

# 现代核燃料循环技术与 IAEA 安全保障

## 展望可预见的发展及其潜在影响

Adolf von Baeckmann

《不扩散核武器条约》(NPT) 于 1968 年开放供签署以后, 在 NPT 无核武器国家实施安全保障制度, 保证和平核活动不被用于制造核爆炸装置的责任, 落到了国际原子能机构 (IAEA) 的肩上。为此, IAEA 不得不大大地扩充和改进了其安全保障体系。

因此, 在 70 年代初期, IAEA 的大多数安全保障概念和技术获得了发展, 当时只有核武器国家有完整的核燃料循环。特别是铀-235 浓缩技术, 只有这些国家掌握, 而且它们总是小心翼翼地避免把这些技术转让给无核武器国家。在那个时候, 乏燃料后处理不被看作是敏感问题——而且在实践中, 几乎没有人利用铀-钚混合氧化物 (MOX) 制造燃料元件, 钚在无核武器国家中的使用仅限于快中子增殖堆 (FBR) 研究设施, 如快中子临界装置。

自那以后, 情况逐渐有了变化。几个无核武器国家已经掌握了轻水堆 (LWR) 燃料循环。它们以超离心技术和其它的气体动力学方法 (UCOR 和喷嘴技术) 为基础, 发展了自己的浓缩能力, 并在乏燃料后处理方面获得了大量经验 (如欧化工厂、西德卡尔斯鲁厄后处理厂、东海村后处理厂和塔拉普尔厂)。几个无核武器国家还发展了 FBR, 并建成了一些重水生产厂。

情况仍然在变化着: 切尔诺贝利和三里岛核事故造成了很坏的影响。核工业在 70 年代初期蓬勃发展

的那种景象已经让位于巩固和整顿的政策。FBR 项目已经停止或推迟, 动力堆的新订单急剧减少, 后处理厂和 MOX 燃料制造厂的建造计划已经大大推迟。总之, 除了超离心铀-235 浓缩厂的建造以外, 整个核燃料循环工业处于停滞不前的状态。

尽管有这些变化, 但深入地看一下就会发现, 前景还不是那样的暗淡: 许多计划已经推迟, 但至今并没有取消。而且, 由于迫在眉睫的那种压力没有了, 因而开发工作往往可以比较仔细地考虑和规划。最显著的一些发展可以在自动化领域——特别是后处理厂和 MOX 燃料元件制造厂的自动化中找到, 也可以在反应堆燃料经济分析以及乏燃料的贮存等领域中找到。激光浓缩技术有了插足核燃料循环的机会, 从重水慢化剂和冷却剂中分离氘的工作也已成为常规。

本文将对可预见到的某些发展及其对 IAEA 安全保障的潜在影响作些分析。但是, 将严重影响 IAEA 安全保障未来的其它——非技术——方面的发展, 一定不能忽视。最可能出现的一项发展, 或许要算对核武器国家所有和平核活动中的一切核材料全面实施 IAEA 安全保障这件事了。

### 自动化方面的发展

出于经济方面的考虑和把从事核工业的工作人员所受的辐射照射量降至最小的需要, 强烈激励着人们使某些核燃料循环设施 (特别是乏燃料后处理厂和燃料元件制造厂) 实现高度的自动化。然而, 自动化和远程操作会使视察员难以接近核材料, 对核实工作不利。

von Baeckmann 先生是 IAEA 主管安全保障的副总干事的顾问。本文所反映的仅是他个人的意见, 并不代表 IAEA 或其安全保障司的正式意见。

因此,需要开发一些核实过程中存量的新程序。已经提出了近实时的材料衡算、连续盘存和使用同位素分批标记等新程序,以便补充或替换通常所用的盘存程序。各项操作的监测方法和更广泛地使用复杂的封隔监视(C/S)技术的方法也正在开发。过程存量的数学计算方法正在研究,使用固定的测量设备(或是专门为安全保障目的安装的,或是工厂的控制所用的仪器仪表)也正在考虑之中。

这些新的安全保障技术并不是没有问题的:需要有经改进的抗干扰技术和鉴别安全保障用数据的技术,这要求更加详细地了解工厂的设计及其运行情况。由于工厂的自动化通常是与高度的计算机化相连的,所以与计算机的操作有关的专用技术和知识是必不可少的。特别是,进行后处理和制造MOX元件的新设施,就属于这一类。

### 铀-235 浓缩

浓缩技术的扩散是个重要问题。现在至少有5个无核武器国家拥有浓缩厂,另外还建成了几座研究与发展设施。铀-235的商业性浓缩已不再是核武器国家的专有特权。

对以超离心技术为基础的浓缩厂而言,“六国安全保障工程”已经拟定了一套可接受的安全保障方案,这一方案以视察员“次数有限地不宣布接近”(LFUA)级联区为基础。\*这一方案谨慎地兼顾了保护商业上敏感的信息的要求与进行可靠的核实活动的需要。由于LFUA区中的六氟化铀存量相对地说较少,因此,为这种工厂制订的安全保障方案,还包括结算级联区以外的材料收支情况和核实级联区内确实未生产高浓缩铀(HEU)。

在受IAEA安全保障的研究与发展性质的浓缩设施中,目前基本上还没有采用别的铀-235浓缩技术,但这种情况也许很快就会有变化。如果南非的UCOR工艺要置于安全保障之下,也许有必要采取一些附加的措施,因为它的级联区中包含着数量非常大的六氟化铀。同样,如果西德-巴西的喷嘴法也被用于受保障的商业规模浓缩厂,或现有扩散厂要接受

安全保障,情况也会是这样。这些工厂的有几个运行参数被认为在商业上是敏感的,但如果不了解其中的某些参数又无法得知数量如此之大的过程存量,因此也许要开发专门的核实程序。

激光浓缩设施不一定会引起特殊问题。如同超离心浓缩技术那样,与同等生产能力的扩散厂相比,激光浓缩设施的过程存量相对说来也较少,而且只有很窄的一个工序含有敏感的激光浓缩技术。从核扩散的角度看,激光浓缩技术的主要问题在于激光分离厂的规模可以比较小,如果某个国家决意形成秘密的高浓缩铀生产能力,那是比较容易隐瞒的。当然,(可能)出现未受保障的浓缩厂一事,会导致低浓缩铀安全保障概念的变化。涉及铀的新安全保障方案,将不得不以包含在浓缩铀中的分离功值为基础,而不是以人为地在(可直接利用的)高浓缩铀和(不可直接利用的)低浓缩铀之间划定的界线20%浓缩度为基础。

### 轻水堆燃料的经济分析及其在热堆中的返回利用

一些国家为了提高轻水堆燃料的经济性,开发出了非常复杂的低浓缩铀(LEU)燃料元件和设法使铀返回利用。这两项措施会给IAEA的安全保障体系带来一定的影响:

如果燃料元件中的铀浓缩度不均匀或存在着可燃中子毒物,则用无损分析(NDA)技术核实未辐照燃料组件中的燃料含量就相当复杂。使用返回铀的情况也如此,因为其中含有痕量的铀-236,因而使测量新元件中的铀浓缩度和铀含量用的标准程序变得很复杂。虽然现有的 $\gamma$ 谱测量技术和中子环套测量技术原则上仍然是适用的,但需要根据测量设备的具体设计特点进行专门的校准。这些操作既费时又费钱,如果没有良好的标准样品,测量结果的精确度通常较差。

在对大多数更加先进的LWR燃料组件实施安全保障方面,燃料细棒的交换增加了工作的复杂性。特别是在新的和用过的燃料元件中交换细棒的可能性,使安全保障战略更加复杂和更带有侵入性,为此要求使用附加的C/S措施和进行附加的测量。如果乏燃料组件在反应堆厂房内例行地解体,只把乏燃料细棒送去贮存、后处理或最终处置——就象有些人已经提出的那样——则情况会变得更加复杂。在这种情况下,在解体和装入运输罐期间也许需要动用很多人力从事人工监视活动。

\* "The Hexapartite Safeguards Project, a Review by the Chairman", by F. Brown, IAEA-SM-260/57, Vienna (1983).

在热堆中的返回利用。MOX 燃料组件的生产，现在已比较经常，目的是将反应堆铀返回 LWR 利用。这方面的安全保障有一个大问题，因为已分离铀的及时性指标较短：新的 MOX 燃料组件必须比较频繁地（每月一次）受到检查。此外，通过 NDA 测量核实或再核实新 MOX 燃料组件中的铀是比较困难的。因为新的 MOX 燃料组件常常存放在反应堆厂房内的水下，眼下又根本不存在可供水下进行 NDA 测量用的那种 NDA 技术，因此，为了进行再核实，只好采用侵入式的燃料操作技术，或必须采用附加的 C/S 措施。

在核实 MOX 燃料组件中的铀方面，新增的另一个难题是每根细棒中的铀同位素的组成常常是不同的，以致仪器的标定工作变得十分复杂。不管怎么说，应该认识到，铀在热堆中的返回利用眼下是在 LWR 燃料循环中消耗已分离铀的主要途径。

### 乏燃料贮存

由于至今尚未建成任何乏燃料组件最终处置设施，大多数乏燃料元件通常长期贮存在可取回的专设贮存库中。乏燃料元件将来究竟是存放到最终的（不可取回的）乏燃料贮存库中，还是将来进行后处理，许多国家尚未作出决定。几乎所有的国家都没有说死一定不进行后处理。

为了有效地对乏燃料实施安全保障，必须开发新的概念、NDA 技术和 C/S 技术。最近的一项发展是能用于水下就地再核实的超声波封记，这种封记现在已在几座坎杜堆的乏燃料贮存池中作为常规手段使用。此外，已经针对某些 LWR 研制成了能自动对乏燃料元件转入运输罐的情况进行监测的设备。

IAEA 正在考虑乏燃料长期贮存库（多层水池和空气冷却贮存库）的安全保障方案，并已开始调查对乏燃料元件最终处置设施实施安全保障的可能性。（参看本期第 16 页的文章。）就乏燃料已经在反应堆厂房内被装入长期贮存容器中的情况来说，人工监视装载过程也许是唯一可用的核实技术。一旦乏燃料罐被装填好后，就只能用 C/S 措施来确保乏燃料不被挪用了。

安全保障方面与乏燃料贮存有关的一个重要问题是，随着冷却时间的增加，由于大多数裂变产物的衰变，乏燃料——或者更确切地说是乏燃料中所含的

铀——变得更易于接近。这意味着这种元件的放射性自保护程度正在减弱，材料转用的潜在吸引力正在增加。这是一个经常被赞成乏燃料长期贮存的人所忽视的问题。机构也确实从未明确地讨论过这个问题，也未在“已分离铀”（探知时间较短，核实要求很高）和“包含在乏燃料中的铀”（探知时间中等，核实要求中等）之间划一条合理的界线。事实上，对核武器生产来说，包含在冷却了很长时间的低燃耗乏燃料中的铀，与来自高燃耗燃料的、目前以高温烧结混合氧化物的形式“存放”在新燃料元件中的已分离铀相比，前者的吸引力大得多。由于乏燃料的冷却时间普遍在加长，LWR 燃料的燃耗也在加深，因而这一问题在将来会更加突出。最终处置设施如果要（或正在）存放乏燃料元件（“铀矿”），就一定不要忽视这个问题。

### 重水生产厂

1991 年，预计第一座受 IAEA 安全保障的重水生产厂将开始生产。对 IAEA 来说，这是一项新的、异乎寻常的任务。这样的工厂并不是真的燃料循环设施，也没有什么核材料可接受安全保障。不过，重水生产厂是一座非常复杂的化工厂，拥有几百公里长的管道和众多的容器、交换柱、泵、热交换器等。

在当事国和有关建筑公司的紧密配合下，IAEA 正在为这座重水厂开发一种以结算氙的收支情况为基础的安全保障概念。\* 重点注意工厂的设计、运行方式、氙的提取、厂内存量、自然损耗以及测量的不确定性等。正在开发的这些概念和技术，要监测大量的运行参数，它们仅适用于这座工厂，该厂的某些重要特点在世界上是独一无二的。在一种令人满意的、有效和高效的安全保障制度得以实施以前，需要用比较长的时间进行试验和示范。

但也有人提出，由于重水对核扩散的意义不大，机构可用于安全保障的资源又有限，因而 IAEA 应该把它在重水厂中的安全保障活动集中在核实最终产品上。

\* “Selection of a Safeguards Approach for the Arroyito Heavy-Water Production Plant”, by A. von Baeckmann and M. D. Rosenthal, IAEA-SM-293/140, Vienna (1987).

## 氙

随着核武器技术的发展,被认为敏感器材的品种会有所变化。在60年代和70年代初期,曾把核级石墨看成是敏感的,但在实践中,核级石墨在IAEA安全保障中实际上没有任何意义。另一方面,某些超铀元素和氙却可以在核不扩散问题中起重要作用。一旦限制核军备协议达成,出现核武器国家的核武器生产和更新需要中断的形势时,情况就更是如此。

关于氙的问题,最近已开始进行讨论。对许多核武器来说,氙似乎是必不可少的,它的产量对于核武器的更新和保持库存来说也许是一个限制因素。因此有人提出,IAEA的安全保障或许要把氙包括进去。在核武器国家中,氙一般是在专门为生产氙和钷设计的生产堆中通过核反应产生的。原则地说,可以利用IAEA的视察员核实这些国家是否存在必要的辐照设施,或是否使用现有的辐照装置生产氙。但必须意识到,在用重水冷却和(或)慢化的动力堆中,正在生产着大量的氙,这并非是故意的,因为它是一种副产品。为了排除从受保障反应堆的重水中未报告地取出氙的这种可能性,看来必须持续地监测此种反应堆中的氙含量和存量。这样一项任务当然是相当艰巨的,因为不管是出于辐射防护方面的理由,还是从商业性的和平利用角度,都可以要求从动力堆的重水中分离氙。

目前,IAEA的安全保障制度中并没有考虑对氙的产量进行探测或核实。事实上,在任何的安全保障协定、IAEA《规约》,或者是在IAEA从某些成员国收到的涉及出口规则的资料(INFCIRC/209和INFCIRC/254)中,氙的问题甚至提都没有提到。一旦防止氙的生产成了IAEA安全保障的一项任务,那就必须开发和实施新的安全保障措施。INFCIRC/153就必须修订,现有的与安全保障有关的所有协定也都得修改。

## 其它方面的发展

与IAEA安全保障有关的发展,并不局限于无核武器国家和平核活动方面的技术发展。正如比较现代化的一些技术既可用于改进燃料循环活动,也可用于改进核实活动一样,这些技术也可以被潜在的转用者所利用,因而必须在进行所谓的转用分析时加以考

虑。改进过的计算机程序,可以帮助IAEA以比较可信的形式,分析安全保障方面现有的核材料流量和存量数据,但它们也可以帮助潜在的转用者改进他们的转用战略。这就是为什么IAEA的安全保障不能建立在一成不变的概念和准则之上,而必须通过坚持不懈的开发和修改不断地加以发展的原因所在。

政治方面的种种发展也是必须加以考虑的。归根结底,核不扩散政策的合理性,只有得到(从长远来看)核军备控制和裁军政策的补充,才是充分的。一旦核裁军协定生效,IAEA安全保障在核武器国家中的地位也许会扩展成一种比较全面的国际核查体系。这确实将是下一个十年中IAEA的安全保障也许要面临的一项最重要的任务。

此外,西欧的经济一体化过程将会使西欧国家在核燃料循环方面的联系加强,乏燃料后处理也许会集中在两个核武器国家(即法国和联合王国)内进行。另外,东欧在政治和经济方面的新发展,也许会导致欧洲的核燃料循环服务进一步集中,以致IAEA在这一地区的安全保障活动最终有可能集中在几座大型设施上。

严重影响IAEA安全保障有效性的另一项发展是,尚未接受全面安全保障的那些无核武器国家中处于IAEA安全保障体系控制之外的核设施数目和核材料数量日益增加。这些国家的一些反应堆,以及实际上包括铀-235浓缩厂、后处理厂和重水生产厂在内的各种类型的燃料循环设施,已经在IAEA安全保障范围之外投入运行。IAEA安全保障的普遍性正在明显下降。这不仅使IAEA对受保障核材料适用安全保障变得更复杂,而且降低了国际上对于国际核查不扩散政策的信心。就不扩散体制的未来和IAEA安全保障的未来而言,扭转这种趋向是必不可少的。

最后一点,对核活动管得过严的这一倾向(这一点在切尔诺贝利事故之后在某些国家中可看到),也许会延缓或妨碍安全保障措施的贯彻执行。特别是在安全保障样品的运送、燃料的移动和接近程序方面,遵守各国的新法规和新要求的困难越来越多,这一点已经察觉到。

## 展望

机构将如何对付这些挑战呢?技术性的任务通常借助于顾问、咨询组和安全保障支助计划等,由机构

的视察员和开发人员处理。几个成员国中的研究与开发方面的国家实验室，通过这些安全保障支助计划配合机构开展工作。\* 此外，安全保障执行常设咨询组 (SAGSI) 经常在它们的审议活动中讨论有关的发展，并不断地给机构提出建议。

一国或国际支助安全保障的研究与发展项目，及与商业性公司之间的合同，可用于发展安全保障概念、仪器、方法和技术。“东海村先进安全保障技术演练” (TASTEX)、“六国安全保障工程”、和“大型后处理厂安全保障计划” (LASCAR) 等，都是国际安全保障项目的具体例子。\*\* 在某些情况下，在建造新的核工业设施时已经考虑了安全保障的要求，但这一方面还需要有更多的指导和做更多的工作。此外，在 IAEA 的安全保障司内，已经建立了一些具体的

项目，准备打破处的界线，研究在综合性设施中实施安全保障的办法。

在 IAEA 成功地响应新发展的能力中，很重要的一个因素是要有雄厚的经济基础。遗憾的是，IAEA 已在安全保障经费近乎零增长的限制下工作了多年，结果是不得不挪用部分研究与发展经费来满足压力愈来愈大的扩大视察活动的需求。因而现今的开发工作受到经费不足的困扰，而且随着时间的推移，这个问题将变得愈来愈明显。一旦核武器国家中的安全保障活动真的要进一步扩大，人力物力肯定需要大大增加，否则就只能使目前这种水平的安全保障措施密集程度降低。在安全保障的研究与发展和实施方面，足够的经费和持续的合作，是使机构有能力成功地应付日益增加的任务所必不可少的。

\* H. Kurihara, 《支助计划在安全保障中的作用》，《国际原子能机构通报》中文版第 30 卷第 1 期，维也纳，1988 年。

\*\* For TASTEX, see *Tokai Advanced Safeguards Technology Exercise*, Technical Reports Series No. 213, IAEA, Vienna (1982).

IAEA 安全保障的覆盖范围遍及全世界 900 多座核设施。

