

【工业】再谈中国的核电发展

2015-10-23 19:17:00

原文网址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/108908782>

我在前文《高温气冷堆》中介绍了这项由清华主导的第四代核电技术。中国是唯一还在积极发展高温气冷堆的国家，投资也算是可观，但是它其实不但不是当前中国核电的主流，连未来的主力研发方向都算不上，祇是一项备用的技术。其问题的根本在于高温气冷堆的功率密度过低，双堆并联也祇有200MW的电功率，而中国对核电的需求极高，到2020年预订必须有58GW的装机容量，到2030年将超过400GW；相形之下，最新的压水堆已达到单堆1.75GW的电功率，所需的厂房数目可以减低一个数量级。因此中国的核能战略是所谓的三步走：“热堆—快堆—聚变堆”，其中的热堆就是第三代的压水堆，快堆是我在《高温气冷堆》也提过的快滋生反应堆，聚变堆则在《永远的未来技术》里解释过，是与超弦并列为物理界两大成功忽悠的不切实际幻想。

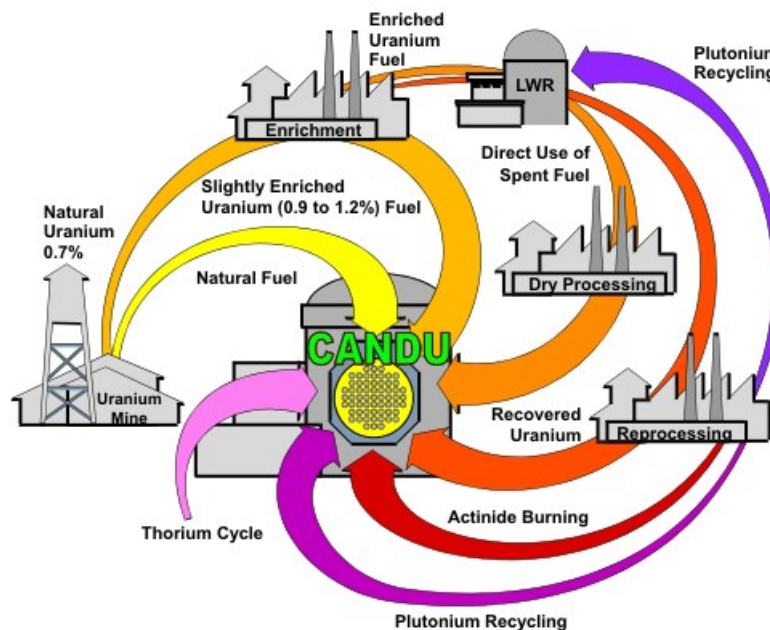
还好搞核聚变的人不敢把商业化的日期订得太近，以免谎话被拆穿。最大胆的（一般是50岁以上，20年内就会退休的人）也祇敢说30年后，所以中方的投资还在预研阶段，不算太高，而且是多方下注，除了纯聚变之外，也支持所谓的“Z箍缩聚变-裂变混合反应堆”。这其实是用很小规模的聚变来激发快滋生裂变反应，也就是聚变产生的中子并不直接用来加热蒸汽轮机，而是被铀238吸收后再依传统的裂变反应来发电，因此在技术上还有实用化的可能，真正的问题可能会出在经济性上，亦即竞争不过液态金属冷却的快堆，但是那要等实件做出来之后才能确定。这个计划的领导人是中物院的彭先觉院士，他在今年稍早公开说核聚变“可能无法很快”实用化，并不是酸葡萄心理下的无的放矢。

实际上中国到2030年所需要的400多座核电反应炉，绝大多数都会是第三代的压水堆。原本的计划是以西屋的AP-1000系列（由国核技引进）为主力，但是一方面美方提供的关键部件（推动冷却剂内环路的主泵）老是不过关，另一方面过去两年为了努力外销创汇，决策高层了解到外销型号也必须在国内大量部署，否则客户永远会有疑虑，所以似乎已经转向为AP和华龙一号兼顾的策略。当然华龙一号其实是两种完全不同的设计（参见《克里斯蒂娜的玩笑》）：中核的土产型号和中广核的仿EPR。这次英国愿意在Bradwell（参见《英国二三事》）装华龙一号，正因为它其实就是法国的EPR，和EDF要建的Hinkley Point是一回事。其实EPR现有的两座示范工程（分别在芬兰和法国，Hinkley Point将是第三座）都严重超支并落后进度，说不定还得靠中广核来解决问题，但是中国的高科技还没有国际声誉，行销时沾些法国人的光也是不得已的办法。

既然在可见的未来，压水堆是绝对的主力，那么快堆的意义何在呢？我在前文已解释过，以液态金属为冷却剂的快堆没有中子减速剂（其他反应堆用水或石墨），工作原理和压水堆完全不同，不是靠喜欢吸收慢中子的铀235，烧的是喜欢快中子的铀238和超铀元素。铀235祇占天然铀的0.7%，快堆显然在燃料来源上有很大的优势，但是压水堆有70年的民用和军用技术累积，在安全性和经济性上都成熟得多，所以快堆在中国核能计划里的地位其实是从核废料处理而着眼的，也就是所谓的核循环。一般压水堆的燃料棒在两年内就必须更换，然后会因裂变过程中产生的高放射性物质（尤其是超铀元素）的自发性衰变而持续大量放热，这些燃料棒因而成为最难处理的核废料，必须在冷却池中储存很长的时间。台湾祇有6个反应炉，尚且头痛万分，中国到2030年的反应炉数目将超过境外的总和，废弃的燃料棒预计达到23500吨，而且会以大约为台湾百倍的速度持续累积，传统的储存方式不但极为昂贵困难，也是对有限的铀矿资源的一大浪费。

目前其他核先进国家唯一的改进手段是很有限的回收循环，把用过的燃料棒里所含的铀235、钚和其他超铀元素浓缩制成MOX（Mixed OXide）燃料，然后应用到专为MOX修改过的压水堆。这对铀资源的应用率，提升祇有20%，而且產能也极为有限，回收能力最高的法国祇有1700吨的年產能，英国有1200吨，日本则有800吨。2015年九月23日，中核宣布将投资1000多亿人民币，引进一座法国Areva设计的年產能800吨回收循环厂，预计2020年开工，厂址将在山东、江苏、浙江、福建和广东几省中选择。

很显然地，以中国核能发展之大之快，现有的回收循环技术是杯水车薪，所以再进一步就是引进重水堆。重水堆和压水堆相当类似，主要的不同在于冷却剂用的是重水而不是一般的水。重水是氢的同位素氘的氧化物，由海水提炼纯化而来。氢原子核就是一个质子，和中子有很好的弹性散射截面，所以在当冷却剂的同时可以兼做中子减速剂；但是质子也会和中子做非弹性反应，结合成氘，所以部分中子被吸收了，连锁反应的总效率因而降低；这正是为什么压水堆的燃料必须先经过浓缩，把铀235的成分提升到2-5%的原因。改用重水后，氘的弹性散射截面和氢相似，非弹性反应（吸收一个中子而成为氘）截面却小得多，连锁反应效率更高，就无须提升铀235的浓度，使用天然铀就可以发电。正是因为这个好处，1994年中国还没有高效的离心浓缩技术（到2013年六月21日，中核集团的兰州铀浓缩公司才公开宣布已成功将离心机工业化；在此之前，旧式的扩散法耗电达25倍之多），便特别与专长在于重水堆的加拿大原子能公司（Atomic Energy of Canada Limited, AECL）开始合作，1996年正式签约，引进了两座CANDU（CANada Deuterium Uranium，加拿大氘铀；选择这个缩写是因为它听起来和Can Do同音，而“Can Do”是“行/没问题”的意思）6号反应炉，也就是秦山核电站三期工程。后来发现重水堆的真正价值在于对燃料不挑剔（不过还没有到《Back to the Future》里把垃圾丢进去就可以发电的地步），压水堆用过的燃料不须经过前面提到的全回收过程，祇要简单用化学提炼出铀就可以推动重水堆，同样也能提升铀资源的总应用率20%。整个示范工程在2015年七月通过审查，预计2016年底正式启用。长程的计划是引进最新的EC6（Enhanced CANDU 6，达到第三代反应器的安全标准）技术，国产化之后称为AFCR（Advanced Fuel CANDU Reactor，先进燃料重水堆），依每四座压水堆建一座重水堆的比例，可以更廉价地达成燃料回收循环的结果，而且两者的效果在理论上可以叠加。



重水堆对燃料不挑剔，烧钍（Thorium）燃料也可以。钍的地表存量是铀的三倍，印度是主產区，所以印度的核反应炉大多是从加拿大引进的重水堆，共有15座。重水堆的另一个用处是生產军用的钷239；这是因为它的燃料浓度低，必须经常更换，所以產生的钷239没有足够的时间被转化为钷240。钷240会自我引爆，是制造钷基原子弹的最大障碍。虽然重水堆生產钷239的效率远低于快堆，但是印度还是靠着前者累积了足够的钷在1974年制造了第一颗原子弹。伊朗也有一座

重水堆，依今年七月达成的协议（参见前文《与伊朗的核子谈判》）必须将它改造为不产铀的形式；2015年10月19日，中国国家原子能机构宣布将帮助伊朗进行这项改造。

前面提到的回收循环厂和重水堆，对铀资源的高效应用和核废料的回收处理，都只有有限的贡献。真正要把超铀废料大幅消化嬗变，还得靠快堆；但是用液态金属（如钠）来做冷却剂，工程的难度当然更高得多。目前快堆技术最先进的是俄国，中国在2009年引进了一个实验堆，预计2035年才能商业化，届时压水堆用过的第一手燃料经简单分离后，可提供重水堆使用，其后的废料可由回收循环厂提炼出MOX，在特别配置的压水堆和重水堆用第三次，最终最脏的废料再交由快堆处理，达成理想中的全循环。

中国的核能发展，如同高铁一样，引进世界众家之长（即德国的高温气冷堆，美国西屋公司的AP系列压水堆，法国Areva公司的EPR压水堆和核废料回收循环厂，加拿大的CANDU重水堆，和俄国的快堆），快速地发展出更先进更全面的技术（除前列外来技术的后续发展外，Z箍缩技术和中核的压水堆基本是土产的），是后来居上的典范。其与汽车工业的最大不同，就在于高度集中于中央的计划与监控权力，强迫那些实际执行业务的企业要专注在产业技术提升，而不被市场份额和利润分散了注意力。自由市场永远都对大资本和老玩家最为有利，相信绝对自由主义能帮助他们高速发展经济的开发中国家只能是美国宣传体系的受害者。

16 条留言

Jlee

2015-10-23 00:00:00

看到这篇 想到台湾的核四....先天不良 后天失调 乾脆夭折....

“

核四原本是该建的，但是拖了这么多年，工程品质很有疑虑，未来的管理也没有保证，反而越来越建不得。

几十年前轻易办成的事，现在却已无力为之，这是典型的衰退消失中的国家的现象。美国也是一样的，君不见为一个主泵折腾了近十年，祇是有美元和军事霸权撑着，衰败还没有明显化而已。

zxuan

2015-10-24 00:00:00

中国的离心机最近几年才国产化成功，但是伊朗一直有大量的离心机，新闻上说伊朗国产的，这让我一直很困惑。

“

伊朗的离心机技术来自巴基斯坦，而巴基斯坦的技术来自欧洲。1972年，A.Q.Khan从他的荷兰雇主那里获得了最新的离心机设计，潜逃回巴基斯坦后，开始纯化大量铀235，后来在1983年试爆了第一枚回教原子弹。和印度的铀基弹不同，巴基斯坦的原子弹是钚基的。

zxuan

2015-10-24 00:00:00

感谢您的回复！

但我接下来又有两点困惑了：

1.既然巴基斯坦很早就有了离心机的生产技术，按照中国和巴基斯坦的关系，中国应该也很早就能国产化离心机才合理。

2.我不了解离心机，但是感觉离心机应该是对工艺水平很高的，仅仅有设计图纸而没有一个高水平的工业体系是很难生产出离心机的吧？巴基斯坦和伊朗都能在自主的工业体系里实现离心机的国产化，很令人惊讶。

“

巴基斯坦和伊朗的离心机还是有许多关键部件必须进口，不过很多都主要是民用的产品，所以早年并没有太大的困难。

至于中国为什么没有早一点从巴基斯坦引进离心机技术，我也不清楚。我的猜测是等到巴基斯坦搞定的时候，已经是80年代，当时的外交局势不利这种敏感的技术转移，中国国内又在大裁军，再加上60、70年代在扩散式技术的投资很多，所以就一直沿用到近年民用核能开始大规模兴建才有了动力搞效率较高的技术。

xujin111

2015-10-25 00:00:00

我在网上看到高温气冷堆可以在核战略轰炸机使用，比如只闻其名的五星之光，问一下王先生，这个具有可行性吗？

“

没有可行性，体积和重量太大。

greg

2015-10-29 00:00:00

全球首台三代核电AP1000主泵通过国家核安全局审查

http://www.thepaper.cn/newsDetail_forward_1390508

Gary

2015-10-29 00:00:00

只是初步通过试验，下一步还要到核电场试运主泵性能，大概又要一，二年才有可能正式运作。就好像今年初，主泵正式完成，但是到了8月试验又出问题。

“

这个主泵真的把引进AP1000的计划搞得灰头土脸，法国的EPR毛病更多，中国的核能工业还是大有可为的。

Yau

2015-10-30 00:00:00

孟源兄，想请教您一下关于钚能发电的事情。网上的有关的资料真令我有些难分。我在维基看到的钚能简直是一面倒优于铀，想问一下是真确的吗？那些优点究竟是钚，还是第四代核电？另世上好像还没有钚能的核电厂，但又资料说CANDU可用于钚能，这是真实情况吗？另外，世界各国的发展情况如何？

谢谢

“

我在正文里已解释过了，轻水堆（即压水堆和沸水堆）祇能用铀或MOX，要用钚就必须用重水堆或快堆。重水堆不是主流，以往祇有加拿大在投资研发，所以连第三代都还没有做出来。快堆的技术更困难，中国自己的估计是2030-2035年才能大批量商业化。

一般的报导都是不诚实的宣传，是行业内人为了骗经费写的。不过至少重水堆或快堆都是真正可以工程化的技术，也有回收循环的特别功效，所以给了足够的时间，应该还是会开发成功的。

谢谢回覆，我自是物理本科毕业的，本来十分清楚明白核融合不是短时间可发生的。但前一阵子有一则新闻是Lockheed Martin 的 Fusion Reactor, Lockheed Martin 是十分知名的企业，弄得我也有些动摇，孟源兄有没有听过物理学届的传闻真假？是不是像犹他大学的乌龙事件？

“

不是的。ITER是一个超大型的Tokamak，本身就很昂贵，又被人谋不减，现在已经超支3倍到150亿美元。所以有很多其他的电浆专家（我知道有将近10个公司）说我们有不同的设计，祇要1-5亿美元就可以达成核融合。

他们之中或许有几个可以做到核融合，但是最终如何把中子的动能转换成热能还是无解。

这个留言应该放在《永远的未来技术》。

姚广孝

2015-11-05 00:00:00

感谢博主撰文。

本来我对核电可以是一窍不通。但是知道些中国大陆核电发展的擦边消息，所以写出来给博主参考。

我现在发现内地的老百姓其实对于国家的种种基础设施包括核电的感受可以说和世界上其他地方截然不同的。这在外界绝对是无法想象。

比如我老家这边要修路，开路，拆迁等等等等，从开始到结束过程速度超级快，可以说用惊人来形容，比如两个月内，10平方公里的土地就给你改天换地。相同，核电建设全国可以瞬间在一两年内给你一下子建设50个核电厂。这在外面的任何国家都是不可想象的。

因为政府不用民调。导致老百姓对地方政府的种种行为可以说是漠不关心。政府要干啥也没啥阻拦，甚至核电也是。我老家非常贫困，人均gdp不到4000美金，基础设施也落后尤其是电力短缺，中央要建设第五代核电（事实上我也不知道这是什么程度），说建就建了。地方老百姓对此毫不关心，没人反对，甚至很多人不知道。我问过一个官员，他就直接说，老百姓是支持的，这其实是中国标准官方口吻了，反正政府随意摆出14亿老百姓的声音出来，核电也是安全的。当然好像中国的核电也真没出什么事。

“

这种事还是由政治精英（前提是有理想，所以不能是财阀）决定，有效率的。

陈晨

2015-11-05 00:00:00

姚广孝网友，不是不关心，而是没有什么可以反对的，网上该讨论的早就讨论过了。比如拆迁，实际上除了拆迁出人命这种新闻以外，还有另外一种，那就是拆二代，在中国，被拆迁被认为是一夜暴富的经典片段之一。所以，很多时候，除了觉得还可以要的再多一些的，大多数人都是早就签字走人。

至于说老百姓关心核电安全与否，不如说需要与否，刚看了观察网的新闻，英国已经开始限电了，一度电2.5英镑。www.guancha.cn/europe/2015_11_05_340188.shtml

大陆有句话，现在流的泪都是早年脑袋进的水，台湾废除了核四，估计下场比英国好不到哪里。你也说大陆利用核电多年，还是比较有经验的，所以与其关心要不要，还不如好好监督安全利用。下面这篇怎么感觉有点忽悠，请王先生鉴别一下。

中国核反应堆技术实现突破 或将消除熔毁风险

www.guancha.cn/Science/2015_11_05_340157.shtml

大陆的民智其实也久经考验，80年代大家从收音机里的美国之音了解什么是民主，结果搞出了89。进入新世纪，PX项目的反复，以及包括你说的核电问题，还有一个就是手机信号站在小区受阻，这些都是一个套路，大众对政府的不信任被媒体恶意放大，结果造成很多群体事件。到了最后，买单的还是老百姓，还有句话，骗你一次是别人不对，骗你两次就是你的问题了，不知道你看过程本山的卖拐系列小品没，多么生动的现实。

最后歪一下楼吧，刚才看到王先生谈到习马会，说是共产党考虑历史定位，突然想起历史上的46年，两位领导人在重庆见面，还签了一纸协议，结果离别不久内战爆发，从此换了江山。金杯同汝饮，白刃不相饶。这就是中国的政治现实。当年国民党不管出于何种想法，让共产党去谈判，从

道义上给了和平一次机会，如今共产党叫国民党去谈判，一报还一报，从此两清，再不相欠。很多人觉得和国民党谈不出什么，其实问题不在于谈，而在于共产党事后会不会改变对台政策，如果真是那样，恐怕王先生所有的担心都已经成真。我倒是希望马总统最后哪怕表个态，不仅仅是为自己，也算是为百年大党的历史定位真正男人一次。

“

必然谈不出什么重要议题，纯粹是象征性的姿态。

至于会后的政策怎么走，我个人认为应该完全放下政治考虑，专注在经济整合和社会救助上，毕竟台湾社会被自己玩砸了，烂摊子最后还是得由中方来收拾。

jk123

2015-11-06 00:00:00

不过现在台湾社会反对大陆经济上的整合，说让利都让财阀吃了，反而成了反对大陆的借口，而不是检讨自身内部的分配问题，感觉这个好像没法再进行下去了

“

台湾极度崇洋，其实可以借力打力：祇要有国际压力，就可以压下岛内的政治反对。例如紫光要兼并联发科，把WTO扯进来，威胁制裁，台湾自然会乖乖就范。

陈晨

2015-11-06 00:00:00

jk123网友，香港其实也是这个问题，这也是大陆对一国两制的深刻教训和思考，中共在大陆之所吃得开靠的是完善的动员机制和深入到村镇的行政体制，而这些在香港没有，未来如果在台湾也没有，必然会发生和香港一样的问题。这也是大陆现在民意急速转向武统的一个重要原因。目前来看，台湾确实保留了很多中国传统文化，比如桩角政治，其实就是古代令不出衙的翻版，对于现代社会的世俗化管理有很大的弊端和阻力。虽然这版面的网友都知道最后还是要中共来收拾，但是如何收拾其实是个分歧，我个人是主张大破大立的，毕竟从长远来看对统治上更有利，只不过台湾肯定免不了要继续沉沦二三十年，虽然大家都觉得惋惜，但其实也是无可奈何之事，有些路早晚都要走。大陆也在文革里转了一圈才幡然醒悟。

另外，王先生有没有发现，NASA最近不断出新闻（观察网几乎每周都有），是到了年底要向国会要钱了，还是另一版本的星球大战？我觉得前者更可靠点吧，要真是后者，那美国的政治智商未免下降的太快了。

“

NASA自1980年代起，年年都得托鉢化缘，各式各样的媒体炒作已经成为它的主要业务。最近的一堆有关火星的消息，也不外是平常的公关罢了。

Sherwood

2015-11-09 00:00:00

I read the following article

www.guancha.cn/Science/2015_11_05_340157.shtml

If I undstand correctly, It was not a "power reactor" to generate electric power, more likely it is a different version of USDOE 20 years ago program - transmutation of nuclear waste. In that program, a 1.2 GeV proton- beam would be stop at a tungsten target, and knock out about 30 high energy neutrons per incident proton, while those neutrons absorbed by nuclear waste material, they will transmute the long-lived radioactive waste isotopes to relatively short-lived isotopes. During the process power would be generated, but it is not the main goal.

According to the article, IHP used high energy proton beam to initiate the fission process of a sub-critical pile. The fission process will be stoped if ther is no proton beam, so it is not a self sustaining process, can not be used for power reactor. I have no information about how many neutron produced in the process, if the multiplication factor k is much large than 1, I wonder whether the system is stable.

If their pourpose was to reduce nuclear waste, I have different idea. I will be happy to e-mail it to you.

Best regard. By the way, I really enjoy reading your article. To read your article and every body else comments is the first thing for me, when I turn on my computer. Thank you very much.

“ Using particle beams to induce fission reaction without going "critical" (i.e. chain-reaction) is an old idea among academics, but has never been used on large-scale application due to its impracticality. Basically, it is a fast-neutron reactor where most of the neutrons have to be supplied by outside sources. The Fast-Breeders will be at least 10 times more economical.

姚广孝

2015-11-10 00:00:00

“瑞金将建全球首座第四代核电站”

sztqb.sznews.com/.../content_3201602.htm

好吧，我今天一百度，原来全球“最先进的核电站”就在我老家。看来我老家和核电还挺有缘。当地老百姓是抵制的，但是我觉得还是迟早全国复制。想想第四代核电都有问题，那么全球的都有问题了。

“ 我在《高温气冷堆》就提过，这是全球第一座完全商业化的高温气冷堆发电站，恭喜了。

Gary

2015-11-12 00:00:00

比尔·盖茨访华谈第四代核能技术行波堆合作

m.guancha.cn/america/2015_11_13_341123.shtml

王先生觉得这所谓的第四代核电有没有实行的可能性？我个人觉得这是巨大的骗局，骗钱骗时间，美国连所谓的第三代核电都完成不了就提第四代。

“ 这是快堆的一个变种，不是骗局，但是技术困难很高，也没有经验累积，我并不看好。

crztrader

2017-09-21 00:00:00

补充一段影片，相当好的核电科普资料及中国核电发展，里面有核电厂内部运作场景...。「科技相对论」特别企划：核电，到底有多“危险”？

<https://www.youtube.com/watch?v=Wt5PQ1zM4KM>

“ 看来是和广核合作的节目，说的都是很基本的事实，不过对不是理工科出身的普罗大众应该是有价值的国民教育。

[返回索引页](#)