

# 我国物质结构研究的大型实验平台(续)

## ——原子核科学与技术实验设施

张 闯 组稿

我们现在从基本粒子来到原子核的层次。核物理是一门重要的基础研究领域，核技术在能源等诸多方面有着广泛的应用。为了深入开展核物理的研究，科学家发明了加速器，用高能量的粒子束流作为“炮弹”，打开原子核的奥秘。为了开发蕴藏在原子核内部的巨大能量，科学家发明了反应堆，建成了核能发电站，并研究更安全、更有效的核能装置，造福于人类。

从 20 世纪 30 年代中子的发现起，人们就知道原子核主要是由质子和中子构成的。随着研究的深入，核物理研究的前沿又推进到放射性核束物理、核天体物理、重子物理、超核、超重元素和夸克胶子等离子体等领域。针对这些重大科学目标，国际上建造了一批大型加速器装置，有美国的相对论性重离子对撞机、欧洲大型强子对撞机、德国 GSI 和日本 RIKEN 的重离子加速器等。在我国，有兰州重离子加速器及其冷却储存环和原子能研究院的串列加速器及其升级装置，以及计划中的高流强重离子加速器装置 HIAF 和北京放射性核束装置 BISOL 等。

反应堆利用原子核的裂变和聚变反应产生能量。在裂变反应堆里，核燃料中的原子核在吸收中子后发生裂变，释放出能量，同时产生 2~3 个中子，维持裂变链式反应。核裂变反应堆的类型有：轻水堆、重水堆、气冷堆、熔盐堆和快中子堆等。中国实验快堆是一台能实现核燃料增殖的先进反应堆。科学家还在研究加速器驱动的次临界反应堆系统。在核聚变反应堆中，氘和氚的原子核发生聚变，形成氦原子并产生中子，释放出巨大的能量。科学家正在研究以可控制的方式产生聚变能。包括中国在内的世界各国科学家正通力合作，研制国际热核聚变实验堆（ITER），我国建成了全超导托卡马克实验装置，正在深入开展受控热核反应的研究。



国际热核聚变实验堆



先进超导托卡马克装置



兰州重离子冷却储存环



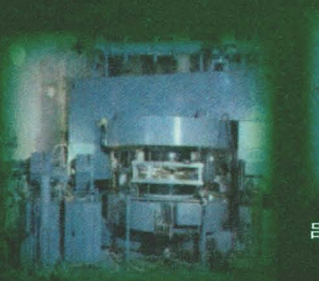
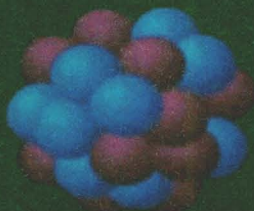
LHC 上的重离子对撞实验



中国实验快堆



我国第一台核反应堆



我国第一台回旋加速器

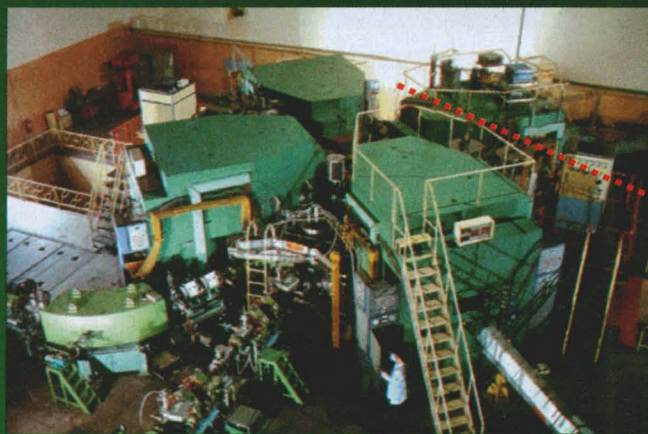


串列加速器升级装置

图片和资料由中科院等离子体所万元熙、李建刚，近代物理所夏佳文和原子能研究院柳卫平、张天爵提供并审阅。

# 兰州重离子加速器及其冷却存储环

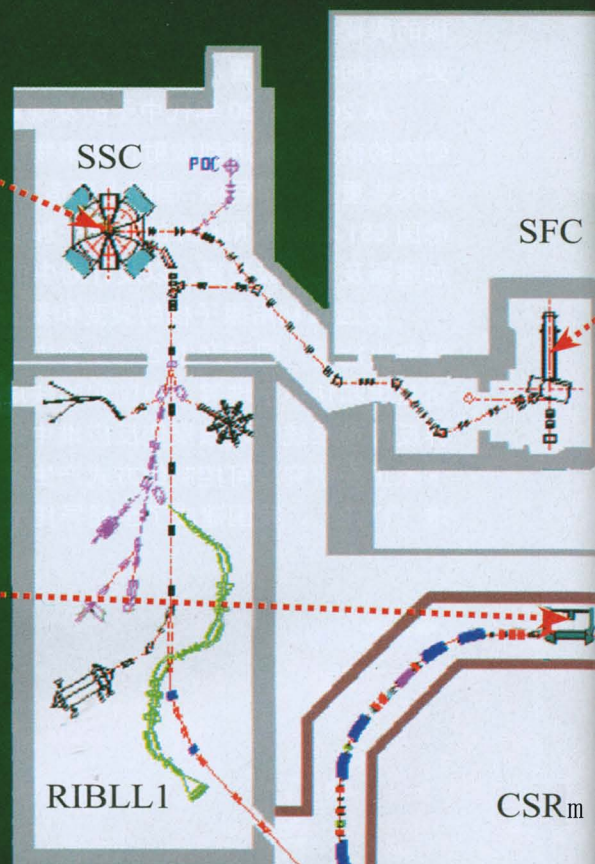
兰州重离子研究装置 (HIRFL) 及其冷却存储环 (HIRFL-CSR) 是我国能量最高的大型重离子研究装置。HIRFL 于 1988 年建成, 使我国在重离子物理及相关前沿领域占据了一席之地。HIRFL-CSR 是国家“九五”投资建设的最大科学工程, 由主环 (CSRm)、实验环 (CSRc)、放射性束分离器 (RIBLL2)、实验探测装置、原有装置改进、建安工程等组成, 是一个集累积、冷却、加速、储存、内靶实验及高分辨核质量测量于一体的多功能实验装置。HIRFL-CSR 为我国在放射性束物理、高温高密度条件下核物质性质和高离化态原子物理等基础研究和天体核物理、重离子辐照损伤和重离子治癌等交叉与应用研究提供了国际先进的平台。



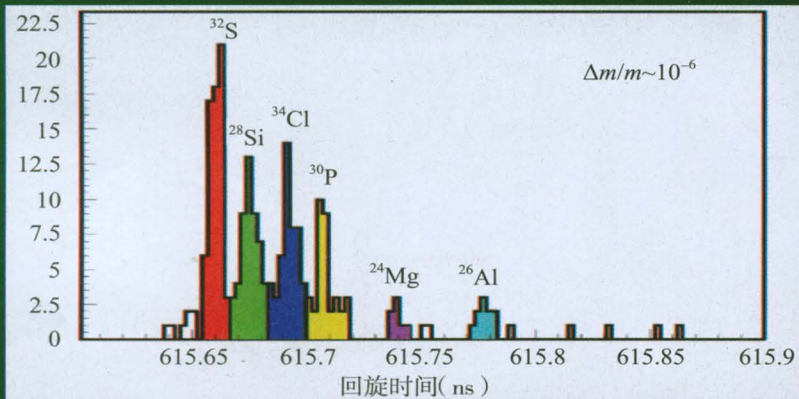
HIRFL 分离扇回旋加速器 SSC  
K=450, 110 MeV (质子)  
100 AMeV (重离子)



电子冷却装置

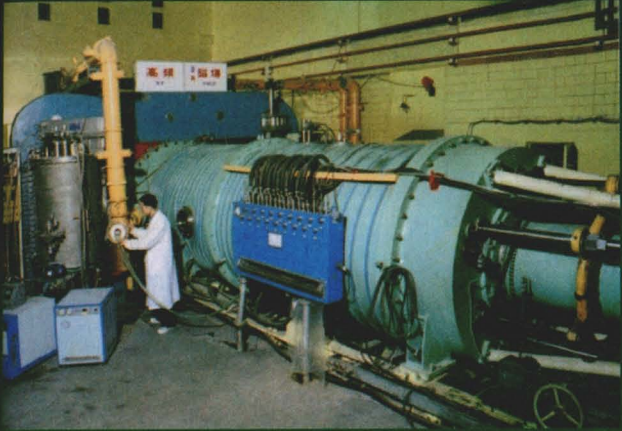


CSRm  
周长 161 m  
12 GeV—C<sup>6+</sup>  
120 GeV—U<sup>72+</sup>



CSRc 上的放射性核束质量的精确测量





HIRFL 扇形聚焦回旋加速器 SFC  
K=69, 17~35 MeV(质子)  
10 AMeV(重离子)



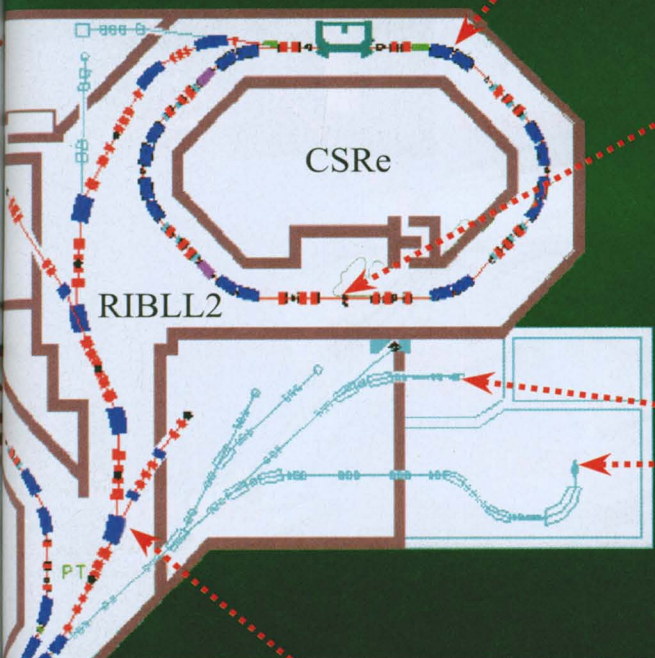
CSRe  
周长 128.8 m, 120 GeV—U<sup>92+</sup>



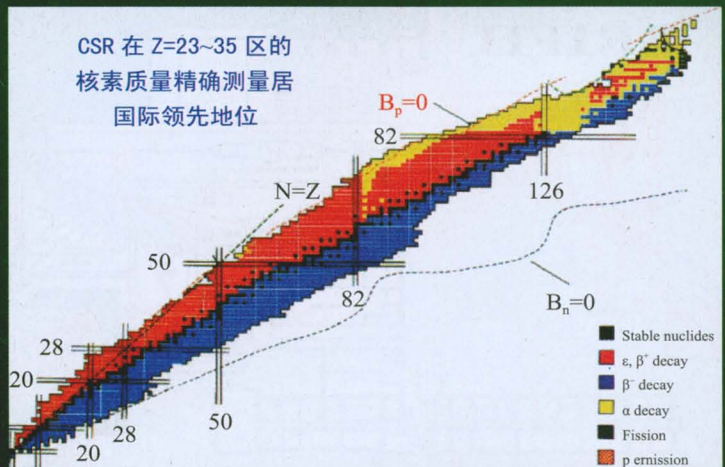
内靶实验装置



重离子肿瘤治疗装置

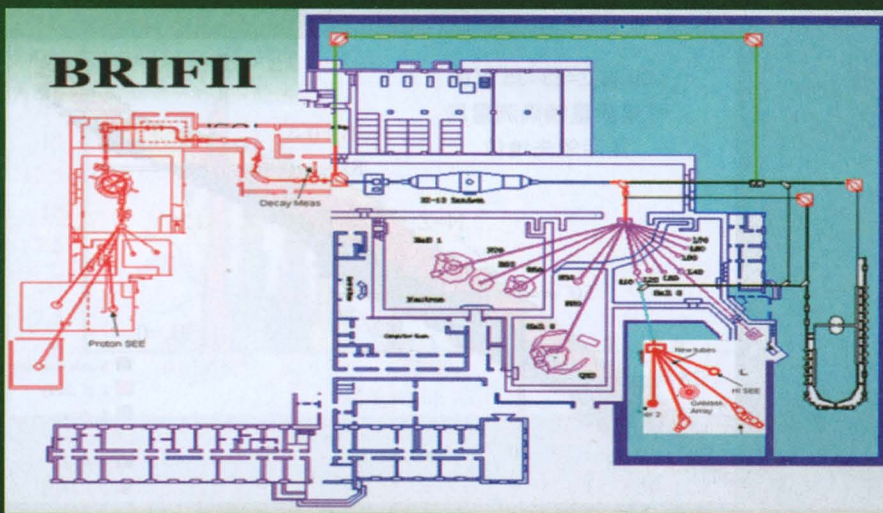
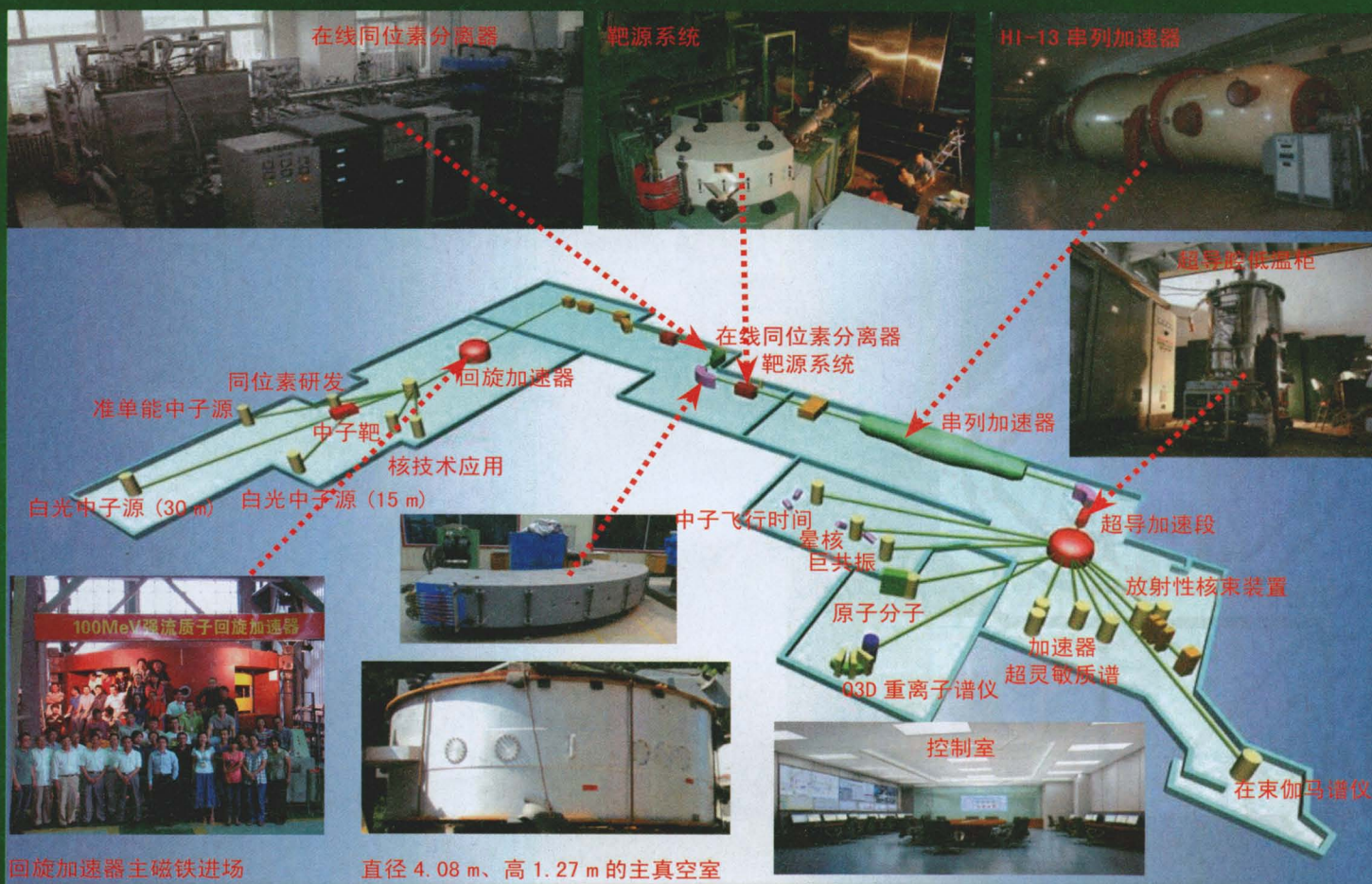


高能次级束流线 RIBLL2

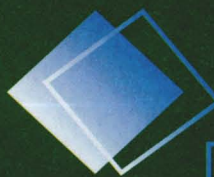


# 串列加速器升级工程

串列加速器升级工程即“北京放射性束装置 (BRIF)”，是对 1987 年投入运行的 HI-13 串列加速器进行升级改造的项目，包括新建一台能量为 100 MeV、流强 200 mA 的紧凑型等时性强流质子回旋加速器，一台质量分辨率为 20000 的在线同位素分离器和在 HI-13 后端新建一台具有 2 MeV/q 加速能力的超导重离子直线增能器，与现有 HI-13 串列加速器组成一套加速器组合装置。回旋加速器的质子束轰击靶源，产生放射性同位素束，经在线同位素分离器后注入串列加速器，可提供强流质子束、一百余种强度为  $10^6 \sim 10^{11}$  粒子/s 的不稳定核素和稳定重离子束。BRIF 计划于 2014 年完成，建成后将达到国际同类装置的先进水平，在空间辐射物理研究、核数据测量、开发新型放射性同位素、核医学研究及推动其他应用等方面发挥重大作用，成为在我国核科学技术领域基础和应用研究的平台。



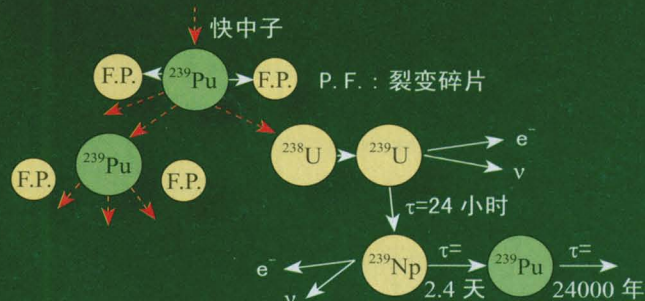
研究正未有穷期。当 BRIF 还在建设时，进一步升级的计划 BRIF-II 业已提出。BRIF-II 包括增建一台能量增益为 17 MeV/q 的超导加速器，一台射频四极加速器和一台漂移管型直线加速器和一套包含大型  $\gamma$  探测器阵列和高精度磁谱仪组成的多用途实验平台。BRIF-II 将为我国核物理基础研究进入国际前沿，在放射性核束物理和不稳定原子核等领域的创新研究提供先进的平台。



# 中国实验快堆

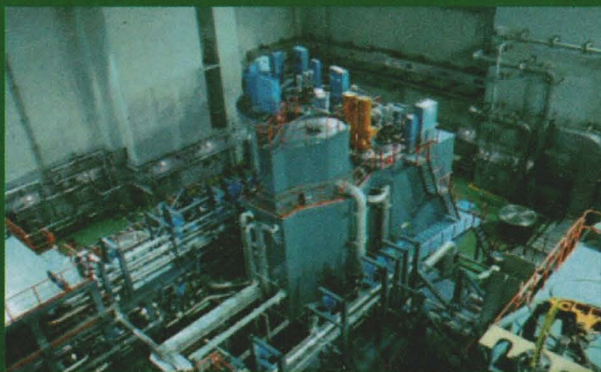
中国实验快堆（CEFR）是国家“863”高技术发展计划中最大的科学工程项目，是我国核能发展“压水堆—快堆—聚变堆”三步走发展战略中的第二步，也是我国快中子增殖反应堆（快堆）发展的第一步。中国实验快堆的建成，使我国成为世界上少数拥有快堆技术的国家之一。

目前世界上运行的核反应堆主要是压水堆。压水堆是一种慢中子堆，在压水堆里，水作为冷却剂和慢中子慢化剂，慢中子主要与核燃料中的铀<sup>235</sup>（<sup>235</sup>U）发生裂变链式反应，释放出能量，而<sup>235</sup>U在天然铀中的丰度仅0.7%左右。快中子堆主要以平均能量80~100 keV的快中子引起裂变链式反应，新产生的易裂变核燃料（如<sup>239</sup>Pu），多于消耗掉的<sup>239</sup>Pu或<sup>238</sup>U，从而使易裂变核燃料得到增殖，因此又称为快中子增殖反应堆。

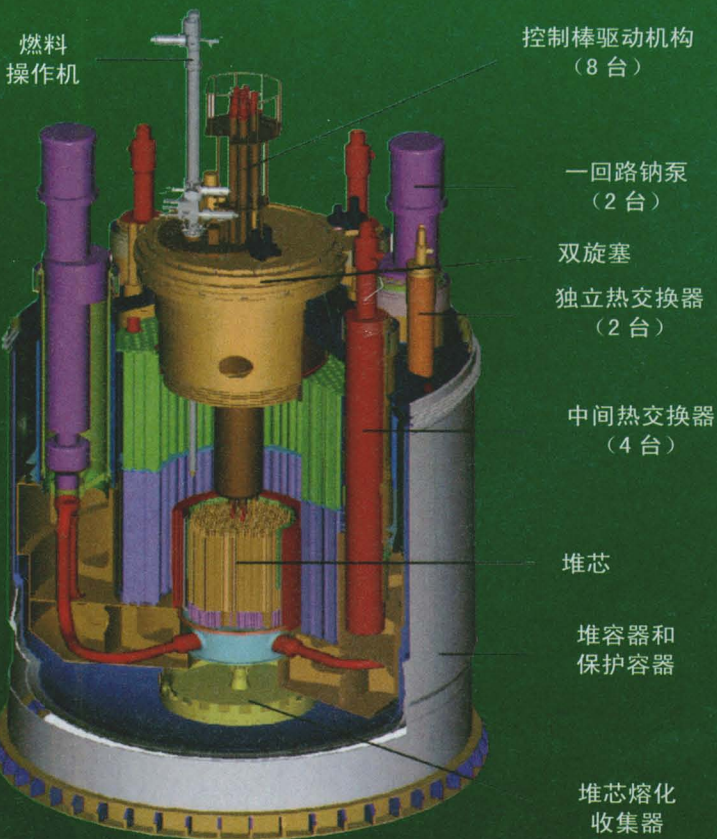


主控制室

在快堆的运行中，实际消耗的是天然铀中不易裂变且丰度占99.2%以上的<sup>238</sup>U，还能嬗变部分长寿命锕系核素。快堆的乏燃料经后处理，所得钚返回堆内再烧，多余的钚则用于装载新的快堆。如此封闭并多次循环，铀资源的利用率可从压水堆的1%左右提高到60%~70%。



建成的快堆主体



中国实验快堆主体结构图

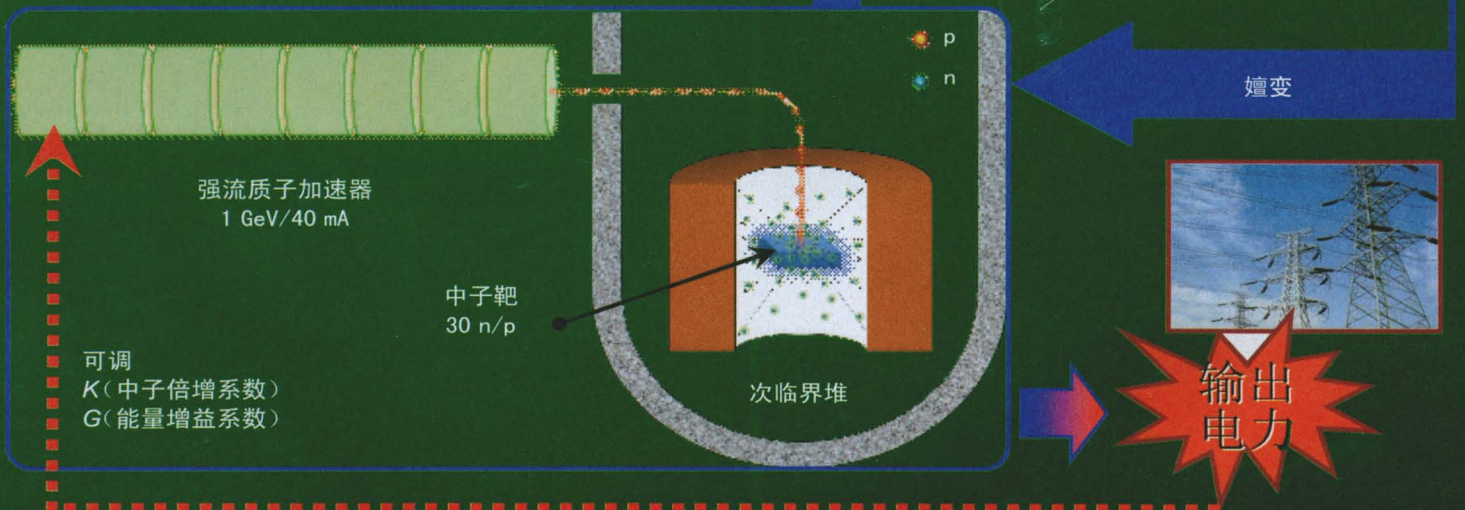
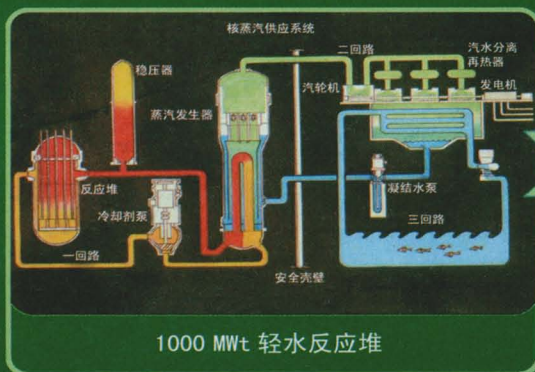
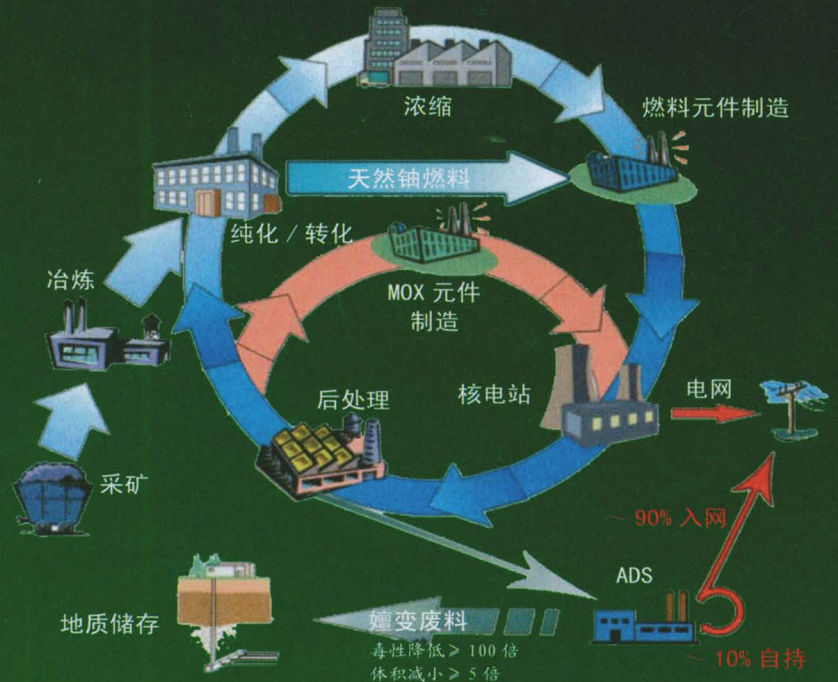


中国实验快堆外景

为了维持快中子，快堆不能采用除气体外带轻核的冷却剂。CEFR采用钠—钠—水（汽）三回路系统，其设计具有固有的安全性。CEFR的热功率为65 MW，设有一台容量为25 MW汽轮发电机组，实验发电功率20 MW，是目前世界上为数不多的具备发电功能的实验快堆。

# 加速器驱动核废物嬗变装置

一座 1000 MW 功率的核电站每年大约要产生 34 kg 的超铀次锕系核素和约 50 kg 的长寿命裂变产物，有的核素的半衰期长达数百万年。目前采用的固化加地下深层埋藏处理方法，不仅费用昂贵，而且会对环境产生长远的影响。利用加速器产生的强流质子轰击反应堆里的重金属靶产生中子，可以驱动处于次临界状态的核反应堆，把次锕系核素和长寿命核废料嬗变为较短半衰期的核素，从而大幅度降低长期放射性、显著减小需永久储存的核废料体积，同时产生能量发电，变废为宝，以闭式循环的方式高效地利用核燃料。

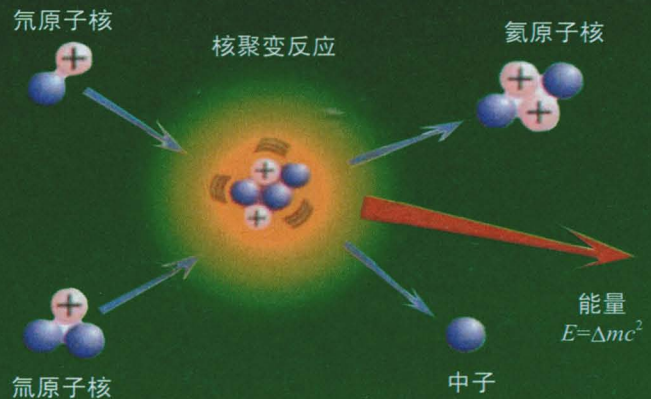


要实现用加速器对核废料的嬗变，尚需突破大量科学技术挑战，包括强流加速器、高功率散裂靶和冷却剂、次临界反应堆和裂变材料的后处理等。目前世界各国都在积极开展 ADS 的研究。在国家的大力支持下，中国科学院启动了战略性先导科技专项：“未来先进核裂变能——ADS 嬗变系统”的研究。相关领域的科研院所正通力合作，计划用大约 20 年的时间，实现从 ADS 预研装置、实验装置到示范装置的跨越式发展。

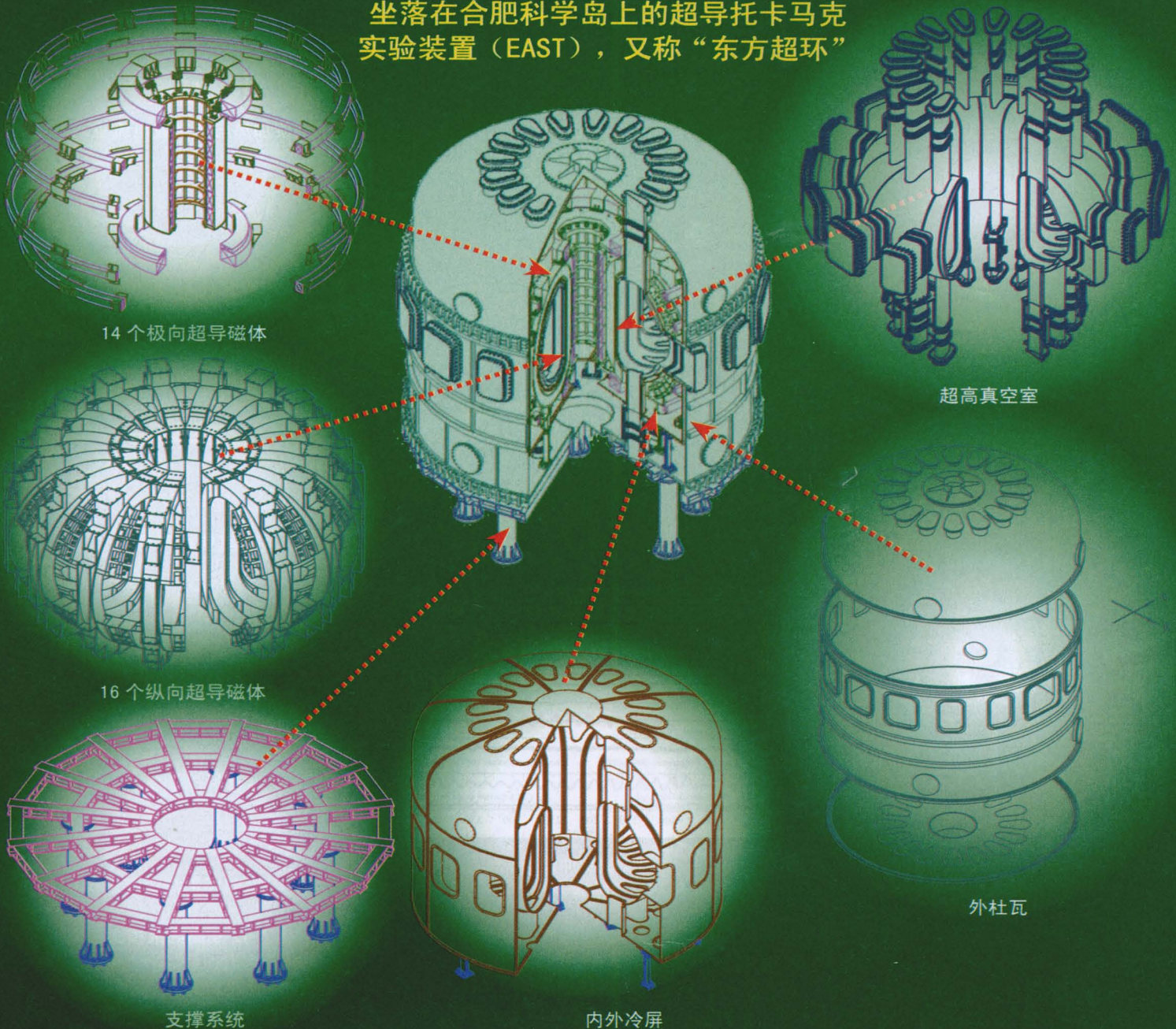
# 超导托卡马克实验装置

大家知道，太阳源源不断地发射出光和热，氢弹爆炸具有极大的威力，盖源于其中的核聚变。在受控热核反应装置中，氢的同位素氘和氚的原子核发生聚变反应产生能量，因此也被形象地称为“人造太阳”。与核裂变能相比，核聚变有两个优点。一是地球上蕴藏的核聚变能远比核裂变能丰富得多。每升海水中就含有 0.03 g 氘，氘也可通过中子同锂作用产生，而 1 L 海水中所含的氘，经过核聚变可提供相当于 300 L 汽油的能量，可以说是取之不竭的能源。另一个优点是，它不会产生污染环境的放射性物质，也不释放引起温室效应的气体，这种反应可以在稀薄的气体中持续地稳定进行，所以它既干净又安全。

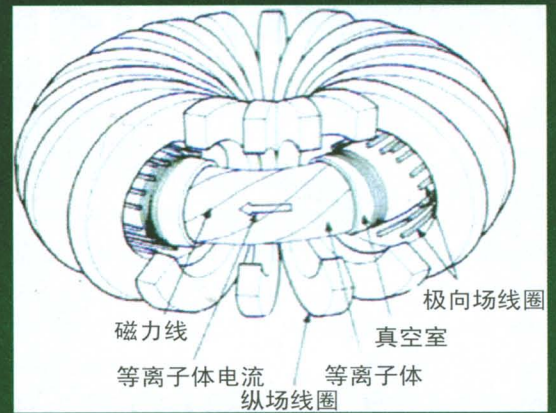
建设受控核聚变反应堆是我国核能发展“三步走”战略中的第三步。



## 坐落在合肥科学岛上的超导托卡马克实验装置 (EAST)，又称“东方超环”



可是，核聚变反应需要几亿度的高温，要实现受控的核聚变，必须克服许多难题。首先，用什么材料可以承受这样高的温度呢？科学家想出了一个巧妙的办法，在一个类似汽车轮胎形状的容器上面，加上强大的磁场，让氘和氦原子中的电子和原子核分离，成为等离子体，原子核在磁场的约束下在环中高速运动，不断碰撞并发生聚合反应。这样，虽然原子核的温度很高，但在磁场的约束下只在环中心运动，离容器壁很远，容器壁的温度就没那么高了。此外，还要让反应堆里的等离子体维持足够长时间的高温和高密度的状态，持续地进行核聚变反应。这种用磁场约束高温等离子体进行核聚变反应的装置就是托卡马克。



EAST 是我国自行设计研制的国际首台全超导的托卡马克装置。它的建成使我国成为世界上少数几个拥有这种类型超导托卡马克装置的国家，我国磁约束核聚变研究从此进入世界前沿。



超导线缆和磁铁研制



控制系统和控制室



离子回旋加热与低杂波电流驱动系统



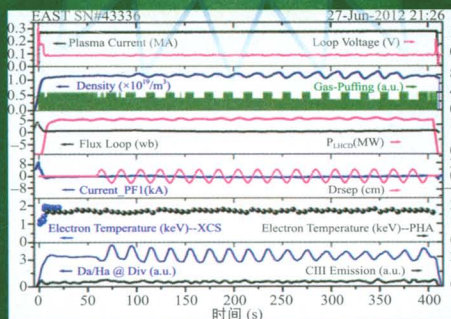
超导磁铁测试



真空抽气系统

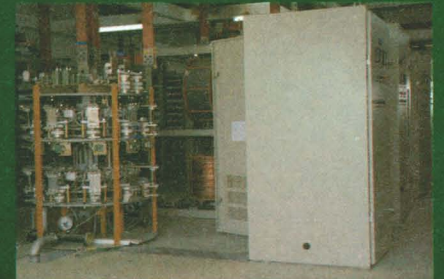


2 kW/4.5 K 低温和制冷系统



实现长脉冲运行

$I_p \sim 0.28$  MA/411 s,  $n_e \sim 1.5$ ,  $T_e \sim 1.8$  keV



极向场电源变流系统

EAST 建成后，先后有 40 个国际合作小组、数百位国内外科学家在其上开展实验研究，五年来取得了 12 s 高约束模式、偏滤器精密控制、安全运行、长脉冲运行等十多项国际先进的成果，等离子体流强达到设计目标 1 MA、约束时间达 100 s（目标 1000 s）和温度达 4000 万摄氏度（目标 1 亿摄氏度），并与国际上各聚变实验室建立合作，有望在 3 ~ 5 年内实现其科学目标。EAST 将引领长脉冲等离子体研究，为我国建设热核聚变堆奠定坚实的基础，为 ITER 的设计与研制提供实验依据，为人类最终解决能源问题做出贡献。