

一个庞大的研究和发展计划

——加拿大废核燃料的深埋贮藏

沙振元

(上海原子核研究所)

摘要: 本文简要地介绍加拿大废核燃料的深埋贮藏研究与发展计划的由来、意义、具体设想、工作内部、组织方式以及具体进度等各个方面。

加拿大是积极发展核电事业的 国家之一。经过长期探索,他们的科技工作者找到了一条不需富集,即用天然铀作核燃料的独特技术道路,发展了一种运行效率很高的重水反应堆,并使其得到很好的应用。目前,加拿大已建立发电用的反应堆16个,发电量共约900万千瓦。今后十多年来加拿大的核电还将会有更大发展,预计在本世纪末核发电总量可达600万千瓦,大约占加拿大总发电量的三分之一。

利用核电虽有许多优点,但长期来最令

人们担心的是反应堆和大量核废料如何得到妥善的处理问题,特别是反应堆堆芯的核废燃料棒束处理问题。存放核燃料的棒束是反应堆堆芯工作的重要基本部件,二氧化铀被压制在陶瓷片内,再叠放在锆金属管内,由近二十根锆管组成一个棒束。每个棒束大约含铀48公斤,可以发电100万千瓦/小时,这相当于400多吨煤的发电能量。棒束在堆芯平均燃烧十七个月,需要替换新的棒束,这种被换出的废棒束具有极强的放射性,也是核工业中最为主要的强放废物。以加拿大彼克

在Mcromafios上测得 O^{8+} 离子流75%的发射度为 $30\pi\text{mm}\cdot\text{mrad}^{(9)}$ 。它接近于我们测得的离子流的核心值。在(8)、(9)报告中发射度值的宽度范围可能由于包括了离子流尾的不同部分所致。离子流中心核的发散性表示了对高到低的电荷态的能量分辨的极限为(0.1~5)eV。

对LBL的ECR源今后的发展计划是:使固体物质得到较宽的范围而提高RF系统。即采用Geller报告中所指出的,使RF的频率由10GHZ增加到16GHZ时导致 Ne^{10+} 束流大量提高的方法⁽¹⁰⁾。我们计划用目前第一级的调束管来馈送第二级的RF。从而使第二级的RF频率由6.4GHZ提高到9.2GHZ。

参 考 文 献

1. J. Clark; 9th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications. p231~240, (1981)
2. C. M. Lyneis et al; IEEE. NS32. No5. p

(1745—1747), (1985)

3. D. J. Clark et al; 10th Int. Conf. on Cyclotrons and Their Applications. p133-136(1984)
4. C. M. Lyneis; LBL Report 18501, (1984)
5. Y. Tongen et al; Proceedings of the International Conference on the Physics of Highly Ionized atoms (1984)
6. Y. Tongen et al; IEEE NS-30 p(2685-2689) (1983)
7. R. Geller et al; Proc. Int. Ion Engineering Congress—ISIAT83 and IPAT83 p(187-198) (1983)
8. N. Chan Tung et al; M. I. N. 174 1/2. p (151-156) (1980).
9. P. Spadke et al; LBL puB-5143. p (103--106). (1985)
10. F. Bourg et al; LBL. puB-5143. p (1-27), (1985)

林 (Pickering) 电站的一个反应堆为例, 加以说明, 该堆内共装有4680个棒束, 那末, 每年平均产生的废棒束大约有3600个。经过多年的积累, 加拿大现存这种废棒束十多万只, 目前全都存放在大水池内。两米深的水层可以屏蔽棒束内核燃料的 γ 射线辐射, 同时, 每个废棒束的放射性自发热(约二千瓦)可以由水来冷却, 棒束中渗出的微量放射性物质则由循环水带到离子交换树脂系统被吸附。一般来说, 在水池中存二、三十年是安全的。实际上, 如果存放期达到五年后, 废核燃料中较短寿命的裂变产物已经大都衰变掉, 总的 γ 放射性强度大为下降。此时, 可以考虑将其移放到专门的水泥屏蔽室或屏蔽管内, 这种方式的贮藏可以保证达到五十年的安全期。然而, 这毕竟不是长久之计, 仍然需要寻求一种确实可靠的办法来保障人类的安全。于是, 就提出了长久性深埋这些废物的设想。

把强放废物深埋的基本设想是这样的。即在地下500米至1000米深的岩洞石内建立贮藏库和专用装备, 把废棒束或对废核燃料处理后的强放废物存放在库内, 采取一系列措施使其密闭, 使放射性永不危及人类的安全。也就是说, 放射性物质的微量渗透在经过长时期后进入人类活动范围之前早已衰变殆尽, 不可能惠及人身安全。这一设想看起来并无十分复杂的构思, 然而, 施行起来, 却包括了广泛的科学内容和工程范围, 它涉及到地理、地质、水文、物理、化学、机械工程、水利工程、核测量技术等等各种专业领域, 综合性极强, 耗资巨额, 估计仅研究和发展工作, 就需要约200亿加元。因此, 要对工作的经济性、科学性、合理性及其社会效率进行反复充分的比较, 逐步执行。它是加拿大研究发展史上最大的项目之一。

除此之外, 是否还有别的方案呢? 科学家们曾经探讨过其他种种办法, 但相比之下, 这些方法会有更多的困难, 把握性小。比如, 可以考虑运用运载火箭把固化了的强

放废物带到遥远的星际, 然而估算下来, 如此装载1公斤废物需要耗资约2000美元, 而且火箭万一在大气层中烧毁, 放射性污染的后果将十分严重。把长寿命放射性核素转化为短寿命或稳定性核素, 虽则在理论上可行, 但必须解决一系列放射性处理装备和高效分离技术。把废物存放地球南、北极的冰层之下, 不仅为现有国际公约所不容, 而且必需首先摸索大量地球水利规律。如把废物埋藏到海底地下, 同样需要解决地下深埋方案的种种问题, 再说, 在深海底下开掘深孔的技术目前人们还未掌握。

地下深埋强放废物研究与发展计划的主要内容是:

一、废物处理

(一)永久性废物储存容器的研制。对各种金属、合金材料进行选择, 包括强度、机械磨损、腐蚀性能、热传导性能等在模拟条件下的系统测试和评价, 还要对放射性溶液经长时期的渗透作出评价和选择。

(二)容器与棒之间填充料的选择。这种填充料以熔融状态被填入容器与棒束之间, 起密闭放射性废物的作用。对这种材料的选择, 要考虑其抗损伤的机械性能、抗水腐蚀的性能、污染渗透周期、放射性释放的比率、热效率和放射性效应对材料本身的影响、熔融时与棒束材料的相互作用以及加工的方法、成本等因素。试验的材料初步定为铅和玻璃。

(三)对部分核燃料经过后处理后的强放废液进行固化和存放。世界各国对这一工作有较广泛的研究, 加拿大采用使废液转化成玻璃状固体的方法已具有较成功的经验。从长久性储存要求看, 还需开展机械强度、材料稳定性、溶解性等一系列的测试考验。

二、地学研究

先由飞机对地球表面作地质勘察。大量地质资料的获得要依靠掘井、取样和测试, 结合采用电视照相、电阻测试、微波天线等仪器来研究岩石组成、同一性、性质断

层特征、地下水质量和水流系统状态等。另外，还需监察地下震源，作地壳稳定性情况的调查以及历史上冰河期侵袭状况的调查，以防被选择地区将来会出现地震或冰河现象。

在调查的基础上，选择包含有示范性储存装备、贮藏库、存放工具的废物管理中心的具体地点，进行经济、环境安全以及对当地的就业、经济效益和可能产生的不利因素等的全面分析和评价，经过与地方委员会、联邦政府、省政府代表的协商一致后，再作深入、仔细的勘察、取样和环境研究。如果所获得的结果仍然证明符合选择要求，再作正式确定。

三、装置设计

这里是指放射性废物被转入地下后的输送、操作、安放等一系列过程中的操作装备设计以及在安放废物之后需要解决的问题。整个工作需要充分考虑到地下操作时发生放射性事故的各种可能性，采取措施加以预防。

与安放废物有关的一个问题是解决一种填充材料，将它加入碎岩石、沙土内，以控制放射性转移速度、调整地下水的水性、减少对容器的腐蚀和减少放射性的溶解量。

另一项重要的研究，是解决一种密封方法及材料，把贮藏库四周表面密封起来。这种材料需要有很好的防水性，与岩石的密度、热扩散性相匹配，还要有良好的机械性能。

考虑到放射性贮藏与库房之间的联系，需综合研究它们之间相关问题，比如固体废物由于衰变时的自发热可能会影响岩石的机械性能，应该事先进行充分的计算。

以上这些工作，都要在接近地表面的地下室内，经过充分的模拟试验考验后，才能转入深部的地下试验。

四、输运

为了把分布在各地核电站的废燃料集中到统一的埋藏地点，中间需要一个绝对安全

的运输过程。在这方面，加拿大和其他一些国家都已做过相当工作，积聚了不少经验，加拿大已有符合安全条件的运输件500多个，美国有4000多个。

对安全运输的基本要求是在发生任何运输事故的情况下，盛放废核棒束的容器却要保证能够抵御内部放射性物质向外泄出。这种容器的结构，是一个约2米直径3米长的圆柱体，四周要有16.5厘米铅和9厘米厚的铁作屏蔽，重量约50吨，内部可装放射性废物3.5吨。这种容器要经过非常严格的强度测验，如由直升飞机将它提升到610米的高度，然后被摔到硬质地面上。载容器的输运卡车以每小时100至130公里的速度，冲向水泥厚块的撞击试验。以每小时130公里速度的火车头向运输车猛冲的试验等。

研究发展计划的进度大体如下所述。贮藏库的建设工作分为论证、地点选择、示范性装备试验三个阶段。在前面两个阶段的工作的同时，开展废物固化、装备设计和工程、环境安全评价等各项工作。至本世纪末，初步完成研究发展计划，然后，再按照实际废物容量建设正式规模贮藏库。

为了执行这一庞大的研究发展计划，加拿大原子能控制法规定，由负责加拿大原子能应用、生产发展和负责放射健康与安全法的原子能部（AECSB）担任全部计划的控制、监察和审批工作，它又根据原子能控制法、联邦政府、省政府的环境法和渔业环境部的意见负责审批各项行动计划。加拿大原子能有限公司（AECL）负责原子能废物的安全管理和废物的永久性贮藏方法，对整个储存技术进行初步审查，内设专门的委员会负责本项计划，并组织不参加本项工作的国内外科学技术专家小组对计划的资料、研究结论进行评议。其他各种如能源部、矿业资源部、渔业环境部提供地质、水文方面的资料，渔业环境部再按本计划各个专题设立对应的专家小组和总体小组负责评议有关环境安全的情况，提供初步意见供讨论。对大学工业

部，则以合同、协议的形式建立合作关系。

所有的论证报告、研究资料以及评议结果基本上采取公开发表的方式，形成通俗至不用专业要求的文件，交给公众，以鼓励各界进行广泛的讨论。

科学家们对地下深埋强放废物方案的安全性作过许多估算，这里包括自然界引起的事件，如慧星的撞击、冰河期的再现、地震、火山爆发等，核燃料产生自发热和辐射效应造成的后果，以及人为的事件，如核战争的爆发、人为的破坏等后果。估算的结果表明总的情况是乐观的，也就是说，在遇到上述事件之后，放射性仍需历经数千年才能抵达人类

活动的范围，此时，核素的衰变已使放射性强度降到很低的程度。另外一个非常偶然而仍然可能发生的事故是，一旦丢失了埋藏放射性废物的记录，后来的人们掘井深挖时正好钻到贮藏库的位置，而且假设当时人们对于放射性的污染毫无戒备，如果这种偶然事件发生在距现在2500年的某一天，从估算的结果看，这些废物已不致会造成恶果。

加拿大这个研究发展计划如能实现，将会解除人们利用核能的后顾之忧，必将大大推动人类对核能的利用。因而，这个计划的实施及其效果特别引人注目。