

美国驾驭聚变能研究的需求与战略规划

冯北元

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

摘要: 为制定美国未来 20 年聚变能发展的全面战略规划, 2009 年 6 月, 美国能源部聚变能科学局 (OFES) 主办了磁约束聚变能科学研究需求研讨会 (MFES ReNeW)。研讨会针对 ITER 燃烧等离子体、建立可预测的高性能稳态等离子体、等离子体与材料界面、驾驭聚变能及优化磁场结构等 5 个研究主题, 进行了充分的研究和讨论, 最终形成了磁约束聚变能科学研究的 5 个主题下的 18 个研究要点。5 个主题之一的驾驭聚变能研究, 其研究目标是: 确定在反应堆环境下, 实现有把握地设计和建造强大可靠的、可将聚变能转换为可用能源的系统 (包括氘燃料的自满足供给) 所面临的研究需求。本文基于研讨会的研究结果, 对驾驭聚变能研究主题所涉及的聚变燃料循环、能量导出、材料科学、安全与环境及可靠性、可用性、可维护性、可检测性 (RAMI) 等 5 个层面及 3 个研究要点进行简要的介绍和阐述。

关键词: 美国; 美国能源部; 聚变能; 氘燃料; 安全与环境

中图分类号: F171.245; TL631.24(712) **文献标识码:** A DOI:10.3772/j.issn.1009-8623.2012.10.007

当今世界, 聚变能科学计划已进入国际热核聚变实验堆 (International Thermonuclear Experimental, ITER) 时代。为充分利用这一发展契机, 2008 年 9 月, 美国能源部聚变能科学局 (Office of Fusion Energy Sciences, OFES) 准备开始拟定一个未来 20 年聚变能发展的全面战略规划。为此, OFES 首先启动了磁约束聚变能科学 (Magnetic Fusion Energy Sciences, MFES) 研究需求计划 (MFES Research Needs Workshop, MFES ReNeW)^[1]。2008 年 10 月, 针对 MFES ReNeW 计划, OFES 成立了执行委员会 (Executive Committee, ExCom)^[2]。ExCom 下设 5 个主题组, 分别涉及 ITER 燃烧等离子体 (Burning Plasmas in ITER)、建立可预测的高性能稳态等离子体 (Creating Predictable, High-Performance, Steady-State Plasmas)、等离子体与材料界面 (Plasma-Material Interface)、驾驭聚变能 (Harnessing Fusion Power) 及优化磁场结构等内容 (Optimizing

the Magnetic Configuration)^[3]。各主题组先后举办了研讨会, 对所涉及的主题进行充分的研究和讨论。2009 年 6 月 8 至 12 日, OFES 在美国马里兰州贝塞斯达市 (Bethesda, Maryland) 主办了磁约束聚变能研究需求研讨会 ReNeW。研讨会就 5 个主题小组经充分研讨后提交上来的主题报告进行了充分的研讨, 最后就磁约束聚变能的 5 个主题, 确定了 18 个研究要点, 并以此形成了研讨会报告: 《磁约束聚变能研究需求》(Research Needs for Magnetic Fusion Energy Sciences)^[4]。该报告凝聚了聚变界科学家们的智慧和战略共识, 为实现聚变能发电提出了发展框架, 将有助于 OFES 为美国未来 20 年聚变能发展制定全面战略规划。

磁约束聚变能研究的 5 个主题之一是驾驭聚变能研究。所谓驾驭聚变能, 即为实现受控核聚变, 也即使核聚变在人们的控制下进行。驾驭聚变能研究的最终目标是: 确定在反应堆环境下, 实现有把握地设计和建造强大可靠的、可将聚变能转换为可

作者简介: 冯北元 (1958-), 数学物理学博士, 高级工程师, 主要研究方向为等离子体物理与受控核聚变。

收稿日期: 2012年6月11日

用能源的系统（包括氦燃料的自满足供给）所面临的研究需求^[5]。

驾驭聚变能主题在先期主题组研讨中涉及 5 方面的内容：聚变燃料循环（Fusion Fuel Cycle）、能量的导出（Power Extraction）、材料科学（Materials Science）、安全与环境（Safety and Environment）及可靠性、可用性、可维护性和可检测性（Reliability, Availability, Maintainability, and Inspectability, RAMI）。在经过主题组研讨及最终的研讨会后，确定了驾驭聚变能研究的 3 个基本研究要点。本文在 Meier 等^[5]工作的基础上，对驾驭聚变能所涉及的 5 个方面的内容及研讨会最终确定的 3 个基本研究要点进行简要的介绍和阐述。

一、驾驭聚变能的 5 个层面

驾驭聚变能，即实现受控核聚变。它由聚变燃料循环、能量导出、材料科学、安全与环境及 RAMI 等 5 个层面组成^[6]，如图 1 所示。

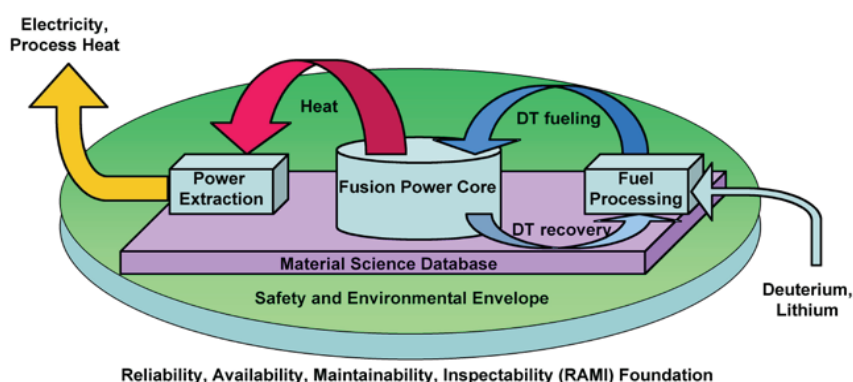


图1 驾驭聚变能的 5 个层面

从而损坏真空室结构材料、氦包层材料、等离子体诊断系统和加热系统等。我们需要弄清导致材料辐射损伤的机理并筛选出适合做聚变堆部件的材料。

4. 安全与环境

聚变能是一种对环境友好的能源。不同于裂变反应堆，聚变材料通过严格筛选，可选出放射性寿命较短的材料。所有聚变材料都应该可重复使用，产生最少的放射性核废料。研究显示聚变堆是安全的，并且不需要公众的应急转移。我们需要有信服力地展示聚变堆的安全性和环境友好性。

5. 可靠性、可用性、可维护性和可测量性 (RAMI)

DEMO 必须演示其充分的能源可用性才能建

1. 聚变燃料循环

包括 DEMO（示范堆）在内的聚变堆核电站通过氦燃料产生 3.5 MeV 的阿尔法粒子和 14.1 MeV 的中子。氦在自然界储量丰富，而氦是半衰期短的放射性物质，不能从自然界获取，可通过锂捕获聚变中子来产生。将含锂材料置于等离子体周围形成产氦包层。我们需要确定如何控制燃料在整个核电站内的流动，包括燃料的添加、增值、回收和储存。

2. 能量的导出

大约有 20% 的聚变能作为表面热被面向等离子体的部件（第一壁和偏滤器）吸收，其余 80% 被中子沉积到包层里，包层部件需要在高温（如 > 600 °C）下可靠发挥作用并有效地产生电能和氢。我们需要开发出满足上述条件的聚变堆真空室部件。

3. 材料科学

高能中子通过材料嬗变可使材料原子位移，在材料中产生氦和氢而改变材料性质使其性能下降，

造商业用堆。只有当 DEMO 能源生产能力达到 50% 或更高，才能期望聚变商业堆能源生产达到 80%（或更高）。达到 DEMO 的这一可用目标，需要可靠的部件设计、RAMI 的集成设计、高的可维护性以及各系统部件的可监测。

二、驾驭聚变能的 3 个研究要点 (thrusts)

（一）进行聚变能导出和氦燃料自供给的科学研究与技术开发

实现和平利用聚变能需要在聚变燃料循环和能量导出等研究上取得突破性进展。ITER 和示范堆（DEMO）的建造将远远超出我们现有的经验。要

成功地运行那些目前尚未制造、尚未演示，甚至尚未在相应环境下试验过的系统，本研究要点旨在通过科学研究和技术开发，安全可靠地实现：聚变能控制和导出；聚变燃料循环操作；氦燃料增殖和提取等过程。

作为实用能源，聚变核电站必须能够生产所需的氦燃料（通过锂捕获中子实现）并能在高温下可靠运行，以将聚变能高效地转换为电能或其他最终能源形式。继续开展聚变堆部件的实验研究和预测模型研究，并对其中发生的现象及相互作用进行研究，对于下一步开展燃烧等离子体研究及加速聚变能向实际应用转化的过程至关重要。

1. 研究的关键点

(1) 如何从燃烧等离子体周围复杂结构中取出聚变能？这些堆体结构在严酷环境下工程上能否可靠操作？

(2) 在实际系统中如何贮存和有效处理氦燃料？对这些大量流动的氦能否准确计量？

(3) 如何将锂增殖材料集成到能量导出部件中以补充燃烧掉的氦？能量导出和持续获得燃料能否

同时实现？

2. 拟采取的研究活动

(1) 开展相关基础研究，确立解决问题所需的科学参数。如氦化学性能、热传输性能以及液态金属冷却锂增殖包层中的磁场相互作用研究。

(2) 开展多因素效应研究，弄清典型聚变环境中操作条件和部件受复杂因素影响的综合效应。如利用 ITER 燃烧等离子体作为实验环境开展氦增殖和能量导出实验，对相关的材料、仪器、组件设计、运行温度和必要的辅助系统进行实验。

(3) 开展集成实验，获得堆环境下部件整体效应和性能数据，如考虑建造和运行聚变核科学装置（FNSF），进行试验和解决表面高热流和强中子长时间辐照效应及其他反应堆条件带来的问题，这些都是尚未解决的问题。

(4) 发展各相关理论和预测模型用于解释和指导实验研究，并收集全过程的可靠性、氦可数性和安全性数据。

本项研究要点相关的能量流和氦流见图 2 所示。

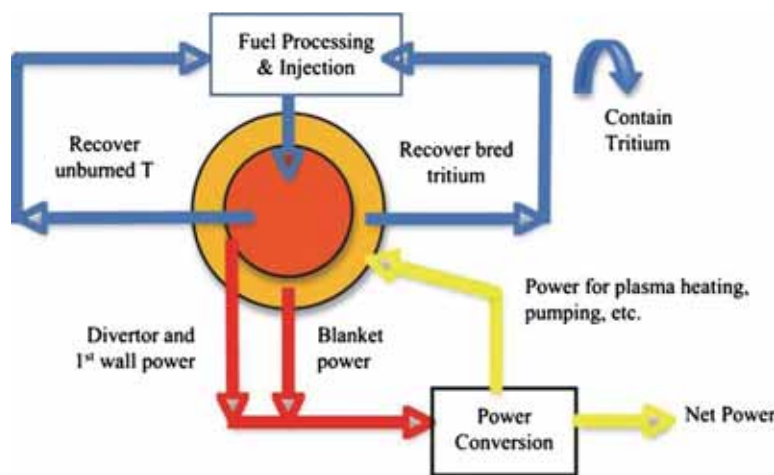


图2 能量流和氦流示意图

(二) 进行驾驭聚变能所需的材料科学研究和技术开发

与常规能源相比，聚变能进入商业应用需要在经济上具有竞争优势。同时，具有安全性且对环境的影响是可接受的，特别是从放射性辐射的角度来看。这些依赖于聚变堆中第一壁、包层和偏滤器系统的性能、可靠性和寿命，即依赖于热回收系统、等离子体纯化系统和氦增殖系统，这些关键部件的

设计及性能强烈依赖其结构材料的性能。由于这些是聚变研究中首要的可行性问题，并且资源有限，所以目前聚变材料方面的研究主要是针对结构材料展开的。基于安全、废料处置和材料性能的考虑，包层和偏滤器的结构材料基本上使用低活化铁素体/马氏体钢、弥散强化铁素体合金、钨合金和硅碳复合材料。同时，对面向等离子体材料、氦增殖材料、屏蔽材料、热绝缘材料、超导材料和诊断用材

料等大量材料也需要大力开发，以满足聚变堆的建造。要建立各系统材料科学发展的综合研究。

必须确保聚变堆材料能长时间在高温、化学元素活性、高应力和强辐照损伤等极恶劣条件下发挥作用。设计、建造和运行聚变堆核电站其材料和部件需要满足安全、高性能和对环境压力最小的目标。

1. 研究的关键点

(1) 什么样的材料其热性能、机械性能和电磁性能满足聚变堆的要求？

(2) 辐射损伤如何影响材料的性能？

(3) 辐射损伤、高温、高应力与腐蚀效应如何协同影响聚变堆的可运行性？

2. 拟采取的研究活动

(1) 改进现有和近期可得到材料的性能，同时开发下一代性能上具有突破性改善的材料。

弄清材料的强度、延展性和抗断裂性之间的关系。设计出异常稳定、高耐热性和能承受辐射损伤的材料；弄清在与等离子体相互作用下，对材料如何选择和设计；建立减小面向等离子体材料腐蚀性的数据库；开发大尺寸部件制造和焊接技术；根据基础材料科学，指导研发高性能材料，控制产生最小限度的放射性废物和最大限度的材料再循环使用。

(2) 开发并通过实验验证用于描述聚变堆环境下材料性能和生命周期的预测模型。

(3) 建立与聚变相关的中子源，加快对辐照损伤对材料性能影响的评价。

(4) 开展集成设计，建立试验方法，对聚变核电站材料、组件和结构进行研究。

(5) 利用现有的核与非核设施验证预测模型，确定聚变核电站材料、组件和结构的性能极限。

本研究要点的目的，是提供材料科学的基础知识和技术，实现对聚变堆的设计、建造和运行。研究聚变环境下材料的基本性质和材料性能模型。这些信息有助于满足聚变堆设计中所需材料的选择、改进和验证，再通过更高集成试验研究面向等离子体材料和包层组件性能，这是一个高度反复的过程。集成试验中的材料性能评价用于材料的选择和处理，材料的选择与处理反过来决定设计的可用性。

(三) 建立聚变能系统模型和集成设计

建立实际的聚变反应堆需要具备设计模型和对大量部件、子系统和过程集成的广泛的基础和科学

知识，包括氦燃料的闭式循环和有效控制聚变能的输出。需要搞清楚各系统性能之间复杂而又关联的相互影响，减少下一步 R&D 的投入的成本和风险。前两个研究要点集中在聚变燃料循环、能量导出和材料性能研究，模型的发展将促进这些方面的研究。本研究项要点着眼于系统集成，包括开展面向 DEMO 的先进集成研究、近期聚变设施集成研究和研究模型的集成研究。集成模型要模拟更复杂和具有多种耦合的聚变堆工厂，包括等离子体真空室、产氦包层、燃料循环和能量导出。

安全、可靠并持续的获取聚变能量并将其转化为可用能源，这需要将众多系统和物理过程集成起来。这一研究包括两个基本方面：开展先进的设计和开展集成模型研究。精准的先进设计研究可以揭示 DEMO 系统集成中平衡性和限制性等设计关键，如最大限度热利用情况下，要求能量循环运行在高温区，此时，温度上限由结构兼容性、冷却能力、热应力、材料行为和等离子体热负荷决定。确定重要的限制因素和设计事项，可以指导研究工作向更高级别和更高收益发展，并使研究计划风险降到最低。精准的先进设计研究，同样有助于聚变堆安全性集成研究、环境影响研究和 RAMI 事项研究。先进设计研究，对选择其他类型的核聚变装置的评估也至关重要。模型集成研究被用于解释聚变试验结果和部件的测试验证，从而降低聚变堆系统的开发成本和风险，并支持未来更先进的聚变装置的设计研究。

1. 研究的关键点

(1) 确定系统集成中哪些事项是先进集成所必须的？优化聚变装置的构造，扩展未来满足可用性、可维护性、安全性和环境要求目标的聚变装置的运行参数空间。

(2) 怎样将独立的物理、核和工程模型有效地耦合起来，描述高度集成的聚变堆系统的行为？

2. 拟采取的研究活动

通过面向 DEMO 的先进设计和集成研究确定开发聚变能的关键事项，包括：

(1) 优化等离子体位型及其维持方法的集成，将满足可用性、可维护性、安全性和对环境要求目标的风险降到最低。

(2) 确定自持燃烧聚变堆发展的科学基础，确

立哪些研究能解决建立 DEMO 的技术问题。

(3) 通过先进设计和聚变堆系统研究, 评价其他可选途径和对先进托卡马克(聚变核科学装置 FNSF) 的设计提出具体要求。

(4) 对装置的核部件和相关系统加大研究力度, 提高模型的预见能力。核部件和相关系统需要有很好的科学基础, 实现良好的耦合, 并且经过实验验证和有充足的数据支撑。

(5) 外推的模型包括物理现象的协同作用, 用于预见和解释集成实验(如 ITER 中 TBM 包层试验) 并优化系统。

(6) 发展用于研究等离子体模型集成的方法学, 获取第一壁、偏滤器在高温、高应力、强电磁环境和表面腐蚀等条件下的关键数据。

三、结束语

美国核聚变计划从等离子体物理到聚变能源系统, 已完成了准备建造 DEMO 所需要开展的研究方向的调研评估。驾驭聚变能主题研究涵盖聚变核科学和技术, 并归结为 3 个方面的工作: 聚变能导出和燃料循环; 材料科学和技术; 集成设计研究和模型集成研究。与其他 4 个主题一起, 全部 18 项研究要点形成一个整体, 可为美国聚变能科学局制定未来 20~30 年 R&D 发展战略规划提

供建设性意见。■

参考文献:

- [1] Letter from Gene Nardella[EB/OL]. (2008-09-19). <http://burningplasma.org/renew.html>.
- [2] Letter from Gene Nardella[EB/OL]. (2008-10-16). <http://burningplasma.org/renew.html>.
- [3] List of Topics Being Considered by ReNeW[EB/OL]. (2009-02-24). <http://burningplasma.org/renew.html>.
- [4] Office of Fusion Energy Sciences, U.S. Department of Energy. Research Needs for Magnetic Fusion Energy Sciences, Report of Research Needs Workshop (ReNeW), Bethesda, Maryland – June 8-12, 2009 [R/OL]. (2009-08) <http://burningplasma.org/web/ReNeW/ReNeW.report.press1.pdf>.
- [5] Meier W R, Raffray A R, Kurtz R J. et al. Findings of the US Research Needs Workshop on the Topic of Fusion Power[J]. Fusion Engineering and Design, 2010(85): 969–973.
- [6] Greenwald M, Callis R, Dorland D W, et al. Priorities, Gaps and Opportunities: Towards a Long-Range Strategic Plan for Magnetic Fusion Energy [R/OL]. (2007-10). http://science.energy.gov/~media/fes/fesac/pdf/2007/Fesac_planning_report.pdf.

US research needs for harnessing fusion power and its strategic R&D plan

FENG Beiyuan

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413)

Abstract: In order to map out its strategic R&D plan, the US Department of Energy, Office of Fusion Energy Sciences (OFES) commissioned a Research Needs Workshop, in June 2009. This activity will help OFES develop a plan for US fusion research over the next two decades. The workshop was organized in five Themes: Burning Plasma in ITER, High-performance Steady State, Plasma Material Interface, Fusion Power, and Magnetic Configuration. The total 18 research thrusts on the five themes were finally developed. The top level goal of the Fusion Power Theme was to identify the research needed to develop the knowledge to design and build, with high confidence, robust and reliable systems that can convert fusion products to useful forms of energy in a reactor environment, including a self-sufficient supply of tritium fuel. Each Theme was subsequently subdivided into Panels to address specific topics. The Fusion Power Panel topics were: Fusion Fuel Cycle; Power Extraction; Materials Science; Safety and Environment; and Reliability, Availability, Maintainability and Inspectability (RAMI). The key research thrusts of the Fusion Power theme were briefly introduced and expounded here.

Key words: The US; the US Department of Energy; fusion power; tritium fuel; environment and safety