

第二十八冊

研究用反應器

譯者：陳方顯

目 錄

導 言

研究用反應器的詳細說明

中子怎麼產生的.....	3
中子有什麼用途.....	5

如何描述反應器

實驗設計.....	6
各種類型反應器之比較.....	10

研究用反應器之安全

研究用反應器之分類

石墨反應器.....	13
水鍋反應器.....	15
水池反應器.....	16
匣型反應器.....	20
重水反應器.....	23
脈衝反應器.....	24
高通率反應器.....	28
特殊的反應器.....	29

怎樣利用研究用反應器做實驗

飛時度量.....	31
化學.....	32
生物與醫學.....	32
食物以及農業研究.....	35

訓練研究用反應器人員

研究用反應器之展望

研究用反應器

原著：FREDERICK H. MARTENS

and

NORMAN H. JACOBSON

譯述：陳 方 顯

導 言

人類中之傑出者創造、改良並應用一些機械及發明來開拓未知世界。通常，一般人都把用來發明的機械以及其操縱者想像得特別重要。當然，並非所有用來探求未知的工具都像太空囊或深海探測艇一樣的富於吸引力，或者像粒子加速器一樣獨特，也不都像許多東西，如顯微鏡的平淡無奇。

反應器的地位居於這些極端之間。

無疑的，反應器已非常有名。領我們進入原子時代的第一座維持鏈反應的原子堆（chain-reaction-sustaining pile）（註1）廣爲人知。在潛艇及發電廠，反應器也已經贏得了它的地位。

自1941年以來，世界上已建造了成百的其他類型的反應器，交給科學人員管理及運用。但，研究用反應器的貢獻却鮮爲人知。

時至今日，興建一座反應器的研究工作，已發展成爲包括高度科學與技術的許多分支。從事此項研究的國家遍佈各洲。此種努力之重要性很少被高估過。有些實驗者用研究用反應器來模擬及預測核子動力火箭在太空中其四周輻射情況。另外有些，在研究用反應器中收集金屬因輻射而產生的損害情形，輻射對人體的影響以及用輻射來治療惡性腫瘤的知識。

（註1）“堆”這個名詞是早期原子時代通用的名詞。其原因是因爲這座反應器是由石墨塊及鈾塊堆成的。

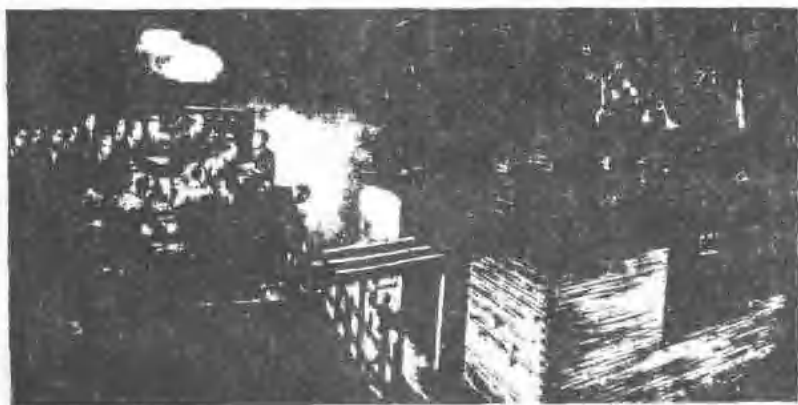


圖 1 在 1942 年 12 月 2 日美國芝加哥大學校園內建成的第一座能自持鏈反應的核反應器（堆），圖示其完成情況。

同時，研究用反應器也是放射性同位素的來源。這些放射性同位素可做科學實驗、工業應用、食品照射、動植物的突變以及解決無數分裂化學（fission chemistry）、地質學、礦物學和其他各種科學上的問題。

目前，世界上有三百座以上的研究用反應器正在運轉。數以千計的科學家及專門技術人員已經或正在接受政府機關、工業機構或大學的有關此種反應器的訓練。

在許多的大學裡，研究用反應器是核子科學、工程、輻射研究的焦點。

研究用反應器的詳細說明

什麼是研究用反應器？我們可以採用美國標準聯合會（American Standards Association）對於研究用反應器的描述：研究用反應器乃是供給中子以及（或者）伽瑪射線以用來研究應用物理學、生物學、化學或輻射對各種物質的影響的一種設計。它的特徵是有長的圓洞以使中子及伽瑪射線離開核心（Core）。通常，此種反應器可供

給某些同位素。

在這個定義中包括了一些不常見的名詞，例如：中子。中子是在所有比氫原子重的原子中都能發現的不帶電的基本粒子。在一些核子反應（nuclear reaction）中被核子放射出來。這些反應包括：核分裂（nuclear fission）及核融合（nuclear fusion）。這樣放射出來的中子是不穩定的，但有高度的滲透力，能再參與其他的核反應，分裂的鏈反應因此得以維持。要知道這些其他的特殊名詞可以查本叢書的第十四本核術語簡釋。

所有的反應器，不論研究用或生產用，都有下述的基本功能：在可控制的安全情況下，發生中子鏈反應。（註 2）

下列各組成分子，在各種反應器中均可找到：

1. 燃料，鈾，它能分裂而產生能量。
2. 緩和劑，它能使中子減低速度以產生穩定的分裂。通常用水（利用其中之氫原子）、重水、鈹或碳做緩和劑。越輕的元素越適宜做緩和劑之用。
3. 冷却劑，它流經核心以移去核心因核分裂所產生的熱量。
4. 反射體，包在核心四周（一些從核心逸出之中子與反射體之原子碰撞而回到核心）。用做緩和劑的材料同樣適宜做反射體。
5. 控制系統，用以調整反應速率的快慢。
6. 屏蔽，可以吸收大部份自核心逸出之強烈輻射。

以上各部份常常不只僅有一種功能。例如在一些反應器中緩和劑同時也可用做冷却劑，反射體或屏蔽。

中子怎麼產生的

現在我們要問，到底研究用反應器怎樣產生科學家們所需要的粒子及輻射線？

（註 2）關於核能的其他知識可見本文庫“3 我們的原子世界”及 9 “核反應器”。

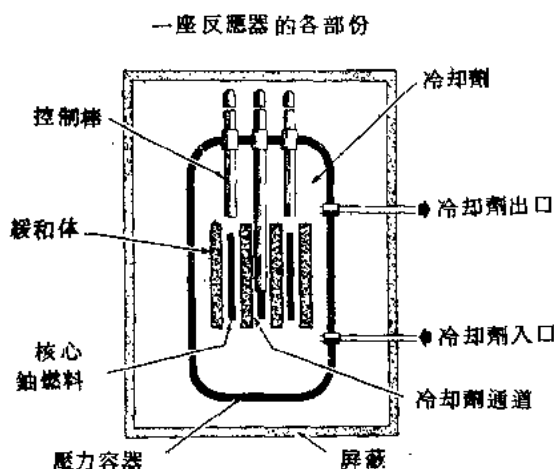


圖 2 一座反應器可以說是一座原子火爐。在反應器中核燃料中的原子在控制下分裂，其能量可做有用的功。這個簡單的圖標示出其基本部份。

在研究用反應器內，燃料永遠是鈾。通常濃化（enrich）其可分裂同位素（fissionable isotope）鈾-235 之含量。當中子撞擊到鈾-235 時新能產生分裂。分裂時，分成兩個有幾乎相等質量的分裂碎片，以及二到三個中子和大量的能量。放出的中子能再進入其他的鈾核中以重複此項反應。這一系列的事件——一個中子進入鈾原子，鈾原子分裂，放出更多中子，一個或多於一個中子進入另外鈾原子，叫做鏈反應。（開始鏈反應的中子來自中子源以後將會論及。）

反應器設計的目的就是在使鏈反應的進行得到控制。

在一次分裂之中平均有 2.54 個中子被放出，如果反應器要繼續運轉的話，其中必須有一個維持鏈反應。如此每產生一百次分裂，便剩下一百五十四個無用的中子，其中一部份被組成反應器之各部份所吸收，另外一部份被鈾吸收但不產生分裂。但大部份離開反應器的核心，以做為其他實驗之用，這是研究用反應器所特許的。

一些在分裂過程中所產生的能量，以伽瑪射線之形式放出，它較 X 光的能量高。因為伽瑪射線有強的穿透力，必須用厚水泥牆環繞核

心以保護使用者的安全。分裂時產生的分裂破片也具有放射性 (radioactive)，這更增加了屏蔽的需要。

中子有什麼用途

研究用反應器最主要的功能之一就是產生中子，中子之性質在研究上有重要用途。中子比其他基本粒子的質量較重與質子的質量幾乎相等，是電子質量的 1850 倍。因為它的質量大，就是在緩慢運動時也具有相當高的能量。如果一個中子，用來穿透物質，則因其運動緩慢，增加了許多與該物質作用的機會。

中子的另一特性是不帶電荷。所以它能穿過原子中的電子壳 (electron shell)，並且能進入或接近核子而不被正電荷偏折。

科學家最感興趣的是幾種中子與其他物質的反應。其中之一是中子吸收，在這種作用中，一個中子進入靶原子核而成為其中的一部份。科學家們用不同速度的中子撞擊不同的靶，研究它被吸收的或然率，以及所形成的新的同位素的性質。(註 3) 新產生的同位素通常具有放射性，有助於對物質基本構造的瞭解。也可以用來做放射示踪劑 (radioactive trace)，把它加在另一種物質上以觀察其運動及放射性。

中子散射 (neutron scattering) 是另外一種在科學上有興趣的作用。中子能與其他物質發生散射。科學家們從其散射情況來研究靶物質的結構。

反應器是中子最主要的來源。但少量的中子也可以用其他方法得到。例如用阿爾伐粒子撞擊鉍原子核，或用高能量的伽瑪射線也可以，其反應可生一中子。稱做“ α, n ”反應，及“ γ, n ”反應。如果重氫或氘被足夠能量的粒子所撞擊的話也能產生中子。

(註 3) 同位素是化學元素的不同形態。一種元素的同位素，其原子核具有相同數目的質子，但是中子數目不相同。

如何描述反應器

一座反應器可以用其特點來描述它。反應器的大小通常用“功率”(power)(註4)以及“中子通量”(neutron flux)來表示。研究用反應器的功率大小範圍從10 仟瓦到10 百萬瓦。任何反應器產生的功率低於一佰萬瓦稱為“低功率”一至五佰萬瓦稱為“中功率”，超過十佰萬瓦稱為“高功率”。

反應器最主要的區分可能是中子通量；也就是對中子強弱的一種量度。中子通量的定義為：每秒鐘通過每平方厘米的中子數。它不只與放出中子之個數有關，也與其速度有關，所以可以用每立方厘米的中子數與其平均速度的乘積來表示。通常單位是中子/每平方厘米一秒。中子通量簡寫為 nv ，設在反應器中有一處每秒每平方厘米通過百萬百萬個中子則其中子通量為 $10^{12}nv$ 。幾乎所有的研究用反應器都有比這個高的中子通量。中子通量高於 $5 \times 10^{14}nv$ 的稱做高通量反應器。所有的反應器中，通量最高者為 $10^{16}nv$ 。

反應器也可以用其他方法來分類，如核心容器，緩和劑的材料，以及採用何種燃料等。

實驗設計

把實驗儀器造在研究用反應器中，以便有效地運用其中子及其他輻射。多數的研究用反應器都具有實驗管(beam tube)、熱中子室(thermal column)、試樣管(sample tube)、照射梭(rabbit device)以及其他特殊儀器。典型之設計如圖三之水池式研究用反應器剖視圖，以及圖四之TRIGA反應器(註5)。

(註4) 功率(power)，能量形式轉換的時變率。量度的單位通常為瓦特。一個仟瓦是一千瓦特，一個佰萬瓦是一百萬瓦特。反應器的功率是反應器內的熱所做的功的速率，稱為熱瓦特。有些反應器產生蒸汽推動發電機而有電力輸出，則用電瓦特來量度。

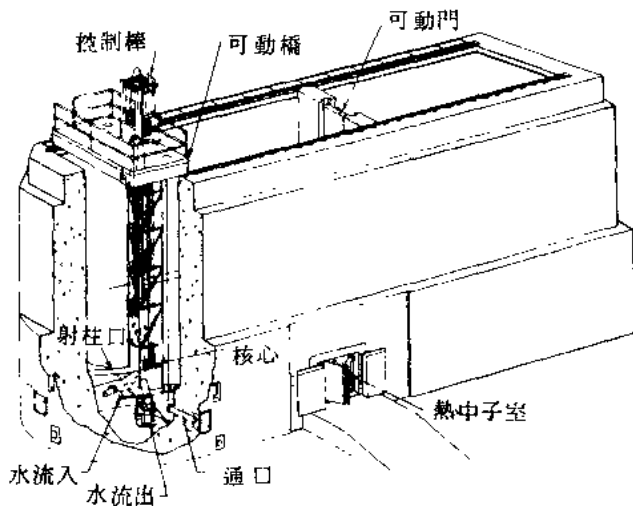


圖 3 水池式反應器的實驗儀器，這些儀器在其他類型的
研究用反應器中大部份也有。

研究用反應器內共同的實驗設備有下列六種：

1. 實驗管，是一根空管，從核心或核心附近通達屏蔽表面，它使中子能自由到達屏蔽外之實驗設備。屏蔽上通常有門或照射開關（shutter）當我們不需要中子的時候，用來關閉中子射性（neutron beam）。它的作用如同照像機上的光開關一般，不過它有兩英尺厚並且移動緩慢。圖五是一個半開的照射開關。科學家常利用一些其他的東西以使射柱的形狀規則化，以符合我們的需要。通常我們需要的是錐形射柱，因此要用準直儀（Collimator）或聚焦器（focusing device）去掉所有不在我們需要的方面及範圍的中子。如果伽瑪射線實驗的進行有干擾，還要加上銻或鋁過濾器（filter），它能吸收伽瑪射線但中子能自由通過。

（註 5）TRIGA 是 Training, Research and Isotope Production Reactor - General Atomic（訓練、研究及同位素生產）的簡稱。

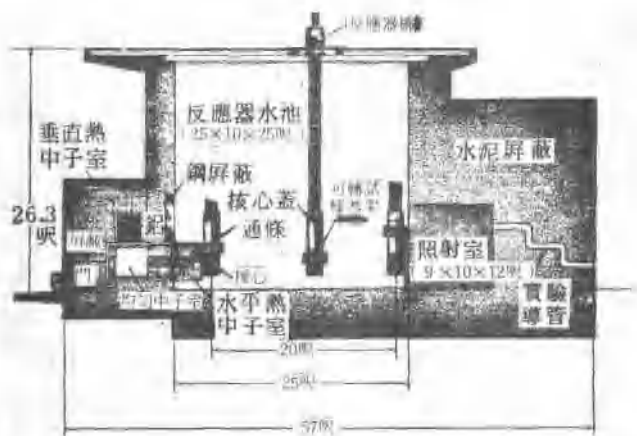
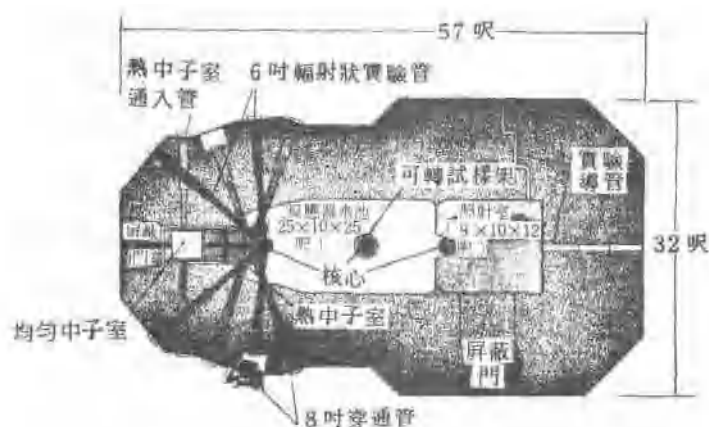


圖 4 水池反應器及其實驗裝置之垂直與水平剖面圖。大的照射室有很多用途。注意核心的三個位置。均勻中子室(hohlraum)是被良緩和劑圍繞的一個空間，在這裡我們可以有幾乎均勻的中子通量。四周細點的區域都是屏蔽。

圖 5

一個射柱照射開關打開時之情況。射柱管的底端，可從照射開關上面看見。



2. 照射梭 (rabbit)，使試樣能很快地很容易地放入高中子通量區域。試樣放在運送工具上，利用空氣或水的壓力經一根管子進入核心。照射完畢後直接送回實驗室以供研究。
3. 熱中子室 (thermal column) 是從屏蔽一直到反射體邊緣的一個開口，充滿着能使中子減速但不吸收中子的物質，最普通的是石墨，它不但產量豐富、便宜而且還便於精確製造。其他物質如 D_2O (重水) 以及鈹、二氧化鈹也可以用來充塞熱中子室。從熱中子室逸出之中子已失去其大部份之能量，所有的只是熱平衡時的能量，所以英文名字叫 **Thermal neutron**，也就是熱中子。(譯者註：其速度為 2200 公尺/秒或稱慢中子。)
4. 穿通管 (through tube)，是經由核心而穿過整座反應器的長管，試樣可在其中接受照射。如果因某種理由在核心一端的實驗裝置不能移動，而被照射物又要時時更換的話，照射物能從核心另一端進入。最常見的情形是用以研究物質被中子照射後放出伽瑪射線的情形。
5. 試樣照射管 (sample irradiation tube)，把試樣帶進中子強度最高的區域，在那裡可把裝有試樣的容器放入，暴露至所需要的程度後即移入一有屏蔽之容器內做進一步的

研究之用。這種管子有助於半化期（half life）（註 6）短的物质之研究。

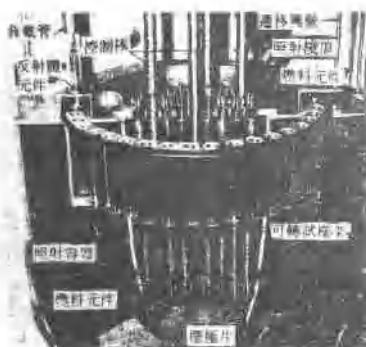


圖 6

石墨反射體核心實驗設備的剖視圖，如可轉試樣架及充氣照射梭。輕水反射體核心的實驗設備亦類似。

6. 試環（test loops），在核心內維持長時間的一定情況照射。用冷水或空氣流經試樣。同時裝置熱偶（thermal—couple）以測量及控制溫度。

定溫試環之各部及冷卻試環裝置見圖七左側。圖七之右側為此裝置之中子放射性照像。此相片與X光相似，不同的是中子用來產生影像。

此外，我們感到興趣的裝置是可轉試樣架（rotary specimen rack），圍繞著爐心而間隔均勻的鋁杯盛著試品容器。架子的旋轉使得四十種試樣受到相等而且同時的照射。

各種類型反應器之比較

反應器因其用途及設計目的不同，可分為各種不同的類型。我們可從各種類型反應器的比較中來學習研究用反應器。

所有的反應器都產生熱、輻射及分裂產物。如果在高溫下利用其

（註 6） 一個放射性物質的半化期，是它的放射性強度減低至原有一半時所需之時間。一個短半化期物質的放射性很快就會消失。

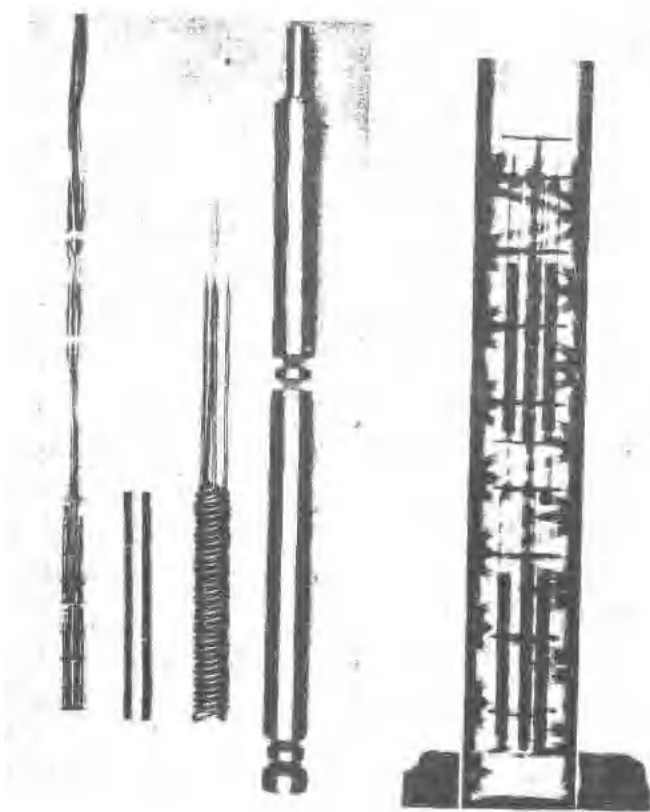


圖 7 研究用反應器內定溫裝置之各部份。左側為裝置前之試樣架及冷卻環。右側為此裝置之放射性照片，黑影為試樣架周圍之環。

熱能，就得把輻射“拋棄”。要用其輻射，熱能就不能兼顧。至於分裂產物，雖然有時能做輻射源，但通常都當做廢料處理掉。

動力反應器（power reactor）——用途是發電——其核心必須有很高的溫度。水蒸汽或加壓水在核心中熱達華氏五百度以上，其溫度愈高效率愈大。但在研究用反應器中，冷卻劑很少有熱到沸點以上的。同時，因為許多實驗要在一定的溫度下進行，研究用反應器的溫度要儘量保持一定。

儘管我們不須要高溫，研究用反應器還是會產生二百萬瓦的熱能，這些熱能可供附近居民發電之用。但，事實上研究用反應器內所生的熱，帶給我們的麻煩遠比好處為多。它必須由冷卻系統以移去其熱量，對於研究人員不但麻煩而且不經濟。

水雖然是研究用反應器中常用的冷卻劑，但也可用空氣，二氧化碳及氦等。

因為在研究用反應器中之水不沸騰，所以用來裝核心的容器不必承受水蒸氣的壓力，它的強度只要能承受核心的重量即可，這種槽通常用薄於一英吋的鉛製成。但在動力反應器中却起碼要四英吋厚的鋼。

生產反應器 (production reactor) 是用來生產自然界不存在之同位素的反應器。最常用的是用來生產鈾，鈾可用來做其他類型反應器的燃料，或製造核武器。鈾反應器是一種能使鈾-238 捕獲多餘的中子然後蛻變成鈾的設計。有些反應器用中子撞擊穩定元素而產生放射性同位素，也稱為生產反應器。

最後我們要區分一下研究用反應器 (research reactor) 以及實驗反應器 (experimental reactor)。研究用反應器是用來產生供實驗用之中子，實驗反應器本身就是一個實驗，它用來實驗一種新設計的好壞，而不供外來研究，通常是為試驗一種新的動力反應器而造。

研究用反應器之安全

研究用反應器在美國有很良好的安全記錄。其安全性藉着“差錯—安全”(fail-safe)裝置予以保障，這是一套行動很快速的電子儀器停機(shut-down)設備。同時也藉着一套永遠能確保安全的燃料元件設計，這種設計與電子儀器不發生任何關係，能在動力脫離(excursion)(註7)時自動停機。

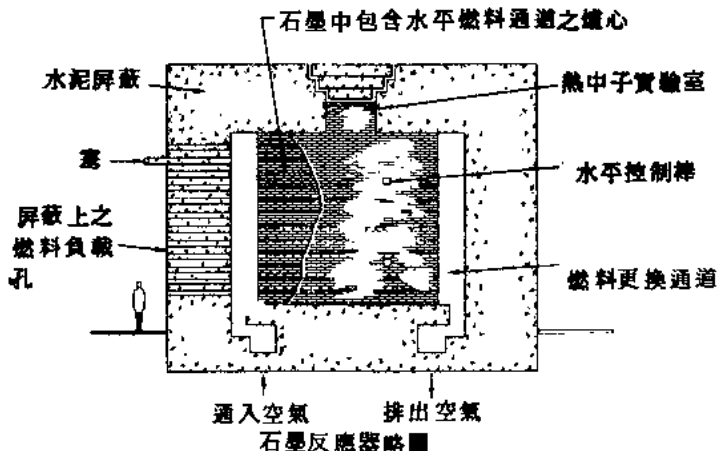
研究用反應器之分類

反應器有時用“均勻”性 (homogeneous) 及“非均勻性” (heterogeneous) 來區分。多數的反應器都是非均勻性的。在這些反應器裡，燃料與緩和劑分開，同時是個別的放在燃料元件 (fuel elements) 內。均勻性反應器之燃料是與緩和劑，冷卻劑相混合，例如 TRIGA 及水鍋反應器，以後都會論及。

研究用反應器的設計，因採用的燃料、冷卻劑、緩和劑及操作方式的不同而分成很多種。現在我們逐一討論之。

石墨反應器

因為緩和劑是石墨做成的而得名。其體積是各種類型反應器中最大的。第一次鏈反應就是在石墨塊與鈾燃料合成的原子堆中產生的。幾年以前，美國建造了幾座石墨反應器，但是現在已不再建造或設計新的石墨反應器了。美國橡嶺國家研究所 (Oak Ridge National Laboratory) 的研究用石墨反應器，在運轉二十年後業已關閉。純石墨有使中子減速的能力，同時對中子只有很小的吸收力，這兩種



性質使得石墨或為優良的緩和劑。用石墨做緩和劑，使核心有很大的體積。這些因素的合成，導致可以用自然鈾（99.3%的鈾-238，0.7%的鈾-235的混合物）做燃料，而不必用價格昂貴的含有較多鈾-235的濃化鈾。

在紐約的額普頓地方的布洛克海文國家研究所（Brookhaven National Laboratory at Upton, New York）的石墨反應器是美國建造的最後一座石墨反應器。它從1950年幾乎連續不斷地運轉到現在。燃料可放入在這座反應器中二十五英尺見方的負載面（loading face）上的1380個洞中任何的洞內。要變成放射線同位素的元素，也可放入這些洞內。有三十根實驗管穿過石墨及屏蔽。

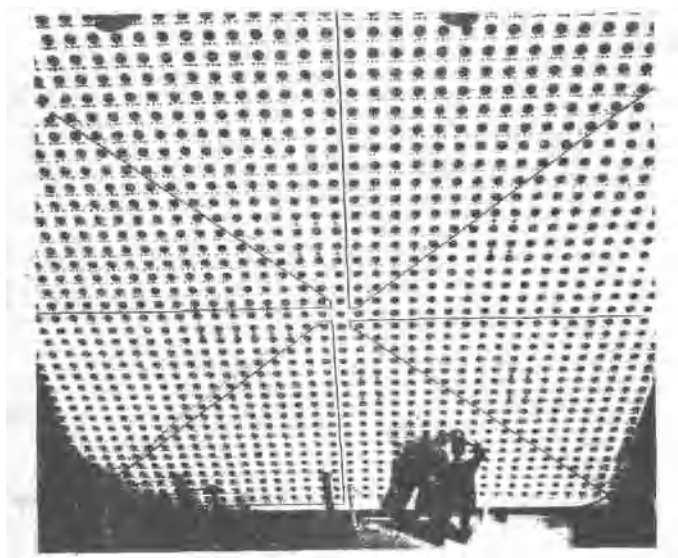


圖 8 在布洛克海文石墨反應器中兩端負載面上洞的行與行之間隔為八英寸，同時指示出鈾在石墨中的排列。這些洞同時可置放其他放射源之物質。在這張照片中的技術人員在放置物品時是站在可任意升降至任何高度的電梯上。當用石墨工具或其他遙控設備操作時用潛望鏡來觀察輻射源。並且有一座五英尺厚的重水泥牆以保護其不受輻射傷害。