

核聚变：瞄准安全和环境目标

分析聚变动力堆在安全、可靠和有益环境运行方面的潜力
是正在进行的研究的重要内容

Franz-Nikolaus
Flakus、John
C. Cleveland
和T. J. Dolan

几十年来，人们一直在注意那个为太阳提供能量的过程——核聚变，把它看作地球能源问题的一个解决方案。核聚变能否满足我们的期望还有待观察：聚变电站设计者面对的技术问题是复杂的，至今尚未建造一座聚变电站。然而，已在实现聚变潜力方面取得了显著的进展。

核聚变科学一些领域的研究工作已在许多国家进行数十年。这类工作包括：已为改善等离子体约束提供重要结果的 JT-60 实验；取得了相对于磁场压力的等离子体压力的最高记录的 D-III D 托卡马克实验；和已从聚变产生了 10MW 的热功率的托卡马克聚变试验反应堆 (TFTR)。联合欧洲环 (JET) 预料会达到，所产生的聚变功率超过输入功率的无亏损状况。尚未解决的物理问题，如等离子体的纯度，破裂和电流保持等，将由国际热核实验反应堆 (ITER) 解决。这座反应堆目前正由欧共体、日本、俄罗斯联邦和美国的专家设计。(见开始于第 16 页的相关文章。)

人们相信，工程设计问题——包括那些有关超导磁体、真空系统、低温系统、等离子体加热系统、等离子体诊断系统和包层冷却系统的问题——最终都会被解决。设计聚变电站的其它重要方面与安全性和经济性有

Flakus 先生是 IAEA 核安全司高级职员；Cleveland 先生是 IAEA 核能司高级职员；Dolan 先生是 IAEA 物理和化学科学处物理科科长。

关。本文着眼于聚变电站设计的安全方面，并评述目前正通过国际合作活动在各安全相关领域所做的努力。

与安全有关的目标和考虑

只有在商用聚变电站的设计细节确定之后，才能对聚变发电成本进行可靠预测。当前，还不能预期这一成本比其它能源的低得多。

但是在与安全有关的各领域，聚变比其它能源具有潜在的优势。几乎在所有与聚变电站设计相关的研究报告中，安全和环境方面的考虑正越来越被强调，聚变的安全目标也一直在被广泛讨论着。聚变电站设计的安全和环境目标是要保护工作人员免受辐射、电磁场和其它有害因素的影响；公众免受放射性和有毒材料的危害；环境免受污染物和废物的危害；投资者免受事故造成的损失。

聚变过程。在足够高的温度下，几乎所有轻核都能进行聚变反应，并且在原则上都能用作聚变电站的燃料。然而，技术难度却随着反应同位素核电荷的增加迅速加大。因此，实际上人们建议使用的只有氘、氚以及氦、锂、硼的同位素。

第一代聚变电站将很可能使用氘-氚 (DT) 燃料，这是因为它最容易点燃。主要的反应产物氦-4 没有健康危害。一次 DT 聚变过程的主要能量输出是 1 个能量为 14 MeV 的中子。高能中子轰击能使几乎所有

材料不同程度地活化。DT 聚变反应堆中的中子反应将不可避免地产生放射性同位素。因此,DT 聚变反应堆中存在的主要放射性材料将是氚和被中子激活的反应体周围的结构材料。

与安全有关的考虑。聚变电站特有的安全研究,包括与氚的安全性、氚释放的评价、活化产物安全性、放射性废物处置、潜在事故及其后果的分析有关的研究。它们是许多其它安全研究的补充。

电站运行期间氚的释放率必须很好地保持在可接受的安全范围内。这种氚释放是通过计及氚在电站所用材料中的渗透的计算机程序模拟的。主要的氚研究实验室建在加拿大、德国、意大利、日本、俄罗斯联邦和美国。

如果中子活化产物能够被包容或者它们具有短的半衰期,那么产生这类产物并不是个严重的问题。它们是聚变反应的副产物,不是直接反应产物。因此,它们在反应堆包层和结构体中的产生是在设计者控制之下,并可通过适当的设计和恰当的材料选择被降到最低程度的。目前,正在广泛研究各种低活化材料的应用问题。

聚变反应是不可能失控的;实际上,要解决的问题是如何使聚变反应完全充分地进行。事实上,所有的硬件问题都将导致聚变反应停止,并且由于只存在其量有限的聚变燃料以及聚变反应的性质,在任何情况下都有内在的限度。然而,在聚变安全方面的一个特别值得注意的工作是分析各种其它潜在事故比如磁体事故,并进行“后果计算”。为了把事故分类为不同的事件组和估算事故的频度,需要有特定部件的可靠性数据。

进行聚变电站一般安全分析的方法与其它大型核设施设计所用的方法相似。(见第 25 页附框。)安全分析的结果表明,聚变电站能够达到所期望的安全目标。例如,ESECOM 研究比较了许多聚变反应堆设计的安全和经济方面。* 讨论了 ITER 的一般安全问题,并公布了一份给出 ITER 安全分析初步结果的报告草案。

20 多年来,有关聚变电站安全性的研究一直在发展。它们不断改进以适应国际认同的辐射安全概念和要求的发展。

1994 年,IAEA 同其它 5 个国际组织联合公布了修订的《电离辐射防护与放射源安全性的国际基本安全标准》。这份同粮农组织(FAO)、国际劳工局(ILO)、经济合作与发展组织的核能机构(OECD/NEA)、泛美卫生组织(PAHO)和世界卫生组织(WHO)联合公布的基本安全标准,考虑了国际放射防护委员会(ICRP)有关辐射防护的新建议。剂量限制系统的核心部分是“防护最优化”原则。聚变是成功应用该原则的好候选者。在安全评价已纳入项目的早期设计阶段的场合,最优化最易实现。

如前所述,第一批聚变电站将非常可能使用 DT 燃料循环。在建造了基于 DT 反应的聚变电站后,为了开发能源可进一步寻求先进的燃料。这将使氚存量变少。以后的聚变电站可能发展成使用产生较少中子,并因此在周围材料中产生更少的放射性的燃料(如氘+氦-3)。这样,在向先进燃料循环发展的过程中,聚变的安全性优势就会随时间增长。将来也许能够设计出放射性核素存量足够低的电站,以致于应急计划和准备都是不必要的了。

聚变的实际实现

据估计,实现聚变发电约需 500—1000 亿美元的投资。聚变研究的进展速度受目前资金投入速度限制,估计全世界每年的资金投入只有约 15 亿美元。

当前人们的期望是,ITER 能在 2005—2010 年前后开始有意义的 DT 运行,随后建一座示范电站。示范聚变电站将在此后二十

* 见“Report of the Senior Committee on Environmental, Safety, and Economic Aspects of Magnetic Fusion Energy”, by J. P. Holdren, D. H. Berwald, R. J. Budnitz, et. al., UCRL — 53766 (1989).

年开始运行。如果这座示范反应堆是成功的,即,如果有足够的运行经验证明为商用电站筹资是正确的,那么早的话商业聚变电站将在 2050 年前后开始运行。

这一推断的时间表可能被推迟或提前。资金短缺和等离子体现象或技术上的不可预见的困难,可能使这一时间表推迟。在认识等离子体行为方面的突破(例如也许最近在托卡马克运行的“逆切模”方面的成功)、增强等离子体约束方面的新发明,以及加大投资速度都将使这一时间表提前。

非托卡马克型的等离子体约束也正在研究中,以开发出生产较低成本电力的反应堆。例如,日本和欧洲正在建造大型仿星器实验装置。十分清楚的是,安全性研究在获得和保持公众对聚变发电的信心、愿望及接受程度方面将起到非常重要的作用。

IAEA 在聚变安全方面的工作

在国际聚变研究委员会(IFRC)的指导下,IAEA 正在开展一系列旨在推进国际合作和帮助提高聚变动力安全性和环境优势方面的活动。其中包括支助 ITER 项目,ITER 的工程设计工作进程已经过半。ITER 实验装置在设计中已体现其安全性,以确保在严重事故过程中不会发生放射性同位素释放导致的死亡。1995 年,IAEA 出版一本有关惯性聚变反应堆安全性的文集。

IAEA 在辐射安全领域里的许多工作与聚变安全有关。它们涉及辐射防护的安全标准、放射性材料的安全运输和放射性废物管理、氦安全处理导则、以及限制向环境释放放射性等课题。

1973 年以来,聚变安全一直是 IAEA 安全工作议程中的一个特殊项目。过去 20 年,IAEA 组织了几次关于聚变安全的技术委员会会议。会议中讨论了进展、研究需求以及未来计划。一般情况下,有十几个成员国的约 50 名专家出席这些会议。会议每三至四年举行一次。最近一次会议是 1993 年在加拿大多伦多举行的,这次会议的论文集发表在 1993 年 6 月号的《聚变能杂志》上。下次

聚变安全的基本原理

目前,聚变安全的基本原理包括如下概念:

- 非能动系统和固有安全特性;
- 故障安全设计;
- 可靠性(包括部件(泵、阀门等)的冗余度;多样性(如两种不同的备用电源);独立性(如果一个部件或系统失灵,不会导致邻近部件失灵);简化性;和监视,以便在事故发生前探测到故障部件;
- 考虑人为因素;
- 远距维护能力;
- 工作人员态度方面的安全教育;
- 质量保证(包括法规和标准;核查和确认;和安全分析);
- 运行控制(故障探测,自动校正响应);
- 减小故障后果的安全系统;
- 事故准备和管理,以维持约束整体性;
- 应急计划,以便在需要的情况下缓解放射性释放的影响。

会议计划 1996 年 10 月在日本举行。

展望与未来方向

聚变反应堆在安全、有益环境运行方面具有很大潜力。聚变电站的安全性一直是纸上设计的,尚不容易与裂变反应堆或其它运行中的能源的安全性相比。在聚变中,大部分放射性材料是中子活化产生的副产物,这为通过材料开发和选择或使用先进燃料实现防护最优化留有余地。

为了确保聚变潜在的安全和环境优势最终能够实现,聚变反应堆的设计中必须考虑安全工程。ITER 项目正在这样做,尽管 ITER 只是一座先进实验聚变反应堆,还够不上原型聚变动力堆。

随着聚变安全研究的进展,需要做越来越多的跨学科工作。在这个漫长过程中,人

聚变安全分析

与其它大型核设施的安全研究一样,聚变电站的事故分析涉及各个步骤。

事件的每个后果都可用“事件树”表示,该树的每个分枝有相应的发生概率。例如,如果一个阀门被令关闭,它不被关闭的概率很小。对于冷却剂丧失事故和流量丧失事故,在第一壁和包层中的温度升高必须作为时间函数计算。于是可以根据实验室试验数据,估算各种元素的迁移情况。

在事故过程中迁移的放射性同位素的数量构成“源项”。有时源项由氧化物气溶胶组成,它们大部分沉积于在建筑物内。在安全壳损坏的严重事故中,一部分气溶胶可能从安全壳泄漏到大气中。一些完善的计算机程序被用于模拟:

- 中子和 γ 射线在第一壁、包层和屏蔽中的传输;
- 中子吸收产生的放射性同位素;
- 事故中由余热和化学反应引起的温升;
- 事故中放射性同位素的迁移情况;
- 约束建筑内的(和反应释放的)气溶胶传输;
- 释放的粒子和气体向场地边界的传输;
- 场地边界“最大受照个人”的辐射剂量。

们有信心期望,随着聚变电站设计方面取得进展,安全能够得到加强。20年前 IFRC 主席 C. M. Braams 在当时精心准备的一篇评论的绪言中说的话,今天看来仍然不错:

“……尽管利用聚变有益环境的优势的前景是好的,但毫无疑问聚变反应堆如果成为现实,一定会对环境产生影响——包括放射性危害——它的大小将取决于研究方面取得的进步、材料可获得性,和社会准备在减小影响方面投入多少力量。” □

聚变电站事故分析步骤

I. 考虑潜在危害:

其中包括:

- γ 辐射
- 氦的例行释放
- 来自以下方面的放射性物质的事故释放:
 - 结构
 - 冷却剂
 - 腐蚀产物
 - 灰尘
 - 壁、包层、冷却剂、真空系统、装料系统内的氦
- 铍、钷、铅等毒性材料
- 电磁场
- 真空
- 低温流体
- 窒息物(N_2 、He 等气体)
- 化学反应
 - 液态金属与水、空气或混凝土反应
 - 热表面与水或空气反应
 - 氢的产生和爆炸
- 高电压
- 转动机器
- 起吊重物
- 由透平叶片、磁体线圈弧或高压气体产生的飞射物。

I. 分析可用于“迁移”放射性物质的能量源

估计数值的例子:

- 衰变热 [910] GJ 第一个星期内
- 化学反应 [800] GJ
 - 冷却剂
 - 水/空气+热等离子体—面对等离子体的部件。
- 冷却剂贮存的能量 300 GJ
- 磁体线圈贮存的能量 120 GJ
- 满功率聚变反应 1.5 GJ/秒
- 等离子体磁能 1.3 GJ
- 等离子体热能 1.2 GJ
- 容器热能 小
- 真空 小

II. 分析可能的事故,如:

- 等离子体事件
 - 聚变过功率
 - 破裂
 - 延迟停堆
- 冷却剂丧失事件
- 流量丧失事件
- 真空丧失事件
- 磁体事件
- 低温丧失
- 氦工厂事件
- 辅助系统事件