

【能源】熔鹽堆簡介

2019-01-13 08:42:00

原文網址：<http://blog.udn.com/MengyuanWang/123728083>

三年多前，我在《高溫氣冷堆》一文中介紹了高溫氣冷球床（Pebble Bed）反應堆的發展過程。到了2017年底，中文媒體報導了一些有關另一種所謂“第四代”反應堆的進展消息，於是就有讀者發問，這個“熔鹽堆”是怎麼一回事。今天在此做個簡介。

首先提醒大家，“第四代”這個詞匯是商業廣告用語，並沒有科學或工程上的嚴格定義。詳細來說，前三代的商用核能電廠不是輕水式（Light Water Reactor，這是相對於含氘的重水，所以輕水其實就是普通含氫的水；輕水式又分為沸水式和壓水式，它們是現役商用核反應堆的主流）就是重水式（亦即加拿大的CANDU，參見前文《再談中國的核電發展》），利用固態柱狀的鈾或鈾燃料棒浸泡在兼做中子減速劑（Neutron Moderator）和冷卻劑（Coolant）的水中；代與代之間的差別主要在於安全設計上的改進。而近年來流行的所謂“第四代”，則泛指所有不是輕水式或重水式的成熟設計（所以這是又一個商學院發明的妙語：明明實際上的特徵是還不實用，卻誤導讓人以為是先進的意思），它們幾乎沒有例外都在原子能濫觴的40年代就有人提出概念，在50和60年代有原型設計；之所以到現在還沒有商業應用，是因為在當時的商業化過程中競爭不過輕水式和重水式，被放棄了。當然50多年前被放棄，有多種可能的原因，包括政治選擇、技術背景、還有先到先得效應（First Mover Advantage）等等，不一定代表著在21世紀的技術環境下仍會是次等的選擇；但是如果反過來，只因為它們被包裝成“下一代”的設計，就以為它們必然是有優越性的，那麼失望的可能性當然遠大於成功（精確來說，成功了才是第四代；成功之前只不過是個實驗）。

2017年傳出的中國“熔鹽堆”計劃（TMSR），並不包含詳細的技術細節，只提到它是由江綿恆博士（江澤民的長子，現任上海科技大學校長）主導推動，將在甘肅先建造2MW的固態鈾（Thorium）基熔鹽堆，然後再視情況演進為比較接近實用型的設計。所謂的固態鈾基熔鹽堆，是把含鈾的核燃料做成燃料球（Pebble），以氟基金屬熔鹽為冷卻劑，因此它既是熔鹽堆，也是球床堆。因為它的經濟性相對於現有商用核電站很明顯地不會有優勢，在這裏它的目的只能是為了獲得鈾基核反應的一些基本實驗參數，所以我不詳細討論了。如果我們拿這個2MW的實驗堆和清華發展高溫氣冷堆的歷史相比，晚了不止20年；既然世界第一座商用級別的高溫氣冷堆正在山東石島灣建設之中，可以看出熔鹽堆距離實用化還很遠。

至於未來的商用熔鹽堆會是什麼樣子，實在很難說；這是因為鈾基的熔鹽堆有幾十種不同的設計，各有優劣。我覺得很可能江校長自己都還沒有確定，要等到上面提到的實驗堆出了結果，才能決定下一步。本文為了方便討論，我假設他會選擇目前看來最先進的Two Fluid Liquid Fluoride Thorium Reactor（Two Fluid LFTR，雙流氟基熔鹽鈾反應堆）。

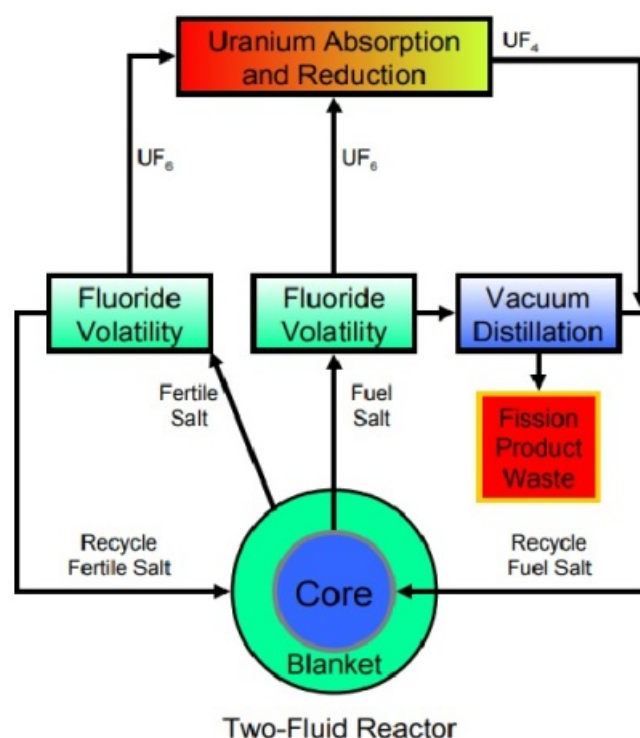
前面提到很多所謂的第四代核反應堆的設計概念，其實在1940年代就有，鈾基堆也不例外。它最早是由Eugene Wigner和Alvin Weinberg領導Oak Ridge National Lab的團隊在1944年設想出來。當時美國的另一個主要核子研究單位Argonne National Lab由Enrico Fermi和Walter Zinn主導，選擇專注在鈾基的反應鏈上。在二戰結束後，大家從開發原子彈的曼哈頓計劃抽身出來，開始研究核反應器，最早的大錢來自海軍的核潛艇計劃，這需要很小的體積，所以先合作發展出功率密度很高的輕水堆；而輕水堆也就很快成為工程上最成熟的設計。

但是輕水堆有許多缺陷，在當時最明顯的包括1）它用鈾235為燃料，不但十分稀缺、濃縮困難，而且裂變反應不完全，利用率不高，反而會產生很多放射性極高的超鈾元素廢料；2）它使用柱狀固態燃料棒，必須承受大量中子轟擊，而且氣態的裂變產物會產生氣泡，所以會隨時間而弱化，必須時常更換；3）更換下來的燃料棒有極高的放射性，不論是回收或掩埋都很困難。於是在輕水堆還沒有成功的1951年，Argonne的團隊就先建成了以液態金屬為冷卻劑的快滋生反應堆（因為液態金屬對中子沒有什麼減速的效果，快中子可以照射到放在反應器周邊的鈾238，把它轉化成鈾239，參見《再談中國的核電發展》）；而Oak Ridge則在1952年建成HRE-1，成為世界第一個使用液態燃料的反應堆，不過這用的是氟化鈾溶解在水裏，一直到1959年，才改為氟基熔鹽。

輕水堆適用在核潛艇，快堆則可以量產核彈頭用的鈾，兩者都獲得了充足的美國政府投資；熔鹽堆為了爭取公款，只好也想辦法往軍用途上靠。剛好熔鹽堆有可能做出比輕水堆還要高的功率密度，於是就搭上空軍的核動力轟炸機計劃；雖然沒有做出結果，但是這筆錢最後容許Oak Ridge在1965年做出為民用發電而設計的Molten Salt Reactor Experiment（MSRE，熔鹽堆實驗，熱功率7.4MW）。然而在那之後，United States Atomic Energy Commission（AEC，美國原子能委員會）決定集中資源發展快堆的民用型號，並在1973年開除了Alvin Weinberg（主要因為他公開批評快堆不夠安全，不適合商用推廣），熔鹽堆從此完全退出主流，一直到21世紀，全球暖化引發核電的新潮流，才有人重新考慮建造熔鹽堆。

因為MSRE就是人類所建造過的最後一個熔鹽堆原型，我們目前所知比較靠譜的最先進設計正是Oak Ridge團隊所計劃的下一代藍圖，亦即前面提到的LFTR。LFTR又分單流、雙流和單雙混合三種，其中以雙流最乾淨、效率最高。它的核心是處於熔融狀態的鈾233氟鹽，外層則是熔融的鈾232氟鹽；兩者的環路是分開的，所以叫做雙流。

鈾233是最理想的裂變燃料，不但效率很高，而且產生的放射性廢料最少；它的問題在於自發半衰期太短，而鈾礦是地球誕生時從以往超新星爆炸繼承得來，40多億年下來鈾233早已衰變盡。剛巧鈾232是一個很穩定而普遍的同位素，吸收一個熱中子（Thermal Neutron）之後成為鐳（Protactinium）233，然後經過自然β衰變成為鈾233。雙流LFTR外層的鈾鹽就是負責吸收核心裂變洩漏出來的中子，用來滋生燃料。



一旦鈦232轉化成鈾233，後者必須被提煉出來，移交給反應器的核心環路。這裏是熔鹽堆最妙的工程細節，也是為什麼熔鹽堆特別適合鈦基的核反應：因為鈾有兩種氟化物，在工作溫度（600-1000°C）下四氟化鈾是液體，六氟化鈾卻是氣體，只要在熔鹽裏打入氟氣，四氟化鈾自然變成六氟化鈾而分離出來，所以一般必須在嚴格放射性防護下運送到再處理工廠來做的化學分離，熔鹽堆可以簡單地在現場（In Situ）完成。同樣的，負責做真正核裂變反應的核心環路也可以通過現場加氟，來把還未用掉的鈾233燃料和廢料分離開來。

總結來說，熔鹽堆理論上可以一次解決前面提到的三大輕水堆毛病。然而LFTR從來沒有被建造過，所以幾乎可以確定會有它自己獨特的難題（就像張無忌要練乾坤大挪移第七層，既然設計者自己都沒練過，就必然會有設想錯誤之處）。例如核心與周邊環路之間必須有隔牆，這個隔牆還必須有中子減速的功能，因此當年Oak Ridge團隊計劃用石墨來建造。我在討論核聚變的時候，曾經強調高能中子對牆壁會有很強的破壞作用，這裏也是一樣的；如何在放射性環境下定期更換石墨牆，絕對不是一件簡單的事。當然，熔鹽堆的石墨牆比核聚變的真空腔壁要小得多、也便宜得多，所承受的中子流要弱得多，也沒有高溫等離子體的衝擊問題，所以並不是完全不可能解決的。

我想讀者看到這裏，應該可以理解早先我為什麼說中國的熔鹽堆未來的發展方向還不能確定。這個技術實在太不成熟，至少還要20年才會達到建造商用原型的地步。它有它的優點，但是也必然會有工程上的重大困難。最終它能否與其他的核反應堆競爭，目前不可能準確預測。我以前曾經估計過，高溫氣冷堆有商業性成功的機率在10%那一級，熔鹽堆大約也在同一級別；這已經值得國家投資了，但是我們不必也不應該過度樂觀。

【後註】《Nature》在2021年9月9日報導（參見[《China prepares to test thorium-fuelled nuclear reactor》](#)），中國在武威興建的2MW熔鹽實驗堆TMSR已經完工，將在本月試機。

5 条留言

nthu.cs.晉陽彭城客

2019-01-15 22:44:00

王博士感謝您的這一系列文章的精辟分析, 我不懂理化但心中長久的疑惑想請教一下: 1. 前陣子有報導大陸準備開發浮動核電廠, 感覺很適合台灣(颱風或出事了把船拖走就好)及某些缺電國家或地區(例如南海島嶼), 總覺得也是一門生意, 但其他核能大國好像不太熱衷? 2. 若為了抗炸而考慮將核電廠地下化時, 熔鹽堆是較合適的嗎? 3. 核武維護費用高, 中國又不首先用, 那麼核原料平時發電用, 挨核彈後再把核原料轉做核武 這種思路是可行經濟的嗎?

“

浮動核電廠用的是中小型的輕水式反應堆，堆的本身沒什麼特別之處，只不過可以在海上行動而已。它的用處是爲了像是南海的小島，或是西伯利亞的沿岸礦區，在陸上建核電站沒有效益，或者只需要短暫幾年的電力服務。臺灣需要的是長期和大量穩定的電力供應，所以還是適合超大型的第三代輕水式反應堆。現代的鑽地炸彈性能很高，地下化太過昂貴，又沒有什麼太大的防護效果。核武用的PU239需要特別滋生和純化，臨渴掘井是來不及的。

狐禪

2019-01-16 14:46:00

熔鹽不是氣體，高溫下的容器可能會是個問題。

“ 高溫熔鹽有腐蝕性，但是沒有快堆的高溫鈉金屬液體那麼嚴重。這個腐蝕的問題能否解決，還有待努力。

南山臥蟲

2019-01-16 17:41:00

于敏老爺子剛走了，也算與此欄題有關，王兄可以簡單談談嗎？

https://www.guancha.cn/politics/2019_01_16_487115.shtml 我国氢弹之父于敏去世 享年93岁

“

原子彈的工程設計很簡單，學過物理的都可以試試，困難在於提煉高純度的鈾235或鈾239。氫彈剛好相反：提煉氫的同位素氘雖然貴並不難，但是構型設計非常困難。這是因為氫彈必須用原子彈的爆炸力量來壓縮氘引發核聚變，但是有了原子彈這個級別的爆炸，那麼周邊的一切事物自然是想要飛開而不是被壓縮。所以只有一流的工業國家能做到；例如印度有原子彈40多年了，到現在連氫彈的邊還是摸不上。氫彈的設計是絕對機密，蘇聯靠間諜拿到美國的早期構想，不過那和最終設計有很大差別，所以頂多只能說有幫助，不完全是照抄。中國則是自己獨立發展的，當時的主要設計人就是于敏。至於現在大陸網絡上廣為流傳的所謂“于敏造型”，那幾乎可以確定是以訛傳訛的胡扯。氫彈的物理原理是一致的，如果在細節上中美有差別，官方絕對不會泄露，所以也輪不到網絡上那些噴子去討論。尤其是在這些吹捧“于敏造型”的文章中，基本常識錯誤有一大堆，例如他們甚至以為現代的熱核彈頭不算氫彈了。我以前提到李文和案的時候，曾解釋過中共間諜獲得了美國W88熱核彈頭的設計圖，然後又有變節人員把它送回給美國，所以FBI才開始Witch Hunt。現在共軍ICBM上的核彈頭，很可能是照抄了W88才能夠小型化，這樣東風41才可能裝載10個彈頭，于敏的老設計應該已經退役了。

南山臥蟲

2019-01-17 13:32:00

王兄回覆的第一段，絕對是內行中的內行，言簡意賅之至。網上看到的有關核彈類文章，從未有此者。另外，還有一種流行的說法如下，亦請王兄不吝賜教（若有靈感，亦不妨拓寫成一章，放上風聞欄目）。//我国是目前蓝星上唯一一个，常年保存氢弹这个终极大杀器的国家，美国，俄罗斯等其它四大流氓因为没有独特的技术，氢弹保养昂贵，保存时间短。而我国能够长久，常年保存氢弹，就是因为于敏老前辈独特的“于敏构”型氢弹// 又，于老先生那一輩人，一如其詩句中的家國之情，事蹟令人動容 - - 「身为一叶无轻重，众志成城镇贼酋」 - - 謹以為誌。

“

你所引用的，正是我所說的網上噴子常常胡扯的論點，完全不足采信。

南山臥蟲

2019-03-05 20:54:00

王兄，剛又看到一篇有關於于敏與氫彈的文章，其中談了不少理論細節，並最後也談了一點有關氫彈結構的訊息。最重要的，是他引用了何祚麻先生所談一篇較專業的長文。所以請王兄看看，有沒有新的有意義的內容。謝謝。 <http://hanfeng1918.com/baijia/3795.html>

“

很好的文章，但是比較專門一點，一般人大概看不懂。我簡單把最重要的三個重點解釋一下：1) 于敏是天才級的核物理學家；2) 他的氫彈研究從頭到尾都是獨立進行的；3) 但是最終設計，殊途同歸，和美蘇的氫彈並無根本性的差異。