

加强 ADS 技术研究 促进核能大规模可持续发展

夏海鸿 罗璋琳 赵志祥

一、引言

1. 核能在低碳能源政策中的重要作用

2000 年, 全世界 60 亿人口消耗了 100 亿吨标准煤; 2006 年, 65 亿人口消耗了 117 亿吨标准煤。预计到 2050 年, 世界能源消耗将比 2000 年增加一倍。为了应对世界能源消耗的快速增长和温室气体减排的巨大压力, 保证能源供应的安全, 许多国家和地区都提出了低碳能源政策。煤电及核电是 24 小时全天候供电的主要基础。核裂变能是重要的低碳能源, 正在为全世界提供大约 17% 的电力。核能对温室气体减排的重要性不容置疑。

我国的核电事业正在进入快速发展期。核电发展的中期目标从原计划 2020 年核电总装机容量达到 4000 万千瓦增加到 7000 万千瓦。根据对国家中长期能源发展形势和前景的分析, 在中国工程院的咨询报告《2050 年我国的能源需求》中指出, 我国的核电占一次能源总量的比重要求提高到 2050 年的 12.5% (占电力装机容量的 20%)。

2. 分离-嬗变是实现核能大规模可持续发展不可缺少的环节

人们在享受核电带来的巨大好处时, 也不得不面对核电产生的核废料尤其是长寿命核废料的最终处理处置难题, 这将成为我国核电事业能否可持续发展不可缺少的一环, 必须从战略高度来加以定位。根据对核电站废料的潜在生物危害性分析, 核电站废料的远期风险决定于长寿命高放废料, 其中主要是镅、镎、钷等称为次量锕系元素 (简称 MA) 的元素和长寿命裂变产物 (简称 LLFP)。MA 和 LLFP 要衰变数十万年才能达到天然铀的毒性水平。目前压水堆是核电的主要堆型, 一座 100 万千瓦的压水堆核电站, 每年卸出乏燃料约 25 吨; 其中含有可循环利用的铀约 23.75 吨, 钚约 200 千克, 中短寿命的裂变产物约 1000 千克; 还有次量锕系核素约 20 千克, 长寿命裂变产物约 30 千克。随着我国压水堆核电站装机容量的增长, 核废料的积累量将快速增加。如果 2030 年的核电装机容量达到 8000~10000 万千瓦, 则届时乏燃料累积存量将达到 20000~25000

吨, 其中所含钚为 160~200 吨, 次量锕系核素为 16~20 吨, 长寿命裂变产物为 24~30 吨。

国际上早在 20 世纪 60 年代就提出了采用分离和嬗变 (Partitioning and Transmutation, 简称 P&T) 的方法处理中、长寿命高放废物, 即首先将长寿命锕系核素和长寿命裂变产物从高放废物中分离出来, 然后再集中起来进行嬗变, 即利用中子引起的核反应, 使其变为非放射性的或短寿命的核素。分离和嬗变可以在充分利用资源的同时, 大大降低核废料的毒性和体积。采用分离和嬗变的技术路线, 结合必要的少量高放废物的深埋处置是处理处置长寿命高放废物的合理的选择。

分离-嬗变和地质深埋处置之间的关系就相当于大家熟悉的火葬与土葬之间的关系。分离-嬗变战略并不能消除地质处置的必要性, 但使得地质处置在技术上更加容易、更加安全、更加经济, 由于从废料中去掉了大部分裂变材料而明显减少了临界风险, 这种带有燃料处理厂的嬗变单元可以减少高放废料 (简称 HLW) 运输及地质储存的数量。“分离-嬗变”战略同时解决了乏燃料中铀和钚的回收, 产生很好的资源效益和实际的附加经济效益; “分离-嬗变”战略将减少废物的放射性毒性水平至少两个数量级, 减少废物的容量至少 50 倍, 这将大幅度减少废物运输和地质储存的费用。

从图 1 和图 2 可以看出, 对次量锕系核素 MA 来

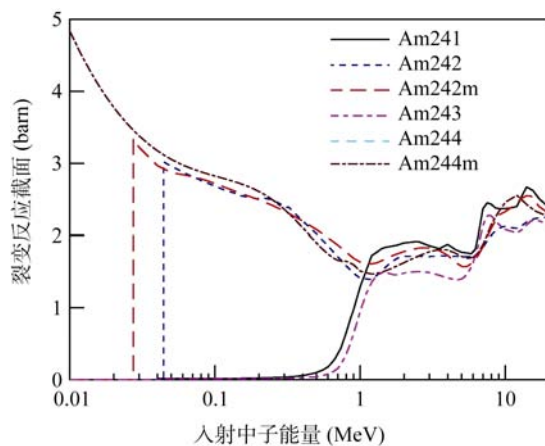


图 1 镅核素的裂变截面

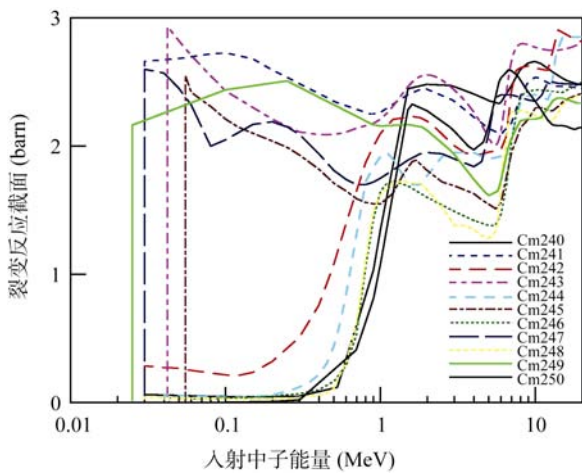


图2 铜核素的裂变截面

说，快中子引起的裂变要比热中子引起的裂变多得多。因此要有效地嬗变它们，必须采用快中子增殖堆(FBR)以及加速器驱动次临界反应堆系统(ADS)等快中子嬗变装置。下面就让我们来具体了解ADS。

二、ADS 是最有前景的嬗变技术

1. ADS 的基本构成

典型的 ADS 由中能强流加速器(主要是质子加速器)、外源中子产生靶和次临界反应堆构成。由加速器产生的质子束流轰击设在次临界堆中的重金属靶件(如液态铅或铅铋合金)，引起散裂反应，再通过核内级联和核外级联产生中子。散裂中子靶为次临界堆提供外源中子。ADS 由外中子源驱动次临界反应堆，以维持其链式反应，保持中子水平，以获得稳定的功率输出，从而获得裂变核能。如无外中子源(如切断加速器的束流)，加速器驱动的次临界核能系统的裂变功率水平将逐步降低，最后趋向于零，这一点与现行的裂变核能系统有所不同。加速器驱动的次临界核能系统中的反应堆将总是工作在次临界状态，通过加速器束流强度改变来实现功率水平的转换和调节，可以减少操作失误引起瞬发临界的可能性，从临界安全的观点，加速器驱动的次临界核能系统具有固有的安全性。

在加速器驱动的次临界核能系统中，次临界反应堆是一个中子放大器。20 世纪 60 年代末期有所谓电核反应堆的概念，把加速器产生的中子，经由次临界反应堆放大，提高整体中子水平生产核燃料，实现 ^{232}Th 到 ^{233}U 或 ^{238}U 到 ^{239}Pu 的转换，但经研究

表明，要实现工业规模的应用，加速器的束功率为数百 MW，而当时的技术还达不到 1MW。从能量转换的观点，加速器驱动的次临界核能系统还是一个能量放大器，次临界反应堆把加速质子束流的电能转换为裂变核能，实现能量放大。1993 年意大利高能物理学家，诺贝尔奖获得者卡罗·鲁比亚(Carlo Rubbia) 从高能物理实验中得到启发，提出利用裂变核能的能量放大器概念。

近几十年来，核能界一直在探索次量纲系核素和长寿命裂变产物的最终处理办法。经过分析比较，找到核废料核素最终处理的办法就是分离与嬗变，由核化学工作者把乏燃料中的长寿命核素用化学流程分离出来，用中子轰击，通过与中子的核反应使其嬗变为稳定的或短寿命的核素。嬗变处理长寿命核废料用中子源，可以是聚变堆中子源，裂变堆中子源或加速器散裂中子源。现在比较普遍认可，有工业前景的是加速器驱动的次临界核能系统。

人们构想的工业规模的加速器驱动的次临界核能系统，它的工作流程如图 3 所示。图中双线方框代表加速器驱动的次临界核能系统，原则上说它有嬗变、核燃料增殖和生产能量三种功能。以哪种功能为主，可根据建造目的，由设计参数决定，通常以嬗变核废料核素为主。加速器驱动的次临界核能系统的嬗变能力用支持比来量度，支持比代表一座加速器驱动的次临界核能系统可以嬗变多少座同功率压水堆卸出的次量纲系核素，按现在广泛认可的设计研究结果，支持比一般为 10 以上。

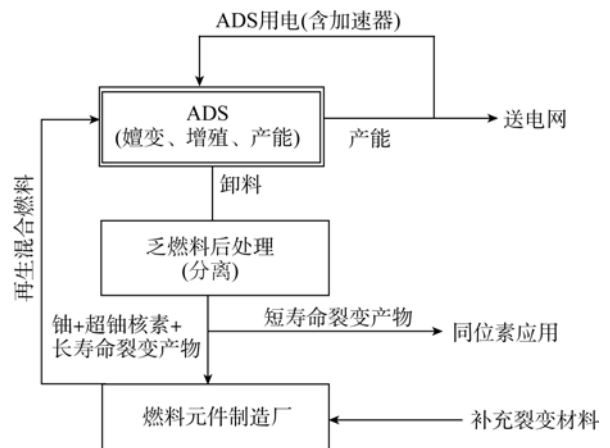


图3 理想的加速器驱动的次临界核能系统工作流程图

在图 3 中加速器驱动的次临界核能系统和燃料后处理厂结合，构成对核废料核素的分离-嬗变，其

目的是实现对核废料的最终处理，这是当前核能界关注的主要目标，再与燃料元件制造厂结合，将可构成一个封闭的核燃料循环，一旦实现这一理想的核燃料循环，所构建的核裂变核能系统将是放射性洁净的，它将使裂变核能利用回归大自然，不因裂变核能的利用而增加自然界的放射性毒性。这当然是人类和平利用核能所追求的目标。

20 世纪核能科学技术的成就，集中反映在两大核工程设施上，一是各种类型的核反应堆，二是各种结构的带电粒子加速器。加速器驱动的次临界核能系统则是通过由质子束管和散裂靶构成的结合件，把这两大核设施耦合在一起，形成一个全新的核工程设施。加速器驱动的次临界核能系统结构组成可以简略地图示在图 4 中。

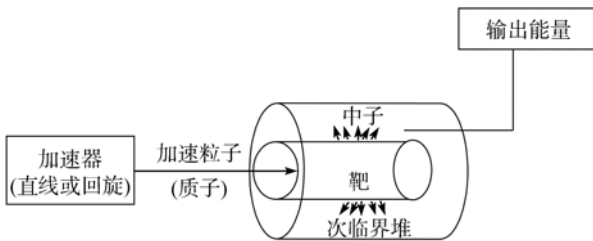


图 4 加速器驱动的次临界核能系统结构组成示意图

从图 4 中可以看出，加速器驱动的次临界核能系统在结构上是由三大部分组成，经过近十几年的研究，每一部分的物理图像和追求的技术目标，在原则上都已基本清楚，简述如下：

加速器

加速器一般选用强流质子加速器，如直线加速器或回旋加速器。

- (1) 质子能量约 1GeV；
- (2) 质子束流约 10~30mA。

高功率次临界反应堆

在加速器驱动的次临界核能系统中，次临界反应堆在加速器驱动下工作在高功率状态。在发展过程中探索过各种堆型，包括压水堆和重水堆等热中子反应堆，但都被放弃了。现在核能界形成共识，要实现加速器驱动的次临界核能系统的工程目标，只能使用快中子反应堆。

- (1) 反应堆热功率 500~1500MW；
- (2) k_{eff} 0.94~0.98；
- (3) 冷却剂 液体金属钠、铅、铅-铋

共熔体或（氦）气冷。

结合件

加速器驱动的次临界核能系统实现加速器和次临界反应堆之间的耦合使用结合件，结合件由质子束管和散裂靶构成。中能强流质子通过束管引入次临界堆堆芯轰击靶件，由核反应产生中子。但是并非所有产生中子的核反应都能产生足够的中子。加速器驱动的次临界核能系统的中子源，只能利用散裂反应的散裂中子源。所谓散裂反应，是指当能量足够高的粒子与原子核发生反应，使原子核碎裂成较多碎片的过程。这些碎片可以是粒子，轻离子或大质量的核。当用中能质子轰击具有一定大小的重元素靶时，随着入射质子的能量增高，除与原子核发生散裂反应外，逸出核外的次级粒子还有足够的能量与靶内其他原子核再发生散裂反应。这种核间的级联反应能一直延续到次级粒子能量降到反应阈能以下为止，于是使重元素靶发射的次级粒子数，包括中子数进一步扩大，由这种过程产生的中子源，称为散裂中子源。散裂中子源产生的中子数与质子能量、靶材料及其几何形状有关。以直径 10cm，长 60cm 的铅靶为例，每个 1GeV 的质子在铅靶上可产生约 20 个中子。

2. ADS 工作原理

反应堆的有效增殖系数 k_{eff} 定义为

$$k_{\text{eff}} = \frac{\text{当前一代中子数/单位时间}}{\text{上一代中子数/单位时间}}$$

经过简单的推导可知，次临界堆对注入中子数具有放大作用，放大倍数为 $\frac{1}{1-k_{\text{eff}}}$ ， k_{eff} 越接近临界状态，即越接近 1，放大倍数越大。对加速器驱动的次临界核能系统，如果选择次临界堆工作在 $k_{\text{eff}}=0.95$ 左右，那么中子放大倍数在 20 左右。

加速器驱动的次临界核能系统作为一个工业规模的核能系统，当然更关心它的能量放大功能，也就是说，更关心它对由散裂靶注入的质子束之束功率放大的功能。经过简单的推导可知，加速器驱动的次临界核能系统的能量放大倍数与中子放大倍数，即 $\frac{1}{1-k_{\text{eff}}}$ 成正比。

从单次裂变产生的中子数平衡考虑可知，对加速器驱动的次临界核能系统而言，平均每次裂变产生的中子数，将因加速器驱动而比临界堆增加约 5%，

因此有更多的中子裕量用于核废料核素的嬗变。

3. 引入加速器驱动的次临界核能系统构造放射性洁净核能工业园

宏观物理研究的结论

放射性洁净核能系统，首先它是一个有资源再生能力，可以充分利用铀资源的核能系统，同时它又是一个全封闭的核燃料循环系统，这个系统输出裂变电能，排卸出的仅仅是从放射性长期风险的观点，可以接受的中短寿命裂变产物，是比较“干净”的核能系统。再生铀资源，不仅要使核电发展过程中产生的大量贫化铀转换为工业铀，而且需要嬗变核废料中的超铀核素，作为裂变资源利用。还要嬗变长寿命裂变产物，这就需要足够的中子。中子学基本研究表明：

(1) 从中子经济学的观点证明，目前核电运行中的热中子反应堆（主要指压水反应堆）不可能实现这一目标。宏观物理研究证明，在热中子能谱中子场中，进入核能系统的核素除 ^{235}U 和 ^{239}Pu 以外，所有核素，从它们进入系统，直到经过各种核反应转化为稳定核素或短寿命核素为止，整个核素族的净中子产生率是负的，单次裂变的中子产生数也是负值，是一个纯中子消耗过程。使用具有热中子能谱的核能系统不能实现放射性洁净核能系统的目标。

(2) 在快中子场中，核素的净中子产生率或单次裂变中子产生数都是正的。特别是核废料中重要的核素次量铀系核素的中子价值都是正的，表明快中子能谱系统可能有足够的中子余额，用来增殖易裂变核素或嬗变核废料核素。因此使用具有快中子能谱的核能系统，才有可能实现放射性洁净核能系统的目标。

堆芯工程设计的制约

上面我们指出，在快中子能谱中可能实现放射性洁净核能系统的目标。事实上，研究表明，如果一开始就采用快中子反应堆作为裂变核能利用的唯一堆型，不仅资源可以充分利用，而且放射性毒性也可以比使用压水反应堆降低二个数量级，实现放射性洁净的目标。不幸的是以热中子反应堆作为核电站主要堆型已成为历史发展的现实，而且在很大程度上也是核能开发历史发展的必然。热中子反应堆核电站卸出大量乏燃料，积累了足够数量的工业铀才有可能发展快中子反应堆核电站，也是一种裂变核能发展的规律。现在的问题是，我们是否可以不受任何制约地利用快

中子反应堆来烧掉核废料，实现洁净核能系统的目标，答案是否定的。原因是以增殖核燃料和嬗变次量铀系核素为目的的快中子反应堆，设计上还受到许多工程安全因素的制约。

临界反应堆要安全运行，必须保证有负的反应性系数和适当大的缓发中子份额，而这两者都与提高中子的平均能量和增加次量铀系核素装料量相矛盾。快中子反应堆的设计中，为了提高增殖比，为了提高对次量铀系核素焚烧效率，都要使中子能谱硬化，提高堆中子的平均能量，而中子能谱硬化将使反应性系数变正。目前商用核电站的快中子反应堆平均能量 $\leq 300\text{keV}$ ，而为了嬗变次量铀系核素，希望平均中子能量达到 $600\sim 700\text{keV}$ 。在日本和法国都研究过专门用于焚烧次量铀系核素的临界特制堆芯（焚烧炉），探索大量装载次量铀系核素的可能性。研究表明，这将导致安全参数恶化。安全参数恶化分两个方面，一方面是缓发中子份额降低，这是由于镎、镅和锔等次量铀系核素缓发中子份额很低的原因。缓发中子份额 β 值是临界堆超临界反应性的最大限定值，这个限值越低，安全运行难度越大^①。压水反应堆 $\beta \sim 0.71\%$ 。MOX-FR[®] $\beta \sim 0.3\%$ ，随着次量铀系核素装料增加，整个反应堆平均缓发中子份额将减少，例如 $\beta < 0.10\%$ 以下，这将难以在临界状态下实现安全运行。

另一方面，在快中子系统中，中子能谱变硬，将增大正的反应系数，特别是，如果 ^{238}U 装料也减少，使多普勒效应变小，进一步促进正反应性系数增大，超过安全设计的限值。由于安全参数的恶化，使得焚烧次量铀系核素的特制临界反应堆在工程上不可能成为现实。

目前根据各种研究结果，可以说，在临界的快中子反应堆中次量铀系核素最大允许装料量，在重核素中所占重量的比例约为 5% ，而对轻水反应堆约 $1\%\sim 2\%$ 。

开发加速器驱动的次临界核能系统技术，构造放射性洁净反应堆工业园

由上面讨论可知，要利用快中子能谱，又要避免安全参数限值的制约，有效焚烧嬗变次量铀系核素和长寿命裂变产物的可行之路是开发加速器驱动的次临界核能系统技术，用中能强流质子加速器驱动快中子次临界反应堆，构成一个新的核能系统。这一系统较少受安全运行参数（正反应性系数和缓

发中子份额)限值的制约,中子能谱和次要锕系核素装载量都有较大的选择余地。引入加速器驱动的次临界核能系统以后,就可以由热中子反应堆、快中子反应堆和加速器驱动的次临界核能系统组合成反应堆工业园,组合模式和要求组合的结果必须使中子裕量大于0。

要构造放射性洁净的核能系统,除提高分离回收效率,达到99.9%以上外,关键是选择各种堆型,组成放射洁净的反应堆工业园。

放射性洁净反应堆工业园,在满足中子裕量的基本前提下,存在多种组合模式,其中有代表性组合模式如下:

(1) UOX-LWR→MOX-FR→ADS

在这种组合模式中,由轻水反应堆核电站积累工业钚,供给快中子反应堆电站装料,把次要锕系核素放在加速器驱动的次临界核能系统中焚烧。这种组合模式中,加速器驱动的次临界核能系统在反应堆工业园中所占份额约5%~10%,参看图5。

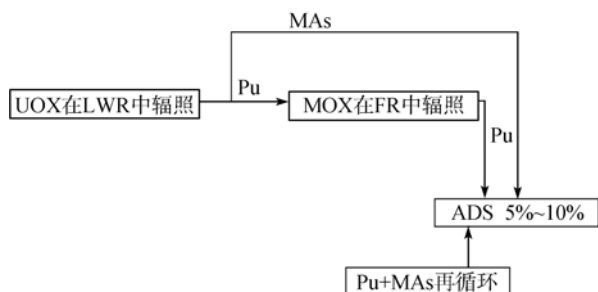


图5 UOX-LWR→MOX-FR→ADS组合

在这种组合模式中,加速器驱动的次临界核能系统焚烧次要锕系核素,对压水反应堆的支持比约为10。

(2) UOX-LWR→MOX-LWR→ADS

UOX-LWR产生的工业钚,再在轻水反应堆中以MOX-LWR形式再循环使用,然后提取工业钚和次要锕系核素一起送去加速器驱动的次临界核能系统焚烧,参看图6。据报导,差不多6座UOX-LWR能产生1座MOX-LWR所需装料。

我们注意到在轻水反应堆中使用MOX燃料将使某些锕系核素(镅和锔)有明显的增高,这就使得在这种反应堆工业园组合模式中加速器驱动的次临界核能系统所占比例增高,例如加速器驱动的次临界核能系统约占15%,UOX-LWR占74%,MOX-LWR约占10%。加速器驱动的次临界核能系统的支持比约为5。

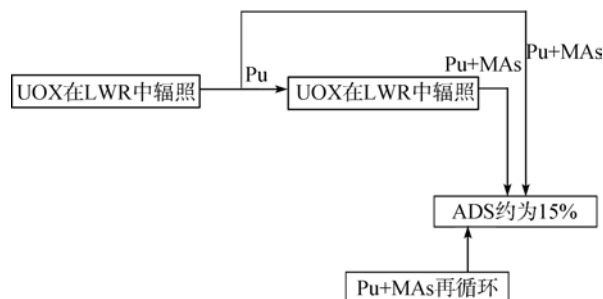


图6 UOX-LWR→MOX-LWR→ADS

(3) UOX-LWR→ADS

如果不希望把钚和次要锕系核素分别提出,UOX-LWR产生的钚和次要锕系核素一起送到加速器驱动的次临界核能系统中去焚烧,图7便是这种组合模式,其中加速器驱动的次临界核能系统约占20%。

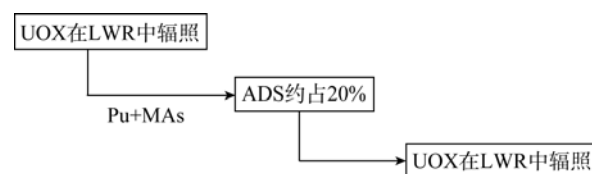


图7 UOX-LWR→ADS组合

综上所述,可以有下述结论。

(1)中子学研究证明,核废料核素有明显的中子学价值,是重要的裂变能资源。裂变能资源相对贫乏的国家,尤其应重视核废料核素的利用。

(2)裂变能的开发使核素总体的放射性毒性成百倍增加,对人类生存构成极大的潜在风险。研究利用核废料,对其作最终处理,使放射性毒性从总体上回归到自然资源水平,有极大的环境效益,也是核能界的职责所在。

(3)开发加速器驱动的次临界核能系统技术,利用中子嬗变核废料核素,作为最终处理手段是各国核能界的共识。但是各国裂变核能开发的历史和现状不同,核能政策各异,开发加速器驱动的次临界核能系统的路径也有所不同。这种不同,主要表现在次临界堆冷却剂的选择上,虽然都尚处在研究探索阶段,钠冷却和铅或铅-铋冷却是目前两种主要研究路线。

各种加速器驱动的次临界核能系统研究开发路线的共同目标,是引进加速器驱动的次临界核能系统,最终使裂变核能成为全封闭的干净的燃料循环

系统。

(4) 放射洁净核能系统关注核废料的最终处理, 更关心裂变资源的充分利用。而要实现这两个目标, 都需硬化反应堆(临界或次临界)中子能谱, 提高中子平均能量, 以增加对核废料核素的嬗变能力和资源利用能力, 同时提高易裂变核素的增殖比, 缩短易裂变核素的倍增周期。因此, 超快中子能谱相关的物理、热工和材料问题是放射性洁净核能系统构造中, 反应堆工程研究的重点。

(5) 一个系统的嬗变能力和增殖能力主要由两个因素所决定: 一是除了维持系统自持和考虑各种吸收及泄漏外的中子余额数目; 另一个是系统嬗变或增殖每个核所消耗的中子数目。要嬗变核废料, 必须有中子余额。ADS 由中能强流加速器、外源中子产生靶和次临界反应堆构成。由于 ADS 有外中子源, 其中子余额要多于临界堆, 这一点对于核废料的嬗变比快堆有利得多。ADS 是目前嬗变核废料的最强有力工具。从技术上看, ADS 和快堆互为依托。研究表明, 加速器驱动的快堆是一种比较理想的选择。因此, 快堆技术发展是 ADS 开发的一个必须经过的阶段, 并对 ADS 提供有力的技术支撑(如材料、堆芯物理、燃料循环)。另一方面, ADS 研究将涉及新型冷却剂的开发等问题, 可以推动快堆本身技术的发展。

(6) 核能系统要达到放射性洁净的目标, 必须改进和提高后处理分离技术, 提高核废料核素的回收率, 特别是应该关注长寿命裂变产物的回收率。

三、ADS 研究进展

1. 概况

自 20 世纪 90 年代初以来, ADS 开始成为国际核科技研究的热点。

国际核科技界认为 ADS 是一个有前途的新一代核能开发的技术路线。国际原子能机构把它列入新型核能系统中, 称之为“新出现的核废物嬗变及能量产生的核能系统”。目前已把它纳入国际原子能机构的快堆技术工作组的年会内容。国际上关于 ADS 的学术交流、研讨会及科技合作日益活跃与频繁。总的来看, ADS 不仅列入主要核电国家的中长期发展计划, 而且许多核能研究机构和相关工业部门都参与开发研究。欧盟已经在多个框架计划里支持了 ADS 研究并取得明显进展。在沉寂了一段时间之后, 美国对 ADS 的兴趣又开始升温, 2010 年在弗

吉尼亚开了 ADS 国际会议。在那次会议上, 美国能源部的报告认为, 除了加速器稳定性以外, 当前的加速器技术已经可以满足 ADS 实验装置的要求。经过适当的发展, 也可以满足 ADS 示范装置的要求。最近, 美国科学家还提出了不少有意思的 ADS 概念。美国阿贡国家实验室认为, 3~4 座工业化 ADS 可以满足美国嬗变核废料的需求。每座工业化 ADS 包括 1 GeV 质子加速器, 铅铋合金散裂靶和次临界反应堆。质子加速器束功率约为 25 MW, 反应堆的热功率约为 3000 MW。次临界反应堆的有效中子倍增系数 0.98, 采用液态金属燃料, 包括铀和次锕系核素。美国加利福尼亚大学伯克利分校和劳伦斯伯克利国家实验室提出, 在乏燃料外面直接再包一层包壳, 然后放在 ADS 中燃烧, 可以将燃耗提高一倍。日本和印度等国也有各自的 ADS 研发计划。

我国于 1996~1999 年间, 在中国核工业集团公司和国家自然科学基金会的支持下开展了 ADS 概念研究和物理可行性研究。1999 年在科技部的国家重点基础研究发展规划项目(“973 计划”)中立项, 开展为期五年的“ADS 物理和技术基础研究”, 2007 年, “973 计划”中继续支持了 ADS 的研发至今, 由中国原子能科学研究所和中国科学院高能物理研究所共同承担。与先进核能国家比较, 我国的 ADS 研究起步较晚, 投入较少, 研究资源缺少。但由于充分利用了承担单位的技术积累, 很好地借鉴了国外的先进经验并且充分发挥了科研人员的积极性和创造性, 目前我国 ADS 研究整体上达到国际水平, 有些已经达到国际先进水平, 得到了国际同行的认可, 保持了与国际同步的研究态势。建成了输出能量为 3.5MeV、输出脉冲流强为 43mA 的强流质子 RFQ 加速器; 建成了输出能量为 75keV、输出流强大于 65mA 的强流 ECR 离子源; 建立和配套了 ADS 中子学研究专用计算机软件系统并开展了 ADS 工程概念优化方案计算; 建成了 ADS 专用中子和质子微观数据评价库; 创造性地进行了专用材料的辐照效应研究及其与液态金属冷却剂(钠和铅铋合金)的相容性研究; 在核废料核素的中子学价值、ADS 特有的辐射防护问题、ADS 系统的热工水力问题等方面, 也开展了一系列的探索性的研究, 取得了积极成果。尤其是建立了国际上第一个快-热耦合的 ADS 次临界实验平台——启明星一号(图 8), 在国际上产生了很好的

影响。2010年，国家自然科学基金委员会实施了“先进核裂变能的燃料增殖与嬗变”重大研究计划，支持 ADS 等研究。

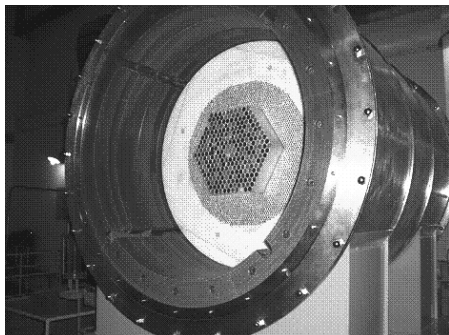


图 8

ADS 研究的共同特点是：充分利用已有核能研究开发设施开展实验工作；重视国际合作，以欧盟的 MYRRHA 实验装置和散裂靶的 MEGAPIE (1 MEGAWATT Spallation Target Pilot Experiment) 计划最具代表性。目前国际态势已从概念研究、物理研究进入关键技术部件预研及 ADS 系统集成的研究。近期的两个热点是基于零功率 ADS 实验装置的研究和带热功率的 ADS 实验装置建设。

2. 零功率 ADS 实验装置

目前正在运行的零功率 ADS 实验装置主要有我国的启明星一号、白俄罗斯的 YALINA 系列和日本京都大学 ADSR。

启明星一号是我国专门为开展 ADS 次临界中子学研究而建立的国际上第一个具有快-热耦合结构的次临界实验平台。于 2003 年完成了方案设计，2005 年完成了安装、调试与第一阶段实验。启明星一号在建设过程中还实现了 ADS 燃料低浓化。该装置为我国开展 ADS 次临界反应堆物理基础研究、组织或参与国际 ADS 研究合作提供了硬件保证。启明星一号从堆芯中心向外分为中子源区、快区、热区、反射层区、屏蔽层区以及不锈钢外壳。现在，启明星一号已经作为基准实验装置列入国际原子能机构的合作研究计划项目，并开展了许多研究工作，系统地研究了在不同能量的中子源驱动下，启明星一号堆芯不同位置的中子能谱特征、堆芯中子通量密度空间分布、堆芯裂变率分布、在堆芯某一位置的嬗变率等。

白俄罗斯的 YALINA 系列是在美国的帮助下建设的，已经完成的有 YALINA-Thermal 和 YALINA-

Booster；它们也是国际原子能机构的合作研究计划项目的基准实验装置，已经开展了许多中子物理研究工作。现在正在将 YALINA 改造为纯快谱的装置。

日本京都大学 ADSR 项目利用一台 FFAF 加速器和中子靶在 KUCA 临界装置外面（而不是通常的中心）产生中子，利用 MCNP 程序和光纤等测量手段，分别对中子通量密度随时间的变化与中子衰减行为等进行了计算和实验。

此前，欧盟各国合作开展了 MUSE 计划——利用法国的大型快中子零功率实验装置开展 ADS 中子学研究。现在正在执行 GUINIVERE 计划，将比利时的 Venus 装置改造为快谱的 ADS 实验装置并与新建的强流中子发生器耦合。

3. 带热功率的 ADS 实验装置建设计划

带热功率的 ADS 实验装置建设计划主要有欧盟的 MYRRHA 计划、乌克兰与美国合作建设 ADS 实验装置的计划及中国的 ADS 实验装置建设计划。

欧洲现在正在致力于建设 ADS 集成实验装置 MYRRHA，并开始设计示范装置 EFIT。MYRRHA 为多用途小尺寸 ADS 装置的英文缩写，最初由比利时提出，计划用它来替代现有的研究堆 BR-2，用于材料和燃料元件研究同位素生产以及用于嬗变和生物应用研究。MYRRHA 计划的核心是由加速器驱动的铅-铋冷却的快中子次临界系统。MYRRHA 计划开始是多边合作项目，后来演变为欧洲共同体第六框架和第七框架的研究项目。MYRRHA 的主要设计指标：50~100MW 热功率，600MeV、4mA 的强流加速器，铅铋合金作为靶和冷却剂。从最近的报告中了解到，MYRRHA 的一个重要变化是从原来的无窗设计改为有窗设计。MYRRHA 计划于 2023 年左右运行。EFIT 将功率提高到几百 MW，设想在 2030 年左右建成。

乌克兰 Kharkov 物理与技术研究所正在与美国阿贡国家实验室合作建设 ADS 实验装置，计划的要点如下：采用低浓铀作为燃料，水作为冷却剂，石墨作为反射层，100kW、100MeV 的电子直线加速器打固体钨靶或者铀靶产生中子驱动次临界堆。计划于 2014 年左右建成。

最近，中国原子能科学研究院和中国科学院分别提出了 ADS 研究路线图，初步拟定分小尺度技术集成，即原理验证装置建设、原型 ADS 建设、全尺度 ADS 工业示范等三个阶段，大约用 30 年的时间

来实现 ADS 的工业应用。他们在“国家重大科技基础设施‘十二五’建设需求建议”中都积极申报了 ADS 实验装置项目。现在 ADS 实验装置已经列入指南。拟在项目启动后五年左右，建设一个热功率 10MW 的液态金属冷却快中子次临界实验装置（临界设计，可次临界运行）以检验 ADS 设计和进行 ADS 技术的集成。

另外，中科院在 2010 年 3 月 31 日向国务院第 105 次常务会议汇报了“创新 2020”方案，得到原则同意。在“创新 2020”方案中，“未来先进核裂变能”作为战略性先导科技专项进行部署，包括基于钍的熔盐堆和 ADS 预研装置的建设。ADS 先导科技专项的五年经费为 17.8 亿元。目前，先导科技专项的第一笔经费已经到位，正在组织队伍实施。

四、结束语

裂变能可持续发展的一个重要的限制性因素是如何解决核废物的最少化问题，分离-嬗变战略是解决这一问题的有效途径。在国家 973 计划等渠道的支持下，国内已经形成了一支 ADS 的研发力量并有很好的研究基础，形成了与国际研究基本同步的态势。由于 ADS 技术发展的不确定性，为了减少决策的风险，应该在单项关键技术攻关的基础上尽快进行小尺度的技术集成。目前国际 ADS 研究处于从基础研究向小规模系统集成过渡的阶段，由于尚未涉及太多的商业秘密，正是开

展国际合作的最佳时机。应该抓住有利时机，大力鼓励和全方位地参与国际合作，加快对 ADS 关键技术的掌握。

（中国原子能科学研究院 102413）

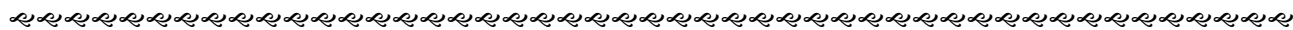
作者简介

夏海鸿，1965 年生，浙江省永康市人，中国原子能科学研究院研究员，博士，研究方向为 ADS 和中子物理学。中国原子能科学研究院核物理所所长、核数据测量与评价技术重点实验室主任、北京串列加速器核物理国家实验室副主任、中国核数据委员会副主任、973 项目“嬗变核废料的加速器驱动次临界系统关键技术研究”的项目办公室主任。2004 年享受政府特殊津贴；2005 年获国防科技工业优秀博士称号；2009 年入选百千万人才工程国家级人选。



①反应堆物理表明，当反应堆超临界反应性，达到 1β (1β) 就将发生瞬发临界事故，所以实际运行的临界反应堆都规定超临界反应性必须 $1/3\beta$ 。

②此处及后文字母缩写含义如下：使用铀的氧化物制造的燃料称为 UOX 燃料，使用铀-钚混合物制造的燃料称为 MOX 燃料，LWR 表示轻水反应堆，FR 表示快中子反应堆。



科苑快讯

海水-淡水电池

一种新型的基于盐水和淡水的熵不同的电池，可能是巨大的可再生能源。斯坦福大学的崔义 (Yi Cui, 译音) 与他的同事用钠锰氧化物 (Sodium Manganese Oxide) 的纳米棒电极 (能有选择地吸收和释放钠离子) 及银电极 (能有选择地吸收和释放氯化物离子)，把电极放在淡水中，电极就充电，然后，把电极放在海水中，电能就释放出来。

无限次重复这个过程，每一次循环都有一点能量增益，效率高达 74%。这样的电池可以从淡水和海水自然混合的地方，产生全球能量消费量的 13% 的电能。

（何景棠译自 2011 年 5 月《欧洲核子研究中心快报》）

土卫二上有生命吗

土卫二表面不断喷射出冰与水蒸气的混合物，这些羽状喷泉使土卫二成为太阳系中最活跃的地方。随着对这些物质的持续研究，研究者认为土星的这个冰冻卫星将是最有希望找到地外生命的星球，他们在 5 月的学术会议和 6 月 22 日的《自然》(Nature) 杂志上做了报告。

卡西尼号探测器对这些羽状喷泉做了取样分析，揭示了土卫二坚硬的冰层下面存在一片海洋或是蕴含大量水的裂缝。卡西尼飞越了这些羽状喷泉的中心地带，发现其中 99% 的冰晶颗粒是富含盐分的，说明它们来自土卫二表面下一些地方的咸水。这些直接证据将催生新的太空探测计划，揭开土卫二的神秘面纱。

（高凌云编译自 2011 年 6 月 22 日 www.sciencemag.org）