

再谈我国必须大幅度调整核能政策

——必须重新评估和认真分析核能的发电成本与社会效益

何祚庥

(中国科学院理论物理研究所,北京 100190)

摘要:我国必须大幅度调整核能政策,因为还有一个被掩盖了的核能发电成本和社会效益的问题,必须将乏燃料的“后处理+嬗变+储存”等巨额支出打入成本。为妥善解决核废料的处理和储存,国际社会采取了“一次通过”“热堆闭式循环”等不同的核政策。在核废料的处理和储存这一“安全隐患”未消除前,中国必须大幅度缩减“2020年核电占5%,2030年核电占10%”等既定目标,近期发展核电的目标是走向军用,走向大型海洋船舶动力,陆地核电站则放在海边或海上小岛。

关键词:核电站;核防卫;乏燃料

中图分类号:TM623.8

文献标识码:A

文章编号:1008-7699(2011)04-0001-06

一、必须重新审定“2020年核电占5%,2030年核电占10%”等既定目标

2011年5月12日,我在两院资深院士联席座谈会上曾大力呼吁,我国必须大幅度调整核能发展政策。其实,这一发言仅谈了核安全问题,谈了要从 nuclear safety 上升到 nuclear security,未谈及核能还有另一被掩盖并为社会公众所忽视的问题——核能其实发电成本相当高,而且其释放出的放射性核若不予以妥善处理、存放,将成为严重威胁人类生存环境的能源。

2011年4月19日,联合国秘书长潘基文在乌克兰召开的“安全和创新利用核能国际峰会”上强调,“核事故不但会对人类健康和环境构成直接威胁,更造成经济动荡,所以我们需要在全球范围内重新思考如何确保核能的和平利用与最大的安全这个基本问题。安全工作必须被置于至高无上的地位;因为核事故的影响是跨越国界的,所以应对行动必须在全球范围内得到论证。”为此,潘基文秘书长提出五点行动方案,呼吁国际社会全面加强核安全,避免核事故灾难的发生。“第一,对现有核安全标准,在国家以及国际层面,自上而下进行全面审查和评估;第二,加强对国际原子能机构应对核安全挑战行动的支持;第三,必须将关注的焦点更为突出地放在自然灾害与核安全的关联性方面;第四,必须对核能源的成本效益重新进行分析;第五,在核安全与核保安之间建立更强有力的联系。”^[1]

需要引起社会广泛关注的是“第五点”。我的理解是,潘基文秘书长是在敦促联合国以及世界各国不仅要关注 nuclear safety,还要关注 nuclear security。其实,nuclear security 一词包含多方面内涵,既包括如何抗御敌方飞行物的袭击,也包括防卫恐怖分子的破坏,还包含核材料的走私、核技术无控制的转移等,涉及捍卫国家安全和保证国际社会共同安全等重大问题。这是因为,“核事故的影响是跨越国界的”,必须“在全球范围内重新思考如何确保核能的和平利用与最大的安全这个基本问题。”中国网站均将 nuclear security 一词译作“核保安”,似不能完全体现这一词条丰富的内涵,也许以译作“核防卫”较佳!

当然,对于仅考虑如何应对自然灾害的 nuclear safety,就仍有一个我国将如何“自上而下对现有核安全

标准进行全面审查和评估”的问题。我所知道的情况是,我国所设计的核电站,其核安全所设标准其实是很低的;而且设计者对所设计的抗震标准往往讳莫如深,不予公布。原因在于,国家发改委要求核电站的发电成本不能超过石油发电成本的 20%,若太贵了,发改委就不予支持。请恕我直言,据我所知,早年的设计,其设防标准约是 6.5 级;新设计的所谓“第三代”Ap1000 型核电站,其抗震标准也只定为 7 级。所以,中国现在运行和在建的核电站不仅无法抗御福岛事故的 9 级地震,连唐山大地震、汶川大地震也无法抗御!但是,我们的核“专家”却不断吹嘘所设计核电站如何安全。

最近,前中国工程院徐匡迪院长主张,“核电站的安全要放在首要位置,选址很重要”,核电站应放置在“1 000 年内没有 4 级以上地震、没有海啸的地方。”而“如果那个地方没有地震、没有海啸,像美国、法国的很多电站都没有出现问题”。徐匡迪院士还具体指出,“中国在欧亚大陆和印度板块断裂层,包括我们陕西到甘肃这一带,包括欧亚大陆到太平洋板块之间,我认为这些位置是不能选择的。”^[2]

应该说,徐院士这一讲话有一定的道理,因为中国确有一些地方未出现过大地震。当然,在“选址”问题上,还有其它待考察的因素,如当地人口是否过分密集,有无足够的冷却水源,是否会在炎热天气形成强烈的热污染,影响生态环境,以致核电站在夏季只能以低功率运行。而万一当地出现严重干旱,水源枯竭,核电站将如何应对这一不测事件。所以我们十分认同徐匡迪院士提出的“选址很重要”的意见,但还要冷静地看到,这一意见是仅从如何解决 nuclear safety 的角度来讨论核电站选址问题的。如果还要考虑 nuclear security,就仍然要考虑到中国有许多“核心”地区不能建造核电站。我曾经看到一个材料,说湖南省在历史上从未发生过地震,看来这将是核电站“待选”的优良地址之一。但如果考虑到中国的“核防卫”不仅要应对未来可能的国际战争,还要应对国际恐怖分子、民族分裂分子、宗教极端分子等的袭击和破坏,那么其最佳选择还是以放置在海边、海中小岛为好!“湖广熟、天下足”!这是中华民族的“核心利益”所在,切不可掉以轻心!

还要注意的,徐匡迪院长所建议的这一“选址”准则如果真正付诸实施,就不仅影响许多待建的核电站,而且还牵动许多已建和在建的核电站。例如,地处辽宁省的大连就有一个在建的核电站处在徐院长所指出的危险区域,东北三省还有一些其它待建的核电站也处在徐院长所指出的危险区域。所以,徐匡迪院长所提出的“选址很重要”的准则必定牵动许多已建、在建、待建的核电站,也牵动许多拟议或计划中的核电站。其逻辑结论就是,必须重新审定中国工程院所提出的“2020 年核电占 5%,2030 年核电占 10%”等既定目标。

二、必须对核能的成本与效益进行重新评估、重新分析之后,再确定中国的核能政策

之所以强烈主张“我国必须大幅度调整核能政策”,还有一个被掩盖了的核能的成本与效益的问题。这不仅是因为我国核工业集团低估了“核能源的成本与效益”,而且整个国际社会也往往低估了“核能源的成本与效益”。我国能源界流行的一个观点是:核能是高投入但又高效益的能源行业,而这一观点值得商榷!

为什么潘基文秘书长呼吁“必须对核能的成本效益重新进行分析”?

除了因为“核安全”和“核防卫”,而必须提升“安全”和“防卫”的“标准”,必将大幅度提高其发电成本外;还有一个铀棒燃烧后,其剩余有极强放射性的核废料如何妥善地处理和保存,以保证其在长达几十万年的储存期间不致严重破坏人类居住环境的问题。其实,世界各国均未能妥善解决这一重大遗留问题,也未计入发展核能必须付出的成本。一旦这一重大问题真正提到议事日程,核能的成本就将大幅度增加,其效益也就大幅度减弱;而出现严重的环境事故,还可能产生后果极为严重的“负效益”。福岛事故本身已说明,凡影响子孙后代的灾难性的环境破坏的核事故,将产生“负效益”。

实际上,这一重大遗留问题将留给子孙后代去解决,由子孙后代为其先辈所取得的重大经济效益付出代价!这明显地背离了可持续发展的准则!

下面介绍国际社会为应对这一重大遗留问题所采取的不同对策。

美国对核废料的“处理”采取的是“一次通过”的政策。所谓“一次通过”，其实是“不予处理”的政策，所有的铀棒只燃烧一次。对于燃烧后的核废料，设法固化成玻璃体，放置在一个密封的、由不锈钢做成的很结实的盒子里面，用比较清洁的水直接冷却带有强放射性并不断发热的玻璃体，而且不断循环移去所释放的巨热！理论上，这一填埋需要持续几百万年，或至少几十万年，直至玻璃体中全部长寿命放射性核完全衰变为稳定的化学元素为止！

但这一方法是否确实有效，所有核专家都打了一个大大的问号！原因在于，现代科学技术尚无法预知未来十万年或百万年内会发生什么不测事件。人们无法预知所选填埋盒子的地点在几十万年内不会出现严重的地震灾害，无法预知在数十万年的未来，这一填埋方式不会污染地下水！甚而也不清楚这一烧结的玻璃体在长时期强放射性核冲击之下，能否确保所蕴含的放射性核不致泄漏、不致污染循环中的冷却水和地下水！而这一填埋式储存至少需要延续几十万年！

据我们所知，美国曾设计一个搁在沙漠里储存的盒子，现已接近爆满，而且玻璃体温度已上升到 100 多度。但是，已有 100 多座核电站的美国尚有 8 万吨核废料有待处理和储存，目前只好放在原有核电站临近，利用核电站具有的循环冷却技术，长期冷却！

据悉，这些年来，先后有不少有核国家向中国提出建议，愿以巨额代价在中国选一沙漠地区，大量存放这些核废料，我国迄今未作出承诺。但是，我国还不明确，我国发展的核未来是否将奉行“一次通过”的核政策。

“一次通过”的优点是，现在所设计的核电站（包括移民费用在内）的“投资”才约为 20 000 元/千瓦；燃烧中的低浓度的浓缩铀，其售价也比较低廉。所以，一个 100 万千瓦的核电站虽然投资达 200 亿人民币之多，但如果能安全运行 60 年，其经济效益、社会效益均极为巨大！虽然在 60 年后，人们将为燃烧后的铀棒如何加工、填埋付出较大代价，但那是由“孙子”替“爷爷”还帐！据我们所知，世界上最喜欢奉行并且竭力向世界各国推销“一次通过”核电政策的是美国。原因在于，这将极大地有利于贯彻“核不扩散”，而这是美国在核领域里最为坚持并认为是影响到美国核心利益的基本政策。很多有核国家（如加拿大、瑞典、芬兰、西班牙等国）均奉行或实际奉行这一政策。其实，美国在 20 世纪末就建成了一座年处理核废料能力 1 500 吨的后处理工厂，但为防止核扩散，一直没有投放运行。

有不少核专家纷纷批评“一次通过”的核政策，理由是：这是大浪费。燃烧后的铀棒（或称乏燃料）并不都是废料，其中有可回收的钍，钍 238、239、240，还有可再利用的铀 238、235。所以，有一些国家强烈主张采用“处理、回收再利用”路线，主张形成后处理、再利用的“闭式循环”。法国已建成两座 1 600 吨乏燃料后处理厂，已在热堆中实现了闭式循环。^① 英国拥有 1 200 吨和 1 500 吨的后处理工厂，已在运行中。俄国现有一座 400 吨的后处理工厂，据说，2012 年拟建约 200 吨左右处理能力的“新型”技术的示范厂。日本建有 100 吨和 800 吨后处理厂各一座，印度共有 50 吨一座、100 吨两座。中国已建成能处理 5 吨乏燃料的示范生产线一条；据说，将扩建到年处理 50 吨；十二五末，将实现 80~100 吨的生产能力。但在技术上，请恕我直言，也绝对是落后的技术。

据报导，目前世界各国累计卸出的乏燃料高达 34 万吨，但只有约 1/3 的乏燃料“被”后处理。而且，至今世界上还没有一个国家已建成可使用的、可以“长期”储存的“地质处置库”。这里的关键词是何谓“长期”？是指百万年、十万年，还是几千年？这在技术实现的“可行性”以及投资大小方面，有很大差别。有报导说，法国正在积极进行地质处置库“选址”的工作。

实际上，世界各国大多采取观望的态度。据报导，美国是最早建成军用和商用后处理厂的国家，到 1977 年，美国冻结了商用后处理厂的运行。“到了上世纪 80 年代，美国改走一次通过的路线，计划在尤卡山建一个地质处置库。但很多技术问题无法克服，导致地质处置库的计划运行的时间一拖再拖，至今未能运行。不

① 请注意：这只是热堆，并不是快堆，快堆需要另外的技术！

过,尤卡山地质处置库按照国会批准的设计处置容量是 8 万吨,但截至目前累计的乏燃料量已经超过了 8 万吨。也就是说,尤卡山地质储存库一旦投入使用,将会被立即装满。……从奥巴马上台之后,美国地质处置库和后处理的经费都被削减”。^[3]实际上,美国是处于观望态势。

而极有兴趣的是,“相关资料显示,乏燃料后处理是我国早已确定的技术路线。1983 年,国务院科技领导小组召开全国专家论证会,经过对我国核电发展计划、国内外铀资源情况、国内后处理工艺技术发展水平、后处理的安全性、经济性等诸多方面的充分论证,确定了‘发展核电必须相应发展后处理’的战略,并在 1987 年日内瓦国际会议上对外公布了这一决定。”^[4]

实际上,这一“决定”并未真正实行,这只是空洞的“决议”。因为国家发改委并未给出足够的钱,也不明确应该由谁来出钱。前一时期,中核集团 404 厂宣布,他们所研发的乏燃料处理生产线第一次热试成功,成功地提取了铀和钚。不过,其技术以及应取得的相应的经济效益还有待提高!但这一已用资 20 亿元、历时 24 年才建成的实验研发项目还需一二十年时间和大量的投入,才能真正实现热中子核电站所产生的核废料的后处理。至于地质处置库,根本没有提上议事日程。既不知道该如何设计,也不知道该按照什么要求、什么标准来设计,也不知道该存放在哪里。所以,中国是走“一次通过”,还是走“热堆闭式循环”的路线,其实并未决策。

但是,按照规划,预计到 2020 年,中国的核电站将达到 7 000 万千瓦,2030 年达到 2 亿千瓦。预计到 2020 年,中国乏燃料累计存量将达到 10 000 吨;2030 年,更猛升至 30 000~40 000 吨。这一大笔“后处理”、“地质处置库”(也许还要加上“核嬗变”)费用,将由“谁”出?是核总,还是发改委,还是用户?不得而知!

由于中国现在推行的核电政策是走向产业化、市场化、企业化,理论上,当然应由有关企业支付这笔费用。应由企业完全负责清除对环境可能产生的污染,避免可能产生的核事故,负责赔偿出了事故后受害方的损失。企业可以转请保险公司支持,但总要缴纳巨额保险费,最后当然会转嫁到使用者,后果必将是大幅度提高电价。而现在的情况是:无人负责,也不明确该由谁来负责。实际上,是留给子孙后代承担费用!现在仍在各方相互“扯皮”期间!

由于这是国家发改委、核总公司以及“孙子、孙女”“三方面”的“博弈”,而“孙子、孙女”在能源决策层中没有代表。理论上,该由国家环保总局代表“孙子、孙女”的利益,而实际上,这可能是几十年后才需要由“未来”的环保总局“被”解决的事情,与现在的环保总局无关。所以,国家层面的环保局就不仅不为“孙子、孙女”说话,而且还为核电的大跃进大开大放,一路绿灯。由于国家发改委和核总公司均是强势群体,这一“扯皮”也就长期拖延不决。所以,直到现在,是“一次通过”,还是“闭式循环”,也就无从决策,更谈不上“谁”投钱。

其实,从“后处理”……直到“地质处置库”,不仅存在一个“尚未完全解决的适用”技术的问题,还存在一个必须妥善解决的“核安全”和“核防卫”的问题。

已知钚 239 的半衰期是 24.5 万年。钚 239、240 在化学性能上是剧毒物质,一旦潜入人体,会潜伏在肺部、骨骼等组织中,导致癌症。钚 239 的临界质量是 6 公斤,一颗原子弹的用量是 5 公斤,钚的密度是 16.00~19.86 克/cm³。所以,6 公斤钚 239 的体积只约为 300 cm³,相当于半径为 4cm 的一个小球。所以,其提取和储存只能控制在比 300 cm³ 远为小的体积以内。钚 239、240 所具有的这些性能既提高了其提取、储存的费用,也增加了在“处理、埋存”期间如何保证其不泄漏、不污染环境的费用和困难。

更重要的,技术上尚未解决的问题是,如何设计“地质处置库”。如果这一“地质处置库”是储存几十万年、上百万年——亦即要求在储存期间,必须确保钚 239 等严重污染环境的长寿命放射性核的死亡——可以说,没有一个“核专家+地质学家”敢说这样的“大话”。也不知要付出多少“代价”,才能做到这样的“大话”。但如果要求一个“地质处置库”仅储存几千年,那么在可预见的将来,仍可能开发一些新技术,将寿命长达百万年、几十万年的放射性核转变为寿命小于、等于几千年的放射性核,然后放置到能保证在几千年内不致泄漏的地质处置库储存。这是现代技术有可能做到的事情,也就是近来有很多学者所支持的“核嬗变”技术。

“核嬗变”的基本原理是,利用能量较高、数量较大、有较高穿透物质能力的快中子源轰击核废料中的长寿命放射性元素,使这些放射性元素“活化”为短寿命元素,逐步转变为稳定的化学元素。所用到的快中子源可以是快堆产生的平均能量约为 0.8~1.0 MeV 稳态运行的快中子;更好的是由高能加速器加速质子轰击铅铋合金做成的液态靶,产生能量约为 10~30 MeV 的中子源;也可以用强激光轰击氘氟做成的小球,产生能量为 14.1MeV 的强中子源;当然还有其它建议,如利用 x 射线激光激活氘氟反应产生强中子。但是,所有这些强中子源的制备均需要高科技、高投入,而且还大量耗能。

据后处理专家介绍,一座功率为 100 万千瓦的热中子堆核电站平均年产生约 25 吨的乏燃料,其中包含 23.75 吨铀 238、235,0.2 公斤的钚 239,还可能有少量的钚 240、241、242 等同位素。极有价值的是钚 238,其半衰期是 88 年,最适合做成太空飞行物的热源和电源。此外,还有中短寿命的裂变产物约 1 000 公斤、长寿命裂变产物 30 公斤、次锕系核元素约 20 公斤。所谓乏燃料的“后处理”,就是将其中重约 24 吨的铀和钚提取出来待用,剩余的约 1 吨重的强放射性元素设法固化为某种玻璃体,由地质处置库储存。但由于必须保证能在几十万年期间不致泄漏,最好是利用核嬗变技术,消灭其中多种多样的长寿命放射性元素,仅将其中半衰期在 2 000~3 000 年以下的放射性核元素设法固化为某种玻璃体,送交能存放 2 000~3 000 年而且不致泄漏的地质处置库储存。

这一“嬗变+储存”方案的优点是,存储量仅为“一次通过”储存方案的 1/25,可将“地质处置库”做得小一些,投资也少一些。难点是,这一“嬗变”后的放射性核固化为玻璃体时,其单位体积、单位重量所具有的放射性强度将至少比“一次通过”的储存方案中形成的玻璃体大 10~20 倍。这一固化后的玻璃体能否在强辐射照射下,仍然保持其固化性能,能否将其中产生的多出 10~20 倍的热量有效地取出来……都是未知数,有待今后的研发工作去解决。

可以说,虽然“最终安全处理”是解决这一重大核安全问题的最佳方案,但相关技术尚待研发,也不清楚需要多少资金、多少能源的投入。现在多位核专家都呼吁要将“确保安全”放在“第一”的地位,但如果缺了“从后处理、核嬗变直到地质处置库”这一整套的技术措施,又怎么能称为“安全第一”?

最大的问题是,不知道这一从“核资源—核燃料循环—核电站—后处理—核嬗变—核废物处置”的产业链要花多少钱?

仅从我看到的技术资料来看,据后处理专家顾忠茂介绍,“现在国际社会上能达成共识的乏燃料后处理价格大约是 100 万美元/吨。1 个百万千瓦的反应堆以每年产生 25 吨乏燃料计算,后处理费约 2 500 万美元。”刘学刚表示,“建设一个后处理厂费用极高,相当于几个核电站的费用。”^[3] 试问,这一费用极高的后处理厂的市场价格究竟是多少? 这里有一个参考数字:“法国人开出了一个天价——200 亿欧元。而这仅仅是一个年处理能力 800 吨的厂”。

由上述数据容易算出,一个功率为 100 万千瓦的核电站所分摊到的后处理费用是:2 500 万美元×60 年×6.5 元=97.5 亿人民币。然而,这里应用的是国际上较成熟的技术,我国未必能以低价利用这一较成熟的技术。

而如果引进法国人开出的“天价”,可算出一个功率为 100 万千瓦核电站所分摊到的后处理厂的建造费用。如果这一后处理厂的使用寿命是 60 年,^①那么在其生存的 60 年期间,投入是 6 亿欧元=55 亿人民币。而如果其使用寿命仅是 30 年,相应投入费用就上升一倍! 问题是,这座后处理厂要应对的是超常强放射性元素的轰击,所有的控制元件、传感器能持续运转的寿命均属未知数,而且人员不能靠近在线拆换已损坏的器件! 而如果仅能使用 20 年,其相应投入立即上升到 165 亿人民币!

请注意,这里并未计入为建设一个后处理厂所必须付出的土地、基建、工资、环保、增殖税等费用,所回收

① 只能如此假定,未知确否。

的仅是12公斤铀和1425吨的铀。现在国际上天然铀价格约是50美元/磅,由于有“核不扩散”,铀“被”抬到5500美元/克。简单测算一下,其产生的产值约是2.0亿美元,仅占引进的“后处理”工厂等全部支出中很小的一部分。

需要向社会公众报告的是,在如何处置“处理后”剩余的核废料存放问题上,现在还出现一些新思维。一些人主张存放到月球,还有一些人主张用航天技术存放到太空。5月26日,粒子物理学家张肇西教授来我办公室讨论核政策问题。他建议,不如存放到绕太阳而旋转的轨道上。我说,不如用火箭技术,将剩余核废料加速成为“大于第一宇宙速度,又小于第二宇宙速度”的飞行器,只需大体上对准太阳发射,就一定能降落到太阳表面,形成壮丽景观!由于这一发射只需控制火箭的发射功率,不需导航精度,也许能大幅度降低发射成本,取得经济效益和社会效益。其突出的优点是,只要不出现发射事故,将能保证这一“存放”绝对不会污染地球!我们两人都不是火箭专家,也不知要投入多少钱,也算是一种新思维,提出来供大家研究。

6月4日,我见到欧阳自远院士,他告诉我一个发射价格。“按我国现有发射技术水平,如不计算发射架的建设等投资,每发射一吨重的飞行器飞到天空,其火箭发射成本约是1.0亿人民币。发射到太阳,其发射技术和发射成本应该和发射到月球不会有太大区别。当然,必须‘确保’这一飞行器绝对不会返回地球。如果‘返回’地球,将是一次极大的核事故!而如果这一‘确保’能够成立,就不仅可以‘确保’核废料的‘嬗变+储存’的绝对安全,而且可为我国航天技术开辟一个极大的市场。”

我还请教了航空航天系统工程专家顾逸东院士,他也给了我一个大致的发射价格,与欧阳院士的“开价”相同。顾逸东院士又说,“重大的问题是发射成功率。现在国际和国内发射成功率一般均在95%~96%左右,但这是指进入指定的轨道。向太阳发射,没有入轨问题,其成功率可能较高,究竟是多少,有待研究和改进。”而一个运转60年的100万千瓦核电站所支出的“嬗变+储存”费用就有可能缩减为约60亿人民币。

现在全世界有待处理的核废料约有25万吨,后处理后,可缩减到约1万多吨。如果将其发射到太空,市场效益将至少是1.0~1.5万亿人民币。我认为,这一发射“储存”的方案值得深入研究。

三、结论

必须妥善解决核废料的“处理……存储”,必须彻底消除核电大发展给地球带来的“安全隐患”。

必须大力发展高科技,投入大量资金,实现“热堆闭式循环”。

在上述“安全隐患”未消除前,中国必须大幅度缩减“2020年核电占5%,2030年核电占10%”等既定目标。因为核电还有“后处理+嬗变+储存”等巨额支出,必须将这一巨额支出打入成本,绝不能由“子孙”承担这一费用。

我赞成师老师昌绪院士的意见,发展军用核动力,发展船舶核动力,仍需陆地核电站技术的配合和先导,但需要放在海边或海上小岛。近期发展核电的目标是走向军用、走向大型海洋船舶动力,军用可消化核电的高成本;海洋航运正成为高赢利、高效益的行业,万一出现事故,不致污染地下水。

参考文献:

- [1]潘基文在基辅核安全峰会上再次强调确保安全利用核能的重要性[EB/OL].[2011-05-18]. <http://www.un.org/chinese/News/fullstorynews.asp?newsID=15448>.
- [2]徐匡迪.调整能源结构 发展核能和可再生能源[EB/OL].[2011-05-28]. <http://www.chinanews.com/ny/2011/05-23/3059805.shtml>.
- [3]陈欢欢.国际乏燃料处理路线选择[J].科学时报,2011-01-31(B1).
- [4]朱学蕊.我国乏燃料后处理迈出关键一步[J].中国能源报,2011-01-10(19).

(责任编辑:江 雯)