從鈾到釷
——即將來臨的世界核能革命

●吳俊、梁培燈

2025年11月1日，中國科學院宣布，由上海應用物理研究所（以下簡稱「上海應物所」）牽頭，在甘肅省武威市建成的兩兆瓦釷基熔鹽實驗堆（Thorium Molten Salt Reactor, TMSR-LF1）首次實現「釷—鈾」核燃料轉換，並獲得釷置入熔鹽堆後運行的實驗數據，成為目前國際上唯一運行的釷基熔鹽堆①。這是核能研究領域的一次里程碑式的突破，不僅鞏固了中國在世界熔鹽堆研究領域的引領地位，也有可能深刻影響全球的能源格局。

核能的研究始於1938年，德國科學家哈恩（Otto Hahn）與斯特拉斯曼（Fritz Strassmann）發現了核裂變現象。一些不穩定的重核如鈾-235、鈾-233、鈈-239在中子撞擊後分裂成兩個較小的原子核，同時釋放多個中子及大量熱能。被釋放的高速中子繼續撞擊其他重核誘發裂變，形成鏈式反應。如果不加控制，隨着反應繼續，中子數量激增，該系統可以在極短時間內釋放巨大能量，產生爆炸，這就是原子彈的基本原理。1945年，美國成功製造出原子彈，並投放到日本的廣島與長崎，震驚全世界，核時代由是來臨。

第二次世界大戰結束後，科學家試圖馴服裂變反應，讓其持續可控，從而提取其中蘊藏的豐沛能量。這催生了鈾核反應堆的研究與出現，通過精確控制裂變反應的速度，讓產生的熱能在可控情況下緩慢釋放，轉化成為人們可以利用的電能。1950年代就出現了世界上第一座民用的核電站，到目前為止，全球有超過四百座運行中的核電站，提供了全球接近10%的電能②。目前運行的鈾核反應堆主要使用低濃度、約4至5%的鈾-235作為核燃料，然而天然鈾礦雖然富含鈾-238，它卻不會自然裂變，會裂變的鈾-235僅佔0.7%，因此，必須對鈾原料進行提純從而生產能用於反應堆的核燃料。這個過程昂貴且複雜，具有極高的技術壁壘，並受到嚴格的國際管控③。此外，要控制核反應速度與效率，必須吸收多餘的中子並減緩其速度，最常見的是使用水作為中子慢化劑及冷卻劑。這種反應堆需要在高壓環境下運行，一旦失控會

* 感謝陳方正博士邀請撰稿並給予大量細緻的修改意見與建議，謹此致謝。兩位作者能力有限，不足之處，歡迎讀者指正。

發生爆炸。最後，燃燒後的核廢料處理也是一個難題，其中含有強輻射、長壽命放射元素，部分需要封存在地下長達數萬年時間。

針對這些弱點，早在1960至70年代，美國已經發展出更好的替代方案，這就是釷基熔鹽堆的原型。釷基熔鹽堆具有全新的從核原料到核燃料的轉化路徑，它使用「可育材料」釷-232作為核原料，釷-232捕獲中子後會變成釷-233，然後經過兩次β衰變成為鈾-233，鈾-233作為核燃料在反應堆中發生裂變並釋放能量（如下圖所示）：

$$\text{中子} + {}^{232}_{90}\text{釷} \longrightarrow {}^{233}_{90}\text{釷} \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}_{91}\text{鏷} \xrightarrow{\beta^-} {}^{233}_{92}\text{鈾（核燃料）}$$

與鈾核反應堆相比，釷基熔鹽堆具有更高的核燃料利用率，產生更少、放射性更低的核廢料，同時具有更高的安全性能。鈾核反應堆的燃料製備需要提純，工藝繁複，即便如此，也只有低於6.5%的鈾（包含鈾-235與鈾-238）最後實際參與裂變反應④，鈾的整體利用率極低。相反，釷基熔鹽堆通過「釷—鈾」轉化，燃料利用率可以超過50%⑤；並且，產生的核廢料中幾乎沒有長壽命、強輻射的裂變產物，剩下的放射元素半衰期降為三百至五百年，所需封存時間遠遠低於傳統核廢料。除了燃料利用率，熔鹽堆在安全性能上也有顯著優勢。熔鹽堆使用氟化鹽作為核燃料的溶劑與冷卻劑，氟化鹽的沸點高，高溫時保持液態，能在常壓環境中穩定運行。當燃料過熱時，氟化鹽膨脹，自動降低反應速度，原則上幾乎不會產生爆炸的風險，也就是說熔鹽堆在設計上自帶內生的負反饋安全系統⑥。

中國科學院上海應用物理研究所（資料圖片）