府可以在公众参与和教育方面发挥作用，促进就聚变能、其在国家能源系统和经济中的作用、所需投资的规模和时间范围以及该技术可能带来的益处开展双向、公开和知情的科学讨论。

## 监管机构

监管机构既是建立聚变产业的关键参与者，也是利益相关方。随着技术的发展，它们需要培养自己的技能和能力，包括通过与业界和研究机构协作。

国家监管机构之间的协作对于确保各法域之间分享学习成果、支持新监管机构的建立以及加快监管方案的统一也很重要。这些都是发展大规模国际市场的基本要素。



## 研究机构和学术界

从根本上说，学术届的聚变研究活动是为了支持探索而存在的。无论公立还是私立，研究机构和学术界（包括大学和高等技术教育）都发挥着关键作用，即通过实施研究计划，提高关键使能技术的技术成熟度和商业化潜力，使私营部门能够推进这些技术。需要鼓励这些活动，更广泛地说，需要鼓励与私营部门的合作（如提供对研究设施的使用），并将重点放在开发适合最终商业化的技术上。私营和公共实体之间的协作需要得到一个健全的知识交流和知识产权生产与保护框架的支持，并需要侧重于跨学科研究计划。

研究机构和学术界也可以单独或通过伙伴发展计划，在提供培训和发展能力方面发挥关键作用。这将有助于保留和更新未来的职工队伍，以及对实现聚变电厂所需的物理学的必要了解。研究机构和学术界也可以通过与业界和监管机构的联合计划建立伙伴关系，协助职工队伍的发展。它们还可以以最新能力、设施和专门知识的形式向监管机构提供直接的技术支持。

最后，研究机构和学术界还可以通过社会科学领域促进该产业的发展和社会的接受。



## 聚变技术供应商

聚变技术供应商是聚变产业发展的重要组成部分。这些组织基于研究和早期开发工作，创造可以销售、制造、调试和运行的工业产品。随着行业的发展，将出现各种不同的实体，在能源生产设施的设计、建设、调试和运行方面发挥作用。在这一早期阶段，划分技术供应商和其他实体的具体责任具有挑战性。

私营聚变技术供应商的出现和对私营聚变技术供应商的投资代表着潜在的市场兴趣，对于支持和证明国际社会对及时进行聚变发展、示范和部署的日益关注至关重要。迄今为止，全球有40多家这样的私营聚变公司，它们获得了超过70亿美元投资的支持。这些公司正在研究磁约束<sup>10</sup>、惯性约束<sup>11</sup>和磁惯性约束<sup>12</sup>方面的多种聚变能技术。它们还在研究多种聚变燃料选择，包括氘-氘、氘-氘、氘-氦-3和质子-硼-11。尽管每种特定的聚变技术方案都有不同的研发需求，但有一些普遍有用的研发领域可以使大多数私营聚变技术公司受益，如更抗辐射的第一壁材料和包层技术开发。



<sup>10</sup> 磁约束技术包括托卡马克、球形托卡马克、仿星器/螺旋器、场反向位形、磁镜、悬浮偶极、尖顶和混合静电系统。

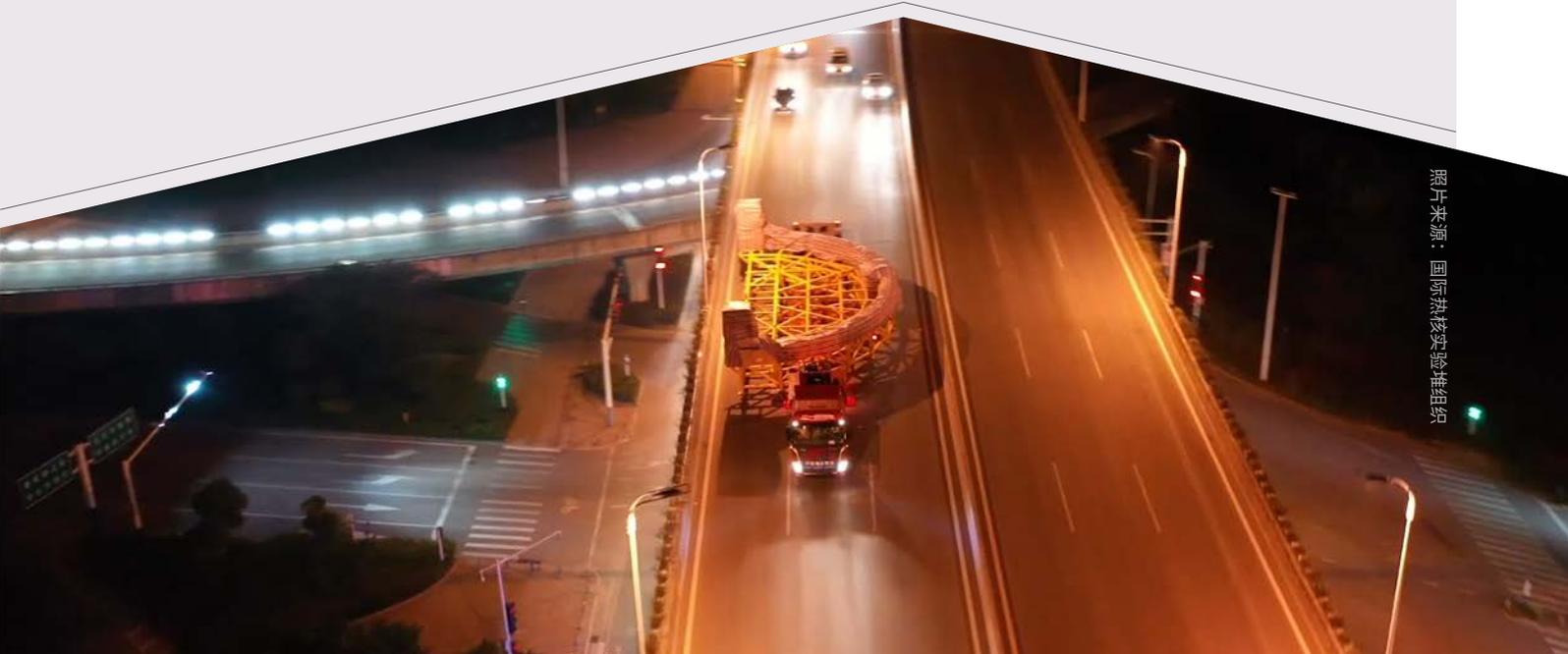
<sup>11</sup> 惯性约束技术包括激光器和射弹压缩系统。

<sup>12</sup> 磁惯性约束技术包括但不限于液体压缩、场反向位形、Z箍缩、等离子体喷射和磁化内衬惯性聚变系统。

## 供应链

除了聚变技术供应商之外，聚变电厂的规划、设计、建设、调试和运行还需要一个横跨多个领域的强大供应链。虽然其中一些领域高度针对聚变，但许多领域与其他部门重叠，如核能、石油和天然气、航空航天和空间技术。这种重叠给熟练职工队伍和资源带来了竞争因素，因为这些行业也需要类似的专门知识和技术能力。聚变供应链中的潜在参与者包括关键材料供应商、部件制造商、成套设备工程公司、一般建筑公司、设备供应商以及专业和非专业服务供应商。鉴于这一供应链的广泛性和多样性，其范围可能是国际性的。

对职工队伍的竞争是可能影响聚变行业发展的一个关键因素。随着聚变技术与其他高需求部门的交叉日益增多，确保和留住一支熟练的职工队伍将至关重要。应对这一挑战，需要进行战略性的职工队伍规划和跨行业协作，以确保聚变能发展不会因必要技能和专门知识的短缺而受到影响。



## 国际组织

国际组织在聚变能的发展中发挥着举足轻重的作用。它们的参与包括以下关键领域：

- 它们可以为聚变能研发所需的基础设施（包括研究设施）以及未来商业聚变电厂所需的基础设施的发展提供支持。这些组织经常帮助为聚变能研究、发展和示范项目提供必要的资金和资源。鉴于聚变发展涉及的成本高、时间长，国际协作可以汇集多个国家的资源，使目标远大的项目变得可行。
- 它们可促进各国、科学家和研究人员之间的协作，使知识、专门技能和研究成果得以共享。这种协作努力可有助于弥合知识差距，加快技术进步，更高效地克服技术挑战。此外，加强国际组织对公众宣传和教育工作的参与，将提高人们对聚变能的认识和理解。这可能有助于凝聚公众对聚变能项目的支持。
- 它们可以协助提出支持聚变能发展、部署和采用的政策建议。这可以包括关于聚变能研究、发展和示范国际合作、筹资机制和激励措施的政策。

## 非营利组织

作为聚变技术发展和部署的一部分，非营利组织可以在监测公共利益和促进公众讨论方面发挥多重作用。除了一般性宣传，非营利组织还可以为国际、国家和地方关于气候变化、能源公正和环境影响等主题的辩论做出重要贡献，并为团体和社区提供发言机会。

行业组织可发挥召集作用，使私营部门公司能够分享知识，以寻求制定共同的实绩标准，并在适当情况下，就关键问题向政府和监管机构发出集体声音。行业组织还可以通过向政府、监管机构和公众等关键利益相关方提供以真实、科学和最新的信息来做出贡献。



# 6.

## 公众参与、外宣和沟通

有效宣传聚变能在提供气候变化和能源安全长期解决方案方面的潜力，对于确保公众支持其发展至关重要。



## 通过双向沟通实现有效参与

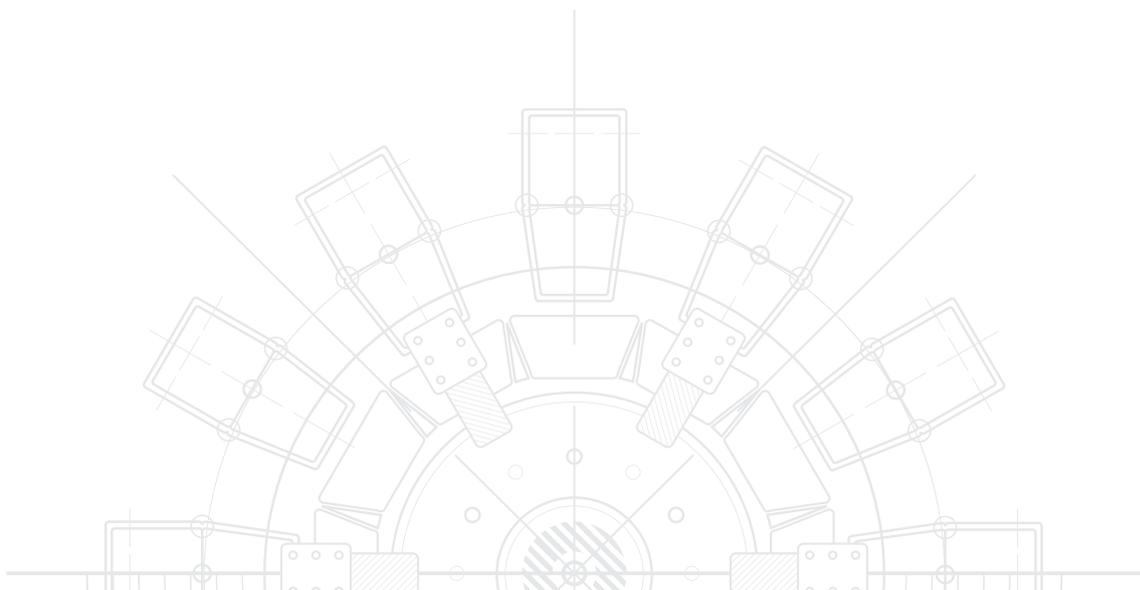
通过双向参与，可以最有效地推动公众接受聚变能。这种方案使设计者、政府和其他方面能够了解并纳入当地的需求、兴趣和时间表，包括对能源公正、环境公正和环境影响等议题的意见。此外，公众还可以了解辐射风险、技术和实际可行的部署时间表。这些对话需要根据受众的需求和兴趣专门设计，并需要由可信的专家，包括来自政府、业界和监管机构的声音，以真正的兴趣参与。通过反复的双向对话，可以及早做出调整，解决公众关切的问题，促进社会接受。如果不提供机会纳入公众的反应，在后期阶段进行的沟通或看似只是为了提供信息或作出解释而进行的沟通可能会显得不真诚。

近年来，已做了大量工作，以发展通过这种双向参与建立公众接受度甚至热情的概念[11-13]。借鉴这些努力，聚变界可以学习和应用其他行业使用的成功方案，包括应用于矿业或生物医学技术的“社会许可”[14]；应用于创新生物医学技术的“生物伦理审查”[15-17]；将公众意见引入早期设计的“负责任的研究与创新”方案[18-20]；以及将公众和技术专家聚集在一起共同设计一项技术的“共同设计”方案[21]。



在所有这些方案中，关于聚变能的讨论都需要在广泛商业应用的进展和时间表、潜在的益处和挑战以及发展和部署聚变能所需的资源方面透明和客观。公众感兴趣的益处包括：支持清洁能源转型、经济发展和服务不足的社区；满足日益增长的能源需求；以及通过聚变研发开发的技术推动其他领域（如材料、磁体、等离子体技术）的发展。

公众关注的挑战包括与其他行业相比的废物管理，以及潜在的危害和厂外释放。重要的是，要清楚地传达已确定的正常运行和可能发生的事件和事故的潜在风险，以及如何减轻这些风险以限制或防止厂外后果。保持透明度和在必要时将应急规划纳入公共防护措施，可以提供保证，并建立公众的信心和接受度。与此同时，在区分聚变与其他技术以及不同的聚变技术时，也需要小心谨慎。重要的是，传播者要避免无意中贬低任何技术，并考虑受众的立场和首选方案。根据场景选择最合适的措辞可以避免意外后果，并准确反映发展阶段（如实验、示范机、原型机、商业电厂）。





## 参考文献

- [1] 聚变工业协会, 《2024 年全球聚变工业》, 聚变工业协会, 华盛顿哥伦比亚特区(2024 年), <https://www.fusionindustryassociation.org/wp-content/uploads/2024/07/2024-annual-global-fusion-industry-report.pdf>
- [2] 欧洲原子能联营、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、国际海事组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织《基本安全原则》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 SF-1 号, 国际原子能机构, 维也纳(2006 年), <https://doi.org/10.61092/iaea.hmxn-vw0a>
- [3] 国际原子能机构《促进安全的政府、法律和监管框架》, 原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 1(Rev.1) 号, 国际原子能机构, 维也纳(2016 年)。
- [4] 国际原子能机构《安全领导和管理》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 2 号, 国际原子能机构, 维也纳(2016 年), <https://doi.org/10.61092/iaea.cq1k-j5z3>
- [5] 欧洲委员会、联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际劳工组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、联合国环境规划署、世界卫生组织《国际辐射防护和辐射源安全基本安全标准》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 3 号, 国际原子能机构, 维也纳(2014 年), <https://doi.org/10.61092/iaea.u2pu-60vm>
- [6] 国际原子能机构《设施和活动的安全评价》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 4(Rev.1) 号, 国际原子能机构, 维也纳(2016 年)。
- [7] 国际原子能机构《放射性废物的处置前管理》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 5 号, 国际原子能机构, 维也纳(2009 年)。
- [8] 国际原子能机构《设施退役》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 6 号, 国际原子能机构, 维也纳(2014 年)。
- [9] 联合国粮食及农业组织、国际原子能机构、国际民用航空组织、国际劳工组织、国际海事组织、国际刑事警察组织、经济合作与发展组织核能机构、泛美卫生组织、全面禁止核试验条约组织筹备委员会、联合国环境规划署、联合国人道主义事务协调厅、世界卫生组织、世界气象组织《核或辐射应急的准备与响应》, 国际原子能机构《安全标准丛书》第 GSR Part 7 号, 国际原子能机构, 维也纳(2015 年), <https://doi.org/10.61092/iaea.3dbe-055p>
- [10] 国际原子能机构《应用分级方案监管辐射源安全》, 国际原子能机构《技术文件》第 1974 号, 国际原子能机构, 维也纳(2021 年)。
- [11] S.A. HOEDL, “使聚变能获得社会许可”, 《等离子体物理学》, **29** (9) (2022) 092506, <https://doi.org/10.1063/5.0091054>
- [12] S. HOEDL, “社会认可与低成本和净能源生产对气候和能源贫困的影响同样重要”, 《聚变能杂志》, **42** (2023) 22, <https://doi.org/10.1007/s10894-023-00355-x>
- [13] K. GUPTA 等人, “美国人对聚变能的想法: 对可持续公众支持的影响”, 《聚变科学与技术》, **2024** (2024) 1-17, <https://doi.org/10.1080/15361055.2024.2328457>

- [14] N. GUNNINGHAM、R.A. KAGAN、D. THORNTON, “社会许可和环境保护: 企业为何不止步于合规”, 《法律与社会调查》, **29** (2) (2004), 307–341, doi:10.1111/j.1747-4469.2004.tb00338.x
- [15] 联合国教科文组织, 《国家生物伦理委员会在行动》, 联合国教科文组织, 巴黎 (2010 年), <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000189548?posInSet=1&queryId=a17553d7-2780-4e51-b9d3-a495cecdab90>
- [16] 纳菲尔德生物伦理委员会, 《预防线粒体 DNA 紊乱的新技术: 伦理审查》, 纳菲尔德生物伦理学委员会, 伦敦 (2012 年)。
- [17] M. WARNOCK 等人, 《人类受精和胚胎学调查委员会的报告》, 英国卫生和社会福利部, 伦敦 (1984 年), <https://www.hfea.gov.uk/media/2608/warnock-report-of-the-committee-of-inquiry-into-human-fertilisation-and-embryology-1984.pdf>
- [18] J. STILGOE、R. OWEN、P. MACNAGHTEN, “为负责的创新制定框架”, 《研究政策》, **42** (9) (2013) 1568-1580, <https://doi.org/10.1016/j.respol.2013.05.008>
- [19] R. OWEN、P. MACNAGHTEN、J. STILGOE, “负责任的研究和创新: 从社会中的科学到科学为社会服务”, 《科学与公共政策》, **39** (6) (2012) 751–760, <https://doi.org/10.1093/scipol/scs093>
- [20] T. BRAND、V. BLOK, “商业中负责的创新: 对作为核心治理机制的协商参与的批判性思考”, 《负责任创新杂志》, **6** (1) (2019) 4–24, <https://doi.org/10.1080/23299460.2019.1575681>
- [21] J.M. SMITH, 《提取责任: 工程师和企业的社会责任》, 麻省理工学院出版社, 马萨诸塞州剑桥市 (2021 年)。

## 参与起草和审查的人员

M.S. Abdullah	国际原子能机构
J.P. Allain	美国能源部（美利坚合众国）
A. Anikeev	国家原子能公司（俄罗斯联邦）
V. Artisiuk	国际原子能机构
M. Ascic	国际原子能机构
S. Ashraf	国际原子能机构
M. Barbarino	国际原子能机构
A. Becoulet	国际热核实验堆
V. Budaev	国家研究中心“库尔恰托夫研究院”（俄罗斯联邦）
I. Chapman	英国原子能管理局（英国）
T. Clark	美国核管理委员会（美利坚合众国）
D. De Caires Watson	国际原子能机构
S. Desai	Helion Energy公司（美利坚合众国）
T. Ellis	英联邦聚变系统（美利坚合众国）
G. Federici	EUROfusion（德国）
S. Hoedl	邮政道路基金会（美利坚合众国）
Hole, M.	澳大利亚国立大学（澳大利亚）
S. Hsu	美国能源部（美利坚合众国）
F. Jenko	马克斯·普朗克等离子物理研究所（德国）
C. Junillon	第一光聚变公司（英国）
A. Ibarra	国际聚变材料辐照设施—示范聚变电站定向中子源（西班牙）
T. Kaneko	国际原子能机构
R. Kumar Ellapan	等离子体研究所（印度）
P. Li	西南物理研究院（中国）
T. Matsumoto	国立研究开发法人量子科学技术研究开发机构（日本）
J. Milnes	英国原子能管理局（英国）
Y. Oh	韩国聚变能研究所（大韩民国）
M. Osakabe	核融合科学研究所（日本）
E. Poli	马克斯·普朗克等离子物理研究所（德国）
T. Pussieux	可替代能源和原子能委员会（法国）
P.J. Rance	国际原子能机构
F. Romanelli	偏滤器托卡马克试验设施联合体（意大利）
M. Shannon	英国原子能管理局（英国）
D. Tadjer	国际原子能机构
S. Takeda	京都聚变工程公司（日本）
R. Wagner	国际原子能机构
M. Yokoyama	核融合科学研究所（日本）

### 顾问会议

奥地利维也纳：2024年1月25日至29日、2024年2月27日至29日、2024年4月16日至18日

## 国际原子能机构的成员国

阿富汗	格鲁吉亚	挪威
阿尔巴尼亚	德国	阿曼
阿尔及利亚	加纳	巴基斯坦
安哥拉	希腊	帕劳
安提瓜和巴布达	格林纳达	巴拿马
阿根廷	危地马拉	巴布亚新几内亚
亚美尼亚	几内亚	巴拉圭
澳大利亚	圭亚那	秘鲁
奥地利	海地	菲律宾
阿塞拜疆	教廷	波兰
巴哈马	洪都拉斯	葡萄牙
巴林	匈牙利	卡塔尔
孟加拉国	冰岛	摩尔多瓦共和国
巴巴多斯	印度	罗马尼亚
白罗斯	印度尼西亚	俄罗斯联邦
比利时	伊朗伊斯兰共和国	卢旺达
伯利兹	伊拉克	圣基茨和尼维斯
贝宁	爱尔兰	圣卢西亚
多民族玻利维亚国	以色列	圣文森特和格林纳丁斯
波斯尼亚和黑塞哥维那	意大利	萨摩亚
博茨瓦纳	牙买加	圣马力诺
巴西	日本	沙特阿拉伯
文莱达鲁萨兰国	约旦	塞内加尔
保加利亚	哈萨克斯坦	塞尔维亚
布基纳法索	肯尼亚	塞舌尔
佛得角	大韩民国	塞拉利昂
布隆迪	科威特	新加坡
柬埔寨	吉尔吉斯斯坦	斯洛伐克
喀麦隆	老挝人民民主共和国	斯洛文尼亚
加拿大	拉脱维亚	南非
中非共和国	黎巴嫩	西班牙
乍得	莱索托	斯里兰卡
智利	利比里亚	苏丹
中国	利比亚	瑞典
哥伦比亚	列支敦士登	瑞士
科摩罗	立陶宛	阿拉伯叙利亚共和国
刚果	卢森堡	塔吉克斯坦
哥斯达黎加	马达加斯加	泰国
科特迪瓦	马拉维	多哥
克罗地亚	马来西亚	汤加
古巴	马里	特立尼达和多巴哥
塞浦路斯	马耳他	突尼斯
捷克共和国	马绍尔群岛	土耳其
刚果民主共和国	毛里塔尼亚	土库曼斯坦
丹麦	毛里求斯	乌干达
吉布提	墨西哥	乌克兰
多米尼克	摩纳哥	阿拉伯联合酋长国
多米尼加共和国	蒙古	大不列颠及北爱尔兰联合王国
厄瓜多尔	黑山	坦桑尼亚联合共和国
埃及	摩洛哥	美利坚合众国
萨尔瓦多	莫桑比克	乌拉圭
厄立特里亚	缅甸	乌兹别克斯坦
爱沙尼亚	纳米比亚	瓦努阿图
斯威士兰	尼泊尔	委内瑞拉玻利瓦尔共和国
埃塞俄比亚	荷兰王国	越南
斐济	新西兰	也门
芬兰	尼加拉瓜	赞比亚
法国	尼日尔	津巴布韦
加蓬	尼日利亚	
冈比亚	北马其顿	

国际原子能机构的《规约》于1956年10月23日经在纽约联合国总部举行的原子能机构《规约》会议核准，并于1957年7月29日生效。原子能机构总部设在维也纳，其主要目标是“加速和扩大原子能对全世界和平、健康及繁荣的贡献”。

## 版权声明

国际原子能机构的所有科学和技术出版物均受1952年（伯尔尼）通过并于1972年（巴黎）修订的《世界版权公约》之条款的保护。自那时以来，世界知识产权组织（日内瓦）已将版权的范围扩大到包括电子形式和虚拟形式的知识产权。必须获得许可而且通常需要签订版税协议方能使用原子能机构印刷形式或电子形式出版物中所载全部或部分內容。欢迎有关非商业性翻印和翻译的建议并将在个案基础上予以考虑。应通过以下方式与原子能机构出版处进行接洽：

Marketing and Sales Unit, Publishing Section  
International Atomic Energy Agency  
Vienna International Centre  
PO Box 100  
1400 Vienna, Austria  
传真：+43 1 26007 22529  
电话：+43 1 2600 22417  
电子信箱：sales.publications@iaea.org  
www.iaea.org/publications

© IAEA, 2024  
国际原子能机构在奥地利印制  
2024年11月  
STI/PUB/2099  
<https://doi.org/10.61092/iaea.rjb6-m9r0>

ISBN 978-92-0-128324-5（平装本：碱性纸）

ISBN 978-92-0-128424-2 (pdf)

## 编者按

虽已尽力保持本出版物中所载信息的准确性，但是国际原子能机构及其成员国对使用本出版物可能产生的后果均不承担任何责任。

本出版物并不涉及与任何个人的作为或不作为有关的法律或其他方面的责任问题。

本出版物所提供的、与已确定的良好实践有关的导则和建议系专家意见，而非在全体成员国协商一致的基础上提出。

使用某些国家或领土的特定名称并不意味着国际原子能机构作为出版者对这类国家或领土、其当局和机构或其边界划定的法律地位作出任何判断。

提及具体公司或产品的名称（不论表明注册与否）并不意味着国际原子能机构有意侵犯所有权，也不应被解释为国际原子能机构的认可或推介。

国际原子能机构对本出版物中提及的外部或第三方因特网网站的网址继续存在或准确与否不负有责任，而且不保证这类网站上的任何内容现在或将来仍然准确或适当。

---

《聚变关键要素》概述了聚变能发展的共同愿景。本出版物建立了对聚变能从研究、发展和示范到商业化的途径的共识，并制定了有助于维持和推进全球聚变能倡议的协作框架。本出版物面向从事聚变研究与发展的科学家和工程师、监管者、参与聚变技术开发的企业家或利益相关者以及政策制定者。