

科學圖書大庫

原子能文庫

主編 鄭振華

第 1—4 冊

徐氏基金會出版

第 二 冊

核動力與商船

譯 者 張 世 賢

目 錄

導 言.....	1
核子商船薩凡娜號.....	8
薩凡娜號的動力.....	11
國際貿易和核分裂.....	18
特殊的問題.....	22
世界各國發展核子商船的情形.....	26
歐洲原子能組織.....	28
展 望.....	30

導 言

核動力與商船

原著 WARREN H. DONNELLY

譯述 張世賢

導 言

在很久遠的年代以前，人類已能利用水道輸送貨物和旅客。經過幾個世紀的演變，人們發現了許多型式的能源可用以推動貨船，無論在河川中，在海洋裏。他們編造木筏順流於水面，製造各種利用風力吹送的帆船，以及利用貯藏在煤、石油中的能以推動的汽船。如今，人類已經預備用一種最原始的能源——由質量變成能量，使他們的商船航行在固定的航線上。

事實上，物質已能在海洋裏轉變為能源。在水底下，有潛水艇利用原子發出的能量；在水面上，航空母艦、巡洋艦、快速艦、商船、破冰船等等，也都正在利用這種新式的能源。每一個過去的日子裏，都有關於原子能用途方面的新知被一些人發現，像工程師，設計家、建築師、經濟學者、法律學家、保險經理人、勞工領袖，和其他許多終將決定原子能何時能應用於世界上所有商船的人。

這本小冊子即告訴你有關核能（nuclear energy）對商船的用途。它描述一艘核子商船，探究其利與不利之處，推測可能的新型海上貿易，並檢定一些普通商船和核子商船之間的區別。

無論那個年代，如有新的能源被發現時，人類就會用以加速旅客和貨物的海上運輸。在十九世紀，當那異樣優雅的美國快船完成了長距離的航行時，他們的努力達到了頂點。但這些船的全盛時期比人的壽命還短，其後一種嘈雜的、骯髒的、危險的機器——蒸汽機，被搬到海上，而將它們從古老的、乞助於風的年代裏解放出來。



這艘薩凡娜號汽船是十九世紀的技術先驅者，它表明了蒸汽在海上的用途



核子商船薩凡娜號則為二十世紀的先驅者，她正在驗證核子動力船隻的推進力。

遠在一八一九年，有一艘小帆船薩凡娜號，橫過大西洋做第一次利用蒸汽輔助的航行。這是由一個美國商人所發起的，一種勇敢先驅的成就。但那時世界上的造船工業並沒有為她準備就緒，因此，薩凡娜號汽船並沒有引致風起雲湧的變革，而遲遲在二十年後，才有英國商船 Sirius 號，第一次完全利用蒸汽的推動以橫渡大洋。這次的冒險也促成了大英帝國商用汽船船隊的發展。

今天，這種從油料到原子能燃料的階段也是航運史上一種偉大的實驗，就如同從風帆到蒸汽的階段一般。它尚需時間觀察核能是否將提供足夠的利益，使船主製造核子商船以取代目前的輪船。誠然，汽船在建造和操作上比帆船花費很多，可是，在早期利用蒸汽的年代裏，商人們即將他們最具價值的貨物用汽船裝運，為甚麼呢？因為在十九世紀，由於勃興的貿易的需要，使蒸汽提供了在價值上的可靠性。如今，一個新的技術先驅者核子商船薩凡娜號，正在海上驗證核能的

用途。這是一項實驗：一艘普通的商船裝置著核子引擎，她的工作乃在向全世界的造船工業驗證核能的功用。

核能用在海洋的展望

爲甚麼我們要把那舒適地固定在陸上的核能發電廠搬到海上去？對於這種熱心而所費甚多的工程上的努力，以及對於公共團體和私人基金的投資，有甚麼可以證明其爲有利的指望？我們可於此列舉四端：避免時時加添燃料，低廉的燃料價格，較高的航行速率和較大的貨物容量。

第一點：方便自由。如同汽船可免於風和洋流的影響一樣，核能可使商船免於煩惱在遠方停泊的海港是否有燃料的供應。一艘核子商船可持續航行二至五年而無須換新燃料。這個條件將使核子商船取得和帆船一樣不受航線限制的優點，每個可停泊的海港都能到達，也同時能具備汽船的獨立性和可靠性。

第二點：低廉的燃料價格。船主當能預期核能燃料的價格低於普通商船所需的燃料價格。既然數年內應用的燃料能在同一時間買進，船主們就不用顧及遠方海港的燃料價格，更無須煩惱市價的波動。

圖示一瓶液體所含的能量等於一千噸煤的價值。爲推動一具產生 300 瓩電力的實驗裝置，美國橡樹嶺國立實驗中心用硝酸鈾 (uranyl nitrate) 溶解在重水中以取代出價值昂貴的固體燃料。



第三點：**較高的航速**。在不愁燃料供給及價格低廉的觀點上，船主可以用動力充足的核子引擎開動比普通商船高的速度航行較長的路程。在一些船舶建造者和經濟學家的眼光看來，高速行駛表明了新式船貨經由海上運輸是行得通的。這些充滿希望的優點將能改變海上貿易的型式，有眼光的人將發現為商船而新設計的核子引擎以及進步的船貨處理技術必使造船工業產生革命性的改變，如同蒸汽代替了風帆的時期那般。

第四點：**較大的船貨容量**。由於核子商船所用的燃料重量遠輕於汽船所用的燃料，從前通常被燃料所佔用的容量將可用以容納貨物。

一些異議

上面列舉有關核能用於商船的利益顯然是樂觀的。然而，並非每一個人都覺如此，一些造船技師和船主至今尚未信服這些論調；部份人士則極力否認核子商船獲利的程度與真實性。還有其他的人也認為這些價格、製造的麻煩和操作的費用將使可能的利益失去均衡。今天，造船技師和船主已將普通商船的價格、優點和缺點都知道得很清楚，但核子商船的價格、優點和缺點則尚在猜測階段，必得等待航行海上的核子商船發出足夠的資料後始能確實明瞭。

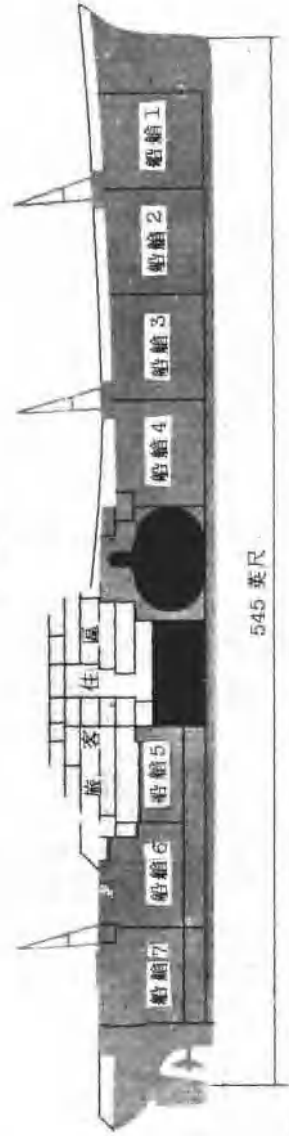
將核能帶到海洋裏

在陸地上，核能電廠要面對自然界所產生的一些危險。將它安置在船上用於遠洋的航行時，則使它顯露在另一個幾乎完全相異的環境裏。船是一種會移動也會擺動的月台，核子商船必須面對所有在海上發生的危險，如一旦有風暴的跡象即要躲進海港的話，她是沒有多大用處的。在任何氣候下，她都必須具備可靠的、安全的動力，無視於滔滔的海浪，無視於船身的顛簸，她的引擎必須忠實地供給動力以開行前進。即使在平靜的海上，船隻也會遭遇擱淺、觸礁以致沉沒的慘劇。如果核子商船成為這種意外的犧牲者，她在建造時就必須設計完善，以使旅客、船員免於那不能控制的放射線的傷害。

因為核能發電的裝置會產生放射線和放射性物質，故必得對核子



D 甲板



一艘以核能推動的載客兼載貨船隻的圖解。

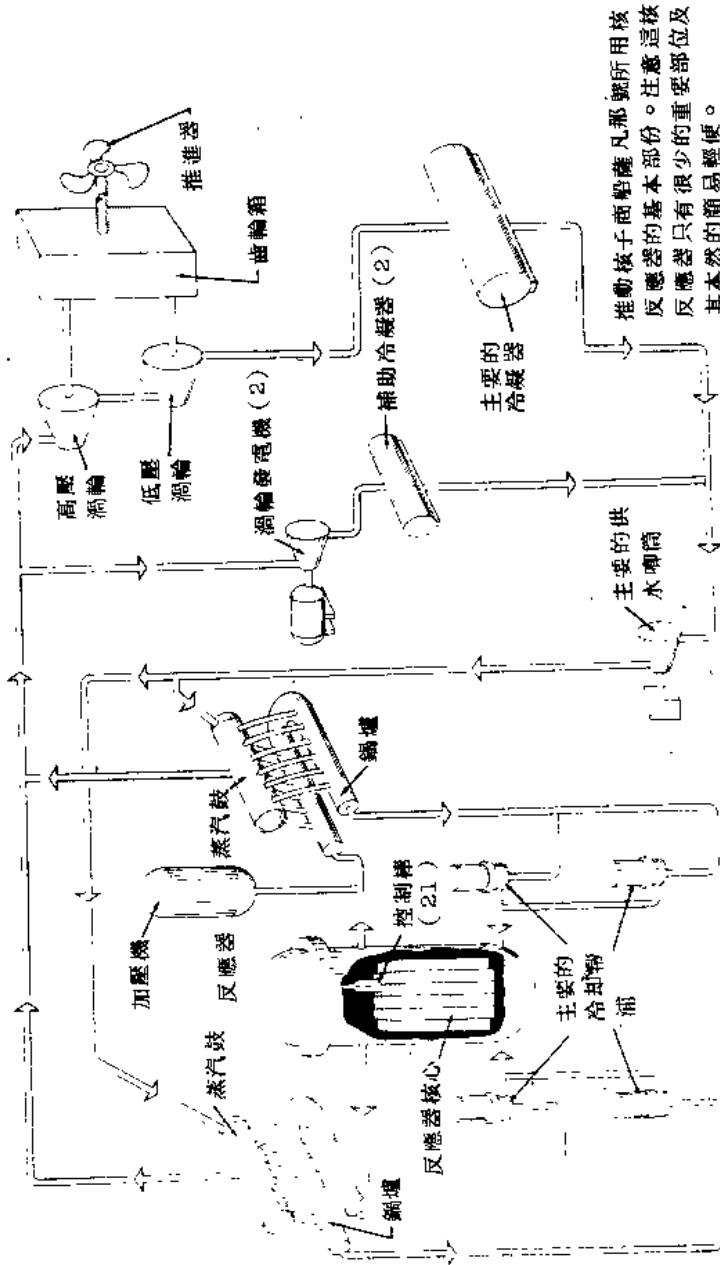
船上的旅客，船員以及居住近港、沿海的人們加以安全上的維護。造船技師和核子工程師明瞭這些危害，在設計船身和發電廠時就超過那些濱海國家和國際原子能總署的安全要求。

核能是如何產生的

蒸汽機或內燃機用燃燒所發出的熱以產生機械能，核子引擎則用質量轉化成能量時所發出的熱以產生機械能，它們相同的地方也僅止於此。汽船的燃燒室和鍋爐根本不同於核反應器（nuclear reactor）。普通船隻的推進系統包括結合空氣中的氧氣和油料中的碳、氫所需的機械裝置。燃料放在燃燒室中燃燒，以產生熱氣，傳到鍋爐，再放熱以產生蒸汽。燃燒室中的燃料必須繼續不斷地補充，大風扇則引進大量的空氣以供給燃燒所需的氧，空氣和廢氣管佔據了很大的空間。油料貯存在油池裏，用幫浦抽到燃燒室（firebox）。除了產生有用的能量外，蒸汽機還須排去有害的氣體和無用的燃料，弄得空氣裏盡是煤煙。

比較上，核反應器看起來並不壯觀。它沒有燒燃料的噴口，沒有空氣和熱氣的隆隆爆聲，也沒有旋空而上的煤煙、水蒸汽。在通常無法看見的反應器內部，裝置著一些金屬板、細長的棒或管，它們會因核心鈾原子的分裂（fission）而變熱，循環流動的水或其他冷卻劑（coolant）迅速地取出核心的熱送到產生蒸汽的熱交換器（heat exchanger）裏。（有一種反應器，核心產生的熱能直接使水沸騰。

核反應器是一種開動和控制質能轉換過程的裝置。這種過程包括鈾的同位素U-235原子的分裂，釋放出熱和放射線，並產生分裂物。燃料是反應器最重要的一部份，其次是控制棒，用來約束中子（neutron）的通量以維持鏈反應（chain reaction）；緩和劑（moderator）用以減慢從分裂而來的高速中子的速度，使易於產生新的分裂作用；冷卻劑用以除去燃料產生的熱量；容器用以容納燃料，控制棒和緩和劑；屏蔽（shielding）用以維護人們免於放射線的傷害；並且，通常外面還有一層容器用以禁閉任何放射性物質，當意外



推動核子商船薩凡那號所用核反應器的基本部份。注意這核反應器只有很少的重要部位及其本然的簡易輕便。

發生而使它們有釋放出來的可能時。

工程師們已經想出了許多方法以結合這些部份；從這些結合的樣式裏也出現了一種可用於航運的新型反應器。

核子商船薩凡娜號

起源和歷史

即使在大戰期間忙著要製造原子彈，科學家和工程師們也利用時間去思考有關核能用於海洋的問題。這種興趣引起了許多人的構想，而導致一九五四年核子潛艇鸚鵡螺號（Nautilus）和今日海軍其他核子船艦的下水。造船技師和核子工程師也考慮到核能用於商船的可能性。直到一九五五年，經過許多人的夢想，策劃並實驗用於航運的核動力，艾森豪總統乃咨請國會批准建造一艘用核能推動的商船。國會同意，且授權建造。一九五六年十二月十五日，艾森豪總統下令商務部及原子能委員會（Atomic Energy Commission）着手進行。

這兩個部門隨即成立一個聯合機構，徵召私家工廠的贊助。結果由紐約一家著名的造船公司George G. Sharp, Inc.負責設計這艘船。新澤西州的The New York Shipbuilding Corp. of Camden 負責建造，並由Babcock & Wilcox Co. 負責核反應器的部門及推進系統。其後，航運管理委員會（美國商務部屬下的一個機構）向紐約一家航運公司商妥，將這艘新船納入他的系統裏。

起初，這艘船原是美國用以證實原子能和平用途計劃的一部份，她不用以證明航行用的核子動力是否具有經濟價值。再者，像一個飄浮的工程實驗室似的，她將幫忙鑑別、確定並解決有關設計、操作和配置船員（manning）的問題，這些問題的解決有助於將來建造核子商船的人們。

這艘新船建造甚快。一九五八年五月二十二日，由當時的尼克森副總統夫人主持儀式，安裝龍骨。年餘之後，一九五九年七月二十一日，艾森豪總統夫人主持下水典禮，命名為核子商船薩凡娜號，意謂



核子商船薩凡娜號。她的早期成績已經加強了核能將開創海上貿易新遠景的期望。

她是早期第一艘動力商船薩凡娜號的繼承者。此後，這有關核動力廠長期漸進的試驗於焉開始。因為沒有已經建成的反應器模型，當她浮在船塢上的時候，所有在設計上的改變以及為加入不斷的改進所做的重複試驗都須在船上完成。

為與核反應器的裝置，發展並駕齊驅，美國原子能委員會採納大家在反應器安全方面的意見，而在一九六一年七月同意負起責任並開始執行安全措施。整個核反應器系統的試驗完成於十月，一種低能鏈反應也在同年十二月二十一起動。其後的各種試驗一直持續到反應器的動力減至原來所設計動力的 10 % 為止。薩凡娜號隨即開往維吉尼亞的約克城（Yorktown），開足動力做海上航行試驗，結果很是成功，就在一九六二年五月一日將她移交給紐約的國家海運公司。數月後，薩凡娜號開始作初次旅行，訪問十一個美國港口。她馳經巴拿馬運河，訪問夏威夷，再停泊於西雅圖，成為一九六二年萬國博覽會的號召物。這次航行在德克薩斯的加爾維斯頓（Galveston）結束，航運部已在那兒設立著核能服務機關。一九六二年到一九六三年的冬季，做了一次檢查和計劃中的修正後，即開始準備訪問本國和歐洲各國的其他港口。

但這些訪問必須延期。早在一九六三年，輪船的操作工程人員即開始因一項複雜的勞資爭論而醞釀罷工，當結果不能以正常的雙方契約達成協議時，航運部乃中止和國家海運公司的約定，而引致新的計劃以操作薩凡娜號。一九六三年七月，另外選擇了紐約一家航運公司 The America Export-Isbrandtsen Lines，並補充一些船員，

加以訓練，準備在一九六四年重新開始航行。

這些新的操作項目代表一個邁向普遍利用核能於航行的重要階段，在這些項目下，薩凡娜號將可能以相同的人員配置和相同的工資率運轉，加上其他的條件，而勝過這家 America Export-Isbrandtsen Lines 的其他船隻。因此，薩凡娜號在一些條件下，將被用以決定核子商船是否能夠，且是否必須，以同於他種船隻的人員配置而運轉。

描述

核子商船薩凡娜號是一艘很漂亮的船，有優雅的船頭，有流線形的超級結構，和大型快船的船尾。她最突出的地方還是沒有煙囪的設備。她全長595英尺（大約等於20個足球場的長度），寬78英尺，吃水深29½英尺。她攜帶著110名船員和9300噸貨物，等於每列有80輛貨車的4列貨車負重。在最大負載時，其排水量達20,000噸。像許多現代的貨船一般，她也載運旅客，有60個船艙。她的航行速度約為每小時21海里（約等於每小時24英里）。其渦輪能產生2200馬力。旅客的膳宿，上下貨物的裝置，通訊設備和航海設備都是當今美國商船之中設計最佳者。

薩凡娜號有四個甲板，貨物的昇降踏板在較低的一層。一個散步甲板延伸過主要的旅客甲板約有三分之一船身的長度，其上是較短的汽車甲板和領航甲板。在第二個旅客甲板內有廚房和餐廳，瞭望過反應器控制室，則為船員宿舍和船尾看台。

與一般商船的比較

因為薩凡娜號是用以做一艘普通商船的，只其中的鍋爐用核反應器代替而已，她的大小很像 Mariner 型的貨船，這種船的航速每小時20海里，並且有很大的船貨容量，對許多不同種類的貨物都能適應。薩凡娜號比 Mariner 稍長一些，也稍寬一點。裝載著貨物和燃料的最大容量時，兩種船的重量幾乎相等；不裝燃料時，一艘 Mariner

約輕於2600噸。



“美國挑戰者”號是現代高速商船的一例。核能可使這艘船以高速度航行很長的距離而無須計及燃料供應的問題。

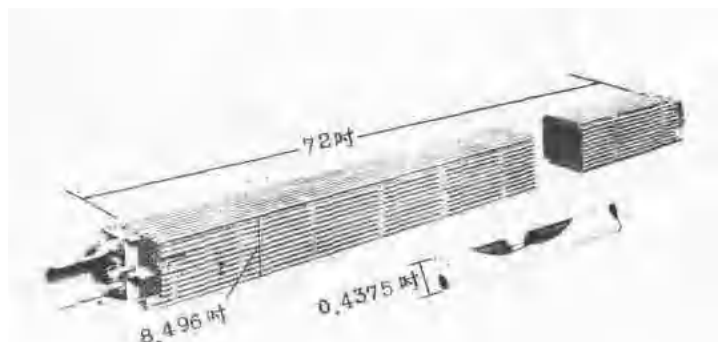
薩凡娜號的動力

在原理上，薩凡娜號的核動力廠是很簡單的。用人工製造而其U-235含量足以保證能很快使原子分裂的鈾，含在核心（core）裏面的燃料元件（fuel element）中，當抽出控制棒（control rods）而開始發生鏈反應時，從分裂著的鈾原子所發出的熱很快就使四週的水溫升到很高，超過平時的沸點兩倍。加壓機則使核心的水受著足夠的壓力以防其沸騰，否則將使操作過程發生不穩定的現象。這些高熱的水用幫浦打到鍋爐，放掉部份的熱以產生蒸汽，然後再回到核反應器裏以獲得更多的熱。鍋爐裏的蒸汽流到主要的渦輪，推動那推進系統的渦輪發電機。沒有被使用的蒸汽則經由冷凝器冷卻成水，再回歸鍋爐。

燃料

薩凡娜號用平均濃度達到 4.4 % 的鈾作為燃料，意謂她所用的鈾裏含有 4.4 % 的可分裂的 U-235（自然界的鈾礦中只含 0.7 % U-235）。這種用濃度很低的方法簡化了燃料元件和核反應器的設備，無須顧慮建築材料會因吸收中子而腐蝕，而受到放射線的破壞。鈾是以二氧化鈾壓成小藥丸的形式裝進不銹鋼製成的小管中，謂之燃料鞘（fuel pins）。選用 UO_2 乃因其不與水發生化學作用，有高的熔點，且在反應器裏能忍受高溫 and 大量放射線的照射而不變形。每 164 個燃料鞘集成一燃料元件，再把 32 個這樣的元件集合起來，共用 $164 \times 32 = 5248$ 個燃料鞘，即成其所用的核心燃料。這些燃料元件是依陸上核動力廠的標準設計的，另外再加考慮航行時船身震盪和擺動的因素在內。薩凡娜號的核反應器在開足馬力時能放出等於 80,000 瓩電力的能量。

薩凡娜號的第一個核心，設計時預期使用三年，假設她有 60 % 的時間航行海上。它包括 17,000 磅的鈾，其中 560 磅是 U-235。在它使用的過程中，約有 137 磅 U-235 和 13 磅的鈾（由中子和 U-238 的作用而生成）在核心分裂。她一次裝滿燃料能在時速 20 海里，必要時增到 23 海里的情況下航行 300,000 海里，等於在赤道繞地球 12 圈。以同樣大小的普通商船作這種航行，將要消耗四倍到五倍於其船重的燃料，可是，薩凡娜號只需用少於一個旅客重量的核燃料。



一小束一小束乾淨而充滿鈾的管子代替了大量的煤和油。

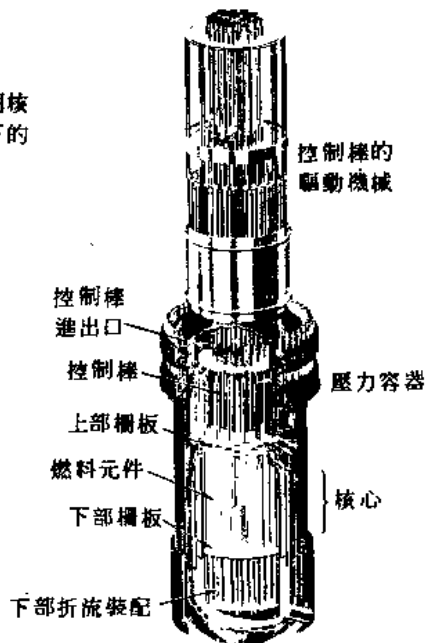
控制棒

在核心的燃料元件之間，擺著 21 根控制棒，這些棒含有會吸收中子的硼。由這些控制棒從核心抽起的高度，能夠決定原子分裂鏈反應的發生，保持或者中止。附近的中子偵測器則驅動電子線路以管制控制棒的上下機械，這些線路能自動維持鏈反應在吾人希望的水準上，且在這些系統發生意外和故障時能立即使作用停下來。

壓力容器

薩凡娜號反應器的核心是被一個很大的鋼鐵容器包著的，這容器高 27 英尺，內徑大於 8 英尺，器壁厚 6.5 英寸，內面塗覆著一層不銹鋼以免腐蝕。容器的上頭可以移動，便於核心燃料的進出。這個大容器的鍛造和機製加工 (Forging and machining) 委實是一種最高度工業技巧的工作。

薩凡娜號核反應器的整個縱切面，表明核燃料所在的核心，控制棒及驅動其上下的裝置。



蒸汽的產生

圖示核反應器的熱水流入鍋爐以產生蒸汽。這種設計能使渦輪和引擎室與反應器中的放射性物質隔絕，因為熱水迴路和蒸汽迴路之間沒有通路。這裏的鍋爐系統有兩個，用不相關連的幫浦以確保核心的冷却，因為即使反應器停機（shut down）時，如無適當冷却的話，從核心燃料來的放射線也會放出足夠的熱量而損害燃料元件。當薩凡那號的船長下令開足馬力時，她的反應器每小時會跑出 74 百萬瓦特的熱能來，帶到鍋爐而產生每小時 265,850 磅的蒸汽。

圍阻用的容器

陸上用的動力反應器和那些可能包含放射性物質的部份系統是用圍阻容器圍繞起來的，薩凡娜號也有一個這樣的裝置。裏面有裝在壓力容器中的反應器核心，水幫浦，鍋爐，蒸汽鼓（steam drum）和昇壓器。圖示這些部份是如何完全地裝置在圍阻容器裏，那是一個像房屋似的大建築，長 50.5 英尺，直徑 35 英尺，壁是碳鋼製的，有厚 2 ½ 英寸者，使能承受每平方英寸 186 磅的內壓，這個壓力比反應器的冷却系統完全破壞而造成危險時所產生的壓力還要大。

屏蔽

反應器開動的時候，核心會放出中子和 γ 射線而造成傷害，除非適當地加以遮蔽，使這些放射出來的東西局限在一個範圍裏。 γ 射線也會由分裂所產生的放射性物質中放出來。屏蔽的作用乃在限制這些放射線而使船隻每天正常地開航，並使船員和旅客不會受到干擾。薩凡娜號有兩組不同的屏蔽：第一組環繞包含反應器的容器而建造，在反應器停開以後，它能減少中子和 γ 射線的逃逸，防止它們多方進入圍阻容器的內部；第二組則建在圍阻容器外邊，當反應器發生意外而在圍阻容器裏面溢出放射性物質時，它可以用來減少人們受放射線照射的劑量。

第一種屏蔽由 33 英寸厚的水組成，外加一層鉛。第二種屏蔽則