

核燃料循环：使之适应于新的现实

不断变化的政治和经济状况已再次引起关于核燃料后处理和再利用方案的争论

B. A. Semenov
和 N. Oi

在 70 年代，核电曾是发展得最快的能源。自那以后，它一直为许多国家的电力供应做着重大的贡献。当今，核电在世界总发电量中所占的份额稍高于 17%，有 15 个国家的核电份额超过 25%。

在 90 年代，核电将继续是世界电力的一个主要来源。不过，核电的增长速率已经下降，预计在这个 10 年中将保持中等的水平。在同一时期，铀和钚（核电厂的燃料源）的供应预计将有很大的增加，过剩也将愈来愈大。

这种变化的状况已经影响了那些可决定核市场特性的工业界的策略和方针。同样，各种经济的、环境的和政治的考虑，也不断影响着世界总的能源和电力的发展。在国际范围内，争论正日益集中在与通常所谓的核“燃料循环”有关的一些工业活动方面。（见附框。）这些活动包括铀矿开采；燃料浓缩和制造；乏燃料后处理和随后提取的钚和铀的回用；以及核废物和乏燃料的管理。鉴于这些影响核电发展的变化状况，看一看这些燃料循环活动正在如何适应新的情况是有益的。本文简要评述有关的发展结果，并介绍 IAEA 通过其涉及核燃料循环的计划正在开展的一些国际活动。

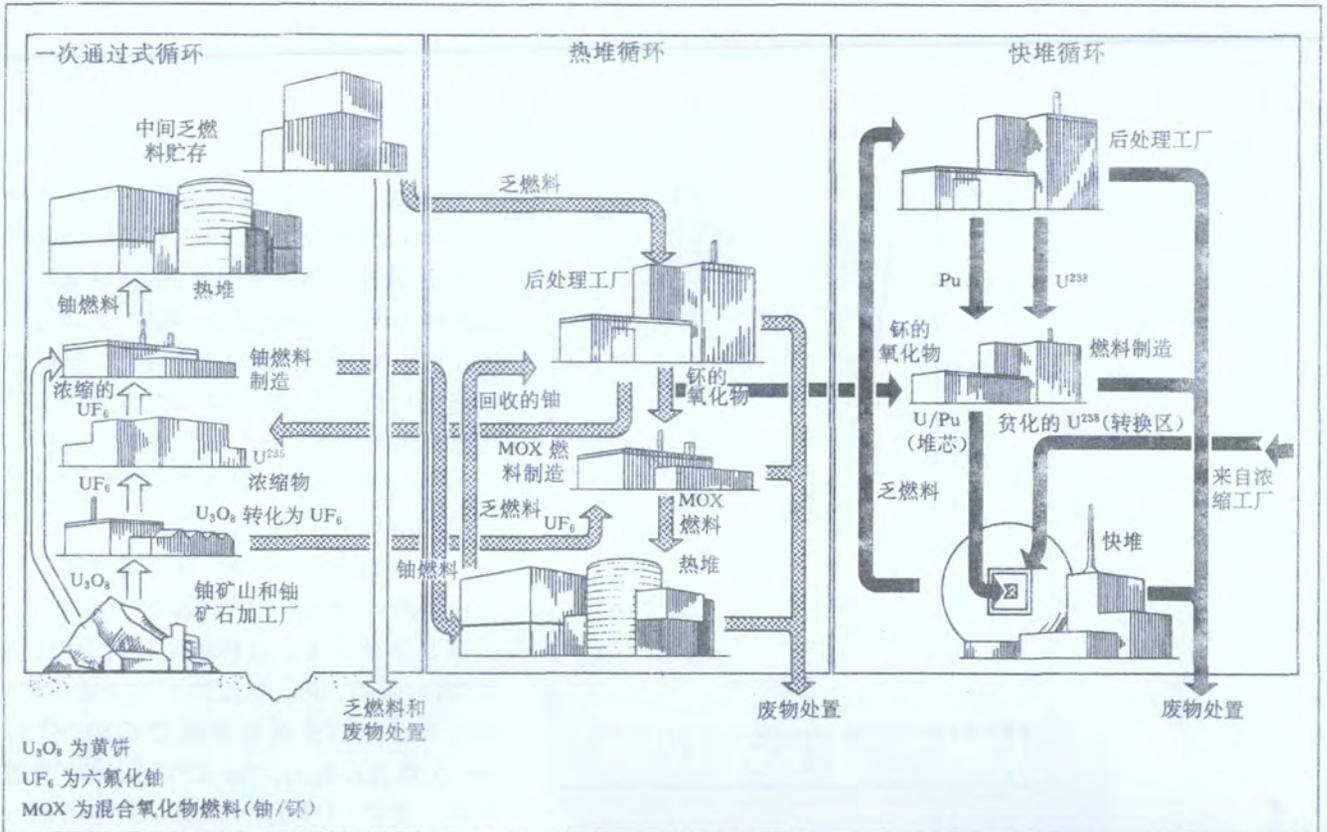
Semenov 先生是副总干事兼机构核能和核安全司司长。Oi 先生是机构核能和核安全司核燃料循环和核废物管理处核材料和核燃料科科长。

核燃料循环的演变

核燃料循环的概念是一个老的概念，几乎如同以受控的核裂变来发电的概念一样老。在开发第一批核电厂时，人们曾普遍认为，从核动力堆中卸出的燃料应进行后处理，而回收的铀和钚则应加以重新利用。

那时候，铀矿石曾是一种稀有的昂贵商品，因而人们曾自然地认为，可以经济地获得的供应将满足不了扩大核电应用对燃料的需求。因此，提取不只是铀-235 的铀的所有含能量，曾似乎是非常必要的。要这样完全地利用铀资源，就要对乏燃料进行后处理，提取用于在专门设计的“快”堆中燃烧的钚。随着快中子增殖堆的概念的提出，这种办法变得更有吸引力，因为这种堆能够生产出比消耗的燃料还要多的燃料。由于这样一些原因，许多国家在 60 年代曾高度重视快中子增殖堆的开发，人们曾预期在 80 年代会广泛部署快中子增殖堆。

70 年代初以前，核燃料循环曾被描述成是一个有序的若干个过程。它从铀矿开采、铀矿石加工和铀化合物转化开始，接着是燃料浓缩、燃料制造和发电，最后是后处理、回收铀和钚返回到快堆，以及后处理工厂废物的最终处置。本质上，这种燃料循环的闭合意味着堆中产生的钚，将被有效地用来作为快中子增殖堆的燃料。



核燃料循环

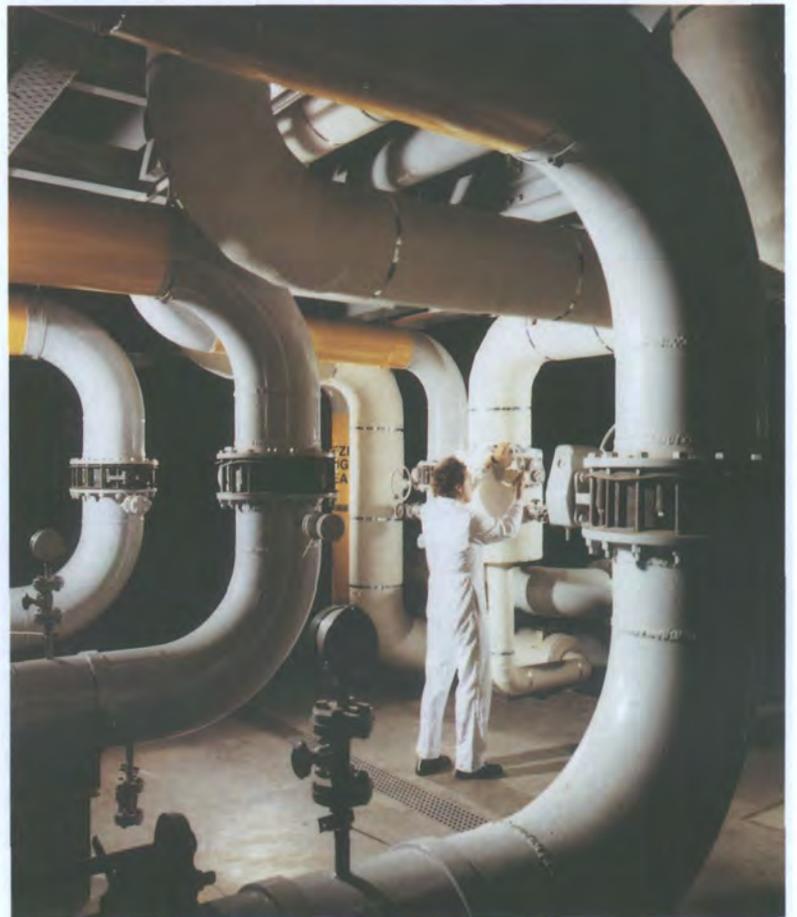
与核电事业有关的核燃料循环,通常按燃料是否被重新利用和发电用堆的类型,分为3种类型。

●“一次通过”燃料循环。在这种循环中,乏燃料不经后处理而保存在贮存设施中直到最终作为废物被处置。

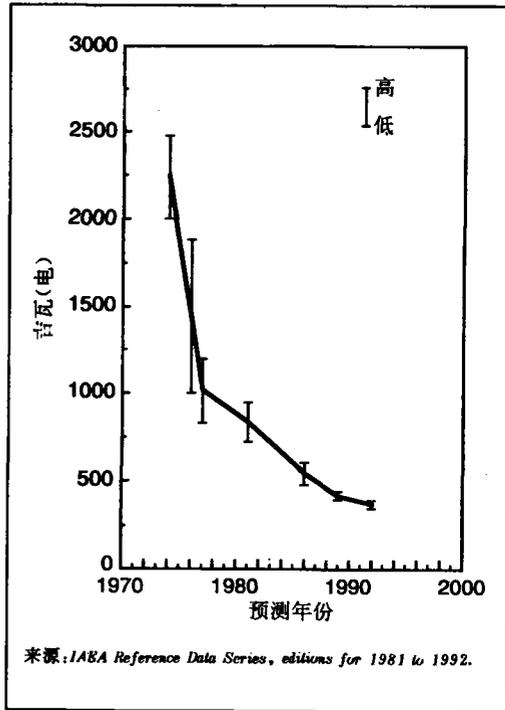
●热堆循环。在这种循环中,乏燃料需进行后处理,并从裂变产物中分离出铀和钚。回收的铀和钚,均可被重新应用于新的燃料元件中。也可以只重新利用铀而把钚贮存起来,或者反过来。

●快中子增殖堆循环。在这种循环中,乏燃料同样需进行后处理,回收的铀和钚制成新的燃料元件。不过,这些铀和钚将被返回到快中子增殖堆或燃烧堆中。快中子增殖堆有一个由铀/钚构成的中心堆芯,其外围有由贫化铀(在浓缩过程中大部分铀-235原子已被移出的铀)构成的转换区。这种贫化铀主要由铀-238原子构成,在辐照过程中有些铀-238原子将被转变为钚。这样,在适当的运行中,快中子增殖堆便能生产比其所消耗稍多的燃料。“增殖堆”的名称由此而来。

一座铀离心浓缩工厂的内景。(来源:BNFL)



关于 2000 年市场经济 中核电装机容量的预测



这种概念为什么已被改变

在最近 20 年中,这方面的情况已发生巨大变化。当初预计在 80 年代投入运行的那种类型的闭式燃料循环,今天一个也没有。尽管核燃料循环的这种闭合已在法国、日本、俄罗斯和英国做过实验上的论证,但至今一直还未做过商业规模的论证。

现在的想法分为两派。一派认为铀作为一种能源没有经济价值,乏燃料应以一种安全的方法加以处置(“一次通过”方案)。另一派则本质上坚持传统的核燃料循环(闭式循环方案)。出现这两种不同方案,虽然有政治上和环境上原因,但主要是由于人们对核电增长有不同的预测,以及对铀的经济供应的可获得性有不同的认识。

应该指出,铀可被用于快堆来更有效地生产能源,同时带来一个附加的好处即可减少一次通过方案中固有的超铀元素的存量。在这种闭合循环方案中,以轻水堆(LWR)燃烧处于混合氧化物(MOX)燃料形式的铀,只是快堆可被获得之前的一种权宜之计。

核动力预测和燃料供应

在过去的 20 年里,对 2000 年时的核电装机容量的多种预测,都已被戏剧性的作了修改。在实施国际核燃料循环评价(INFCE)研究工作的 1980 年,人们曾把 2000 年世界市场经济国家*的核电装机容量预测为 850—1200 吉瓦(电)。这与国际原子能机构最近的预测大相径庭。国际原子能机构最近预测,2000 年的世界核电装机容量将为 372—382 吉瓦(电)。(见图。)在 1992 年年底,世界的净核电装机容量为 330 吉瓦(电)。

关于铀的市场状况,可以通过过去历次出版的《铀资源、生产和需求》出版物,来追溯其演变情况。这种通常被称为“红皮书”的出版物,1965 年以来一直是由 IAEA 和经济合作与发展组织核能机构(NEA/OECD)联合出版的。“红皮书”自 1977 年版本起一直取 80 美元/千克铀的成本类别来确定相当可靠资源,尽管实际美元价值在此期间已降了 50%。

在 1980 年 INFCE 所作评价中,低于 80 美元/千克铀成本类别的相当可靠资源达到过 185 万吨铀。在 1991 年,这类资源被估计为 150 万吨铀。(见图。)在不考虑微小细节的情况下,1975 年以来估计的资源一直大致保持在同一水平上。根据假定的到 2000 年的需要,这些资源估计与未来约 30 年的需要相适应。

铀的现货价格已从它的 1980 年的水平(40 美元/磅浓缩物)逐步下降到目前的不足 8 美元/磅浓缩物。许多生产者暂停了生产,等待铀价格在预测的 1995—2000 年期间回升。因为现在铀的价格低,西方国家 1991 年的铀产量曾降到 2.7 万吨。这个产量低于 1991 年世界核反应堆的铀需要量 4.45 万吨。这种生产和需要的差额是由库存材料和包括从中国与前苏联进口的存货弥补的。(见本期有关铀市场状况文章。)

* 在当时,这些国家曾被称为 WOCA 国家,即非中央计划经济国家。

根据闭合的燃料循环概念,预期钷将逐步取代浓缩铀而作为主要的核燃料。不过,这种情况到现在还没有发生。早期的那种关于从后处理中回收的铀和钷的价值将超过后处理费用的希望已经暗淡。

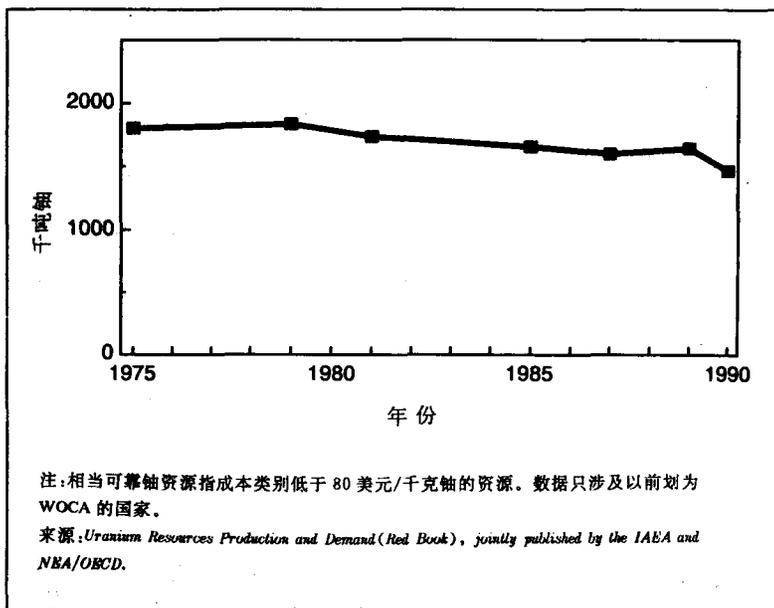
两种核燃料循环方案的前途

目前,两种核燃料循环方案的支持者正激烈地争论着。似乎可以说,一次通过方案是鉴于对核能事业前途的悲观预测和对经济铀资源可获得性的乐观估计。不过我们认为,这种方案有一个固有的问题。处置于地质处置库中的乏燃料或玻璃固化了的与裂变产物相混的钷,将在数千年后变成潜在的钷矿。这是因为大多数的裂变产物将比钷更快地衰变。

闭式燃料循环方案是出于对核能的长远展望。据估计,55亿的世界人口将以每年1亿的速率增长。到2010年,估计需要约4倍于现在所消耗的电能。如不更多地采用核能,便不可能在不损害环境的情况下使电力供应有如此巨大的增长。此外,在今后20年里,后处理和混合氧化物燃料制造的商业竞争力很可能会得到增强,从而使相应的价格大幅度下降。随着铀价的不可避免的逐步上升,在经济上便会更有理由用钷作快堆燃料,从而使闭式燃料循环得以实现。

不过,闭式燃料循环也有一些附带的困难。其中最大的困难也许包括那些有关许可证发放的苛刻的国家政策和国家法规,以及这些政策和法规对未来快堆经济性的影响。几十年来为现在的水堆提出的那些详细的审管见解,无疑将被用到快堆方面。这将造成一些项目长期拖延并带来沉重的经济负担。

对这两种基本的燃料循环方案,可以考虑一些改进意见。一种改进意见是,把现在的轻水堆中的燃料的燃耗提高到特别高的水平,以便生产具有较易加以核查和安全保障的同位素组成的钷。另一种改进意见是,重新研究没有与钷相关的缺点的



钷/铀燃料循环。

核燃料循环的未来发展情况很可能将因国而异。那些用得起昂贵的自然资源的国家,可能出于政治等方面的考虑而决定缩短其核计划,采用一次通过式循环方案。其他的国家无疑将扩展其核计划,努力实施闭式的循环方案。也许再过20年,才能看得出这种方案将如何得到实施。

1975年以来的相当可靠铀资源估计值

国际合作和机构的计划

机构核燃料循环方面的计划,正在适应制约核动力发展的各种变化不定和不可预测的情况。这些计划主要是为帮助各国加强其核燃料循环的安全性、可靠性和经济生存能力,并尽量减少环境和健康影响而设计的。

核燃料循环计划一直是机构成立以来一些活动的一个主要部分。虽然配给这类计划的资源只是机构总预算的一小部分,但各国却能靠它做很多事。有关的活动分为4个领域:铀资源;反应堆燃料性能和技术;乏燃料管理;和核燃料循环评价。此外,还通过与核工业所用结构材料有关的分计划,正在做许多工作。在整个核燃料循环过程中,许多设施多年来一直为一些与某些

类型受辐照材料有关的问题所困扰。这些材料的机械性质变坏,已使某些部件失效和使某些反应设备进入代价很高的停产状态。金属与合金的腐蚀不断地造成严重困难。在机构涉入和支持下,国际上正在解决这些和其他一些技术问题。

铀资源。正如前面所指出的,铀的价格是核燃料循环中一个重要因素,因为它直接涉及发展快堆和钍利用在经济上的刺激力。对计划者和决策者来说,一个全面而可靠的资源数据库是必不可少的。上述的“红皮书”可被看成是一个资源数据库。最近,这本书由于增添了来自前苏联各共和国和其他国家的以往不可得到的数据,已变得更为全面和有用。一项正在进行的工作是把把这些数据与当前的数据库要求及信息需要相协调。

机构多年来一直是有关铀地质、铀勘探、铀开采、铀矿石加工,和铀供求分析的信息的中心。从安全性、环境保护、经济学和许可证发放的观点看,目前的工作还进一步涉及了有关铀开采和铀矿石加工项目的关闭。此外,机构还把重点放在支助那些在发展其和平核计划和燃料循环能力方面寻求援助的国家,所开展的技术合作项目上。

燃料性能和技术。燃料包壳是防止反应堆中的裂变产物释放到环境的第一个屏障。经历了70年代的一些燃料失效的“流行病”之后,现在的水堆燃料性能已变得很好,燃料失效的情况已非常少见。不过,不断地要求改善燃料性能,也许会损害燃料的可靠性。特别是,现在人们非常想进一步加深燃料的燃耗,以减少卸出的乏燃料的量。与此同时,电力公司的人们总想实现“零燃料失效”,以使核电机组保持清洁。因此,核动力设备供应者、电力公司和审管部门都特别注意燃料性能的检验,并对交流信息感兴趣,尽管燃料技术特别是在西方国家被看作是成熟的技术。

1977年建立的国际核燃料性能和技术工作组(IWGFPT)继续指导机构在燃料设计、制造和性能方面的工作。这个工作组现

在包括25个成员国和3个国际组织,起着发达国家与发展中国家之间进行接触的论坛的作用。

乏燃料管理。据估计,到2000年将会有10万多吨从动力堆卸出的乏燃料贮存在世界各地的设施中。到那时,年产生乏燃料中的不足一半的量将被后处理,其余的则在贮存一段长的时间后被最终处置在地质处置库中,或被送去进行后处理。由于快堆部署推迟,有后处理能力的国家也在贮存大量的乏燃料,因此长期贮存正在变得愈来愈重要。大量的乏燃料现正按湿式贮存在水池中,或干式贮存在罐、窖或金属容器中。虽然乏燃料贮存至今还没有发生过任何严重的安全问题,但人们认识到,一些相关的技术问题、审管问题和经济问题仍然是有益的国际合作的领域。(见本期相关文章。)

机构的乏燃料管理定期咨询工作组成立于1984年。该工作组每隔一年开会一次,以便就机构有关乏燃料管理的计划提出技术建议,以及起一个在核燃料循环后段尤其是乏燃料贮存方面进行信息交流的中介体的作用。目前,该咨询工作组由12个国家和NEA/OECD的代表组成。

机构较重要的活动之一是准备有关乏燃料贮存的国际标准。机构正在准备有关乏燃料贮存设施的设计和运营的安全导则,以及有关安全实施的文件。

此外,机构还正在准备一个辐照燃料管理咨询计划(IFMAP)。该计划将处理与动力堆和研究堆有关的问题。该计划的目的是主要向发展中国家的专家,提供指导和培训。

核燃料循环评价。机构的若干种活动覆盖着整个核燃料循环。其中一个实例是关于核燃料循环设施在正常工况和事故工况下的环境影响和健康影响的研究。这项研究是被称为“数十年”(“DECADES”)的旨在对核动力系统和其他能源系统的健康影响和环境影响进行比较评价的国际活动的一部分。

另一重要活动是有关钍的一些工作。

据估计,世界上已积累了 86 吨分离的民用铀,而铀的库存量预计将在本世纪末之前不断增加。这种库存的增加主要归于生产和利用的失调。在铀的国际管理和支持活动方面,已为机构设想了一个新的重要的角色,即参与管理来自军事部门的从拆卸的弹头中回收的铀。

作为全球合作的手段,这些计划将帮助加强国家核燃料循环活动的安全性、可靠性和经济生存能力,并将这些活动的环境影响和健康影响减至最低程度。 □

1992 年初落成的位于阿格的 UP-3 后处理工厂鸟瞰图。下图: UP-3 的中间贮存水池。(来源:Cogema)

加强全球合作

就影响核动力及其燃料循环的事态发展而论,今后若干年将是国际社会经受考验的时期。正如国家的政策和方针所表明的,它们将继续影响全球合作的范围和方向,进而影响机构在各个领域的工作。

机构的这些涉及核燃料循环活动的计划是机构国际服务的一个主要部分,并且将继续适应变化的情况和成员国的要求。

