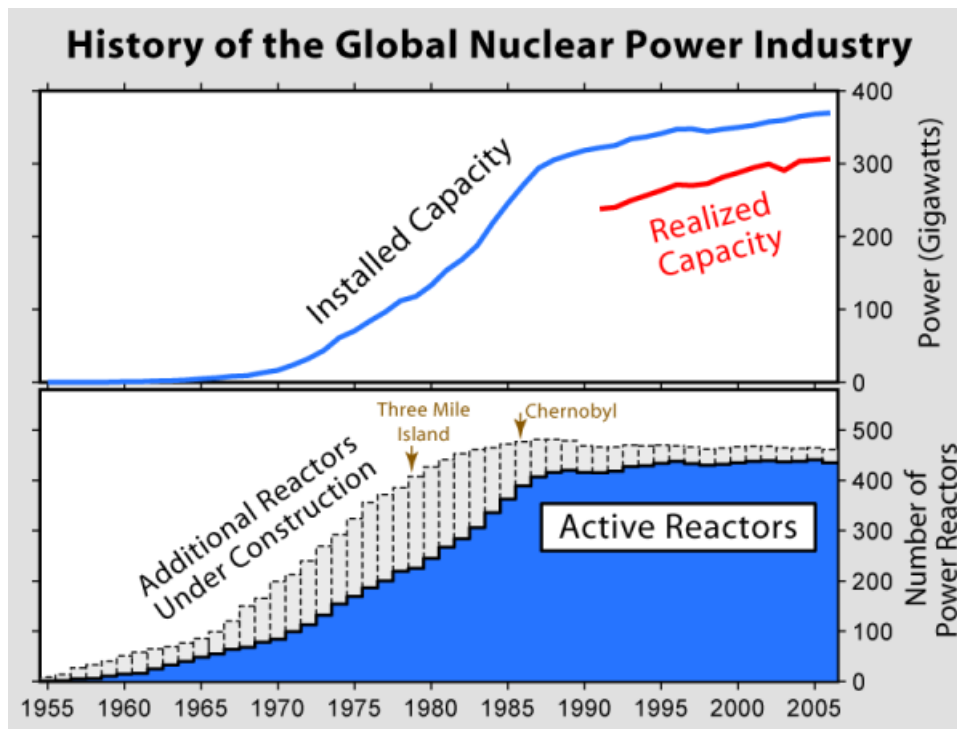


【工业】【能源】高温气冷堆

2015-05-07 20:58:00

原文网址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/108908728>



50、60和70年代是核能发电的黄金时代，在欧美日等先进工业国家有几百座第一代和第二代的核电厂建成上线。1979年的Three Mile Island Accident（三哩岛事件）和1986年的Chernobyl Accident（车诺比事件）是极重要的转折点，此后20年核电工业的增长基本停顿，少数新建成的反应炉只够替代退役的反应炉；所以总数量停滞在400多座，一直到近十年才因中共的能源政策而重新进入成长期。

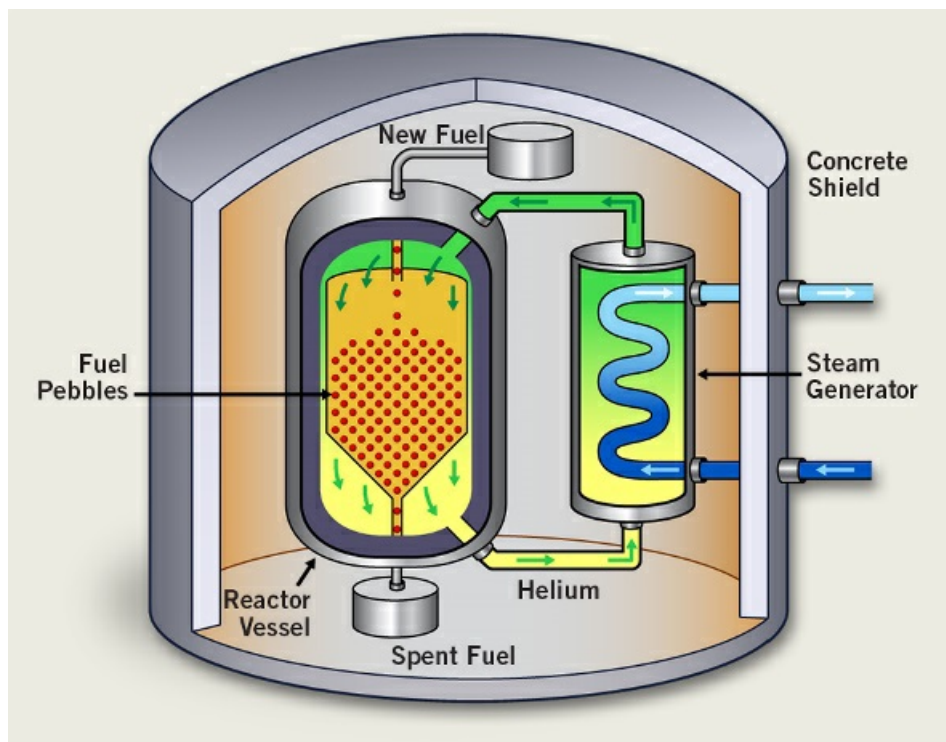
我在前文《核动力在军用与民用之间的差别》曾讲过一些核电反应炉的设计和歷史，如果读者不太熟悉这方面的题材，请先复习那篇文章。我在那里也提到了高温气冷堆（Pebble Bed Reactor），今天主要对它做个简单的介绍。

首先澄清一下核能发电的代别：最早的设计，不论是压水式（主环路靠高压使水完全不能沸腾）还是沸水式（主环路容许水的气态），都没有对安全备分做足够的考虑，所以后来改进之后，就分别称为第一代（如Chernobyl）和第二代（如日本的福岛，所有美国目前在运行的核电厂和台湾的核一、核二、核三）。压水式和沸水式反应炉最大的危险在于若是冷却水主环路失灵，那么即使中子吸收棒被放到“全关”的位置，之前裂变產生的放射性元素仍然会继续裂变而產生过多的热量，最终会把整个炉心熔化掉（Reactor Core Meltdown），极高温的放射性金属熔浆有可能会烧穿反应炉的水泥地基而渗入地下水层，将大量危险的放射性同位素（一般是像碘131这种短半衰期的裂变產品放射性危害最强，而碘进入人体之后会聚积在甲状腺，所以上次福岛核灾后有谣言叫灾民多吃碘）释放到外界，因此这两类反应炉的安全设备主要专注在保障冷却水主环路持续流通。第二代的核电厂普遍使用柴油发电机在停机时驱动主泵，确保冷却水的循环。后来三哩岛事件使设计厂商开始认真检讨所有可能出毛病的环节，就有人提出柴油发电机并不是100%的

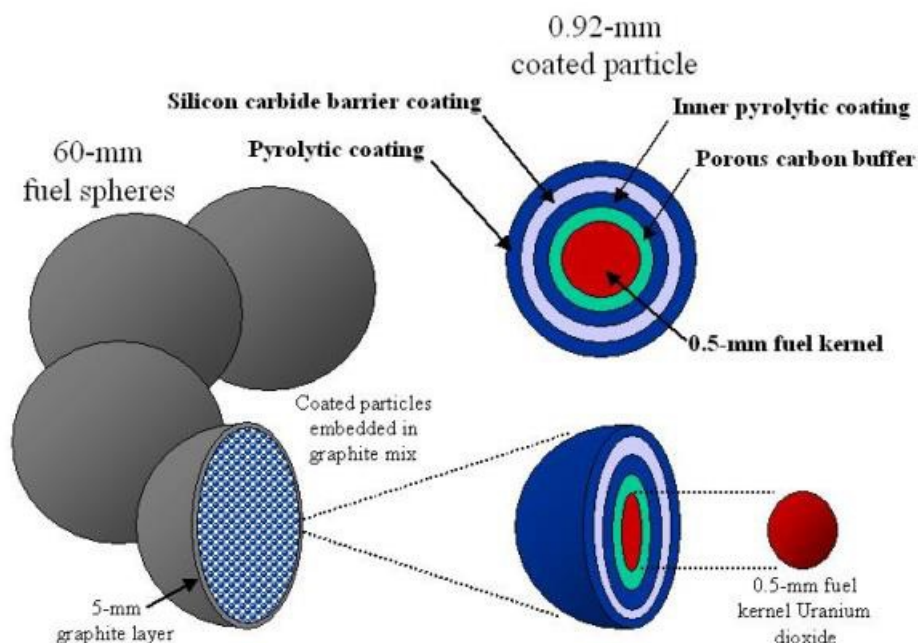
可靠（例如福岛在海啸之后，自然是反应炉和柴油机一起泡汤），于是在1980年代西屋、GE和法国的Areva都开始研究完全不需电力供应的冷却方法，这就是第三代反应炉。不过要在没有电力供应的条件下保持无限期的冷却水循环违反了能量守恒定律，所以先天上就是不可能的。工程上的解决办法只能把一个大水池建在屋顶，利用重力来推动循环，那么当这池水用完以后，反应炉仍然会熔毁。目前的设计一般是保障七天左右，在这段时间内，维修人员必须重启电力供应。这在天灾情况下应该是做得到的，在战争人祸的情形下就很难说了。

至于所谓的第四代反应炉，则是对所有把压水/沸水式完全推倒重来的设计的通称，包括了好几种截然不同的构想。但是由于传统的压水/沸水式在工程投入上有70年的领先，所以这些新设计必须有根本性的优势，否则不可能有人愿意投资几百亿美元来做开发。目前只有两种设计满足这样的要求，分别是高温气冷堆和快滋生反应堆（Fast Breeder）：前者专注在安全性，保证绝不熔堆，而后者则可以用来做元素嬗变（Elemental Transmutation），最主要是将铀238变成钚239。从商业观点上来看，只有前者有真正实用上的价值；快滋生反应堆生产的钚刚好是核子武器的最佳原料，只有军方和日本政府（日本自中曾根康弘首相之后便开始积极囤积钚239，所用的藉口是把钚和铀混合成MOX核能燃料；正因为有这个偷偷摸摸的任务，日本的核能监管单位对电力公司不能做严格的审查，最后间接导致福岛核灾）才会有兴趣冒经济和安全上的风险。

高温气冷堆最早是1943年美国的Farrington Daniels在Oak Ridge实验室所做的一个实验，不过一直到1960年才在西德由Rudolf Schulten主持，开始实际的工程设计与建设。Schulten的反应炉叫做Arbeitsgemeinschaft Versuchsreaktor（Joint Experimental Reactor，联合实验反应堆），简称AVR，1967年建成并网发电，电功率为15MW。1986年车诺比事件后，西德对核电开始有疑虑，AVR也受到严格的监督。1988年发生了一个小事故（燃料球卡在出口），在处理的过程中释放了很少量的放射性尘埃（燃料球的外壳不够强，以致破裂），但是当时的民情已经不容许任何放射性灾害，于是AVR被关闭，德国政府花了26年来清理现场并检讨整个经验，到2014年才大功告成，发布了报告。Schulten原本已经准备开建下一代的高温气冷堆，叫做HTR-MODUL，其改进的重点是针对AVR的几次事故（70年代的事故被遮掩到2000年代才发现）重新设计反应室出口和燃料球；新燃料球在1988年正要开始试产，结果全部生产线必须作废。但是中共有极佳的先见之明，在1970年代末就已经从清华派了学者和学生去参加Schulten的团队，团队被解散之后，他们说服中共当局，以极低的价格买下了智慧产权的执照和图纸（南非也买了执照和图纸，但是没有什么大进展，2010年正式放弃），并且把燃料球生产线带回清华。1995年中国版的HTR-MODUL（改称HTR-10）在清华校园开建，2000年建成并网，电功率为10MW。2005年商业版的示范堆在山东石岛湾开建，预定2017年完成，双机并联，总电功率为200MW（参见前文《中共国营企业的改革》）。



HTR-10的示意图，可以看出高温气冷堆的结构极其简单，基本上就是一个大沙漏里装了几十万个燃料球，既没有中子减速剂，也没有中子吸收棒，完全无须在炉心使用机械装置。这是因为所有的功能都集中到燃料球本身，停机靠的是物理性质而不是工程手段。冷却环路用的是氦，因为氦的腐蚀性和放射吸收性都是零。既然氦不会吸收放射性，理论上就可以用主环路直接驱动涡轮，从而获得更高的热效率。但是在摄氏950度用氦推动的涡轮此前没有现成的应用，必须从头开发，而中方的涡轮技术并不太强，所以清华团队很明智地选择了使用第二环路来推动蒸汽涡轮的方案，这也避免了燃料球破裂后，放射性尘埃污染涡轮的危险。如此一来，高温气冷堆的真正技术难关就完全集中到燃料球本身。



燃料球是Schulten的发明，不同的高温气冷堆视设计功率需求决定放多少个燃料球；一般是几十万个。每个燃料球直径为60mm（比网球略小一点），最外层是5mm厚的强化石墨；中心的燃料直径50mm，由八千个燃料粒和石墨混合而成。石墨是很好的中子减速剂和热导体，并且可以耐热到摄氏2800度；而高温气冷堆受核子物理的天然限制，炉心温度不可能超过摄氏1600度，一

般工作温度在摄氏950度左右。燃料粒直径为0.92mm，由四个保护层包裹直径0.5mm的二氧化铀燃料而成。石墨和氦都不会吸收放射性，所以燃料球用完后，本身就是围阻体，可以简单装箱掩埋，无需另外的机械或化学处理；不过废料总体积会增加。

高温气冷堆的功率控制和绝不熔堆的保证，来自一个很特别的核子物理性质：裂变產生的快中子（Fast Neutron）和石墨原子核碰撞之后，损失动能，成为慢中子（Thermal Neutron）；而其他铀235原子核吸收慢中子（这就是所谓的连锁反应，Chain Reaction；铀238原子核刚好相反，喜欢吸收快中子而不管慢中子；高温气冷堆的石墨减速剂比压水/沸水式用的轻水有效，所以铀235不须被浓缩到同样的5%浓度，甚至只有0.7%是铀235的天然铀在理论上都可以用）而引发新的裂变的截面积（亦即机率）随温度增高而减小，在摄氏1000度以上减小得很快。所以要停机，只须要把主环路的氦气风扇关掉，让炉心温度逐步升高到摄氏1600度，连锁反应就基本停止了。这时铀即使熔化，因为它被包在燃料粒里，也不会泄露。既然关掉主环路里的氦气循环是正常运作的一部分，那么在天灾或故障时失去电力供应，也就没什么大不了的。

高温气冷堆之所以至今没有普及，主要是经济上的问题。它虽然结构很简单，但是在工程设计上远不如压水/沸水式成熟，所以第一代的发电站仍然故障不断，没有经济效益。此外它的功率密度很低，反应炉心占地900立方公尺，比压水式的30立方公尺（这还是民用反应炉，包括了更换燃料棒的机制；核潜艇用的更小得多）大30倍，功率反而只能做到100MW，而最新的压水式已经达到1400MW。清华的设计是两个反应炉共推一个蒸汽轮机，合起来成为一个模组。理论上模组和燃料球都可以大规模生產（清华自己的生產线年產量10万枚，现在正在包头市建设年產30万枚的工厂），长期下来成本有可能压低到远比压水式还低；但是这里有一个很大的不确定性，也就是高温气冷堆核电站是否需要传统的紧急事故处理设备，例如厂房安全壳。压水/沸水式因为有炉心熔毁的可能，安装反应炉的厂房本身也必须是特别设计的气密安全壳（当然因为冷却水沸腾时可以產生爆炸性的力量，两层安全壳仍然不足以保证绝对的安全；而高温气冷堆用的氦气是不会爆炸的）。如果高温气冷堆也必须建昂贵的厂房安全壳，那么因为它的功率密度低，安全壳就必须建得更大，而且必须在气密的同时提供气冷，费用反而会更高得多。如果因为高温气冷堆的安全性而省略了紧急事故处理设备，那么它很快就会比传统的核电厂便宜，甚至可以直接替换掉煤电厂的旧锅炉，沿用现成的蒸汽涡轮。

所以虽然高温气冷堆的安全性已经远高于传统式的核电站，它的前途还是决定在这个安全性到底高到哪里。歷史上AVR的麻烦主要在于燃料球卡在出口，而在处理的过程中有燃料球破裂。原本燃料粒本身已经有四层防护，所以燃料球破裂应该也没关系；但是年產30万枚燃料球，每个球有8000个燃料粒，那就是24亿颗燃料粒。目前的工艺可以保证99.999%的良率，但是即使再提升一个数量级，也就是达到了99.9999%的良率，仍然会有2400颗破损的燃料粒，当那2400枚含问题燃料粒的燃料球破裂时，就有可能泄露放射性尘埃。不过一颗燃料粒只含0.7mg的铀，所以这样產生的尘埃是相当微不足道的。

在最坏的可能情形下，也就是当外力（例如天灾、飞弹攻击或厂房失火/爆炸）打破反应炉，氦气外泄，空气进入反应炉，那么高温的石墨会自行点燃，放射性污染就有可能随烟尘而散布（不过燃料粒的外层有Silicon Carbide，这种陶瓷材料不但坚硬、耐高温，而且不易燃）。虽然有电脑模拟，显示因为燃料球堆积很密，燃烧会有困难，但是这是假设厂房基本完整；如果厂房已经崩塌，氧气的供应就可能足够引发大火。当然以这个脚本来判断安全性是很不公平的，所有其他的核电反应炉设计在同样情形下，放射性污染都会比高温气冷堆高出好几个数量级；问题在于分析了风险回报之后，是不是可以省略一些紧急事故处理设备（石岛湾似乎就省略掉了厂房安全壳，但是因为传统的反应堆在隔壁，其他处理紧急事故的软硬体设备都是现成的；但是高温气冷堆的经济性只有在脱离传统核电厂之后才能显示出来）。很不幸的是，一般民眾没有风险的概念，往往在被传播媒体有意无意中伤的新科技上，为了极小的风险而因噎废食；而旧有的工业技术，却因为既有利益者（如石油财团）护航，可以每年害死几万人而没有媒体敢讨论（如烧煤

和烧油的空气污染，造成每年全球因肺癌死亡的人数，就远超过人类历史上因核电意外而死亡的总人数，这还不考虑全球暖化的后果）。所以只有理性的政府才能做出理性的最佳决定，而台湾的民主政体却是绝对反理性的。

11 条留言

工科学生的图书馆

2015-05-07 00:00:00

多谢王先生的科普。我曾经以为快堆也是很好的核能设计，看来并非如此。但是我看新闻上说快堆可以用来做乏燃料处理，这种理由是否恰当？

“

是的。这事比较复杂一点，所以我没在正文里提。

快堆全名是快中子堆，也就是没有中子减速剂的设计。因为水是中子减速剂之一，所以就不能用；一般快中子堆必须用液态金属来当冷却剂，例如钠或铅。

快中子容易被铀238吸收，成为钚239，这是快中子堆的主用途。但是Trans-Uranium Elements（超铀，即比铀还重的元素，都有高度的放射性，极不稳定）也会吸收快中子而裂变成小原子核。这个好处是这样的：超铀的半衰期一般在几个月到几千年之间，这刚好是最让人头疼的范围；因为半衰期若是很短，放一放就衰退光了，半衰期若是很长，则衰变很慢，放射性就很低，例如天然铀。所以用过的燃料棒里最难处理的元素就是超铀，而理论上快堆可以把它嬗变掉。

当然，在工程上处理高放射性的废料是非常困难的，所以目前快堆基本上还是为了军事用途而存在。

just me

2015-05-07 00:00:00

Even though I am a registered Democrat, I support nuclear energy, GMO and free trade. I am also not a big fan of locavore. I believe technologies such as nuclear energy, solar power and genetic engineering will be the saviors of planet earth. Economy of scale offers the best efficiency.

Taiwan is a funny place. There are people there who want independence but don't want to sacrifice for their belief. Instead, they hide behind the US of A. They don't want nuclear energy but nobody is talking about cutting down the consumption of electricity. Sure, you could take 18% but others cannot. As mentioned before, ignorance is actually not that bad. Biased mindset is much worse. They insist on sovereignty when dealing with Mainland but they were thankful to the occupation by Japanese. They are even happy to give away disputed territory. This kind of schizophrenic mindset is pathological. Why even bother?! Let them take the Presidency. Let them shut down nuclear power plants. Let them find new market in Southeast Asia. I am sure that Taiwan can survive without doing business with a BIG brother next door. Cuba can. Taliban can (live happily with their goats)! Talk the talk is easy. When can they finally walk the walk? Finally, DPP is merely a mirror of their supporters! My God, ~60% of hotel guests don't take things with them after their stays. It was something to brag about? Policed state? Just come to the US of A. You will finally have the real experience of a police state. Sad! After twenty some years, there was no progress. The DPP mindset is poisonous. Taiwan is sinking. Reunification will happen.

“

If everyone in Taiwan is guilty, I would agree to let them just wallow in their own stupidity, but there are people who are not into politics and barely scraping an existence. And they are suffering the most. That is why we have to do something. I am doing my part; it is not much, but if everyone with a conscience does it, maybe together we will make a difference.

听先生解释快堆，我有个疑问。快堆不就是希望从铀 238 变成钚 239，并将钚 239 作为核燃料或是核武原料吗？但是“所以用过的燃料棒里最难处理的元素就是超铀，而理论上快堆可以把它嬗变掉。”这句话似乎是说快堆又可将超铀（钚 239）嬗变为低放射性物质，感觉上和快堆的本意有所矛盾？

“

钚239再吸收一个中子就成为钚240，提炼核武器用的钚最重要的步骤就是要纯化钚239，因为钚240半衰期很短，会使弹头自行引爆，那就不太理想了。所以快堆生产钚的时候，铀238是放几天就拿出来的。

快堆处理超铀废料则是要几个月甚至几年的时间。

沐浴脑壳

2015-05-07 00:00:00

一直对核能感兴趣，期待人类以后能利用更安全的核燃料。仔细阅读先生新作，也大致脑补了核安全方面的知识。就个人认知而言，比较倾向于核电和水电，觉得火电污染太严重，不过任何事情都有利弊权衡，是不是可以选择地广人稀且地质灾害较少之处集中建设不需要第二安全壳的高温气冷堆，再将电力输送到各处？

核能的出现，我觉得除了日本人吃了两颗小丸子（如果没这个事件，核武器的影响力应该会大打折扣，因为就普通人来说，无法想象它的后果），一直都在发射架上维护着这个小地球的大致和平。没有核武器，可能这个世界现在会更乱。而如果技术超级复杂，长期掌握该技术的国家就一两个，也会是一个很不安全的因素，但是个人比较担心的又是另一方向，技术不够复杂，转而被少数极端分子掌握，成为极危险的因素威胁我们的小地球。

“

水电有极限，而且会影响鱼的生态，不过现实中没有完全理想的能源，水电、风电和太阳能算是最好的了，只是它们还是太贵。如果高温气冷堆的安全性能过关（先在传统核电厂试用个10-15年），以它来大规模替代煤电锅炉是最便宜和理想的方法。

“地广人稀且地质灾害较少之处集中建设”核电其实是适合超大型的第三代反应堆的政策。

还好提炼钚239和铀235都很困难，连伊朗都搞了近十年了还没完成。恐怖分子要用核弹还是得靠偷的。

Voyager_ho

2015-05-08 00:00:00

非常感谢解说！我是来自台湾的读者，以前在天下纵横谈发表过一些文章。

对于高温气冷堆，我个人认为这是一个产业的转捩点。就我所知道的，摄氏900度左右就可以直接用水生产氢气，这就可能对交通工具的能源使用产生重大影响，特别是石油的使用，当然这也会对国家战略产生影响。

先生肯定对核技术有相当深入的了解，我的疑问在于：这个高温气冷堆的核技术，中国算是独步全球了，那么这种发电站的输出，是不是会变成非常重要的政治决定？因为这牵涉到技术外泄的可能性。

另外，核电本身都会产生核废料，台湾的核电站里所堆积的核废料已经到了快要没地方放的地步，甚至可能被迫停机。台湾有没有可能因为这个高温气冷堆，以及本身核废料的问题，使台湾转变对大陆的政治抵抗？

毕竟台湾没人想要抱着核废料，而传统的火力发电，目前外三的技术又领先，台湾继续烧煤的空污，大概自己也受不了，这可以成为台湾发生骨牌效应，转变对中国政治敌意态度的一张重要骨牌吗？

想看看先生的看法！

“ 欢迎你来到我的部落格。

我认为氢气太危险了，不能推广到消费者级别，请参见前文《永远的未来技术》。至于在低用电期间生产氢气，直接储存在电厂，在尖峰时间再以燃料电池辅助发电，我觉得有可行性，但是技术还不成熟。

中共似乎没有出口的限制，已经准备把高温气冷堆推销给中东。高温气冷堆用水比压水/沸水式少，950度的高温也适合海水淡化，特别适合中东和北非国家。

台湾没有真正的荒地，核废料是个大问题。至于和中方合作，我自己的观察是台湾选民的智商和五岁小孩差不多，遇到不顺意的事只会哭叫打闹；权衡折中是要有十几岁的智商的，台湾近25年还没有做过；至于对外交涉，求同存异，获取双赢的共利，这是完全成熟的成年人才做得到的，台湾除了喊喊口号之外，有人真能做到吗？

victor

2015-05-09 00:00:00

王大哥，小弟有几个不成熟的想法，您看看。

- 1) 既然已知聚变堆产生的是中子，那么能不能用中子去轰击某些裂变材料使之能作为流水线式生产裂变原料呢？
- 2) 是否存在仅用 2H_1 （普通氢）就能核聚变的可能，这样聚变后仅会产生 2He_4 ，就没与中子这样的麻烦了。
- 3) 记得国际上是有有一种能用来产生快，慢中子的机器实验设备，他们是怎么控制中子的呢？
- 4) 高温气冷堆建成后能不能同时建成海水淡化+氢气生产工厂在其旁边这样一边生产核电同时也能海水淡化+产生氢气，这样会耗掉气冷堆产生的电能吗如果不会，这不就是更高效能量转化率吗？

“

- 1) 中子的来源不是问题。快堆和聚变反应器相比，要便宜、安全、成熟得多。
- 2) 重氢的原子核有多余的中子，提供了额外的吸引力来克服正电之间的排斥力。若是使用普通氢，等离子体的温度要再高两个数量级，磁场就关不住它了。参见《永远的未来技术》。
- 3) 中子的生产，除了裂变和聚变之外，另一个办法是用高速质子去打原子核，有部分会把中子打出来；这也是唯一能产生定向中子束的方法。中子产生时，都是快中子；要慢中子，可以用减速剂和中子做弹性碰撞，吸收它的动能。
- 4) 这绝对是高温气冷堆长期下去的最佳远景，不过压水堆也可以做成袖珍型的和它竞争。中共的型号叫ACP-100，参见《核动力在军用与民用之间的差别》。

md51

2015-05-12 00:00:00

楼主经常逛军网和观察者，有注意到最近有文章介绍中国常规潜艇在瑞典斯特林热机功率的基础上提高了117%，这个文章么？

整好，您这里给普及了第三代/第四代 核能。

我尤其注意到，您说日本无论是第一代第二代的压水堆，废水堆，都是有搜集核武器原料钚239，其实大路上的关心军事的，心里都对日本人的那点小心思一清二楚，日本人环顾四周，被中国人，俄国人，美国人，朝鲜人围着，都跟他有嫌隙。日本人怕俄国人，所以，拥核是个理由。朝鲜人，中国人跟日本人有不共戴天之仇，所以日本人也有理由拥核，美国人欺负日本人整整70年了，而且还曾经用两个原子弹炸掉日本人大东亚共荣圈的美梦，实在拥核的不二理由。

所以呢，日本人的最高理想就是拥核，实际上日本人气最高点论坛2ch,就通过翻译传回大陆的文章中，我就见过几十篇文章中，日本网民在积极谈论日本应该拥核，从舆论的气氛和普及率来说，日本人当中有相当一部分是希望拥核的，这个有民意基础。所以您在文章中说日本人从中曾根康弘时代开始积攒核原料，实际上根据凤凰卫视的纪录片，在日本声明无核三原则的70年代起，日本人就有人后悔这个声明了。到现在彻底废掉无核三原则也只是时间。

我想问的是，您有没有注意到 小堆或者微堆+AIP，高温气冷堆+AIP，热离子堆+AIP，这些名词？就是用小型核反应堆去驱动AIP热机，在常规潜艇的身板上达到无限动力的目标。在2000-3000吨的量级上达到核潜艇的一些性能？

另外，您能不能介绍一下核潜艇反应堆

“ 我对核潜艇反应堆没有专长，所以一直没有写专文。我所知道的是潜艇里寸土寸金，用小堆+AIP不切实际（高温气冷堆尤其如此，因为功率密度太低），大概只是军迷的狂想。如果是用小堆代替AIP，比较有可能。有谣言说共军在开发袖珍型的核潜艇，准备以量取胜；不过中共对核潜艇的保密级别特别高，我们可能要到十年后才知道真相。

共军的新一代大功率核潜艇反应堆是2012年开始研发的（有一个官八股说某某元件从2012年开始，后来可信的分析发现那个元件是核潜艇反应堆环路的一部分），应该在2020年左右服役。

观察网上周有一篇讨论AIP功率增加117%的文章，我想是目前最好的分析。不过我现在找不到了，说不定是因为分析得太好，被拿下来了。它的主旨是共军的AIP技术来自瑞典，而瑞典的AIP有两个功率（75KW和110KW）；依前者（日本的苍龙级用了四台）来算，增加117%后是160KW，四台是640KW，这比世界其他先进柴油潜艇例如德国的214级（240KW）高得多了，将来会有新的战术可能。不过这比起核潜艇（洛杉矶级是26MW）还差得远。

日本的右翼人士其实从被轰了之后就想着要铀，但是1982年中曾根康弘上台才正式偷偷摸摸地干。日本的铀不是压水/沸水堆来的（压水/沸水堆是不能生产铀239的），而是中曾根康弘任内盖的一个快堆。1990年代还因处理MOX（就是铀和钚的混合燃料）错误（居然由手工拿扫把在水桶里搅拌！连口罩都没有带）而有两个工人死亡。

NE86T

2015-06-24 00:00:00

等了一段时间，似乎没有核工专业的人来看这篇文章，提醒文中一个错误——[铀235的自发衰变（亦即没有燃料棒到燃料棒之间的连锁反应）仍然会产生过多的热量，最终会把整个炉心熔化掉（Reactor Core Meltdown），]

以上叙述有误，反应炉的衰变热主要来自分裂反应后的产物，有的衰变快，有的慢，详情可再查证。但绝不是U235的自发衰变，U235的半衰期很长的， 7.04×10^8 年。

“

已更正。多谢指教。

释青衍

2015-10-22 00:00:00

先生之言，令愚辈增长见闻、茅塞顿开；惟倒数第二段中倒数第二行之：“当那2400枚问题燃「球」破裂时”是否为笔误？

以上下文判之，正确应指燃料「粒」。

抱歉如此吹毛求疵。愚辈以为，以先生高见，专业之文本就解惑教授，岂容错字笔误乎？请乞见谅。

“

不是笔误，不过写得不好，容易误解。已更正。

Terry

2016-10-01 00:00:00

最近重温王博士关于核能的文章，有些问题想向王博士请教一下。

在<<再谈中国的核电发展>>一文里，王博士提到压水堆在运行中会产生超铀元素，那高温气冷堆是否同样会在运行中产生超生超铀元素？如果是那如何处理燃料球持续发热的问题？还有就是燃料球的石墨外层会否妨碍对废料的核循环处理？

最后希望王博士把之前因电脑问题而没写成的关于电力的文章完成，我觉得这些科普文章对一般人对世界的认知来说可是十分有帮助的。

“

高温气冷堆把原料分散布置，大幅牺牲了功率密度，就是为了让燃料球用完之后，废料产热够慢，即使简单直接掩埋，也可以自然散热。

为那篇电力文章找的资料都不见了，现在时间更少，很难重新上马。

王先生可以評論一下觀網的這篇報導嗎? 因為該文太短實在看不懂.
http://www.guancha.cn/industry-science/2017_12_09_438487.shtml

“

所謂的“熔鹽堆”，就是我說的快堆，一般是用鈉或鉛來做冷卻劑，基本的困難是腐蝕性太強，堆芯結構承受不了。這個報導的，只是一個實驗堆；是否能解決問題，並不樂觀。聚變堆的堆芯結構問題比快堆至少高3-4個數量級。快堆都不實用，聚變堆怎麼可能工程化、商業化？

[返回索引页](#)