

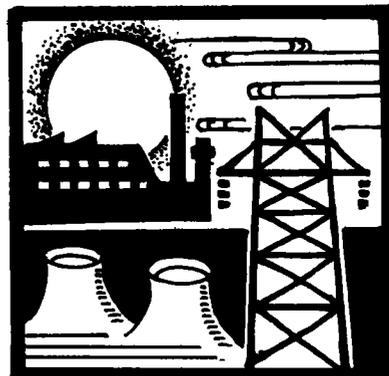
加速器驱动放射性洁净核能系统

丁大钊

(中国原子能科学研究院 102413)

傅世年

(中国科学院高能物理研究所 100039)



一、核能——人类能源的最终解决之道

经历数百万年而形成的煤、石油和天然气等化石能源,为人类的过去和现在提供了生存和发展的基础。20世纪以来,人们将它们的化学能转化为更为方便的电能。经济的迅猛发展和人口的急速增长,人类正在加快耗尽这种不可再生能源。据估计,人类可以继续依赖化石能源的时间不过百来年。除了资源问题,化石能源开采和利用所带来的生态与环境问题,已经向我们这代人提出了严峻的挑战。CO₂过量排放引起的温室效应以及酸雨的影响,对我们人类生活和生存的影响有多严重,还要以后才会更加充分地显露出来。无论是资源问题,还是环境问题,都要求人类找到一种可满足人类持续发展需求的洁净能源。

核能是一种高效、洁净和安全的新型能源。20世纪初科学的新发现,使人们对物质结构有了深入认识。我们知道,重核裂变或轻核聚变时,都会释放出能量。由于科学技术的进步,我们有可能利用这种能源。

聚变核能可望一劳永逸地解决人类能源问题。海水中蕴藏着丰富的聚变核燃料——氘,其燃烧过程不会产生大量放射性废物。但聚变能的开发目前尚处在基础研究阶段。按一项能源新技术的开发应用要遵循基础研究、原理验证、技术验证、示范运行,然后进入商业利用的过程来考察,聚变能的商业应用会在21世纪的后半期。因此,从现在到21世纪中叶以后的很长时期内,核能利用仍然以裂变为基础。

裂变核能的和平利用为人类提供了新型的高效洁净能源。由表1可见,裂变材料所蕴含的能量密度是化石燃料的数百万倍,而一所核电站所排放的废物总量仅为相同发电量的煤电站的几十万分之一,这其中真正待处理的废物不到百分之一,如表2所示。核电在世界上的应用已经有25年的历史了,

目前约有430座反应堆在30个国家用于核电生产,提供了世界约20%的电能。在法国,75%的电力来自核能,日本和德国是30%,美国是16%。我国核电刚刚起步,发电量仅为发电总量的1.5%。作为经济快速增长的发展中国家,我国对能源的需求不断提高,大力开发核能是解决我国能源紧张和能源发布不平衡难题的有效途径,因此,我国核能的发展有很大的空间。据专家预测,到2050年,我国核电可能将占总发电量的10%至20%。

目前商用裂变核能的开发是建立在20世纪50

表1 核能是高效的能源

60m ² 阳光·小时	1kW
1kg 煤	3kWh
1kg 汽油	4kWh
1kg 天然铀(0.75%U ²³⁵)	5×10 ⁴ kWh
1kg Pu ²³⁹ (由U ²³⁸ 转换)	6×10 ⁶ kWh

表2 核能是排放废物总量很少的能源

1Gw. 煤电站年排放		1Gw. 核电站年排放	
SO ₂	17000吨	乏燃料	35吨
NO _x	4500吨	(其中高放射性废物)	80千克
CO ₂	650万吨		
粉尘	1300吨		
灰粉	28万吨		

年代的军用技术转化的基础之上的,在其利用过程中已显露出一些制约其发展的不利因素。为使其成为可持续发展的一种能源,人们必须解决以下3个科学技术问题:

1) 提高资源利用度。核电站使用的核燃料铀-235的天然丰度仅为0.75%,而天然丰度为99.25%的铀-238只有不到0.5%可以转变成易裂变的铀-235。因此,人们希望改变传统产能热堆依赖铀-235为燃料的状况,充分利用裂变核资源铀-238,使其能高效地转换为易裂变核铀-235。另外,也希望能开

现代物理知识

发利用自然界十分丰富的钍-232资源,使其转换为裂变燃料铀-233。

2) 高放废物的最终处理。一座 1GW 电功率的核电站每年大约要产生 34 千克的超铀次量纲系核素(MA)和约 50 千克的裂变产物(FP)。MA 的放射性毒性很强,并且有的核素的半衰期相当长,达上百万年。目前采用的固化加地下深层埋藏处理方法,不仅费用昂贵,而且无法预测它对生物圈未来的影响。

3) 提高核电的安全性。核电本身从技术上看是一种安全的能源。例如,核电大国法国的核电在 25 年的历史中,从未发生过任何核事故。但是,由于一些核事件通过媒体的宣传,在民众中产生心理上的恐慌,人们容易下意识地将任何核事件同核爆炸联想起来。这就要求我们不断提高核电站的安全性能,从根本上消除临界事故的可能性,以提高公众对核电的接受度。

我国核电还处于开发利用的初期,虽然目前还没有大量的核废物需要处理,但是,从未来发展的眼光看问题,我们也必将会面临目前核电大国所遇到的核废物处理难题。而且,充分利用铀资源,对我国更是一个重要的问题。若按 2050 年核电所占总装机容量比例的 10% 计算,用现在商用的压水堆核电站,则所需天然铀资源将接近世界可采储量的三分之一。因此,在核电开发的初期,我们就必须十分重视核燃料资源利用率的问题。

二、ADS——裂变核能可持续发展的创新途径

为克服上述的 3 个难题,核电技术在原有的基础上,正在不断地发展创新中。为提高资源利用率,现在工业上正在利用把轻水堆乏燃料中铀、钚回收

再利用的技术,使铀资源利用率提高约 1 倍。而处于示范-开发阶段的快中子增殖堆,原则上可把铀资源的利用率提高约 60 倍,但核燃料的增值周期较长(约 30 年)。利用快堆也可能嬗变核废物中的 MA,但其能力有限。非能动的安全措施正被用于新一代先进压水堆,以提高核电站的安全性。

但是,这些“改进”的技术路线并不能完全适应核能可持续发展的需要。核科技界应研究开发一种“创新”的技术路线,它应在新的物理概念的基础上,研究革新的技术途径去有效地解决上述 3 个难题。它的目标应是:以更高的增值率、更短的增值周期,把 U-238 或钍-232 转化为易裂变的核燃料,从而显著地提高资源利用率;不仅系统本身只产生极少量的放射性废物,而且,在产能的同时,还可嬗变由其他普通核电站产生的核废物,使这些核废物中长寿命放射性核转化为短寿命与低毒性的废物;该系统还应具有本征安全性,能从根本上杜绝发生临界事故的可能性。

加速器驱动放射性洁净核能系统(AD-RCNPS)正是能满足所有这些要求的一个创新系统。它由一台中能加速器和一座次临界反应堆组成,因此,在国际上统称为加速器驱动的次临界系统(ADS),其原理构成图如图 1 所示。由图可见,这个系统主要由 4 个部分组成:

(1) 驱动器:是一台中能强流质子加速器。其能量大约为 1000 兆电子伏特(1000MeV),质子束流强为几十毫安。由它引出的束流打在重金属靶上,产生散裂中子,为次临界反应堆提供外源中子,用以驱动次临界反应堆运行。

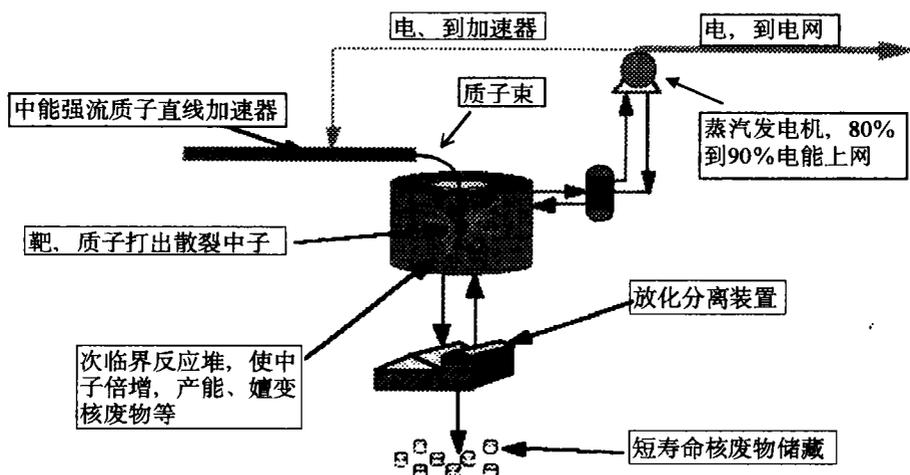


图1 加速器驱动的洁净核能系统原理示意图

(2) 中子产生靶: 由一种特定性能、结构及形状的靶材料做成, 它是驱动器与次临界堆的耦合部件, 它为系统提供外加中子源。靶材料一般选铅、钨、铀等重金属。当中能质子束打在重核上时, 会通过散裂反应产生中子, 用以维持次临界反应堆中的链式反应。

(3) 次临界反应堆: 是系统的“心脏”。其有效中子倍增因子小于 1, 因为由外中子源驱动链式反应, 所以其中子学行为不同于临界堆。外源中子慢化到所需的中子能量及空间分布、核燃料的增值、核废物的嬗变、能量的产生等过程, 都发生在其中。

(4) 原址的放化分离设施: 根据系统设计的具体结构, 或是“在线实时”、或是“离线”处理次临界堆所排出的放射性废物, 经过分离加工后, 将高放废物送回到反应堆中进行嬗变处理。

显然, 这样一个系统与常规的核能系统的主要差异是外源中子的引入, 这些外源中子是通过中能质子散裂反应所产生的。这一特点, 使这个系统不仅是“创新”的次临界系统, 能有效地克服常规核能所面临的三个难题, 而且在工程上具有现实的技术基础。利用外源中子, 这个系统可把 U-238 转化为 Pu-239, 在无限次循环条件下, 原则上可使铀资源利用率提高 120 倍(如表 1 所示), 而倍增周期可缩短到常规快堆的一半。其嬗变核废物的能力也高于快堆, 而且还可将核废物中的 MA 转化为附加的可利用核资源。由于次临界反应堆的中子倍增系数小于 1, 关断束流即可停堆。常规反应堆利用控制棒停堆的时间在秒的量级, 而加速器束流的关断时间在毫秒量级。因此, 这个系统可以从根本上杜绝发生临界事故的可能性。这个系统集 20 世纪核科学的两大装置—反应堆和加速器为一体, 两者各自均有长期发展的工程技术基础。这个系统的结构上, 两者又是相对独立的, 在运行、监测、维护等方面均较方便。

综上所述, 加速器驱动的次临界系统是一个现实的、可保证裂变核持续发展的创新系统, 是值得开展研究的新型核能系统。

三、ADS 系统的基本原理和其中的创新课题

1. 基本原理

加速器驱动次临界反应堆系统的基本概念可归纳为: 把外源中子数 n_0 注入中子倍增系数为 k 的反应堆中, 当 $k < 1$ 时, 中子数将按

$$N_s = n_0(1 + k + k^2 + k^3 + \dots) = \frac{n_0}{1 - k} \quad (1)$$

关系增长。此处 n_0 是每个质子在靶上散裂反应所产生且按每次裂变归一的中子数, $N_s - n_0$ 为由次临界反应堆中核燃料裂变提供的中子数, 除维持反应堆功率水平所需的中子数与各种吸收和泄漏外, 余下的为中子余额。该中子余额可用于嬗变核废物或转换核燃料。

若记 N_k 和 N_c 分别为外源驱动的次临界堆和临界堆中的中子余额, 利用简单的模型可得出:

$$N_k = N_c + v \frac{1 - k}{k} \quad (2)$$

即在有外源中子驱动的次临界反应堆中, 中子余额比同样条件下的临界堆要高。由外源导致的中子余额增量有利于嬗变核废物或增加核燃料的转换, 以维持次临界堆内易裂变核素的储量, 最终达到加深燃耗的目的。由(2)式可见, k 值越小, 中子余额的增量越大。但从产能系统的能量增益的角度出发, k 值应有下限, 否则无法达到产能的目的。由(1)式, 每个质子引发的裂变次数 N_f 为:

$$N_f = \frac{N_s - n_0}{v} = \frac{n_0}{v} \frac{k}{1 - k} \quad (3)$$

次临界反应堆输出的功率 $P = E_f I N_f$, 其中 I 为质子束流强, $E_f = 200 \text{ MeV}$ 为每次裂变释放的能量。由此可得系统的能量增益, 即反应堆的输出功率与加速器束流功率之比:

$$G = \frac{P}{E_p I} = \frac{E_f}{E_p} \frac{n_0}{v} \frac{k}{1 - k} \quad (4)$$

k 值合理的变化范围为 0.85—0.98 之间。通过选择不同的 k 值, 加速器驱动的次临界反应堆可优化设计为以产能为主要目的、或以嬗变核废物或增值核燃料为主要目的。

中能强流质子加速器提供的质子束在重核靶上产生的散裂反应, 是次临界反应堆最经济的外中子源。表 3 列出了在几种核反应中, 每个粒子打靶产

表3 不同核反应中产生一个中子的能耗比较

中子源	中子产额	每中子能耗 (MeV/n)
高压倍加速器 400keV d+T-Ti靶	$4 \times 10^{-5} \text{ n/d}$	10000
低能强流加速器 35MeV d+Li(液态)	$2.5 \times 10^{-3} \text{ n/d}$	10000
中能电子直线加速器 100MeV e+U-238	$5 \times 10^{-2} \text{ n/d}$	2000
中能质子直线加速器 1000MeV p+Pb	20 n/p	50

生中子的产额和产生 1 个中子的能耗。由表可见, 利用中能质子直线加速器的束流打铅靶产生的散裂中子具有最高的中子产额和最低的能耗。由此可看出利用中能质子加速器来驱动次临界反应堆系统的科学合理性。

2. 原有基础与创新展

加速器驱动洁净核能系统的概念是建立在坚实的物理和技术基础之上的。在它所涉及的各学科领域, 包括核物理、反应堆物理、加速器物理、放射化学等, 人们对其理论认识已相当深入, 而且, 还得到了大量实验的检验。不仅如此, 由此建立的工程技术也已有了几十年的开发与发展, 在反应堆工程、强流加速器技术以及放化流程等方面取得了巨大的成就和丰富的经验。这一切为 ADS 系统开发的可行性提供了必要的基础。当然, 作为一个创新系统, 其中也必然还有许多前所未有的挑战等待我们去克服, 这也正是推动这些核科技在原有基础上“创新”发展的一个好机会。

(1) 加速器物理与技术

驱动洁净核能系统的强流质子加速器需要提供平均流强为几十毫安、能量约为 1GeV 的质子束。目前世界上已建成一台流强为 1 毫安、能量为 800MeV 的质子直线加速器, 即美国洛斯阿拉莫斯国立实验室的 LAMPF 加速器。它已运行了近 30 年, 它的建成和其后的运行经验, 是人们追求更高流强的重要基础, 而这 30 年来在强流加速器领域中物理与技术的不断进步, 更使人们相信, 通过一定的技术与开发, 建造更高流强的质子直线加速器没有根本的技术障碍。为满足 ADS 的要求, 人们面临的技术挑战主要来自三个方面: 控制束流损失; 提高加速效率; 提高加速器的运行可靠性。

LAMPF 的运行经验已为人们控制束流损失提供了大量定性的经验, 而近十几年来的强流束物理的理论研究, 对束流损失机制有了更多的认识。在新的强流加速器的设计之中, 人们必须探索控制束流损失方法, 大大降低束流损失率, 使其低于 $10^{-8} / \text{m}$ 。20 多年来, 超导技术在电子和重离子加速器中的应用与逐渐成熟, 为提高加速效率提供了新的途径。为把这些技术应用到质子加速器上来, 人们正在进行新的尝试。作为驱动次临界反应堆的加速器, 其运行可靠性大体上应与反应堆相当。这对通常只用于核物理实验目的的加速器来说, 是十分苛刻的要求。现在, 人们正把通常用于工程设计中的

RAMI (Reliability, Availability, Maintainability, Inspectability) 研究推广到加速器领域中来, 以使所设计的加速器具有高的可靠性和可使用率, 并且易于维护和监控。

除了强流质子直线加速器外, 人们还在探索采用强流回旋加速器的可能性, 它比直线加速器的造价低, 并且更紧凑。瑞士 PSI 研究所正在提高一台 600MeV 回旋加速器的质子束流强, 期望能达到 1.5mA。人们估计, 原则上回旋加速器的流强有可能达到 10mA。这样可采用多台回旋加速器来驱动一座次临界反应堆。

(2) 反应堆物理与技术

目前已开发或已商用的临界反应堆中, 其中子通量、功率水平与高功率次临界反应堆是大体相当的。人们可以采用技术成熟的商用热堆, 如 CANDU 堆, 或已有相当开发深度的快堆, 来作为次临界反应堆的基本堆型。但是, 由于外源中子的引入和工作在次临界状态, ADS 的反应堆还有一些物理和工程技术中的新课题有待解决。次临界堆中, 散裂靶上产生的中子都位于反应堆的中心部位, 因此有必要进行二维或三维计算。而且, 中子的能谱与空间分布是相关的, 不能像临界反应堆物理中那样分开处理。另外, 深燃耗还要求在堆物理计算中考虑更多的核素。在工程技术方面, 由于外中子源导致的堆功率空间分布不均匀性及新型高效导热剂的开发, 都是所面临的新课题。尤其是外源中子产生靶是一个高热负荷的元件, 甚至可能比堆元件的热负荷还高, 其导热与冷却是解决加速器与反应堆耦合并使系统稳定工作的关键之一。

(3) 核物理、放射化学及材料

为满足 ADS 反应堆物理研究的需要, 核物理研究有必要定量地给出外源中子场的空间和能量分布, 能量达 100MeV 的中子核反应截面以及在深燃耗下各种锕系元素的中子核反应截面。ADS 后处理工艺要求放射化学给出锕系核素高回收率情况下的工业规模干法处理流程, 还需要进一步开发熔融盐和熔融金属体系中分离的级联技术。由于 ADS 中一些材料处于高温、高辐照、强腐蚀的运行工况下, 会有一些前所未有的材料科学难题, 比如强流束引出窗材料、高效的反应堆导热剂与其他材料的相容性问题、适应强腐蚀的熔盐后处理过程的合金材料等。

综上所述, 加速器驱动的洁净核能系统在原理

上具有先进性和合理性,在技术上具有可行性,人们需要在已达到的科学技术成果的基础上,在一些核科技的主要领域里进行创新性研究与开发,解决一些具有重大学术价值与实用价值的挑战性课题。这些新的研究成果将不仅会为新型核能系统的建立作出贡献,还必将在新的世纪里极大地推动核科技的整体发展。正因为如此,ADS 相关科技的研究从 20 世纪 90 年代以来,已成为国际核科技界的研究热点。

四、ADS 相关科技的发展动态

近 10 年来,世界上许多核科技先进国家提出了各自的 ADS 发展计划和方案,同时,一直在积极开展与 ADS 相关的基础研究和技术开发,以解决其中的一些关键技术难题。本节将先简要地介绍国际上的发展情况,然后就我国开发加速器驱动洁净核能系统的研究计划提出一个初步的设想。

1. 国际上的发展状况

美国、日本、欧洲、俄国、韩国都已提出了符合各自国家需要的 ADS 方案,有些还启动了前期预研工程。虽然各个方案具有各自不同的应用目的,但其中的技术要求和需要解决的关键课题则基本是一样的。其成果必将对洁净核能系统的建造奠定坚实的基础。

美国的核废物嬗变工程(ATW)在 1999 年底向美国国会提交的报告中,建议采用两台连续束流强为 45mA、能量为 1GeV 的强流质子直线加速器分别驱动 4 座次临界装置,如图 2 所示。这样的安排可提高整个系统的可靠性。直线加速器在 11MeV 之后就采用超导结构,以提高加速器的效率。ATW 打算采用 Pb-Bi 共熔体作为靶和冷却介质,次临界堆的有效中子倍增因子 k 值将取 0.97。ATW 是一个长期开发项目,计划到 2018 年建成一台热功率为

420MW 的演示装置,2027 年建成一台热功率为 840MW 的全尺寸原型装置,并于 2040 年左右推向商用。

日本原子能研究所(JAERI)近 10 年来,在名为 OMEGA 计划的框架下,从事着“中子科学计划”(NSP)的研究开发工作。目的包括核废物嬗变、核电生产,同时还作为散裂中子源,从事基础科学和应用研究。1998 年,NSP 与日本高能加速器研究机构(KEK)的“日本强子装置”(JHF)计划合并,并立即启动了加速器低能段工程。整个联合项目将建在 JAERI,已成为日本国大型科学工程的优先项目,可望在 2001 年获得政府对整个工程的正式投资启动。

欧洲核子中心前主任、诺贝尔奖获得者卡洛·鲁比亚于 1993 年提出了“能量放大器”概念,建议采用钍-铀燃料循环系统来产生核电,并探讨了利用三级回旋加速器来作为驱动器的可能性,同时,也在开展强流质子直线加速器的技术开发。这是一个加速器驱动的洁净核能系统。目前,法国、意大利、西班牙等国以及欧洲核子中心正在进行合作研究和关键技术的开发,在系统的概念设计研究、窗材料模拟试验研究、零功率试验研究以及超导加速器技术等方面取得了相当好的进展。打算用 10 年时间,建成一个能量放大器的演示装置,其热功率为 100MW,然后提高到 250MW。

俄国原子能部把 ADS 作为主攻方向之一。理论与实验物理研究所(ITEP)提出了加速器驱动的快热耦合次临界堆的方案,用于核电产生、军用钚的转换和核废物的嬗变。

韩国原子能研究所(KAERI)提出了一个名为 KOMAC(Korea-Multi-purpose Accelerator-Complex)的计划。它要建造一台能量为 1GeV、平均流强为 20mA 的连续束质子直线加速器,用于多种用途,包括

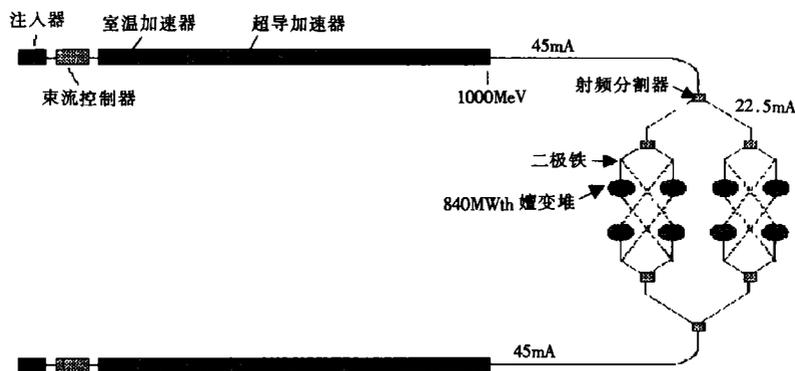


图2 ATW系统示意图

扫描隧道显微镜和原子力显微镜

罗乐 刘东 廖本强

(合肥工业大学理学院 安徽 230009)

在微观领域对物质进行观察和研究中,人们发明了各种显微镜。但是光学显微镜由于受到光的波长的限制而无法达到很高的分辨率,X射线衍射技术则要求观察样品必须是晶体,透射电镜则需要对观察样品进行超薄切片。所有这些要求使人们的观察受到了限制,因此人们开始研制更加先进的显微镜。1982年宾尼格、罗雷尔及其同事们成功地研制出世界上第一台扫描隧道显微镜(STM),导致了显微领域中的一场革命,并在它的基础上研制出一系

核废物嬗变、核电生产、中子与介子物理的基础研究、医学及工业应用。与这个计划相配合,还提出了一个名为HYPER的计划,旨在通过加速器驱动的嬗变技术,解决韩国核能发展的瓶颈问题,即乏燃料的后处理难题。KOMAC计划分为两个阶段。从1997年到2002年,从事20MeV以前的加速器低能段研制,第二阶段包括从20MeV到100MeV的CCDTL和100MeV到1GeV的超导加速器,预计2007年完成。同时,HYPER工程也将建造一台热功率为5MW的小型基准试验装置。然后,再用8年时间,建成一座热功率为15MW的试验装置。

2. 我国开展ADS研究的初步设想

我国的核电发展还处在起步阶段,21世纪有很大的发展空间。这种后发优势给了我们一种机遇,可以有较充裕的选择余地。我国核科学家建议分步研究开发ADS技术。第一阶段是基础研究和系统集成,第二阶段是全尺寸演示装置。在第一阶段中,分两步走。第一步,2000年到2004年,对ADS这一可持续发展核能的新技术路线进行物理与技术的基础研究与开发,完成系统总体概念研究并优选出符合我国国情的裂变核能可持续发展的系统和开展若干重要部件的预研,对该系统所涉及的物理过程进行分解式研究,例如,在脉冲外源驱动的零功率堆上验证中子学行为、开展有关强流束的产生及其在低能注入段中输运特性的研究、对束流引出窗及中子产生靶的热工和辐照性能的模拟试验研究等等,为

列的扫描探针显微镜,如原子力显微镜、磁力显微镜和激光力显微镜等。STM的出现使人类第一次可以实时地观测单个原子在物质表面的排列状态和与表面电子行为有关的物理性质和化学性质。为此,宾尼格和罗雷尔获得了1986年诺贝尔物理奖。

扫描隧道显微镜是根据量子力学中的隧道效应研制出来的,隧道效应是指在金属表面附近的电子密度不会突然变为零,而是形成按指数衰减的电子云分布。STM就是利用隧道效应让金属探针非常

进一步进行总体技术集成研究奠定科学基础。这个基础研究计划已于1999年列入“国家重点基础研究发展规划项目”。第二步,从2005年到2010年,希望建设一台能量为300MeV,平均流强为3到5mA的质子直线加速器,驱动一座热功率小于5MW的池式反应堆,进行技术集成并开展“原理验证”的实验。该加速器还可综合利用,进行靶材实验、中子核物理研究以及同位素生产等。第二阶段的全尺寸系统演示装置将用一台能量为1GeV、平均流强为20mA的强流质子直线加速器驱动次临界反应堆。它的成功建造和稳定运行将为加速器驱动洁净核能系统的商业利用提供示范和基础。

加速器驱动洁净核能系统是裂变能可持续发展的创新技术路线,它是建立在20世纪核科技坚实基础之上的,具有先进性和可行性。发展这一系统所进行的创新性基础研究和技术开发,必将会在21世纪中,有力地推动整个核科技的向前发展。世界各核能强国都十分重视这一系统的研究开发,可以预期在21世纪30年代,ADS核能系统将成为经技术验证了的新一代核能系统,并在其基础上结合基于20世纪中期科学技术基础上的核能系统,从而构建新的核能方案,使核能成为21世纪内一种可持续发展的重要能源。我国在该领域的研究和开发,必将会使核能对我国在21世纪经济快速发展作出应有的贡献。