

第十四冊

太空中的核動力

譯者：李偉德



緊張忙碌的科學家與技術人員們，正密切地注視著儀表。這是內華達州的核火箭發展站的控制大樓，正在進行著核火箭試驗。

目 錄

太空旅程的能量·····	1
核火箭如何工作·····	1
從第一個構想到“內華”·····	8
太空船引擎的建造·····	21
深入沙漠九十哩·····	36
火星及其他星際火箭引擎·····	44
附 錄：字彙及代號	

太空中的核動力

原著 William
R. Corliss

譯述 李偉德

§ 太空旅程的能量

太空旅行的奧秘主要在於能量——極大的能量才能擔負此一重任。第一節農神五號月球火箭，每秒鐘可產生相當於一百萬部汽車引擎所產生能量的總和。核分裂產生的能量非常巨大，正適合太空動力所需，因此在不久的將來，利用核動力的太空船終究能穿過太陽系，把人類載到更遠的星球。

但是鈾原子核分裂所產生的能量並不容易控制，我們所要尋求的是：原子核分裂所產生的幾乎為無窮盡的能量，與唯一具備有衝向太空能力的火箭相結合的方法。這個具有約三十年歷史的核分裂與千年歷史的火箭相結合，其困難就是本書的主題。

美國原子能委員會主席：謝堡（Glenn T. Seaborg）曾經說過：「我們費盡苦心去製造的是密緻的反應器，不比一個辦公桌大，但却能在數分鐘內由冷而運轉放出胡佛水壩般大的能量。」

§ 核火箭如何工作

遠在上古時代人類站在木筏上以長竹撐岸邊，木筏離岸划行，就利用到火箭昇空的原理。此時人們雖深受此原理運用之益，却未能深思其所以然，直至牛頓發現其第三定律：*“每一作用力都有一個

*愛薩克·牛頓爵士（Sir Isaac Newton）是英國天才科學家，發現運動三定律等著名學說。（1642-1727）

和它大小相等，方向相反的作用力存在。^{*}人的作用力；用竿推動岸邊，於是木筏受反作用力向湖心划去。

事實上，我們可不必藉著某物體的推動而得到反作用力，假如我們站在木筏上向岸上擲石子時，每當一顆石子離開手中，人和木筏就會離岸遠一些。這個道理亦可適用於沒有空氣的太空，我們想要使火箭向某一方向推進，就要把某些物件向著反方向拋射，用什麼物件拋射呢？當然不會再用石子了，代替這些石子的，一般是以化學燃料推動的火箭，噴出咆哮怒號的燃燒氣體，而其效果是相同的。在核火箭方面，利用鈾原子核分裂^{*}產生的能量，以使得某些物質推到火箭後面，這些問題將要在本書詳細解釋。

化學燃料火箭引擎、噴氣機引擎、汽車引擎——事實上，大多數人類所發明的引擎——都是從燃料得到熱量，由於氣體膨脹作功，轉變成動力。核火箭也是從這相同的道理萌芽，它也要製造高熱高壓的氣體，然後轉變成衝力。所以說核火箭是“蒸汽噴壺”的直屬後裔，並不為過。蒸汽噴壺還“反動引擎”相傳是西元一兩個世紀前，一個著名的亞歷山大工程師赫洛（Hero）所發明的。

我們很容易瞭解熱氣體在引擎的燃燒室內如何的膨脹，推動活塞



人類所發明的第一具“反動引擎”，赫洛的蒸汽噴壺，蒸汽由兩管中噴出，使得圓球轉動。

^{*}欲知核分裂的詳細說明可參看本文庫“我們的原子世界”。

，爲人類作有用的工作。活塞因熱氣體的膨脹而被推動。火箭的引擎也是以相同的方法工作，只不過活塞被火箭的噴口代替罷了。化學燃料或者是核分裂產生的熱量加熱，使氣體急驟膨脹，從火箭的噴喉中急速排出，對噴口壁產生了壓力，推動火箭噴口（以及整個火箭）而上昇。推動火箭噴口的壓力是推出熱氣體的反作用力。

讓我們從另一個觀點來看：每一個被排出火箭的氣體分子，就像一顆小子彈從槍管中發射出來，假如把火箭的引擎想像成一支能連續發射，並且可同時發射許許多多氣體分子構成的小子彈的槍管。這樣，我們的假設就漸漸的接近事實了。

如果我們秤出這些分子“子彈”的質量，並且測量出小子彈的“槍口速度”，那麼火箭的衝力就可以由下面一個簡單的方程式計算出來。

$$F = \dot{m} v$$

F = 衝力（單位是牛頓*）

$\dot{m}$ * = 子彈或者是氣體分子每秒鐘放出量
（單位是公斤／秒）

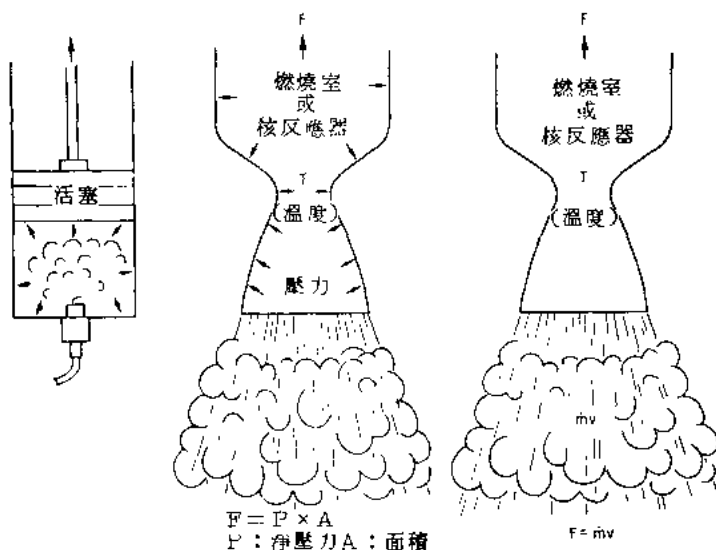
v = 槍口子彈的平均速度，或者是沿著火箭中心
軸的噴氣速度（單位是公尺／秒）

把公式 $F = \dot{m} v$ 變化一下： F 除以 $\dot{m}$ 得到 v ，這條式子表示每秒鐘單位質量的推進劑所能產生的衝力等於噴口的排氣速度。換而言之，小子彈或推進劑氣體分子的速度愈高，我們每秒從一公斤噴出的推進氣體所得的衝力也就愈大。一具優良的火箭需要很高的排氣速度，因為我們可以用較少的推進劑（propellant，例如化學火箭的燃料）完成整個太空任務。現在談到本書的主題：以核動力應用到太空動力方面。爲什麼要應用核動力呢？化學燃料的火箭不是很好嗎？我們下

* 爲了紀念牛頓而採用的力的單位，一牛頓等於每秒每秒使一公斤的質量加速一公尺所需的力。1牛頓 = 0.225 磅

• 牛頓的發明把符號上加一點以表示改變率。例如 V 爲速度， $\dot{V}$ 就爲加速度。

面就要證明應用核動力的火箭，其排氣速度約兩倍於現在一般的化學燃料火箭。排氣速度高是核火箭的最大優點，這是我們必須建立的第一個觀念。



下一個問題是：應用核動力的火箭，如何能得到很高的排氣速度呢？其關鍵在一個簡單的熱力學方程式：

$$v \propto \sqrt{T/M}$$

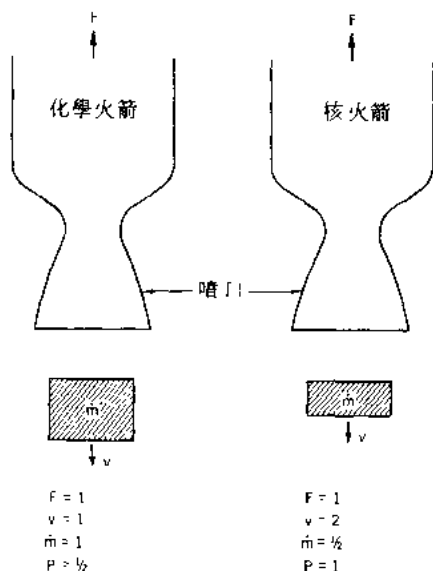
這公式說明：任何火箭的排氣速度與 $\sqrt{T/M}$ 成比例。

其中 T = 熱氣體剛進入噴喉時的溫度。（單位是絕對溫度）

M = 排出氣體的平均分子量。

顯而易見我們要得到很高的排氣速度 v ，必須使 $\sqrt{T/M}$ 增大。

知道了溫度和分子量決定速度後，讓我們先討論溫度—— T 。化學燃料的火箭，燃燒推進劑所能達到的溫度接近 $3000^{\circ}K$ *，根據公式 $v \propto \sqrt{T/M}$ ，若在 M 不變的情況下，核火箭要得到兩倍的速度



核火箭的排氣速度兩倍於化學火箭，因此在相同的衝力下，噴出的推進劑質量可減半，而功率却倍增。

，溫度就要增加到四倍的化學火箭燃燒溫度，即 $12000^{\circ}K$ 。這溫度高於太陽表面的溫度，太可怕了！實際上，今日核火箭內的核反應器（Nuclear Reactor）也只能維持到 $3000^{\circ}K$ ，與化學火箭內燃燒溫度約為相同。

爲了避免陷於絕境，讓我們考慮另一決定排氣速度的因素——排出氣體的平均分子量 M 。我們要減少 M 而不是增加 T 。在用化學燃料燃燒的火箭， M 不可能比 18 低很多，因為一般經常使用的氧化劑多

* 凱氏溫度（Kelvin）以 $^{\circ}K$ 表之，從絕對零度計起，每一度與攝氏（Centigrade）大小相同。 $0^{\circ}C = 273^{\circ}K$ 。

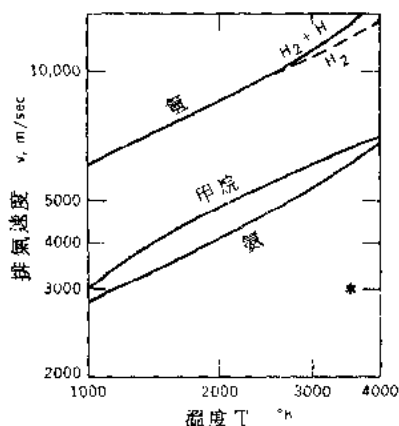
爲重原子。例如最近一種高級人馬座（Centaur）火箭，其引擎是以氫爲燃料，以氧爲氧化劑合成水蒸汽（ H_2O ）從噴口噴出， H_2O 原子量爲 18，因此化學燃料火箭的排出氣體速度，主要受到燃燒產物較重分子量的限制，只要是化學火箭用氧或氫或是更重的物質作氧化劑來燃燒，那麼排出氣體的平均分子量就不能比 18 來得低，化學燃料火箭噴口的排氣速度，就不能大量地改進。

可是在以核能爲動力的火箭，事情就大爲改觀了。燃燒不再成爲必要的步驟，原子核的分裂也不需要化學方法促進，火箭的推進劑不再是引擎的燃料，只是在核反應器內，接受原子核分裂產生的熱量加熱，因此火箭內的燃料不必起化學作用與氧化劑燃燒成較重的分子。一個核火箭的設計者能使用任何推動火箭的物料加熱，只要這些物料不與反應器內的燃料元件（fuel element）起化學作用。核火箭高度的噴口排氣速度的秘密立刻呈現在我們眼前——利用較低分子量的物料作爲推進劑。

在設計一具核動力火箭，大家一定首先會選擇氫爲推進劑，因爲氫的分子量最低只有 2。其他有可能的一些物質是：甲烷（Methane CH_4 ）其原子量爲 16；氨（Ammonia， NH_3 ）其原子量爲 17，水（Water， H_2O ）其原子量爲 18。這些物質對燃燒汽油的火箭來說，可視爲很大的改進，但對以氫爲燃料，氧爲氧化劑的化學火箭來說，則無甚裨益，因其分子量近於 18。但在早期核火箭的發展上，氨和甲烷簡直可與氫匹敵，因爲氧在當時被認爲是一種不安定、易起爆炸的物質，並且須在攝氏零下 253 度以液態儲存，除此之外氫與甲烷在 $3000^{\circ}K$ 左右時，分子互相激烈碰撞下可大部分解。甲烷在完全分解下成五個成分原子（四個氫原子，一個碳原子）使分子量由 16 減到 3.2，因此甲烷更有希望成爲火箭的推進劑。然而氫最後終於贏得勝利，被選爲推進劑。主要因爲氫的危險性被解決了，並且我們需要更高的排氣速度，純氫才能完全發揮核火箭的潛力。

氫氣分子也可在高溫下分解*，但是因爲氫鍵 $H-H$ 結合得很牢

* 氫氣， H_2 ，是由兩個氫原子組成的分子。



*液態氫 - 液態氧引擎，在每平方英寸 500 磅壓力下運轉。

排氣速度與溫度的關係圖表，以氫或甲烷為推進劑的核火箭不比氫氧化學火箭好多少，而以氫為推進劑的核火箭是最為優越的。

固，不易打破，在目前的核火箭反應器所能達到的溫度下，只有少部分能分解，是可以被忽略的。如果溫度能達到相當高，使氫以原子狀態下存在，核火箭的推進劑是氫原子而不是氫分子，則 $M = 1$ ，噴口的排氣速度又增加成為以氫分子為推進劑的 $\sqrt{2}$ 倍，這種發展還要等到將來才能實現。第一次試驗運轉的核動力火箭是以氫分子為推進劑，其分子量為 2，代替了化學燃料引擎——以氫氧燃燒成水分子，原子量為 18 的推進劑。於是核動力火箭的噴口排氣速度能倍於同溫度下的化學燃料火箭。

核動力火箭的噴氣速度加倍，還有一個更重要的結果：那就是核分裂的熱源可產生更高的功率 (power)，一個簡單的功率方程式，是由噴口推出氣體的動能 (kinetic energy，簡寫為 K.E.) 方程式導得的：

$$\text{K.E.} = \frac{mv^2}{2}$$

而功率 P 是能量產生的時變率，於是 $\dot{m}$ 代替 m ，功率 P 代替了動能 K.E.。因此

$$P = \frac{\dot{m} v^2}{2}$$

利用這個方程式，以及以前所討論的方程式 $F = \dot{m} v$ ，各位讀者就很容易從以上兩個方程式得到以下的結果：如果把衝力這一項固定一值，並且排氣速度加倍，每秒鐘噴出的推進劑質量就會減半（合於我們的要求），而所需從事此工作的功率就會倍增。增加噴氣速度的代價就是增加功率。從以上關係我們可看出另一個核火箭的重要優點：那就是蘊藏在核燃料（Nuclear fuel）內的大量能量可轉變成很高的噴氣速度。

歸納以上的討論，我們得到三項基本觀念，這三項結果必須先深入我們腦中，才能使我們了解為何選擇核火箭作為太空旅程的動力。

1. 核動力火箭能轉變核分裂的熱能，成為火箭推進劑的動能。
2. 傳統的化學作用——燃燒是不必要的，所以核動力火箭可選取分子量很小的物質作為火箭的推進劑，而得到很高的排氣速度。
3. 核分裂產生的能量遠比同質量的物質，以化學作用——燃燒產生的能量大得多，所以核燃料蘊藏的能量極充沛。

於是我們能對核火箭的開拓者，如何來利用核能，在高溫、低分子量下設計引擎；如何進一步把人類帶到其他星球上，有一個概略的認識。

§ 從第一個構想到“內華”

“義大利的領航員，已經在新世界登陸”（“The Italian navigator has landed in the new world”）這是亞瑟 康普頓（Arthur Compton）傳電給其他從事核子研究的美國科學家們的密語

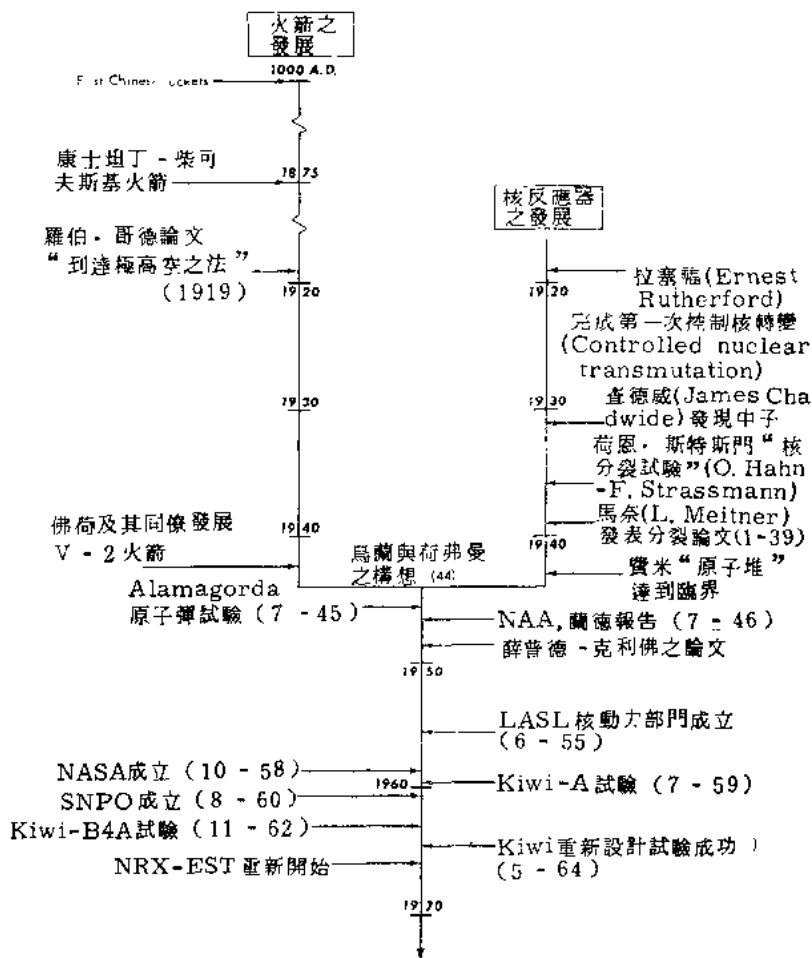


美國議會航空暨太空科學委員會主席，以及原子能聯合委員會（屬於國會）的會員；新墨西哥州的參議員安德遜（Clinton P. Anderson）在訪問洛斯·阿拉莫斯科學試驗所時，觀看「鵝駝」火箭噴口。

標題。當時美國原子能之父費米*（Enrico Fermi）完成人類有史以來第一次的自持核鏈反應（Self-Sustaining nuclear chain

*費米。出生於義大利的諾貝爾獎金得主，在1938抵達美國，領導研究，建造了人類歷史上第一個核反應器。

火箭與核反應器發展年表



reaction)。精確的時間是1942年，12月2日下午3時20分，在芝加哥大學足球場西區看台下。從這偉大的、奇妙的一刻開始，人類真正走上了一個原子能的新世紀。當費米慢慢地把吸收中子的鎳

棒從鈾和石墨堆中抽出時，展開了一個新的里程碑，較康普頓電話中的預言甚而過之。費米不但發現了原子的新世紀，並且給人類帶來新的能源，使人類能向地球之外的世界探險，這真是一個值得紀念的日子。

費米的成功，立刻引起科學家與工程師的想像，把核子研究的結果應用到每一種建設事業，其中對利用原子能探險太空者亦不乏其人，1944年烏蘭與荷佛曼（Stanislaus Ulam and Frederick de Hoffman），在新墨西哥中心，不久成為洛斯·阿拉莫斯科學研究所（LASA）沈思著：核分裂產生的動力或許可以控制以應用到發射太空載車。他們二人是從一個偉大的科學虛構小說作者朱利斯·凡得到的聯想。這位大師在1865年的一篇驚人的小說「從地球奔向月球」（De la Terra a la Lune）上描寫包鐵摩槍砲俱樂部發射了一個載人的拋射體到月球的情形，他們是在堪那佛拉角附近，也就是現在佛羅里達州的甘迺迪角安放砲身，用一挺非常大的巨砲來發射。用核子爆炸力量推進火箭從未證明是可以實現的，但烏蘭與荷佛曼啓發了人們的思想，利用較溫和的核子能源——核反應器——從核反應器中，熱量可被安全的控制慢慢的放出。

通常一個理想，若非實際的需要很難有所成就。美國在1945年以前沒有什麼“太空部門”的，但是在第二次世界大戰末期，德國V—2火箭可載1600磅的炸藥飛行230哩，從納粹佔領的歐洲大陸一直飛到倫敦，給予盟軍很大的打擊。於是美國在發展火箭方面進展很快，各種構想與設計紛紛產生，如果V—2火箭能攜帶原子彈頭不是更具摧毀力嗎？這個構想在技術上未被解決。不久在美國各地洲際彈道飛彈（ICBMs）的設計開始，圖板的製做開始成形，有些巨型火箭的設計是兩頭都用核子裝置——核彈頭與核動力引擎。北美航空公司和道格拉斯飛機公司（核火箭研究計劃 Project Rand）在1946年6月提出秘密報告，為核火箭的發展史上立下了一塊里程碑。這兩家公司的報告上，特別指出這個“熱傳導”核火箭的高速排氣、容易獲得非常高的溫度、以及高速率的熱傳導。報告上也同時指出幾項需要解決的問題。

這篇關於軍事火箭的報告自然被美國空軍歸檔到機密部門，然而在馬利蘭州的約翰·荷普金大學（華盛頓特區附近）應用物理實驗室的一群工程師們，雖然不曉得北美航空公司與道格拉斯飛機公司的報告，也不知道洲際彈道飛彈的事情，但是他們所進行的簡直是北美與道格拉斯二公司的翻版，他們的重要發現也正和兩公司相同，並且把這篇沒歸檔的報告在 1947 年 1 月出版。很顯然的，一個工程師只要具備核子與火箭雙方面的知識，憑著一把計算尺和幾張紙不需要很大的助力，就能很容易地發現核火箭的精髓所在。

在 1948 年和 1949 年，二位英國太空學者：克利佛和薛普德，也相繼重蹈著核火箭秘密的基本原理的覆轍，發表於“英國行星協會學報”。在這英國學報出版之前，更有在美留學的中國科學家：錢學森，在麻省理工學院書報討論中，提出他對核子能量應用到火箭上，以及其他“熱噴氣引擎”的研究。核火箭的基本原理，再也隱藏不住了。附帶一提的是薛普德不久成為英國原子能計劃的一個關鍵人物，而錢學森也回到中國大陸，成為共產黨徒發展原子彈的主要角色，這是題外的話了。

但是在 1940 年代的末期，大家對核動力火箭的興致驟然減低，這次“喪禮”主要的導致者是一篇審慎的、卓越的科學技術報告，其結論是核動力火箭應用洲際彈道飛彈是不適宜的。很有趣的是提出這篇報告的，也正是核火箭的作俑者：北美航空公司，該公司並且提到核反應器需要 5700°F (3400°C) 的高溫，這簡直是空想，因為鋼在這溫度的一半就要熔化，有什麼物質可建立一座核反應器能在這種高溫下了操作？很少工程師聽到這麼高的溫度而不為之咋舌的。所以“核火箭”這一名詞也就漸漸的消聲匿跡，只不過在原子能委員會—空軍核動力飛行載器計劃以間接與消極的資助下苟延殘喘著。一位早期的核火箭擁護者，羅伯·布沙德，把此中滄桑分析得非常明白：

“核火箭計劃之所以陷於絕境，一方面是由於大多數的飛彈與火箭專家，他們一點也不懂得核能，只是一味地偏好化學燃料。另一方面是由於大多數的反應器專家

，他們認為整個核動力飛行計劃只是不切實際的狂想罷了。”

大部分核火箭的復興工作都是布沙德先生進行的，他在1950年代的早期，在美國橡嶺國家實驗所（ORNL）的核動力飛行器發展計劃下工作，他覺得早期核火箭的發展太過於消極與保守，他深信在長途旅程：載重量很大的情況下，核火箭一定可以完全成功地勝過化學燃料火箭。布沙德的研究與個人的大力推展終於發生很大的效果，美國空軍在1955年早期再做檢查，以決定核火箭是否能成為洲際彈道飛彈的推進器。

美國空軍的科學家及工程師們都知道，在核火箭的所有問題中，最值得評議的是如何發展一種抗高溫的材料，也就是要找到在3000°K的溫度下還能完好不變的材料。爲了幫助解決這個問題，洛斯·阿拉莫斯科學研究所在雷蒙·虛伯的主持下成立核動力部門，同時另一相同的團體也在加利福尼亞的勞倫斯放射性實驗所產生了。在1956年的中期，由於編列預算的削減，使得洛斯·阿拉莫斯試驗所所有的有關核火箭的機構不得不統一起來成一部門，然而利佛摩實驗所* 却擔負起建造一個核子噴氣引擎的重任。在這並非有意的平行組織下，火箭計劃部門任名爲「流浪者」（Rover）計劃，噴氣引擎部門稱爲「冥王星」（Pluto）計劃。

奇特的機密代名常是核子與太空科學的一部分，比如說「鄧卜」（Dumbo），美國太空計劃「流浪者」的一部分，是一種“厚牆屏蔽”反應器觀念。另外一個龐大的核動力“大鳥”其代名是「兀鷹」（Condor），然後就是「鸚鵡」（Kiwi）。每一個紐西蘭人都知道「鸚鵡」是一種沒有尾巴，毛髮狀羽毛的大鳥，當地土著摩利族依其尖銳的叫聲而命名。鸚鵡不會飛，用鸚鵡命名的核火箭也同樣的不能昇空。第一具「鸚鵡」——Kiwi-A，包含一組非常重，像“戰艦”一般的試驗用核反應器，當試驗進行時，火箭噴口朝上噴氣，

* 洛斯·阿拉莫斯與利佛摩都是加利福尼亞大學爲原子能委員會工作的兩個實驗所。

好像強調它是沒有能力離開地球似的*。

「鵜駝」實際上是核火箭的前奏罷了。在另一方面抗熱物質試驗也同時在洛斯·阿拉莫斯試驗室進行著，他們發現石墨（graphite）（和鉛筆蕊類似的物質），可耐 3000°K 的高溫，它的強度是隨著溫度的增加而增強一直到 3300°K ，溫度昇到 3900°K 就昇華*，而不經熔化成液態這一過程。有什麼比碳化鈾分散在石墨中建造一個反應器，而來試驗這一奇異的物質更好的方法呢？Kiwi-A 就是爲了以上原因而建造的。

1959年6月在內華達州的試驗站，洛斯·阿拉莫斯實驗所進行 Kiwi-A 的試驗，前後開動了五分鐘，用壓縮氦氣作爲推進劑。產生了七千萬瓦特的熱功率，溫度高達 1770°K 。Kiwi-A 是把紙上一連串的計算、研究論文付諸實際成果的第一次嘗試。

在1959和1960年又試驗了兩個相同形式的 Kiwi-A 反應器，其目的在於：(1)檢查反應器的設計有無缺點。(2)把石墨燃料元件外面包一層碳化鈦，防止推進劑熱氣的侵蝕，並試驗以明瞭它的實際上的效果。真正說起來，「鵜駝」只不過是一部「嚮導用機器」，用來試驗以吸收更多的經驗，建造更好的引擎。

在1950年代末期，支持核火箭昇空的官方情勢又有顯著的改變，擎天神（Atlas）化學燃料的洲際彈導飛彈已經證明能攜帶核彈頭投擲到地球上任一點，這是官方態度改變的最大原因，因此空軍方面不再需要等待核火箭做爲投射工具，核火箭又可能要再度失寵。但是在1957年10月3日蘇俄發射了第一枚人造衛星——史潑尼克一號（Sputnik I），使美國朝野大爲震驚，一個月後蘇俄又把一隻活狗送入人造衛星軌道，蘇俄展開了太空競賽更使得美國科學家們大爲恐慌，美國政府於是採取特別措施，1958年10月1日在美國總

* 我們對於「鵜駝」試驗所感興趣的只是反應器的運轉情形，而沒有昇空的意圖，而向下噴出的排氣又會產生危險，所以噴口朝上。

* 石墨直接由固體變成氣體，不經液態。