

譯者簡介：

邱于芳

政治大學日本語文學系畢，現為上班族

## 第 4 章 導致核災發生之背景

### 第 1、日本核電的開發經過

1952 年 4 月，舊金山和約簽訂，代表日本此後可自由進行核能開發研究。日本就此政官財合一，積極推動國內核電廠的建設工程。

日本開始積極導入外國技術，以被告美國奇異公司為首、加上被告東芝、日立等統稱核能五大集團的積極開發，於 1966 年東海發電廠正式開始商轉，為日本國內最早的紀錄。其後也陸續建造關西美濱、福島第一等核能發電廠，代表日本正式開始將核電廠運用於商業用途。

#### 1、核電廠的開發過程

##### (1) 日本的核能開發

自從核分裂發現於 1939 年，以美國為首開啟了研發核能的趨勢。

1942 年，美國的 chicao pile-1 核子反應爐發生世界首例的臨界狀態，接著於 1945 年世上第一顆原子彈誕生。接著同年 8 月 6 日、8 月 9 日，原子彈分別降落在廣島及長崎。估計同年廣島約有 14 萬人、長崎約有 7 萬人死於核爆。

第二次世界大戰後，聯合國明文禁止日本進行關於核能的任何實驗性研究。但隨著 1952 年 4 月舊金山和約生效，此禁令也隨之解除。

1953 年，美國的核能政策從原本的獨佔主義轉變為國際合作推進主義。美國於 1955 年開始將濃縮鈾供應給日本。因此於同年 11 月 30 日，為了接受鈾的供應及進行核能反應爐的基礎研究，日本正式設立財團法人日本核能研

究所(現在的獨立行政法人日本核能研究開發機構)。

隨後於 1955 年 12 月，訂立核能基本法、核能委員會設置法，並改正總理府設置法的其中一部份(此三法又稱核能三法)，並於 1956 年 1 月 1 日根據核能基本法於總理府(現在的內閣府)設立核能委員會。

日本藉由與業界合作及導入國外技術持續進行核能研發。1957 年，日本核能研究所的動力實驗爐首次達到臨界點，並於 1963 年 10 月 26 日首次達成發電紀錄。

1966 年東海發電廠成為日本國內第一座正式商轉的核能發電廠，1970 年 11 月關西美濱發電廠、1971 年 3 月東京電力福島第一核電廠也相繼加入行列，代表了日本國內的商業核能發電正式全面性實施。

## (2) 業界的動向

1956 年 3 月 1 日，為開發並推廣和平運用核能，日本成立社團法人日本核能產業會議(現：一般社團法人日本核能產業協會)，推派時任東電會長的菅禮之助為會長。

另外於同時期，包括被告在內的核能相關企業為了趕上開發核能產業的趨勢，相繼投入開發，形成核能五大集團。

首先，於 1955 年 10 月，舊三菱集團共計 23 家企業組成三菱核能動力委員會。1956 年 3 月以被告日立及昭和電工為首的 16 家企業組成東京核能產業懇談會。其後陸續於同年 4 月，由舊住友集團 14 家企業組成住友核能委員會、同年 6 月由被告東芝、石川島播磨重工業等舊三井集團等 37 家企業組成日本核能事業會、同年 8 月由富士電機、川崎重工業、古河電氣工業等舊古河、川崎系 25 家企業組成第一核能產業集團。

上述核能產業五大集團不斷進行核能相關技術的領先研發，在工廠設計、生產、培育技術人員等方面都發揮了核能開發中的重要角色。

## 2、福島第一核電廠

(1) 建設經過

福島縣於 1960 年 5 月 10 日加盟社團法人日本核能產業會議，同時，福島縣內各地正進行核電廠設廠調查，調查結果顯示大熊町及雙葉町為合宜的核電廠設置地點。當東京電力公司尋找建設預定地階段時，福島縣方面積極表達歡迎之意，因此於 1963 年，大熊町及雙葉町正式內定為設置候選地。

東電於 1965 年正式自買下大熊、雙葉兩町的福島縣開發公社手中接下約 95 萬平方公尺的建設用地，此後東電開始不斷地買收其他建地，於 1967 年幾乎完全拿下預定建設福島第一核電廠的用地。

1966 年 12 月，東電取得福島核電廠 1 號機的設置許可，隨後於 1967 年開始進行建設工程，於 1971 年建設完成同時開始正式商轉。

之後並陸續建設 2 號機於 1974 年 7 月、3 號機於 1976 年 3 月、4 號機於 1978 年 10 月、5 號機於同年 4 月、6 號機於 1979 年正式開始商轉。

(2) 由被告所建設之廠房

- A. 1 號機採用被告美國奇異公司建造的沸騰型輕水爐，另外奇異一概承包了 1 號機全廠包括核能反應爐、渦輪、電機設備等製造工程。

這時主要製造商為奇異公司，被告東芝及日立所扮演的腳色是接受奇異公司的委託。東芝主要製造核反應爐的蒸氣供給機及電力配置工程及其配管；而日立則負責製造核反應爐圍阻體。

- B. 建設 2 號機時則以培植國內產業為出發點，這時的主要製造商為奇異公司及東芝。東芝除了核反應爐的蒸氣供給機外，也同時製造渦輪及發電機之外的 BOP 設備，包括燃料瓦斯壓縮機、水處理裝置、配管系統啟動閥等附加設備。

- C. 東芝為 3 號機及 5 號機、日立成為 4 號機建設工程的主要製造商。在 2 號機建設時，國內業者製造率不超過 53%，但在 3~5 號機的建設中，達到 90%。

在建設 6 號機時，由於核反應爐圍阻體的樣式產生更動，因此由奇異公司及東芝再次負責製造商。

## 第 2、核災事故頻傳

第一核電廠設置多達 6 個核子反應爐，雖皆已進行商轉，但不論建設時間先後，從至今國內外發生過許多重大核災事故這一事實可以證明核電廠潛藏著相當高的危險性。

### 1. 核災事故的分類

核能設施若發生災害，國際上定義其嚴重性並進行標準評估。國際原子能總署(IAEA)規定的國際核能事件分級表(INES)將事故的嚴重程度分為 0 級(毫無影響)~7 級(嚴重事故)的八階段，1 級~3 級為異常事件、4 級~7 級則達到事故等級。

分級標準的判斷基準，主要考量其對勞工、一般市民及對環境所造成的實際影響。尤其對排放於環境的輻射性物質劑量為最重要的考量。大致上 5 級為 500 兆貝克(Bq)以上、6 級為 5000 兆貝克以上、7 級為 5 京貝克以上。

其中 5 級以上的災害就有以下紀錄：1952 年 12 月喬克河實驗室核爆事件(加拿大)、1957 年 9 月的前蘇聯東烏拉爾山區的克什特姆核廢料爆炸事故。同年 10 月，英國的溫思喬火災，1959 年 7 月，美國聖蘇珊娜野外研究所核反應堆核心融解。1979 年 3 月美國的三哩島核能事故、1986 年車諾比事故等

### 2. 三哩島核洩漏事故

1979 年 3 月 28 日位於美國賓夕法尼亞州哈里斯堡東南部的三哩島(以下簡稱為 TMI)的核電廠 2 號反應爐，發生了國際核能事件分級(INES)為 5 級的核災事故。

事故的主因在於，主給水幫浦突然停止運作導致冷卻水無法送達蒸發器，再加上其他機器的故障及操作不當，導致反應爐內的冷卻水不足，使爐心上部暴露在蒸氣中造成燃料損壞及爐心融解。

核燃料損壞也導致了大量的放射性物質洩漏至暫時冷卻水中，排放至週遭環境中。

美國的總統委員會對於此次災害的報告發表了評論，表示「不可能再發生比這次更嚴重的事故，這次的事件基本上已經超過可容許的範圍」，為了防止事故再次發生，應尋求”根本上的轉換”。UCS(擔憂的科學家同盟)在 TMI 事故發生後，登報控訴「人民該覺醒了」。

這些訊息不止針對美國的核能產業，但世界各國的政府機關及核能產業並未接收到此次事故帶來的危險訊息，反而採取加強技術的對策。於是在七年後終於發生了比「超過可容許範圍」的事故更加嚴重的事故。

### 3. 車諾比核能事故

1986 年 4 月 26 日，位於舊蘇聯烏克蘭境內的车諾比核能發電廠 4 號反應爐(於 1983 年 12 月開始運轉)發生了 INES7 級的核能事故。

當時第 4 號反應爐正在進行實驗，原本預計應切斷由外部供應的電源，但反應爐的產出卻突然急速上升無法控制，導致爐心融解。其後引發水蒸氣爆炸及氫爆，導致反應爐及反應爐建築的屋頂及牆壁遭到破壞，爐心構造物四處向外飛散，大量放射性物質外洩。

事故發生的原因當初指向操作員違反規定，操作員被處以監禁刑。但之後的調查卻指出，「反應爐構造的缺陷以及明知其有缺陷但卻未採取對策的責任當局」才是事故發生的主因。

根據報告指出，放射性物質擴散到鄰近地區，更甚者擴散至東歐、北歐等國家，住在半徑 30 公里以內的居民大約 13 萬 5000 人受到收容，其中有 28 人因輻射而死亡，再加上 1 人失蹤、1 人燒傷、1 人因其他理由

死亡總計這場意外造成 31 人死亡。其次更造成急性輻射症候群患者 237 人、以及造成 2~50 萬人死於晚發性癌症，這幾乎等於日本本土一半以上的土地遭到高度汙染的情形。

#### 4. 日本國內的事故

##### (1) 日本國內主要的核電事故

在本次事件之前，日本從未發生過 INES 等級 5 以上的事故。於 1991 年 2 月，美濱發電廠 2 號機的蒸發器發生過傳熱細管損傷意外。同年 4 月，濱岡核能發電廠 3 號機發生反應爐吸水量減少的意外。1995 年 12 月，高速增殖爐「文殊」發生鈉洩漏意外引發火災。1997 年發生反應爐・核燃料開發事業團東海回收處理設施發生爆炸意外。1999 年 6 月志賀核能發電廠 1 號機發生臨界事故、同年 9 月，JOC 鎢加工工廠發生臨界事故。2001 年 11 月，濱岡核能發電廠 1 號機發生配管爆炸意外。2004 年 8 月，美濱發電廠 3 號機發生復水管損傷意外等，日本發生了許多核電廠意外。

##### (2) 福島第一核電廠事故

A. 1978 年 11 月 2 日，核子反應爐的 5 支控制棒脫落，估計最大 3 時至 10 點半共計 7 小時半的時間，臨界狀態持續發生。

此次意外是，發生於 1999 年 6 月志賀核能發電廠 1 號機臨界事故，當時東京電力為了調查過去發生過的臨界事故而啟動調查才得以發現的意外紀錄。當時志賀發電廠的事故被視為日本國內首次發生的臨界意外，但實際上福島核電廠此次才是日本國內的第一起核能意外。

A. 同起調查也指出，福島第一核能發電廠在 1979 年 2 月於 5 號機、1980 年 8 月於 2 號機都曾在定期檢修過程中發生控制棒掉落的意外事故。

B. 根據獨立行政法人核能安全基盤機構(JNES)指出，1971 年第一核電廠正式商轉開始直到此次事件之間，1990 年 9 月 3 號機的主蒸氣隔離閥發生故障導致反應爐自動停止(INES2 級)以及 1992 年 6 月 1 號機

的渦輪閥關閉導致反應爐自動停止(同 2 級)等等共有 200 件以上的異常意外發生。

#### 5. 被告們與第一核電廠以外的核能關聯

被告們除了第一核電廠以外也參與了國內其他許多核電廠的製造工程。例如福島的核電廠的 1、3 號機是由被告東芝、2、4 號機是由被告日立為主要製造商，柏崎刈羽核電廠的 1~3 號機是由被告東芝、4~5 號機是由被告日立、6~7 號機是由被告三社共同為製造商。

從上述 3(1)所述的事實來看，被告東芝負責製造濱岡核電廠 1~3 號機的反應爐設備及高速增值爐「文殊」的斷路電源、發電機。被告日立則負責製造志賀核電廠 1 號機的整組工廠設備及濱岡核電廠 1~3 號機的一組渦輪設備。

### 第 3、總結

如上所述，日本是世界上唯一受到原子彈攻擊遭受重大被害的國家，但以包括被告三社在內的大財閥企業等為中心，日本國內仍然不斷積極發展核能產業。另外像 TMI 及車諾比核爆事故等重大事故，核能事故的發生相當頻繁，日本也發生包括第一核電廠等許多意外或故障事故。

## 第五章 本次核爆事故的經過

### 第 1 本次核爆事故的發生

本次核爆事故是由於地震的震動導致冷卻設備受到毀損，加上海嘯摧毀了電源設備，冷卻設備受到損傷無法正常運作，最後導致各號機皆失去控制。結果事故發生後約一個月的輻射放射量偵測結果約 37 京及 63 京，以前述基準來看，這次核爆事故可歸分類為 7 級事故。

國會事故調查報告書(甲 1)指出，本次核爆事故的發生與其經過如下。

## 1、東北地方太平洋地震及海嘯的發生

(1) 2011年3月11日下午2時46分18.1秒，震央位於日本太平洋三陸近海，發生了最大震度7級、震級9.0的東北地方太平洋近海地震以下稱為(「本次地震」)。

### (2) 本次地震發生後海嘯來襲

本次地震所引發的首波海嘯於3月11日15時27分抵達，第二波於同日15時35分抵達，其後也不斷發生零碎的海嘯。

1~4號機側的主機組設置地區的淹水高度(小名濱港公示基準面(O.P.))的淹水高度為O.P.+11.5m~+15.5m。同地區的地面高度為O.P.+10m，因此淹水深度(從地表開始算起的淹水高度)約為1.5m~5.5m。同地區的西南部有部分地區的淹水深度測得約O.P.+16m~17m、淹水深為6m~7m。

另外，5號機及6號機側的主機組的淹水高度為O.P.+13m~14m。同地區的地面高度為O.P.+13m，因此淹水深度為1.5m以下。

## 2、地震發生時核電廠的運作狀況

### (1) 1號機

1號機的反應爐以維持一年間可發電的總量「額定發電量」的運作方式穩定運作中。

### (2) 2號機、3號機

2號機及3號機的熱輸出以核子反應爐設置許可的最大值「額定發熱量」的運作方式穩定運作中。

### (3) 4號機

4號機正進行定期檢查。

全部的燃料以壓力槽從乏燃料池中取出。

### (4) 5號機

5號機正進行定期檢查。



反應爐填滿燃料控制棒也全數插入的狀態下，壓力槽內注入氦氣測試耐壓洩漏，反應爐的壓力上升至 7.2MPa。

#### (5)6 號機

6 號機正進行定期檢修。

反應爐填滿燃料控制棒也全數插入的狀態下正處於冷溫停止狀態。

### 3、受地震與海嘯侵襲第一核電廠的電源設備受災狀況

#### (1) 外部電源設備

1~6 號機的輸電系統為大熊線 1~4 號、夜之森線 1、2 號、東電核能線的 7 號回線。另外，輸電路線為「大熊線 1、2 號」與「大熊線 3、4 號・夜之森線 1、2 號」及「東電核能線」的第 3 路線。

##### a 大熊線

大熊線 1、2 號及東電核能線(1 號機、2 號機)

大熊線 1 號，在 1、2 號機開閉所內的斷路器在 3 月 11 日 14 時 48 分時就停止輸電。

大熊 2 號在東電新福島變電所內的斷路器同樣在 14 時 48 分停止輸電。

由東北電力供應的東電核能線與 1 號機金屬閉鎖配電盤(M/C)連接產生異常，導致無法輸電。

##### b 大熊線 3、4 號(3 號機、4 號機)

大熊線 3 號於新福島變電所內的斷路器

##### c 夜之森線 1、2 號(5 號機、6 號機)

夜之森 1 號於新福島變電所內的斷路器於同 11 日 14 時 49 分停止輸電。

夜之森 2 號於新福島變電所內的斷路器於同日 14 時 48 分停止輸電。

#### (2) 緊急柴油發電機

地震發生後供給新福島變電所的所有外部電源全數停止，同 11 日 14 時 47 分至 14 時 49 分內，除了定期檢查中的 4 號機 A 系統外，全部的緊急柴

油發電機全數開始運作，因此 1~6 號機的緊急用金屬閉鎖配電盤(M/C)的電壓才能恢復正常。

然而，海嘯到達後，設置於 1~6 號機的 13 台緊急柴油發電機中，除了 2 號機 B 系統、4 號機 B 系統及 6 號機 B 系統外其他所有的柴油發電機皆喪失功能。

由上圖可得知，1 號機 A 系統及 B 系統由於設置於 1 號機 T/B 地下室，導致其緊急柴油發電機淹水喪失功能。

2 號機 A 系統及 2 號機渦輪機組(T/B)也由於設置於地下室因此緊急柴油發電機淹水喪失功能。

2 號機 B 系統由於設置於位於 1 樓的運用補助共用設施(共用池)中，其緊急柴油發電機免於遭受淹水。

3 號機 A 系統及 B 系統與 1 號機的情況相同。

4 號機 A 系統及 B 系統與 2 號機的情況相同。

緊急用金屬閉鎖配電盤是由使用 6900 伏特的所內高電壓迴路的動力用電源盤，內含斷路器、保護繼電器、附屬測量器等裝置。分為常用、共通及緊急用的三種系統。

Power Center(P/C)是由緊急用金屬閉鎖配電盤經由變壓器降壓至 480 伏特的所內低電壓迴路使用的動力用電源盤，內含斷路器、保護繼電器、附屬測量等裝置。分為常用、共通及緊急用的三種系統。

緊急用金屬閉鎖配電盤及 Power Center 在沒有外部電源供給時由緊急柴油發電機供電，連接於緊急時也可使用的設備上。

#### 4、海嘯襲擊後第一核電廠的狀況

(1) 如同前述，由於本次地震的震動威力導致從東電新福島變電所至第一核電廠間的輸配電設備受到損傷，導致所有輸電作業停止。此外，自東北電力的輸電網接受電的 66kV 東電核能線原本為配置為預備輸電線，但由於與

1 號機金屬閉鎖配電盤(M/C)的連接線發生異常，因此無法順利輸電，喪失了所有的外部電源。

1 號機與 3 號機在地震發生後自動執行反應爐緊急停止動作。

## (2) 電力的受害狀況

海嘯發生於地震後約 50 分鐘，除了造成一些緊急柴油發電機及冷卻用海水幫浦、6 號機的空冷式緊急柴油發電機(一台)之外，所有的電力供應機能幾乎喪失。

## (3) 其他受災狀況

海嘯挾帶土砂瓦礫、捲起重工業機械、儲油槽等破壞核電廠廠房及其機器設備。3 號機、4 號機超高壓變電所及運用補助共用設施(共用池廠房)也遭到海嘯波及，所有主要廠房區域皆遭到海水沖灌蔓延。

此外，海嘯退去後，海水沖刷帶來的漂流物散亂在核電廠內部，阻礙車輛通行及資材機器的搬運作業。另外人孔蓋及排水孔蓋也被海水沖刷帶走，加上地震威力造成發電廠內部道路隆起凹陷等，使得通行更加困難。

由於電源喪失，中央控制室的儀表儀器及監視、控制系統及發電廠內的照明、通訊系統等也完全失效。更甚者，也無法妥善有效地完成反應爐冷卻作業。反應爐冷卻也就是利用高壓灌水或減壓、低壓灌水、反應爐圍阻體冷卻及減壓、去除最終散熱片餘熱等方法能否有效執行，與電源有相當密切的關係。此外，發電廠內通行不便造成消防車的灌水作業或搶修電源供給、反應爐圍阻體的排氣閥疏通及排氣閥的使用遭受極大的困難。

## 5、反應爐事故進程

相關人士在本次核爆事故採取了逃避責任的態度。但是就結果來說 1 號機及 3 號機發生了反應爐事故，而 4 號機的反應爐機組發生爆炸，其乏燃料池洩漏至外部環境中。

與此相對，5 號機及 6 號機雖經歷重重危機但最後仍成功完成冷卻停機作業。

以下將針對無法成功完成冷卻停機作業的 1~4 號機的事故進程進行詳盡的說明。

#### (1)、1 號機的事故經過

1 號於 3 月 12 日 15 時 36 分時發生氫氣爆炸。

##### A、電源設備的損傷

地震發生後同 11 日 14 時 46 分至 14 時 47 分間，外部電源逐漸無法供給，緊急用母線(由外部電源緊急柴油發電機供電，為使反應爐安全停止的必要設備與供給電源予工學安全設施(緊急用爐心冷卻設備、反應爐圍阻體、反應爐安全噴灑冷卻系統等)的母線。

緊接著襲擊而來的海嘯也造成許多緊急發電機(緊急用 DG)及冷卻用海水幫浦、所內配電系統設備、直流電源設備等遭到浸水。

結果導致 1 號機的全電源喪失。

##### B、1 號機緊急用冷凝器(IC)自動啟動及手動停止

(A) 地震發生時，1 號機正以額定發電量穩定運轉中，地震的發生使其自動進入反應爐緊急停止狀態，控制棒也全數處於插入狀態。

喪失外部電源的結果，使得自緊急用母線接收電源的反應爐保護系(RPS)的電源也隨之消失，反應爐圍阻體發出隔離訊號，主蒸氣隔離閥自動關閉。

主蒸氣隔離閥閉上造成反應爐壓力槽內產生的蒸汽無法送達渦輪設備，造成冷凝器無法排熱，導致反應爐壓力槽中產生的大量蒸氣(壓力約 6.8MPa、溫度約 285 度 C)無法排出，反應爐內的爐壓開始上升。

同 11 日 14 時 52 分，裝設在 1 號機內的調整壓力設備的緊急用冷凝器感應到爐壓上升，自動啟動。

(B) 1 號機的緊急用冷凝器由 A 系統及 B 系統兩種系統構成，其各自都備有為了冷卻水的「冷凝器槽」、及「蒸氣管」，其可在反應爐壓力槽上部引出蒸氣進入冷凝器槽、以及「排水管」，其功能是將冷凝器槽中水的冷凝水導向反應爐壓力槽下部的再循環配管中，另外還有 4 個 MO 閥(電動閥)。

A 系統及 B 系統各 4 個閥中，A 系統的 3A 閥及 B 系統的 3B 閥在運作過程中皆處於關閉狀態。與此相對其他閥(1A、2A、4A、1B、2B、4B)處於開放狀態。但若發生例如主蒸氣隔離閥突然關閉等情況造成爐壓上升，壓力達到 7.13MPa 持續 15 秒以上，處於關閉狀態的 3A 閥及 3B 閥就會自動打開。

3A 閥及 3B 閥打開後，反應爐壓力槽內部高溫高壓的蒸氣就會通過蒸氣管進入設置在圍阻體外的冷凝器槽 A、B 內，在此進行冷卻水的熱交換，最後凝聚成比原本蒸氣的溫度低的水。蒸氣凝結成水，體積會隨之變小，因此可有效降低爐壓。從緊急用冷凝器槽 A、B 內流出的水，分別藉由其排水管進入圍阻體後，會在某個地點交會，接著通過 A、B 兩系統的再循環配管中的 B 系統再循環幫浦入口附近回到反應爐壓力槽的本體內。

1 號機的緊急用冷凝器的最大特徵在於，要達到上述的流程並不需要幫浦等動力支持，是使用「自然循環」的方法。

(C) 如前述，1 號機的緊急用冷凝器在 11 日 14 時 52 分自動啟動，但爐壓卻在其後由 6.8MPa 一口氣下降至 4.5MPa。當時的操作員察覺到爐壓下降的激烈程度，為了進一步確認，手動停止了 1 號機的緊急用冷凝器。

此時，由於地震損壞了一些反應爐系統配管，從損壞的部位向乾燥器(D/W)裡噴出冷卻劑，藉由排氣管、通風集管、下水管等流進抑制壓力室的浸水中造成小破口冷卻劑流失(SB-LOCA)的意外發生。由於損壞部位冷卻劑不斷流失，造成最後燃料也受到損傷、融解。

關於此點稍後再述。

### C、1 號機的爐心受損

(A) 操作員手動停止 1 號機緊急用冷凝器後，於同 11 日 15 時 27 分、15 時 35 分左右海嘯 2 度抵達，造成 1 號機全電源喪失。

1 號機的緊急用冷凝器，全部使用電動閥，實際上的操作雖由 3A 閥及 3B 閥進行，但只要全部的閥處於打開的狀態，不需要動力就可以啟動。因此全電源喪失時 3A 閥及 3B 閥處於打開的狀態，1 號機的緊急用冷凝器並未失去功能，但偶然的是，閥突然關閉，在處於隔離狀態的同時發生全電源喪失的意外，導致此事故更加惡化。

此時 1 號機的主蒸氣閥關閉，緊急用冷凝器釋放出的壓力導致無法散熱，再加上遭地震毀損之處的冷卻劑流失，造成爐內水位偏低、燃料上部露出水面、且過熱造成氫氣氣體與水蒸氣產生反應，非凝結性的氫氣氣體因此堆積在細管裡。

1 號機若因配管斷裂造成冷卻劑流失，可使用高壓注水系統(HPCI)，藉由壓力槽內的蒸氣帶動渦輪驅動幫浦，以冷凝儲藏槽或壓力控制室內的水進行灌水工作冷卻爐心。因此緊急冷凝器喪失功能後，對高壓狀態的 1 號機來說，高壓注水系統應可自動進行灌水。但由於喪失直流電源，灌水作業無法自動進行。

(B) 但關係人士並未意識到 1 號機此時處於危急情況，反而將注意力集中在當時運作狀態不明的 2 號機的反應爐隔離冷卻系統上。

(C) 同 11 日 16 時 42 分，1 號機的反應爐水位計(多頻)在還可觀測的時候，顯示出 -90cm 之後反應爐水位開始變低，在顯示 150cm 後於 16 時 56 分開始數值開始縮小直到無法觀測。

操作員判斷緊急冷凝器可能失去正常運作功能，於 17 時 30 分將滅火系統及爐心注水系統連接，啟動柴油幫浦等待其重新運作。若此時將反應爐的壓力減至 0.69PMa，就可向反應爐壓力槽進行灌水。但此時早已距離將

緊急冷凝器隔離約經過 2 小時，爐心上部早已露出水面、熔融已開始。因此可推測鋯已與氫氣產生反應，已無法進行灌水。直至晚上 20 時測得反應爐壓力已達 6.9MPa。

- (D) 同 11 日 18 時 18 分由於直流電源臨時恢復，操作員再次嘗試開啟緊急冷凝器。但經由操作員確認，可暫時聽見側排氣管傳出蒸氣排出的聲響，但隨即消失。

截至此時，反應爐如同處於乾燒狀態，爐心已受相當程度的受損，鋯與水起反應產生氫氣(非凝結性氣體)經由主蒸氣配管堆積在緊急冷凝器的細管中，造成自然循環功能喪失。

- (E) 只要啟動緊急用冷凝器，其實即可在短時間內有效減壓。

但根據報告，同 11 日過 20 時所測得的反應爐壓力高達 6.9MPa，這時滅火幫浦也尚未開始進行注水。同日 21 時 19 分反應爐水位為 TAF+200mm，顯示這時水位計的數值已開始出現異常。

- (F) 同 11 日 21 時 50 分左右，1 號機反應爐廠房內的輻射劑量上升，此時已採取禁止進入的措施。1 號機本身更是危險，隔天 12 日晚上 0 時之後，相關單位開始檢討排氣閥問題。處於待機狀態的柴油驅動幫浦卻突然燃料用盡，尚未進行灌水作業即無法使用。最後由反應爐減壓後為了灌水而配備在反應爐內 3 台消防車內唯一一台可以正常使用的消防車擔負起注水作業。

- (G) 結果緊急冷凝器在被隔離後並未進行灌水，最後於同 12 日 2 時 30 分發生了反應爐壓力槽損壞的意外。

同 11 日 20 時過後反應爐壓力雖已高達 6.9MPa，安全釋壓閥(SR 閥，當反應爐內壓力異常上升時，為了保護反應爐壓力槽，會自動或藉由中央控制室手動進行安全釋壓)雖未運作，但卻於 12 日 2 時 45 分時，測得壓力為 0.8 MPa。因此可推論，由於反應爐壓力槽損壞，造成反應爐壓力槽與

圍阻體的壓力變為一致。

氣體從處於高壓狀態的圍阻體，經由電導體穿入裝置、圍阻體的法蘭部分及設備進出口等持續注入反應爐廠房內，導致廠房內充滿了輻射、水蒸氣及氫氣。輻射從廠房內往外部環境洩漏，造成用地範圍內的輻射劑量持續增加。

- (H) 同 12 日 5 時 14 分左右，避難範圍擴大到半徑 10 公里之外。從圍阻體洩漏出的輻射量增加，圍阻體內部發生堆芯與混凝土交互作用(CCI)，導致氣體濃度逐漸下降，圍阻體內的壓力終於開始降低至可向壓力槽內灌水，水槽內的水可藉由滅火幫浦送入。但對於滅火幫浦來說，壓力仍舊過大，並無法灌進足夠量的水。

#### D、海水注入排氣孔及 1 號機爆炸

- (A) 相關單位於 12 日 0 時過後開始對 1 號機的排氣孔進行檢討。當時圍阻體內的壓力已超越極限，氫氣、一氧化碳的洩漏導致反應爐變得十分危險。為了爭取時間，原本應迅速進行排氣孔排氣作業。但由於考慮到附近居民安全，決定優先進行疏散工作。

因此 1、2 號機中央控制室的操作員組成特別隊，事先服用下碘化鉀等待疏散時機。然而，正當疏散許可通過，正準備進行避難作業之時，才發現比想像中還難以進行，因為為了準備空氣壓縮機等物品耗費許多時間，終於可進行疏散作業之時已是同 12 日 14 時。

- (B) 當時利用滅火水槽內的水進行注水工作，但由於能持續供給的淡水量有限，導致效率不彰，於 12 時左右決定在同日 14 時 54 分左右進行引灌海水的作業。

自衛消防隊員等在 1 號機反應爐進行注入海水的準備工作，於同 12 日 15 時 30 分左右作業幾乎完成。



(C) 但之後於同 12 日 15 時 36 分左右，1 號機反應爐廠房卻發生爆炸，導致 5 人受傷，而為了引灌海水的配備也受損，其中的消防水管由於受損於爆炸威力而四處飛散的瓦礫，無法與機組聯機。

也由於這次的爆炸，2 號機廠房的破裂板式安全裝置也掉落。廠區邊界的輻射監測值超過 1mSv/h，同 12 日 18 時 25 分，首相菅直人宣布避難範圍擴大至半徑 20km。

爾後消防車終於開始於 12 日 19 時 04 分左右，在 1 號機進行注水作業。

## (2) 2 號機的事故經過

2 號機於 3 月 15 日 6 時左右圍阻體及壓力控制室遭到破壞，導致輻射物質大量洩漏。

### A. 電源設備毀損

2 號機在地震發生時，正以額定發熱量進行正常運轉。電源設備的毀損狀況如同前述，以柴油發電機(緊急用 DG)進行供電得以免於淹水的命運，但除此之外，電源的受損情況與 1 號機相同。

### B. 手動啟動反應爐爐心隔離冷卻系統(RCIC)

同 11 日 14 時 50 分左右，由於朝 2 號機反應爐注水的幫浦突然停止，操作員即採取標準作業流程，以手動啟動反應爐爐心隔離冷卻系統。

2 號機由於受到外部電源喪失導致主蒸氣隔離閥關閉，反應爐內壓力上升時，安全釋壓閥(SR 閥)開始進行自動開關。從安全釋壓閥向壓力控制室注入高溫、高壓的蒸氣造成壓力控制室的水溫開始上升，於是於同 11 日 15 時 07 分啟動餘熱移除系統(RHR)，進入壓力控制室冷卻模式，約 15 時 25 分左右，壓力控制室的灑水系統開始啟動。

### C. 反應爐爐心隔離冷卻系統的啟動狀況

(A) 15 時 28 分左右，2 號機的反應爐爐心隔離冷卻系統再次於反應爐水位高漲之時突然停止。之後由於海嘯的影響，2 號機所有交流電及直流電完全

喪失前，月 11 日 15 時 39 分左右，操作員確認了反應爐水位後以手動啟動了 2 號機的反應爐爐心隔離冷卻系統。

(B) 如同前述，由於海嘯的影響同 11 日 15 時 37 分至 15 時 42 分左右 2 號機及 1 號機皆喪失了所有的交流電源。

(C) 反應爐爐心隔離冷卻系統在約 11 日 15 時 39 分時由操作員手動啟動之後，全電源喪失，因此控制盤上閥的開閉狀態顯示燈全數熄滅，無法藉此確認當時的啟動狀態。

1、2 號機的中央控制室研擬以高壓注水取代反應爐爐心隔離冷卻系統的方法，於 12 日 0 時左右調配電源車至 2 號機附近，開始裝設硼酸水注水系統幫浦。

(D) 2 號機的反應爐水位在同 11 日 22 時左右由於監測器恢復作用而得以監測。同時刻的反應爐水位計顯示水位為 TAF+3,400。當時現場若反應爐隔離冷卻系統未作用的話，同日應於 21 時 40 分左右達到 TAF。但從反應爐水位計的數值來判斷，反應爐隔離冷卻系統的確有進行運作。另外，事實也證明，當時處於危險情勢之下的並非 2 號機，而為 1 號機。

#### D. 反應爐隔離冷卻系統停止及其後的狀況

(A) 2 號機的反應爐隔離冷卻系統於 14 日 13 時 25 分為止持續為反應爐進行冷卻。

反應爐水位仍然維持 TAF+2,400mm，至同日 16 時 30 分為止仍舊存在爐心露出水面的可能性。因此為了迅速進行為反應爐減壓的作業，由消防車進行注水準備，但礙於強烈餘震被迫中斷。

同日 16 時重啟作業時，反應爐水位已下降為 TAF+300mm，完全沒有恢復的趨勢，同日 18 時 22 分，爐心已完全露出水面。

(B) 因此為了降低反應爐壓力，開啟了安全釋壓閥，但圍阻體的壓力卻無法升高至理想標準。由此可推論，這是由於氣體由圍阻體洩漏至反應爐

所導致。反應爐壓力後來有效降低至 0.63MPa，但由於消防車燃料用盡無法繼續注水，使反應爐持續維持乾燒狀態。

同日 19 時 54 分，開始引灌海水。於 20 時 37 分至 21 時 18 分進行注水時，留在反應爐壓力槽底部的水，推測應是自爐心支撐板上溶解而出的熔融物質向下崩落，使之蒸發所造成。

周邊部附近殘留的爐心支撐板上也殘留有高溫、散發輻射熱的雜質。同日約 20 時 30 分至約 21 時 20 分間，進行注水後導致反應爐壓力上升，暫時停止注水；而當反應爐壓力下降後再次重啟注水，但壓力一上升即停止，此情形不停重複，終於在同日 21 時 20 分開啟 2 台主蒸氣安全釋壓閥後，其使反應爐加速減壓並成功獲得功效，得以繼續朝壓力槽進行注水，至 22 時即恢復至 TAF-1,600mm。

以下說明發生上述現象的原因。

爐心噴灑系統送進的水在一開始經過爐心噴灑器時被蒸發，其後注入的水也在接觸到灼熱的雜質時瞬間蒸發，導致反應爐壓力槽內充滿了水蒸氣。由於幫浦注入的水瞬間蒸發為水蒸氣使得壓力增高，此壓力更使得幫浦的注水無法順利進行。由於反應爐冷卻劑的穩壓器已受到損傷，即使此時造成許多洩漏處產生也不意外。

例如，爐底部的中子偵檢器底座及控制棒驅動系統底座(CRD)的貫穿處及控制棒驅動系統(CRD)底座下部的法蘭部金屬 O 形環連接的鐵氟龍已毀損。反應爐循環系統的配管中殘留的水受到來自反應爐的壓力壓迫，從幫浦及軸部的軸封處排向圍阻體內。法蘭閥蓋(bonnet flange)及壓蓋填料(gland packing)等已無法維持其密封功能，連壓力槽上蓋的螺栓也由於高溫潛變而鬆脫，可能也導致法蘭部的金屬 O 形環失去密封功能。若熔毀隔覆蓋(Shroud)的 洞部，從孔洞中洩漏出的熔融物質，可能也會對壓力槽洞部的配管造成損傷。

上述反應爐冷卻劑壓力邊界(Pressure Boundary)的健全功能，如今看來已出現漏洞。

朝反應爐壓力槽內注入的水，蒸發為高壓蒸氣阻斷了幫浦注水，最後漏出至圍阻體。反應爐壓力槽內部減壓，但卻導致圍阻體內壓力上升，於是繼續朝減壓的反應爐容器內進行注水，當時的 2 號機不斷重複上述作業。

#### E. 2 號機圍阻體毀損

##### (A) 壓力控制室的大規模毀損

隨著圍阻體的壓力上升，氣體會隨之被擠壓至壓力控制室。導致壓力控制室的水溫過高，失去凝縮能力，水面上浮出氣泡，導致壓力控制室內產生斷斷續續的震動。此狀況在內部壓力上升時發生。彷彿同時在壓力控制室內進行耐壓及耐震的測試。

反覆測試也無法順利運作的 2 號機排氣閥在同 15 日 6 點左右發生了大規模的毀損意外。

##### (B) 圍阻體毀損

RCIC 停止注水後，2 號機的反應爐也無法順利解除乾燒狀態，再加上乾井內壓力隨之上升，在 16 日 0 時 2 分達到 0.75MPa。同日 6 時達到 0.73MPa 時，反應爐水位顯示為 TAF-2,800mm。

此時 4 號機反應爐廠房發生爆炸，同時從 2 號機的圓盤狀壓力控制室也傳出爆炸聲。接著正門附近的輻射值上升至 0.6mSv/h。

同日 11 時 25 分，圍阻體的壓力下降至 0.155MPa，並非圍阻體排氣閥發生功效，而是由於圍阻體毀損所造成，並導致洩漏出大量的輻射物質。

#### (3) 3 號機的事故經過

3 號機於 3 日 14 日 11 時 1 分，持續發出橘色閃光，研判可能發生了核爆。

##### A. 從地震發生到海嘯抵達時 3 號機的狀況

(A) 3 號機與 2 號機在地震發生時，皆以額定熱輸出量正常運轉。

地震發生後，3 號機的反應爐自動緊急停止，並以手動停止主控制閥。  
同日 14 時 48 分，由於地震影響導致外部電源喪失，主蒸氣隔離閥自動全數關閉。

此時 3 號機的緊急柴油發電機自動啟動，高壓配電盤的緊急母線電源得以恢復正常供應。

- (B) 同 11 日 15 時 5 分左右，3 號機的反應爐爐心隔離冷卻系統(RCIC)以手動進行啟動，同日約 15 時 25 分，由於反應爐水位升高導致自動停止。此時，3 號機的反應爐壓力升高，主蒸氣安全釋壓閥(SR 閥)的安全閥發揮功能，使主蒸氣安全釋壓閥自動開啟，蒸氣洩至壓力控制室導致壓力控制室內的水溫呈現上升傾向。

#### B. 海嘯襲擊後的狀況

- (A) 同 11 日約 15 時 27 分及同日約 15 時 35 分時，海嘯來襲，造成 3 號機於同日約 15 時 38 分喪失所有的交流電源。

3 號機原本就與 1、2、4 號機不同，直流電源盤設置在渦輪機廠房地下樓層，免於遭受水患，直流電源得以持續供給，可以透過計測機器得知反應爐壓力及水位等重要數值。

- (B) 由於 3 號機並未喪失直流電源，得以啟動反應爐爐心隔離冷卻系統及高壓注水系統(HPCI)。

同日約 16 時 3 分，反應爐爐心隔離冷卻系統以手動開啟，為了預防其突然停止，設置高壓注水系統為隨時可啟動的狀態。

反應爐爐心隔離冷卻系統於同 12 日 11 時 36 分停止，1 小時後高壓注水系統自動開啟，運轉至同 13 日 2 時 42 分為止。

#### C. 反應爐爐心隔離冷卻系統及高壓注水系統停止的經過與 3 號機

- (A) 同約 12 日 11 時 36 分，因不明原因造成反應爐爐心隔離冷卻系統突然停止。操作員雖嘗試重新啟動但仍然失敗。

由於反應爐爐心隔離冷卻系統停止，造成反應爐水位降低，因此同日 12 時 35 分左右，高壓注水系統自動開啟，使壓力逐漸下降，過 19 時之後，觀測反應爐壓力計，測得 3 號機的反應爐壓力從 0.8MPa 上升至 1.0MPa。

- (B) 同日 20 時 36 分左右，3 號機的反應爐水位計的電源供給不足，導致無法持續觀測水位。

操作員在此狀況下，為了確保朝反應爐內注入足夠的水量，將高壓注水系統的流量調大，並持續監視其釋出的壓力，藉此來確認運轉狀態。但事實上，高壓注水系統原本是在反應爐壓力在 1.03MPa 至 7.75MPa 程度的高壓狀態下，短時間內朝反應爐內大量注水用的注水系統。

3 號機的高壓注水系統，在反應爐壓力從 0.8MPa 逐漸上升至 0.9MPa 時，邊微調整流量、以比正常操作所規範的運轉範圍還低的迴轉數進行長時間的運轉。於是高壓注水系統釋出的壓力逐漸變小，逐漸與反應爐壓力進行抗衡。因此操作員在反應爐\_\_不明的情況下，判斷由高壓注水系統並無法充分注水，同時採用與平常相異的運轉方式不妥當，於同日 13 日 2 時 42 分以手動停止高壓注水系統。

- (C) 高壓注水系統停止導致無法朝反應爐注水。此時反應爐壓力急速上升，也無法使用柴油驅動的消防幫浦進行送水，自同日 4 時 15 分爐心開始露出水面。也是從此時開始，鋳—水發生化學反應產生大量的氫氣。

操作團隊為了操作控制閥，進入圓盤狀壓力控制室，但其實由於前述反應爐爐心隔離冷卻系統、高壓注水系統、主蒸氣安全釋壓閥的操作不當造成內部灌入大量來自反應爐的衰變熱，導致內部溫度相當高。同日 5 時反應爐壓力超過 7.38MPa、水位為 TAF-2000mm，並持續下降，於 7 時 35 分時反應爐水位降低至爐心支撐板的位置。

- (D) 同日 8 時 41 分，控制閥操作成功將最高上升至 0.637MPa 的圍阻體壓

力降低。此時，核電廠境內的輻射值已上升至  $882 \mu \text{ Sv/h}$ 。為了開啟主蒸氣安全釋壓閥操作電磁閥，收集電池而四處奔走的作業員回到此處，終於成功將反應爐壓力降低。

至同日 9 時 25 分，反應爐壓力已成功下降許多，立刻進行注水作業，不消多久，水位已恢復至 TAF 水準。

但同日 12 時 20 分左右，注水用的水開始不足，導致作業中斷，3 號機的水位又下降至 TAF 水準之下，13 時顯示為 TAF-2000mm。其後開始引灌海水，但仍就無法恢復 TAF 水準，此時反應爐廠房入口的氣閘門附近輻射值已高達  $300 \text{ mSv/h}$ ，中央控制室也達到  $12 \text{ mSv/h}$ 。

#### D. 3 號機爆炸

3 號機持續乾燒狀態，於同 14 日 4 時 30 分時爐心完全露出水面。消防車及自衛隊的灑水車陸續趕到，正準備進行注水作業約同日 11 時 1 分時，伴隨著橘色的閃光，3 號機的反應爐廠房發生爆炸。大大小小的瓦礫及粉塵自數百公尺的高度飛落而下，將控制閥廠房的天花板砸出了大洞。這次甚為激烈的爆炸與 1 號機的爆炸很明顯地有所不同，判斷其並非氫氣爆炸，而是發生了核爆。因這次爆炸導致 7 人受傷、作業中斷。再次回到現場並重新開始引灌海水時間已是五個小時後，約 16 時 30 分之時。

#### (4) 4 號機發生事故的經過

4 號機當時正進行定期檢查，但約 3 月 15 日 6 時，反應爐廠房發生爆炸，導致乏燃料池(SFP)裸露至外部環境。

A. 3 月 11 日 14 時 46 分地震發生時，4 號機由於處於定期檢查狀態，因此反應爐內的燃料全數被取出，貯存在乏燃料池中。

地震發生導致喪失外部電源，這時主蒸氣安全釋壓閥自動關閉，緊急柴油發電機自動啟動。

- B. 3月11日15時27分及同日15時35分海嘯來襲，導致4號機喪失所有交流電源，同時直流電源也停止，導致全電源喪失，無法測知乏燃料池的水溫。
- C. 4號機反應爐廠房發生爆炸
- (A) 3月15日6時10分，4號機反應爐廠房發生爆炸。
- 爆炸發生的原因目前尚未釐清。東電對此做出說明，由於3號機產生的氫氣逆流至備用氣體處理系統(SGTS)灌入4號機反應爐廠房中，就在反應爐廠房內充滿爆炸性氣體時，因為不明原因起火，導致氫氣爆炸。
- 但值得注意的是，僅憑自3號機灌入的氫氣即可造成4號機反應爐廠房爆炸，此一說明是否可信還有深入探討的必要。
- (B) 4號機廠房雖然發生爆炸受損嚴重，且乏燃料池裸露至外部，但由廠外得知，4號機的乏燃料池內水量仍維持正常，並未發生燃料裸露的情形。