

钷燃料：清洁核电技术的突破

文_陈贺能

陈贺能 高级工程师，曾在中科院物理所、科学仪器厂从事研究工作，并作为访问学者到荷兰，研究带电粒子在电场和磁场里的运动规律。回国后，在中国科学院新技术开发局工作，后被派往香港工作10多年。现为中科院老科学家科普报告团成员。



为解决人类未来的能源需求，人类研究应用铀和钚的核电技术已经有60年了。据世界核能协会统计，迄今为止已经有440座核电站分布在世界30多个国家，为人类提供了巨大的能源。不幸，因为出现过几次非常严重的核灾难，特别是2011年3月在日本福岛发生的核灾难，使人们对核电的利与弊产生了巨大的争议，一方相信利用核能来发电是解决全球气候变暖问题的最有效途径，另一方则坚持认为核能是“脏能源”、“非常危险”、“不经济”和“没必要”，德国等一些国家甚至宣布将在不久的未来放弃使用核能。虽然绝大多数国家目前不会采取类似措施，但问题是，化石能源总会耗尽，风力发电和太阳能发电都不够稳定，靠潮汐、洋流、波浪发电，边远地区又怎么办？人类以后的能源问题该怎么解决？

事实上，虽然核电相对于煤电有其释放的能量巨大、不排放温室气体等不可替代的优点，但是一些人依然担心核电的安全性，担心核灾难会像25年前的切尔诺贝利、2011年的日本福岛那样在毫无准备的情况下突然再次降临，再次受到看不见的核辐射蔓延多年的威胁，这种担心是可以理解的。而且现今正在运行的核电系统所产的核废物处置困难很大。欧洲地区利用核能发电已经几十年，现有195座核电站，其所产的核垃圾数量可想而知，都跑到哪里去了呢？除了运往法国交由一间专业公司处置之外，德、俄还合作投入3亿欧元合建核废物处理设施和储存场地，成本确实高昂。由于核废物存在强烈的放射性，有的半衰期长达千年甚至几十万年，人类至今未能找到既容易又便宜的方法让它“变废为宝”，不得不将其认定为“垃圾”而深埋于山沟或地下的稳定岩层中，究其实质，就是将这些难于处置的核垃圾留给人类的子孙后代。更有甚者，一些国家核废物的处理不被有效监管，导致核废物流失，后果也十分可怕。

鉴于上述问题，科学家开始把利用核能的研究重点放在待开发的第四代核电技术上面，要研发具有更好的经济性、更少的核废物产量、更高的安全性、更强的防核扩散能力的新一代核电技术。翻开核能利用的研究发展史，我们注意到，早在20世纪50—60年代，科学家就研究过一种名叫“钷”的重金属长寿命放射性元素（半衰期为地球年龄的3倍），它作为核燃料应用有很多独特优点，如果拿它来发电，它既安全又绿色，是

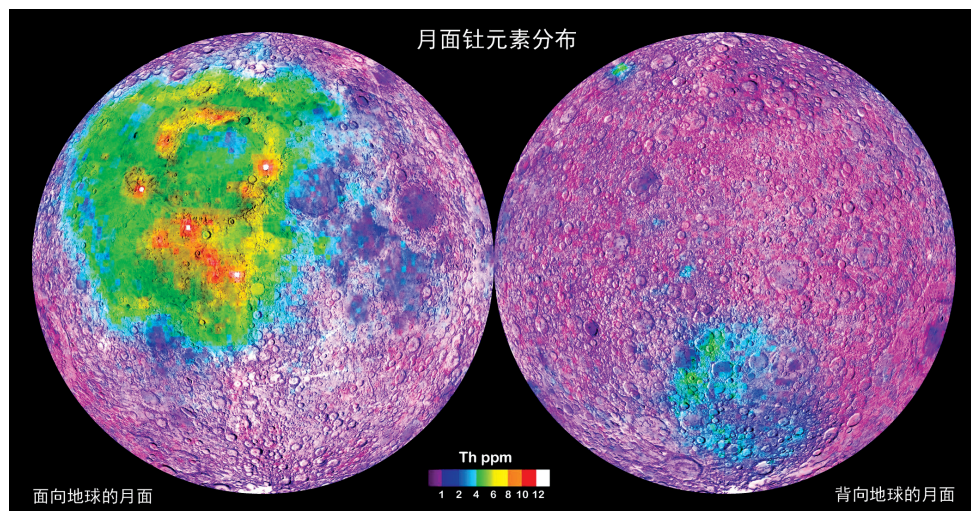
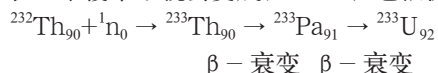


图1 月球表面钍元素含量分布

铀和钍的理想替代品。在核电安全问题引起广泛关注的今天，我们来重新认识钍元素作为核燃料的应用开发，显得尤为必要。

原来，虽然重金属元素钍本身不是裂变物质，但研究发现一个普通的钍-232原子核吸收一个慢中子就会变成钍-233，它很快就经历2次 β -衰变，变成铀-233：



而铀-233则是一种易裂变物质。这个物理现象足以引起科学家对钍的极大兴趣。因为，这就能决定它也可以用作次级核燃料为人类提供清洁能源。

第一，地壳表面存在的钍就是钍-232，几乎不含钍的其他同位素，这一特点使它在核反应堆中使用十分方便。现在常规的铀基核电站里，为了产生持续的链式反应，核燃料棒中铀-235的浓度起码要达到3%左右。但是天然铀元素中的铀-235只有0.7%，必须浓缩，成本高昂又非常费事。但如果用钍做核燃料，就不必“浓缩”这么麻烦了。

第二，从资源的角度考虑，钍的储量比铀丰富得多而且易于开采，这也很重要！根据世界核能协会的统计，2011年全年，全世界的核动力反应堆用铀量就达68971吨（相当于要从沥青矿中提取81338吨八氧化三铀）。而目前全球还有61个在建、154个计划建设的核电站，按照这种发展速度，铀资源只够人类用五六十年。除非现在开始投资另外建设一种“增殖反应堆”（也称“快中子堆”），让占天然铀99.3%的不可裂变的铀-238变成可裂变物质钚-239，那才能延长天然铀的使用年限。但快堆的技术难度在很多方面都比技术成熟的压水堆大多了，经济性也有待验证。虽然一些国家包括我国都已成功建起实验型快堆，但要建成商业化运行的快堆核电站还需假以时日。幸运的是，钍的估计储量是铀储量的4倍。再加上从研究得知，与铀基反应堆比较，钍基反应堆运转更高效，产生的放射性废物也少得多，这无疑为人类延续上千年地利用核裂变能奠定了坚实的物质基础。即使地球上的钍资源用尽了，未来的人类还可以向月球（见图1）和火星索取。

第三，只要用慢中子撞击钍-232，使之变成易裂变的铀-233并设法让它不断增殖，就能使钍-232作为次级核燃料而被广泛利用。下面就介绍国际上正在研究的几种方法。

❶ 钍铀混合实现燃料增殖

现在的问题是：怎样才能使未来的钍基反应堆中的钍-232持续不断地转变为

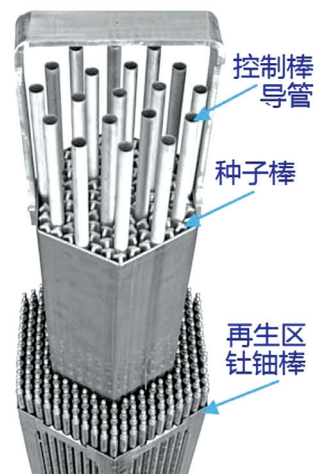


图2 Lightbridge公司设计的钍基（种子+再生区）燃料组件

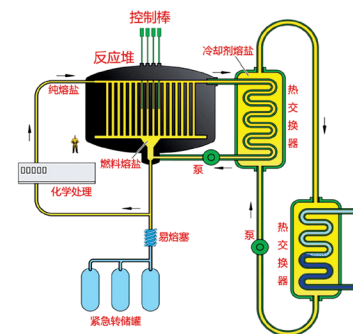


图3 钍基熔盐反应堆的一种方案 [俄国BN800]

铀-233。根据上面的反应式，显然，关键是要提供足够强的中子源来辐照钍-232。全世界正在运行的核电站的钍基反应堆其实就是强大的中子源。如果将钍嵌入低浓缩铀的核反应堆中，只要设计得当，就可以改造成钍铀混合的核反应堆，高的中子通量不但够维持链式反应的需要，而且还有足够多的中子让更多钍-232原子核变成铀-233，实现可裂变物质在堆内的不断增殖；或者，将这种反应堆设计成让新生成的铀-233一起就地参与链式反应而被利用。国际上有一种主张认为，改造现在已经成熟运行的，总比重新设计新的要得心应手得多，况且也较为节省。印度科学家就有这样的设计。还有一家名为 Lightbridge 的公司，它的设计是：在堆芯位置放入一些浓缩铀棒作为产生链式反应的“种子棒”，外围则是由氧化铀和氧化钍混合原料制成的棒所包围（见图2）。这样，链式反应持续进行的同时，实现了利用钍使燃料增殖并同时就地参与链式反应，使反应堆的输出功率提高了三分之一。

➤ 钍基熔盐增殖堆

另外一种设计称之为熔盐增殖反应堆。上溯到20世纪50年代至60年代末，美国橡树岭国家实验室的科学家曾率先开拓研究利用液态氟化钍为主要燃料的钍基熔盐核反应堆，做了很多非常重要的工作，这个实验性反应堆从1964年到1969年还成功运行了5年之久。今天，一些国家特别是俄、印两国科研机构又加强了对它的研究与开发。2011年初，我国中科院宣布计划用20年左右时间自主研发钍基熔盐堆核能系统，引起了世界的广泛注意。

这里说的是为了提高热效率而运行在高达700度高温下的、没有燃料棒的钍基核反应堆的其中一种设计（见图3）。钍基燃料（例如液态氟化钍和氟化铀燃料的混合物）是用来制造并增殖可裂变物质铀-233的，它被混合在主回路的氟化盐冷却剂中，成为一种熔融状态的混合盐类物质。这种含有核燃料的冷却剂运行时只在途经优化设计的堆芯处达到临界。它的好处是不需设计燃料棒及其机械安装部件，不但可以简化堆芯结构，而且燃料的核反应均匀分布，还可以在运行的同时进行核燃料的后处理。

常规的沸水堆型、压水堆型核电站里，主回路的冷却剂是水，为了提高核电站的热效率，就要让水在好几百度高温而又不沸腾的工作状况下带走链式反应热，这只有在增大主回路压力的条件下才能实现。这样一来，主回路在高压下运行就有潜在的爆炸危险。现在设计的钍基熔盐堆采用的熔盐本来就是在高温下才融化而成流动状态的，所以主回路就不必增压了，在大气压状态下就可以运行，于是这种堆对主回路里的泵和管道的机械性能要求低多了，运行安全自然就有了保障。

为了将主回路的放射性物质分割开的同时能将链式反

应产生的热量带出去，这种反应堆设计了第二回路。因为是高温，所以仍然使用同一种熔融冷却剂，将热量带给发电用的第三回路（外回路）的热交换器中（见图3）。

为了保障安全运行，堆芯下方还设计了一个“易熔塞”。反应堆过热时，这个小塞子会熔化，熔盐就排入一个容器。此时裂变物质离开了堆芯，核反应就不会达到临界，链式反应就自动停止了，非常安全。

当然还有很多问题需要研究。例如，要在大功率状态下发电运行，所有用于主回路的零部件连同制造它们的材料在承受高温的同时是否耐腐蚀、耐辐照的问题就显得非常重要。但可以预料，随着技术的不断进步，一个清洁、安全、造价便宜的钍基能源系统将会出现。

➤ 加速器驱动的次临界系统（ADS）

从堆外制造出中子流然后注入钍基反应堆，也是启动钍堆核反应的一种办法。使用一台较高能量的带电粒子回旋加速器，将带电粒子（质子）加速到足够高的能量，让它轰击一块铅靶，便会释放出中子，这些中子被注入钍堆，撞击堆芯的钍核，就诞生铀-233从而开始裂变的链式反应，这就是正在设计的ADS系统。它的堆芯已经不再需要铀-235或钚-239的参与，核能的生产更加清洁安全了！

在一般的回旋加速器里，带电粒子在设定的磁场内运转，它有特定的旋转半径。能量越高的带电粒子要求特别强的磁场才能确保其回旋半径不要很大，以便压缩设备的体积。但问题是，受关键部件磁铁的材料性能所限，磁场强度的提高是有限的。这意味着高能量的带电粒子运动必然有很大的回旋半径，建造这样的庞然大物就不实际了。所以这种加速器驱动的方法要行得通，必然要求加速器有较高性能。而目前能满足这种要求的，只有一种称为“固定磁场交变梯度”（FFAG）聚焦的同步回旋加速器，它的技术特点正是能使被加速粒子的回旋半径大大缩小，从而使投资建造成为可能。

这种方法还有一个优点，就是堆芯熔毁的事故绝对不会发生。常见的核反应堆是临界系数大于1的系统。需要靠监控系统时刻监控并自动调节。但问题是一旦失控就出严重事故。前苏联乌克兰切尔诺贝利核电站的事故，就是因为一个反应堆在很低功率状态下运行不稳定，超临界失控爆炸，才导致严重的核灾难。现在的“加速器驱动次临界系统”（ADS）则不同，它在没有引入外界中子时是一个次临界系统，不可能有自持的链式反应。只有将加速器启动，有了强大质子流才能制造中子并向钍堆注入。当切断质子束那一刻，钍堆内立即没有足够中子，就不能产生足够的裂变物质，临界状态无法维持，于是链式反应迅即自动停止。所以，这种驱动方法反而是更加安全的。

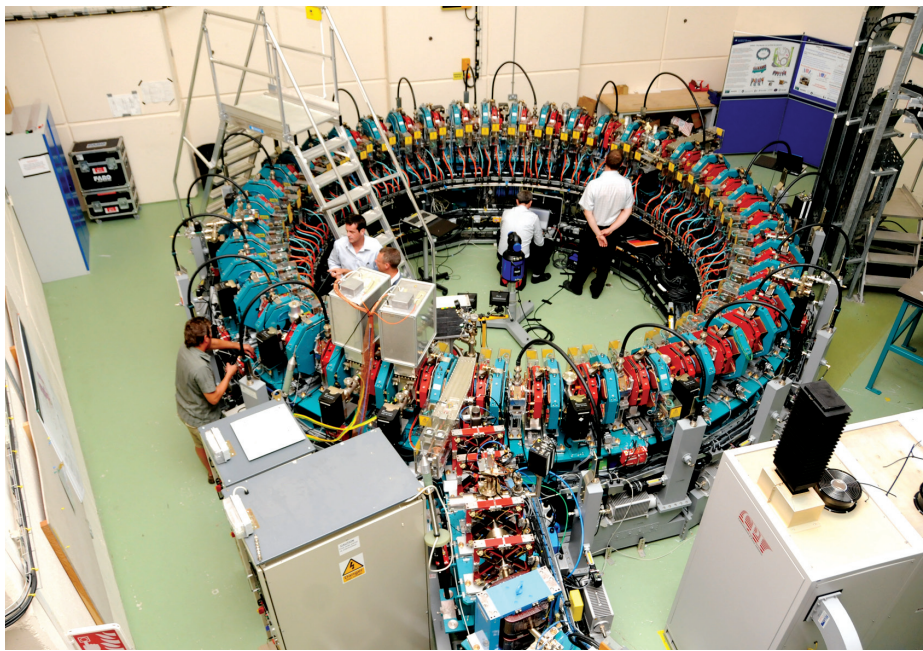


图4 英国 Daresbury 实验室的 EMMA 加速器

顺便说，英国科学家准备用他们的 EMMA 电子束加速器来制造中子流。这部加速器就是 FFAG 型加速器（能产生 20MeV 的激励用电子束流，外观直径大约 10 米（见图 4）。希望不久的将来人们能看见预期的结果。

以上介绍的几种钍基核电系统的一个共同特点是，钍基系统不会发生超临界失控爆炸事故，比铀基系统安全多了。研究还发现，钍基系统运行所产生的核废料数量上只有现行的铀堆的极少部分，有毒的放射性废料大大减少了。这些核废料中只有一种是半衰期为 78 年的，只占全部核废料的不到 1%，只需存放 300 年，其后的毒性已经很低，并不像用铀的反应堆那样，有的核废料的放射性长达万年以上。这是十分理想的！还有，钍基系统运转时没有任何产物适合用来制造核武器，防止了核武器制造和扩散的可能性。

人们自然会问：既然钍的核能应用与开发相对于铀基核反应堆有这么多优势，那为什么目前没有更多地得到利用呢？回顾一下历史就清楚了。核能利用的发展之初，选择发展铀基反应堆还是钍基反应堆，曾经有过决策。当时的大环境是以美苏为首的两大阵营的对立与冷战，政治家们认为首要任务是加强核军备、拥有核武器。而发展铀基反应堆可以实现核能发电的同时获得制造核武器的原料钚-239，一次性投资即可一举两得。所以大环境决定了研究钍堆的科学家没有搞铀堆的科学家那么好的运气，无法从政府获得足够的财政支持，只好被迫关停相关的实验研究。几十年之后的今天，化石燃料枯竭、

能源危机的问题日益凸现。回顾已成大势的铀基核电系统，其安全问题再次受到质疑，再加上铀资源的短缺将难以应付未来能源发展的需要。在这个时候，人们又开始想到钍燃料，它的利用前景重新展现在人们面前。一些国家包括我国都不失时机地提出并开始研发利用钍的核能发电技术，所以我们才能看见本文所介绍的这些利用钍能发电的新方法。

有人曾经对钍基熔盐核反应堆运行时输出的能量做过估算。如果向其加入 6 千克金属钍，它全部参与核反应所产生的能量相当于燃烧 25000 吨烟煤或 66000 吨褐煤，相当于 300 千克浓度为 3% 的浓缩铀在压水堆中释放的能量。我国是个铀矿资源匮乏的国家，其探明储量仅为 10 万吨左右，但钍资源储量却

很丰富，只是由于它常与稀土矿伴生，常被当成尾矿而被抛弃，造成惊人的资源浪费。被随处堆弃的钍资源，还因其带放射性而给当地环境和水资源带来严重污染。所以我们要尽快开发利用这一具有战略价值的、宝贵的能源资源。虽然眼下利用钍能发电还只是起步阶段，未来还有很多挑战，但在新技术层出不穷的今天，利用钍能发电的研究和最终实现商业化运行的前景是十分光明的。我们期待着在未来的不长时期内，我国将最终掌握这一系统所有核心技术并实现产业化，实现核燃料长期稳定供应、核废物最小化、有更好的安全性和经济性，为未来人类提供长期可靠的能源保障作出应有的贡献。

延伸阅读：先进的 FFAG 加速器

这是一种“固定磁场交变梯度”的回旋加速器。它的工作原理在 1953 年就提出了。自从第一个电子模型实验之后，几十年来没有什么大进展，直到 10 年前日本 KEK 高能物理研究所为了研究高强度质子流的加速，成功研制了一个小的原理验证装置，被加速的质子束流能量从 50keV 加速到 500keV。此后，技术不断进步，已经出现 150MeV，直至 2500MeV、回转半径 38 米的 FFAG 加速器。这种加速器的特点是被加速的带电粒子的回旋半径小得多，从而使加速器的商业化应用成为可能。英国 EMMA 电子束加速器也是 FFAG 加速器，用于癌症治疗，现在准备用于研究钍基核能发电。■