

譯者簡介：

陳韋綦

中國醫職安系畢(理學學士)、東吳日研所畢(文學碩士)

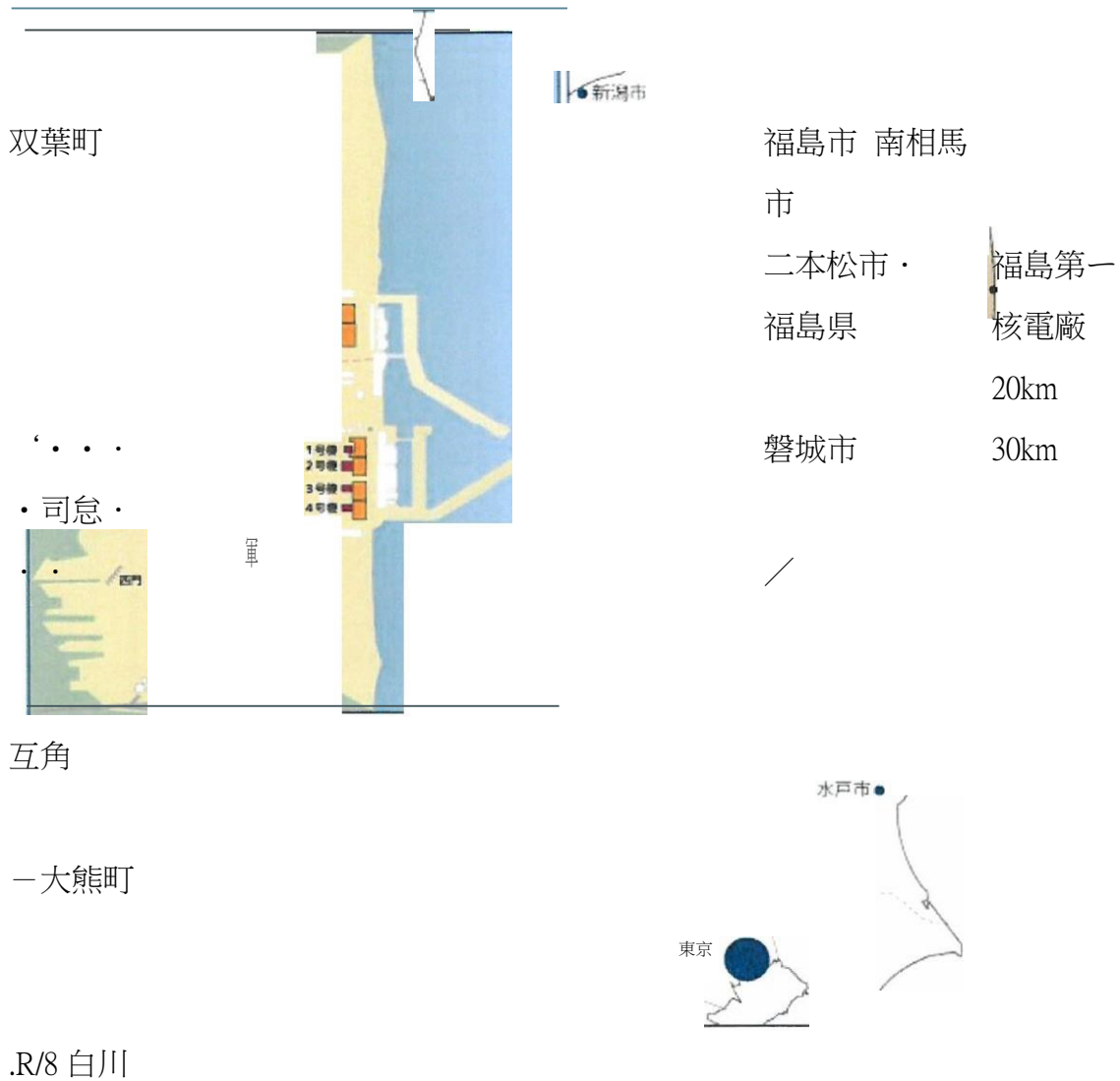
有 10 年翻譯經驗，譯作 40 餘本

第 3 章 核 電 廠 概 述

第 1、第一核電廠概述

1、位置

第一核電廠橫跨福島縣雙葉郡雙葉町及同郡大熊町島，位於福島縣磐城市北方約 40km，同縣郡山市東方約 55km，、福島市東南方約 60km 處，東臨太平洋。廠房面積約 350 萬 m²（約 75 個東京巨蛋大）。



第一核電廠位置圖（右）及主要設施配置圖（左）。（左）圖的 R/B 為反應爐廠房、T/B 為汽輪機廠房。（甲 1・國會事故調查報告書 60 頁）

2、第一核電廠的反應爐

第一核電廠有 1~6 號機，皆為沸水反應爐（後稱「BWR」）。1~5 號機的圍阻體為第一型，6 號機為第二型。

各號機的廠商如下。1 號機為被告 GE；2 號機及 6 號機為被告 GE 及被告東芝；3 號機及 5 號機為被告東芝；4 號機為被告日立。

	1 號機	2 號機	3 號機	4 號機	5 號機	6 號機	
爐型	BWR3	BWR4	BWR4	BWR4	BWR4	BWR5	
圍阻體類型	第一型	第一型	第一型	第一型	第一型	第二型	
輸出電力（萬 kW）	46.0	78.4	78.4	78.4	78.4	110.0	
輸出熱能（萬 kW）	138.0	238.1	238.1	238.1	238.1	329.3	
反應爐設置許可申請日期	1966.7.1	1967.9.18	1969.7.1	1971.8.5	1971.2.22	1971.12.21	
反應爐設置許可日期	1966.12.1	1968.3.29	1970.1.23	1972.1.13	1971.9.23	1972.12.12	
開工日期	1967.9.29	1969.5.27	1970.10.17	1972.5.8	1971.12.22	1973.3.16	
臨界日期	1970.10.10	1973.5.10	1974.9.6	1979.1.28	1977.8.26	1979.3.9	
開始運轉日期	1971.3.26	1974.7.18	1976.3.27	1978.10.12	1978.4.18	1979.10.24	
廠商	GE	GE/東芝	東芝	日立	東芝	GE/東芝	
建築工程	EBASOO	EBASOO	東芝	日立	東芝	EBASOO	
供 給 者	反應爐系 列	GE/GETSOO	GE/東芝	東芝	日立	東芝	GE/東芝
	壓力容器	GE/GETSOO/ 東芝/石？	GE/GETSOO/ 東芝/石？	東芝/ 石？	日立 /Babcock 日立	東芝/石？	GE/GETSOO/ 東芝/石？
	爐心	GE/GETSOO	GE	東芝	日立	東芝	GE
	燃料	GNF-J/NFI	GNF-J/NFI	GNF-J	NFI	NFI/AREVA NP	NFI
	蒸氣系統	GE/GETSOO	GE/東芝 /GETSOO	東芝	日立	東芝	GE/東芝 /GETSOO
	汽輪機	GE/GETSOO		東芝	日立	東芝	
	土木工程	飛島/五洋/ 間/前田/熊 谷/GE	鹿島/熊谷	熊谷/鹿 島	鹿島/五 洋/間/前 田/熊谷	熊谷/鹿島/ 五洋	鹿島/熊谷/ 間/前田/五 洋

取自各號機的反應爐設置（變更）許可申請書及《原子力市民年鑑 2010》

（原子力資料情報室，2010 年）

第一核電廠 1~6 號機的主要設置條目（甲 1・國會事故調查報告書 61 頁）

第 2、第一核電廠各號機基本構造

1、核電廠

核電的發電機制為，用核燃料（通常為鈾）進行核分裂反應產生的能源使水沸騰，再以蒸氣轉動汽輪機，策動發電機發電。

控制核分裂的就是反應爐。

2、輕水反應爐（尤指沸水反應爐）基本構造

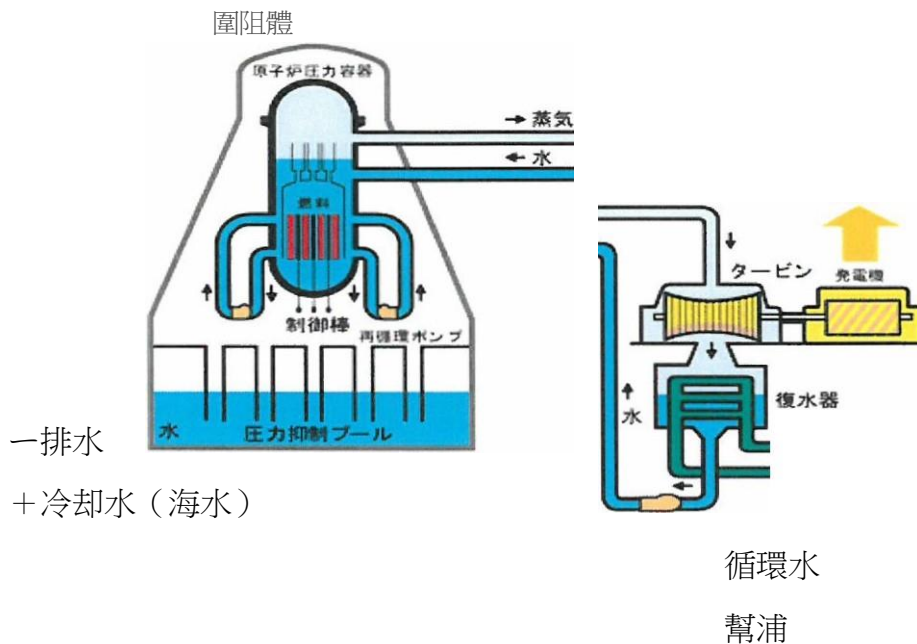
日本使用的反應爐是輕水反應爐，使用普通的水（輕水）當作冷卻劑。

燃料鈾在反應爐中進行核分裂，此時發生的熱能使冷卻劑變為蒸氣，再以蒸氣之力轉動汽輪機以發電。反應爐壓力容器中，蒸氣的溫度高達 280 度，並產生大至 70 甚至 80 氣壓的極大壓力。

輕水反應爐有兩種。一為在反應爐內直接產生蒸氣的沸水反應爐（BWR）；一為將反應爐產生高溫高壓的水導入蒸氣發生器（熱交換器），在這裡產生蒸氣的壓水反應爐（PWR）。第一核電廠的反應爐都是 BWR。

〔 沸水反應爐（BWR）核能發電機制

送電



給水幫浦

（引用：〈核能・能源〉圖面集 2012 5-1-2 電氣事業聯合會網頁）

反應爐的燃料為鈾。鈾 235 易引發核分裂，將包含鈾 235 的天然鈾濃縮後燒結成燃料丸，再排成棒狀，便成為燃料棒。燃料棒的表面以金屬鋯披覆。

中子撞擊鈾 235 後，鈾原子會分裂成 2 個原子核，同時產生大量熱能。發生核分裂反應時，會再產生 2、3 個中子，這些中子再撞擊其他的鈾 235，就能繼續產生核分裂反應。反應爐能使此反應緩慢但持續進行。

若想停止反應爐，要插入可吸收中子的「控制棒」，停止核分裂的連鎖反應。然而，即使核分裂的連鎖反應停止，反應爐中仍有許多核分裂生成物質，在化學方面呈現不穩定的狀態。必須使之發散放射線與熱能，變為其他物質，直到穩定。此熱能稱為衰變熱，熱量極大，因此必須將水不斷注入反應爐冷卻之。

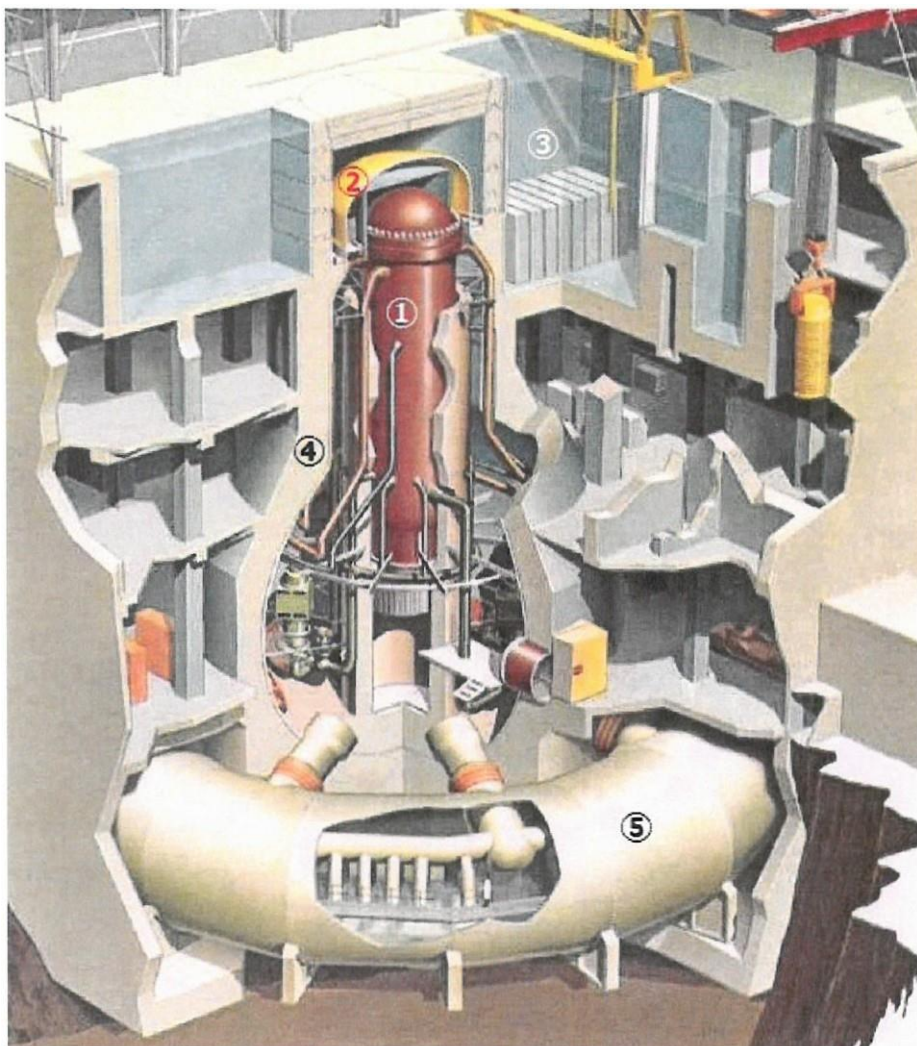
蒸氣於「冷凝器」經由海水冷卻後將變回水，並再次回到反應爐。蒸氣與海水的管路不同，不會直接接觸或混合在一起。

3、第一核電廠概述

(1) 第一型構成部分

核電廠有「反應爐廠房」與「汽輪機廠房」。前者內含反應爐和暫時冷卻迴路（通過爐心的水系統），用過的燃料迴路等；後者則有汽輪機、冷凝劑、給水幫浦等。第一核電廠有「防震重要樓」（發生7級地震也可進行防災處置的避震建築物，備有緊急應變中心、通訊設備、電源設備、空調設備等），在地震等災害發生時，可設立緊急應變中心。

發生本核電意外的1~4號機（後稱「本案各號機」）的圍阻體，均為被告GE設計的第一型圍阻體（後稱第一型）。第一型的構造如下所示。

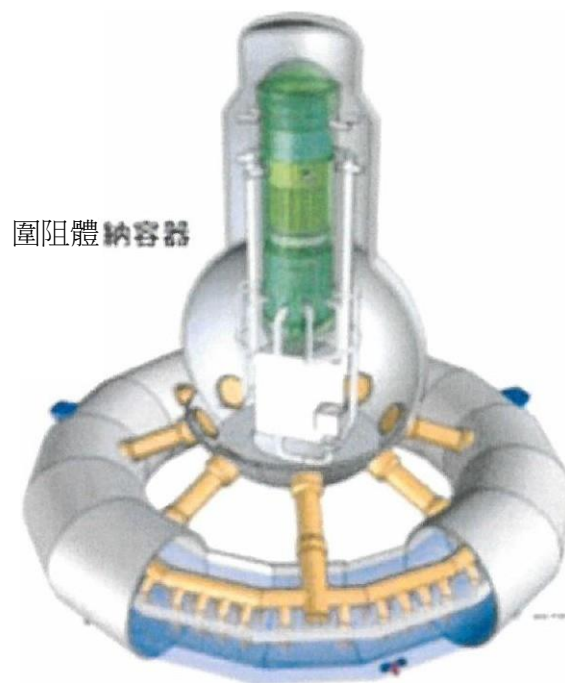


（引用：2011年3月19日，美國核能協會（NEI）的報告書）

- ① 反應爐壓力槽（燃料棒插入處）
- ② 圍阻體上方
- ③ 高階核廢料儲存池
- ④ 二次圍阻體：內側有厚約 3cm 的鋼鐵製圍阻體（乾井）
- ⑤ 抑壓池（濕井）：位於圍阻體下方，以排放管線連接圍阻體。環狀（甜甜圈形），管內有一半的水。因外型而稱為 torus，因功能而稱為 suppression pool，鋼鐵製或水泥製。圍阻體與抑壓池由排放管線連接。

福島第一核電廠・1~5 號機

抑壓池



(2) 安全功能

因鈾產生核分裂反應，反應爐裡有很強的輻射物質，故必須備有防止因異常、故障使輻射物質外洩的方案，或預防其外洩的功能。

具體而言，得從以下三點避免輻射物質外洩：①防止異常情形發生②防止異常情形擴散並演變為事故③防止輻射物質異常外洩。

一、關於①，要從反應爐的設計、建造、運轉各階段著手。設計時，就要十分注重安全

二、至於②，必須具備，發現異常現象時立即停止反應爐的功能（停止功能），方可達成。

可停止反應爐的設備，稱為停止設施。停止設施可在反應爐發生異常時，停止爐心內的核分裂反應，降低發電功率，減少爐心反應度。

停止設施的代表設備便是控制棒。控制棒的構造可吸收中子，因而控制反應爐的反應情形。把控制棒插入爐心後，它會吸收中子，抑制核分裂反應，降低反應爐的發電功率。反應爐發生異常時，為了避免燃料損傷，必須立即把控制棒插入爐心，緊急停機。

此外，停止設施還有硼酸注入設施。硼酸注入設施由硼酸儲存槽、幫浦、測試槽、配管、閥構成。控制棒無法插入爐心時，就要將可吸收中子的硼酸注入反應爐，降低反應速度，以利停機。

三、冷卻功能（反應爐冷卻功能）

而③，為了避免反應爐停止後，殘存於燃料棒裡的多數輻射物質衰變，繼續發熱，造成燃料棒破損，必須有持續冷卻爐心的功能（冷卻功能），及抑制燃料內的輻射物質外洩的功能（防止外洩功能），方可達成。

先介紹擁有冷卻功能的主要設備。

(一) 1 號機

反應爐設備中，除了一般給水設施，還有許多注水設施。反應爐內產生的蒸汽會帶動汽輪機驅動幫浦或電動幫浦，注水設施便經由上述幫浦注水至反應爐。注水設施有兩種，一為反應爐處於高壓狀態時也能注水的高壓注水系統（高壓冷卻系統）；另為反應爐壓力下降後才可注水的低壓注水系統（低壓冷卻系統）。

1 號機有以下反應爐冷卻設備：爐心水霧系統（CS）兩套、緊急冷卻系統（IC）兩套、高壓注水系統（HPCI）一套、反應爐停止時冷卻系統（SHC）一套，及圍阻

體冷卻系統（CCS）兩套。

CS 是冷卻爐心的設備。冷卻劑因故逸失，爐心暴露在外時，為了避免燃料過熱導致燃料及披覆管破損，會以抑壓池的水為水源，由爐心上的噴嘴噴灑於燃料棒上。

IC 為爐心冷卻設備。當主蒸氣管破裂，無法使用主要冷凝器時，可用緊急冷凝槽，將壓力槽內的蒸氣冷凝為水，把水送回爐心，不必使用幫浦。熱能會散發到大氣中。

HPCI 也是冷卻爐心的設備。因配管破損而發生冷卻劑散失事故（LOCA）時，採用壓力槽產生的一部分蒸氣動作的汽輪機驅動幫浦，會以冷凝儲藏槽或 S/C 內的水為水源，注水至壓力槽。

SHC 為反應爐冷卻設備。反應爐停止後，可除去爐心的衰變熱、壓力槽、冷卻劑裡殘留的熱能。

CCS 是冷卻圍阻體的設備。發生 LOCA 時，以抑壓池的水為水源，噴灑至圍阻體內。

（二）2 號機到 5 號機

2 號機到 5 號機，有以下反應爐冷卻設備：CS 兩套、HPIC 一套、反應爐隔離時冷卻系統（RCIC）一套、殘存熱能去除系統（RHR）兩套。

RCIC 是冷卻爐心的設備。反應爐停止後，給水設施因故停止時，藉由汽輪機驅動幫浦，以冷凝儲藏槽或抑壓池內的水為水源，為反應爐補給散失的冷卻劑。

RHR 為，反應爐停止後，使用幫浦或冷凝槽，降低冷卻劑溫度，或緊急注入冷卻水，維持爐水的設施；也是緊急爐心冷卻系統（ECCS）之一。閥的切換操作有六種模式：①反應爐停止時冷卻模式②低壓注水模式（ECCS）③圍阻體水霧噴灑模式④蒸氣冷凝模式⑤抑壓池冷卻模式⑥緊急熱負荷模式。

（三）6 號機

6 號機的反應爐冷卻設備，除了上述的 RCIC 一套、RHR 三套，還有 高壓爐心水霧噴灑系統（HPCS）一套、低壓爐心水霧噴灑系統（LPCS）一套。

HPCS 是爐心冷卻設備。因配管破損而發生冷卻劑散失事故時，以冷凝儲藏槽或 S/C 內的水為水源，噴灑於燃料棒上。

LPCS 也是冷卻爐心的設備。因配管破損而發生 LOCA 時，以 S/C 內的水為水源，由爐心上的噴嘴噴灑於燃料棒上，是 ECCS 之一。

四、防止外洩功能（圍阻功能）

反應爐的潛在危機，在於存積於反應爐內的輻射極強。因此，反應爐有防止輻射外洩的功能，稱為防止外洩功能（圍阻功能）。本案各號機有五道防壁防止輻射外洩。

（一）第 1 道

鈾燃料是把二氧化鈾的粉末燒結成小圓柱狀（直徑、高各約 1cm）而成的，稱為燃料丸。有圍阻功能的第 1 道防壁，就是燃料丸內部的空隙。燃料丸是反應爐的燃料，使用較穩定的二氧化鈾粉末，燒成陶器似的物體，可把大部分輻射物質鎖在裡面。

在顯微鏡下，粒子間有空隙，核分裂生成物，不論固體或氣體，都會被封入這些空隙。

（二）第 2 道

燃料丸被置入後約 0.9mm 的細長燃料披覆管中。第 2 道防壁就是燃料棒周圍的披覆管。披覆管的密度很高，可留住散到燃料丸外的輻射物質。

從機械、化學、核能方面及加工性考量後，選擇了披覆管的材料——以鈳為主要成分的合金，鈳合金。

（三）第 3 道

第 3 道防壁是圍阻燃料棒的壓力槽，擁有許多配管，稱為「反應爐冷卻水壓力邊界」。披覆管因故破損，輻射物質外洩至冷卻水中時，壓力槽耐得住高壓，氣密性也高，可將輻射物質擋在裡面。

反應爐壓力槽的壓力異常上升時，必須積極減壓。壓力槽有減壓用的主蒸氣卸壓閥（SR 閥）。SR 閥排出的蒸氣，將導入後述第 4 道防壁的抑壓池裡，冷凝、減壓。

SR 閥故障，維持開啟狀態時，反應爐冷卻水壓力邊界會急速失去冷卻水。這種反應爐冷卻水壓力邊界失去冷卻水的冷卻劑散失事故（LOCA），是同邊界的配管破損導致的。此類配管破損，可能因材料發生應力腐蝕破裂（SCC），或流體加速腐蝕（FAC）導致的劣化，與地震等外部荷重而重複發生。

若規模大，LOCA 可導致毫不容許時間猶豫的嚴重事態，必須在爐心外露、燃料損傷前，送入冷卻水。緊急爐心冷卻系統（ECCS）就是為此存在。它是非常重要的系統，設計時必須注意多重性、多樣性。這些系統大多以電源為動力，因此，電源要有多樣性。發生可導致配管破損的大地震時，外面的電應該送不

進來，所以需要廠內緊急電源。緊急電源通常都是柴油發電機。LOCA 發生，到柴油發電機啟動，ECCS 運作，開始注水，要花 30 秒。要讓水淹過已露出的爐心上方，基準時間為 5 分鐘，由此可知 LOCA 的威脅，與 ECCS 的重要。

(四) 第 4 道

第 4 道防壁是，包圍壓力槽的圍阻體。圍阻體是鋼鐵製的，包圍壓力槽等主要反應爐設備。

BWR 的圍阻體不必很大，內有「抑壓池」(S/C) 避免 LOCA 時溫度、壓力上升。抑壓池內存積大量冷水，以利 LOCA 時冷凝圍阻體內的高溫蒸器。圍阻體內，含有第 3 道防壁，如反應爐壓力槽等的區域，稱為「乾井」，相對於此，存積大量冷水的抑壓池，則稱為「濕井」。

爐心因 LOCA 外露，ECCS 卻沒馬上動作時，燃料棒便開始受損。而披覆管和燃料組件是鋯合金製成的，此時將造成問題。在超過 1000°C 的高溫蒸氣中，會進行鋯水反應 ($Zr+2H_2O \rightarrow ZrO_2+2H_2$)，而產生氫氣。爐內有大量鋯合金，此反應又是放熱反應，開始反應後，有自我加速效果。氫氣將從 LOCA 破損處散出，充滿圍阻體內。氫氣在空氣中的爆炸下限是濃度 4%，濃度達到 10 幾% 就會引發劇烈的氫爆。由此可知，第 3 道防壁的破損和第 4 道防壁的破損可能有連鎖性。為了阻斷這層連鎖，運轉時，圍阻體內都充滿氫氣。

(五) 第 5 道

第 5 道防壁是反應爐廠房，擁有可過濾圍阻體外洩氣體的功能。若發生氫爆一類事故，導致廠房本身破損，將失去此功能，未經過濾的氣體將直接溢散至外界環境。

(3) LOCA 時的圍阻體運作

一般運轉時，圍阻體和抑壓池內都充滿氫氣，抑壓池裡的水溫和環境溫度相同。若圍阻體內的反應爐冷卻設備配管損壞，加壓冷卻水將流出反應爐冷卻設備，變成水蒸氣，使圍阻體內的溫度及壓力上升。此時，反應爐會自動停機。圍阻體內的壓力升高後，排放管線的壓力也會上升，最後蒸氣會進入抑壓池的水中。蒸氣接觸抑壓池水後，便會冷凝為水。蒸氣變回水後，因 LOCA 而升高的圍阻體內壓力將受到抑制而降低。

抑壓池內的蒸氣冷凝後，抑壓池內的溫度和壓力會稍微提高。事故發生一段時間後，圍阻體與反應爐冷卻設備的狀況也會產生變化，偵測器將感測到變化。此

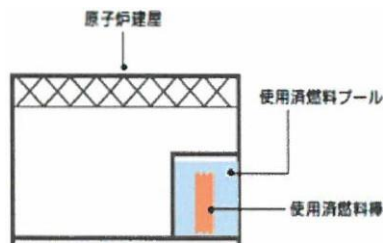
時，緊急系統將啟動，開始冷卻停機的反應爐；冷卻抑壓池水的系統也會啟動。

這些緊急系統需要的電源由外來電源供給，若外來電源無法供電，便使用內部緊急柴油發電機供給。

這些系統動作時，第一型便不會排放反應爐冷卻水和核分裂生成物質，其設計為，圍阻體壓力不會超過設計值，並可對應各種配管破損的意外。

其設計為，即使連接反應爐壓力槽最大的配管斷了一根，都可對應；縱然發生 LOCA，冷卻水及核分裂生成物質也不會離開圍阻體，排放至大氣。

如此，使用抑壓池，抑制圍阻體內的壓力，為第一型的特徵。



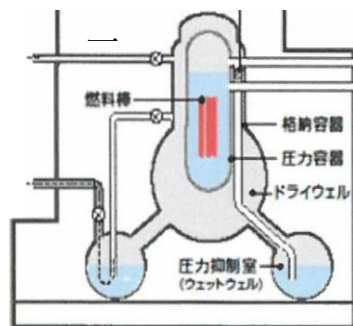
卸壓閥

乾井管線

{ 圍句 }

濕井管線

h 院をして骨 E』、



反應爐廠房剖面概要圖 福島第一核電廠 1~5 號機第一型

(引用：日本科學未來館網頁)

此外，第一型改良型反應爐圍阻體，與第一型相比，容積變為 1.6 倍，改善了定期檢查時的作業效率

