

GE 1712 能源核電與輻射

# 三哩島核能電廠事故

李 敏

國立清華大學  
工程與系統科學系

# 內容

- 前言
- 事故流程說明
  - 背景資料
  - 事故時序
- 事故緊急應變措施
- 事故人員傷害與環境劑量評估
- 事故發生原因
- 三哩島事故的後續措施
- 三哩島事故的衝擊
- 三哩島事故再發生的可能性

# 前言

1979年3月28日凌晨四時，位於美國賓夕凡尼亞州哈里斯堡的三哩島核能電廠二號機發生跳機。

28日凌晨值班人員發現，圍阻體地面有少量積水，且積水中含有放射性物質。

早晨7時，圍阻體內的放射性強度已較正常時的讀數高出倍，電廠宣佈進入所謂的「廠址緊急狀態」。

狀況持續惡化，電廠於7時30分宣佈進入「全面緊急狀態」。

8時15分直昇機環境偵測結果顯示三哩島電廠上空的輻射劑量強度為每小時0.20 ~ 0.30毫西弗。

離電廠2 ~ 3英哩處的空中輻射劑量強度則為每小時0.05 ~ 0.07毫西弗。

3月29日美國核管會宣佈，三哩島發生美國商用反應器運轉以來所發生的最嚴重事故。

## 前言(續)

3月30日美國核管會估計，受損燃料棒比例已達60%。電力公司也首次承認反應器爐心尚無法適當的冷卻，如果事故繼續惡化下去，將對附近居民的安全造成威脅。

從美國各地趕赴而來的工程師和專家們群集出事電廠，苦思對策，希望找出方法使事故不再繼續惡化。

3月30日電廠周圍3英哩半徑範圍內的輻射劑量強度為每小時0.25毫西弗。賓州州長下令將電廠周圍5英哩範圍內的學齡前兒童及孕婦撤離，並通知電廠附近四個鎮的90萬居民準備疏散。

白宮於30日成立特別行動小組，統籌規劃三哩島事故應變事宜。特別行動小組派遣核管會的哈諾德·鄧肯赴三哩島電廠，全權處理事故。

鄧肯的抵達，使得電廠的混亂情況獲得改善。工程師和專家們逐漸將反應器冷卻，成功的遏止了事故的惡化。

4月1日，卡特總統親赴三哩島電廠巡視，以具體行動向民眾宣示三哩島事故的威脅已告解除。

# 事故流程說明

## 背景資料

- 三哩島核能電廠採用壓水式反應器，反應爐供應商為美國 Babcock & Wilcox (B&W)。
- 1978年3月28日三哩島電廠二號機第一次臨界，裝置淨供電 880 MWe。
- 1977年9月24日 Davis-Besse 一號機 (B&W) 曾發生類似暫態事故，但處置得宜，機組穩定控制。
  - \* 假信號造成飼水進蒸汽產生器隔離。
  - \* 低水位信號起動緊急飼水系統並隔離主蒸汽隔離閥。
  - \* 一次系統壓力上升造成平壓槽動力釋壓閥動作。
  - \* 一次側溫度因壓力上升而上升，運轉人員手動急停反應器。
  - \* 一次側的壓力急減，然而動力釋壓閥故障未關。
  - \* 水反蒸汽混合物自調壓槽逸出，流入反應器洩水槽。
  - \* 反應器洩水槽的模片因調壓槽排水過多而破裂，冷卻水逸出到圍阻體廠房。
  - \* 急停20分鐘後，運轉員診斷釋壓閥卡在開的位置，隨即將其關掉，並用高壓注水系統 (HPIS) 補水，機組穩定的停機。

# 事故流程說明

## 事故時序

**3/28/1979, 4:00:37 am**

由於化學除污系統的樹脂發生阻塞現象，使得凝結水泵跳脫，進而也使飼水泵和汽機跳脫，停止運轉。於是輔助飼水泵自動啟動，但由於輔助飼水管路上的一閥門，在維修後沒有依照規定打開，故無法將水注入蒸汽產生器二次側，反應器內產生的熱無法移除，造成反應器壓力快速上升，調壓槽灑水系統自動啟動灑水降壓，釋壓閥亦開啟洩壓，但系統壓力仍就繼續上升，觸及反應器急停設定值。控制棒插入爐心，核分裂反應停止。

**3/28/1979, 4:00:50 am**

反應器急停後，功率降低，反應器壓力亦隨之降低。當反應器壓力降至釋壓閥門自動關閉點時，閥門卻沒有關閉，於是冷卻水由閥門持續流出。由於輔助飼水無法進入蒸汽產生器，故蒸汽產生器內二次側的水已逐漸被燒乾。另一方面，釋壓閥的開啟造成反應器壓力持續下降，導致緊急爐心冷卻系統自動啟動，將高壓硼水注入爐心。運轉員開始擔心調壓槽的水位過高會使調壓槽喪失調壓功能。值得一提的是，運轉員此時不知道蒸汽產生器已經沒有飼水，且調壓槽釋壓閥發生故障，沒有關閉。

# 事故流程說明

## 事故時序(續)

**3/28/1979, 4:06 am**

自調壓槽釋壓閥流出的冷卻水進入位於圍組體的洩壓水槽，洩壓水槽很快的被注滿，溢流到圍阻體的集水區。集水區水位升高，圍阻體集水機的抽水機自動啟動，將水送進輔助廠房。

**3/28/1979, 4:08 am**

運轉人員發現蒸汽產生器二次側輔助飼水閥門是處於關閉的狀態，於是手動打開閥門。飼水進入蒸汽產生器的二次側，但為時已晚，此時一次側已有大量的水蒸汽，使得熱無法有效的自蒸汽產生器移除。

**3/28/1979, 4:10:24 am**

運轉員降低高壓緊急注水系統的流量，避免調壓槽水位過高。

**3/28/1979, 4:15 am**

冷卻水持續自釋壓閥流出，進入圍阻體的集水池，轉而進入輔助廠房。

# 事故流程說明

## 事故時序(續)

**3/28/1979, 4:40 am**

爐外中子偵檢器讀數指示高於預期，運轉員擔心反應器在臨界。

**3/28/1979, 5:14 am**

因系統壓力過低，且系統內已產生蒸汽，冷卻水泵發生嚴重振動，為了防止冷卻水泵的損壞，運轉人員將 B 迴路之冷卻水泵停止運轉。

**3/28/1979, 5:40 am**

A 迴路之冷卻水泵也以同樣的理由關閉，在缺乏動力下，反應器內汽水開始分離，爐心上方的水蒸汽阻止了水流動。預期中的自然對流現象並未發生。此時水位大概只在爐心上方三十公分。

**3/28/1979, 6:18am**

運轉人員此時終於注意到釋壓閥沒有關閉，於是手動關閉了釋壓閥，反應器溫度及壓力隨即上升。



# 事故流程說明

## 事故時序(續)

**3/28/1979, 6:55 am**

由於燃料已有破損，冷卻系統之高放射性警報響起。可惜沒有任何一位運轉員記得聽到警笛聲。可能是由於數以百計的警報聲響起，運轉員無法及時分辨處理，故隨手把警報關掉。也可能主要警報聲響失效或是運轉員漏聽。此時，運轉員依然不知道圍阻體建築內，含有放射性的水和蒸汽量正持續的升高中。

**3/28/1979, 7:30 am**

圍阻體、反應器廠房和輔助廠房輻射強度繼續上升。

**3/28/1979, 8:30 am**

運轉員嘗試利用蒸汽產生器的建立移熱路徑，但由於反應器內的汽水分離現象而失敗。

**3/28/1979, 11:38 am**

運轉員設法降壓，想利用低壓移熱系統移熱，但是反應器的洩壓能力<sup>9</sup>不夠無法降壓。

# 事故流程說明

## 事故時序(續)

### 3/28/1979, 1:50 pm

在降壓操作中，圍阻體內發生氫氣燃燒現象，圍阻體瞬間壓力高達19個大氣壓力。

### 3/28/1979, 5:30 pm

重新以高壓注水系統加壓，使反應器內的水蒸汽凝結，以便再啟動冷卻水泵。

### 3/28/1979, 7:51 pm

A 迴路冷卻水泵啟動成功，冷卻水自反應器流入蒸汽產生器，經由蒸汽產生器二次側，將衰變熱移除，危機終告解除。

搶救工作進行到這裏時，爐心內的熱可以移出，機組的安全已無問題。但由於當時對爐心熔損事故的物理現象並不了解，且對圍阻體內所累積的氫氣是否會發生爆炸，存有相當大的疑慮。為了民眾安全，賓州州長於三月三十日下令將電廠五英哩內的學齡前兒童和孕婦撤離。

# 事故緊急應變措施

- 3/28早晨7時，圍阻體內的放射性強度已較正常時的讀數高出倍，電廠宣佈進入所謂的「廠址緊急狀態」。
- 狀況持續惡化，電廠於7時30分宣佈進入「全面緊急態」。
- 3月30日，電廠周圍3英哩半徑範圍內的輻射劑量強度為每小時0.25毫西弗，賓州州長一度要疏散電廠附近四個鎮的部份居民，但在與核管會及電力公司磋商之後決定暫緩實施，僅僅勸導居民減少外出並緊閉門窗。
- 賓州州長下令將電廠周圍5英哩範圍內的學齡前兒童及孕婦撤離，並通知電廠附近四個鎮的90萬居民準備疏散。
- 從美國各地趕赴而來的工程師和專家們群集出事電廠，苦思對策，希望找出方法使事故不再繼續惡化。
- 白宮於30日成立特別行動小組，統籌規劃三哩島事故應變事宜。特別行動小組派遣核管會的哈諾德·鄧肯赴三哩島電廠，全權處理事故。

# 事故人員傷害與環境劑量評估

- 事故中沒有任核工作人員獲民眾受到輻射傷害。
- 爐心嚴重熔毀，大量的放射性物質釋放到圍阻體內，但圍阻體發揮阻絕功效。僅少部份放射性物質由輔助廠房的集水池釋放到外界環境中，據估計其中含1.6~8.4%的惰性氣體，及17居里活度的碘-131。
- 7:24 輔助廠房氣體排放系統輻射偵檢讀數過高以致無法讀取，宣佈緊急情況發生。空浮導致輔助廠房高輻射，此也是向大眾公開原因。
- 外釋的放射性物質所造成的最高輻射劑量約0.37毫西弗，比自然輻射背景值的1~2毫西弗還來的低。
- 事後對該廠周圍80公里地區以內300萬人口進行輻射劑量偵測，平均每人輻射劑量為0.1~1.6毫西弗(美國民眾每年平均全身接受輻射劑量2.13毫西弗)
- 平均而言當地每人因癌症而死亡者，機率增為800萬分之一

# 事故發生原因

- 機組設備與系統長期運轉在劣化狀況。
- 機組參數如水位、溫度或其他的儀錶讀數沒有計讀，未經獨立查證即認為不可用，因而機組存在徵兆被誤解，而未採正確應變措施。
- 控制室人機介面設計不當。
- 事件導向緊急運轉程序書與相關訓練程序書不妥適，無法處理復雜參數。欠缺程序書處理未分析之狀況。
- 運轉人員的訓練與甄選不適當，欠缺對機組現象的基本了解，尤其是蒸汽與水的熱力性質，阻礙對反應爐系統狀況正確分析。導致釋故中致力處理非重要機組設備，欠缺對反應器冷卻水無解釋狀況的注意。
- 業者的經驗沒有相互交流的途徑。

## 三哩島事故的後續措施

- 三哩島事故發生後，卡特總統下令組成12人調查小組，對事故過程進行調查。
- 調查報告內容除向總統建議管制單位與電廠業主應改進之事項外，並強調操作員素質的提昇與訓練要求。
- 增設值班技術顧問 (Shift Technical Advisor)
- 電廠模擬器的增設
- 緊急運轉程序書的發展
- 既有電廠設備與設計改善
- 緊急應變組織的加強
- 運轉經驗系統回饋

## 三哩島事故的後續措施(續)

- 1980年5月以NUREG-0660發出一份三哩島事故改善計畫 (TMI Action Plan)，要求各商用核能電廠據以逐項檢討並進行改善工作。
- 1980年11月針對NUREG-0660發行NUREG-0737計畫的執行，並包括更多的資訊，如時程、運用、執行審查、提出資料，提出日期及技術立場，共約有120項改善後要求。
- 1981年6月NUREG-0718 表明核管會對 TMI 事故經驗教訓立場

# 三哩島事故的衝擊

- 三哩島事件震驚了世界！核能界一直不願意面對的反應器爐心熔毀事件終於發生了。讓核能界感到慶幸的是，深度防禦概念中，作為最後一道防線的圍阻體的確可以發揮功能，將爐心熔毀後所釋出的放射性物質包封住，不讓它排到外界環境中，造成環境的衝擊和民眾的輻射傷害。反核人士口中說爐心熔毀事故真的發生了，但後果並沒有像發生核反生高壓的泛受到上轉助等問題。



## 三哩島事故的衝擊(續)

- 三哩島事件使得核能界了解到：運轉人員的臨場應變對核能電廠安全的重要性，電廠控制室的人機介面也需要適當的改善，以及電力公司間運轉經驗相互交流的必要性。後一項的認知促成了美國核能運轉協會 (Institute of Nuclear Power Operation, 簡稱INPO)，及在前蘇聯車諾比爾事故後成立的世界核能運轉組織 (World Organization of Nuclear Operation, 簡稱WANO)等國際組織的成立，這些組織的主要功能即為核能電廠運轉經驗的交流，希望透過相互合作，提昇電廠的安全。三哩島事件之後，法規管制單位提出不少新的規定，要求電力公司改正缺失，其中不少牽涉到硬體設施的改善，這些要求使得核電的成本大幅攀升。法規管制單位也意識到，核能界對爐心熔毀的物理及化學現象瞭解不夠，因此大幅度提高相關研究的經費。

## 三哩島事故的衝擊(續)

- 從安全的角度來看，三哩島事件對核能電廠安全所帶來的衝擊是正面的，它促成了核能界全面檢討核能電廠的安全運作模式，發覺許多隱藏性盲點，進而提出相當多的改善方案，這些改善措施直接提昇了電廠的安全。

## 三哩島事故再發生的可能性

基本上，三哩島事件是多重安全系統同時喪失功能所造成。核能電廠由於有潛在性的危險，因此運用龐大且複雜的多重安全系統來維持爐心的持續冷卻。每個安全系統中分別使用著各式各樣的組件。理論上來說，這些組件絕非百分之百的可靠，亦即每個組件仍有壞的可能性；換句話說，雖說是微乎其微，但多個重要組件還是有可能同時發生故障或損壞。基於這一體認，沒有人保證類似三哩島的事故不會再發生。

# 三哩島事故與 車諾比爾災變反應器狀況的比較

## 三哩島事故

- ※燃料大量熔損
- ※反應器壓力槽保持完整
- ※揮發性較高的放射性物質自融損的燃料釋出進入圍組體
- ※圍組體保持完整, 僅少量的放射性物質尤其他途徑進入環境

## 車諾比爾災變

- ※大量燃料於爆炸中損毀
- ※反應器瞬間解體
- ※石墨起火燃燒(5000K)
- ※放射性物質自爆炸瞬間即進入環境
- ※石墨燃燒造成大量放射性物質釋放到外界環境

# 三哩島事故與 車諾比爾災變的後果比較

## 三哩島事故

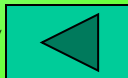
- ※造成的少量放射性物質外釋環境
- ※造成的最高劑量為0.37毫西弗(約4~5張胸部X光,賓州地區之背景輻射為1~2毫西弗)
- ※長期的健康性應評估因研究取樣及數據解釋的不同而有所不同

## 車諾比爾災變

- ※大量放射性物質外釋環境
- ※ 237位職業工作者,134位發生急性確定效應,28人在三個月內因輻射傷害死亡,事故10年後,另有4人死亡
- ※總面積43000平方公里的高劑量區被劃為禁制區

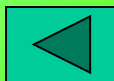
表一 國際核能事件分級制度基本架構

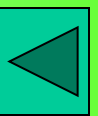
等 級	準則1	準則2	準則3
	廠外衝擊程度	廠內衝擊程度	安全防禦之衰減程度
7級 (最嚴重意外事故)	極大量放射性物質外釋： 造成廣泛性環境之影響		
6級 (嚴重意外事故)			
5級 (廠外意外事故)	有限度之放射性物質外 釋：造成須部份施行區域 性緊急計畫	嚴重之核心或放射性屏 蔽毀損狀態	
4級 (廠區意外事故)	輕微放射性物質外釋： 造成民眾輻射曝露達規 定限值程度	局部性核心或放射性屏 蔽毀損之狀態，工作人員 有致命性曝露發生	
3級 (嚴重事件)	極少量之放射性物質外 釋：造成民眾輻射曝露 尚未達規定限值之程度	發生大量污染擴散及工 作人員有輻射急性效應 發生	接近發生事故狀態， 喪失安全防禦功能程度
2級 (偶發事件)		重要污染擴散及人員超 曝露狀況	發生潛在安全影響之事 件
1級 (異常警示)			發生功能上之偏差
0級 (未達級數)	無 安 全 顧 慮		



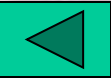
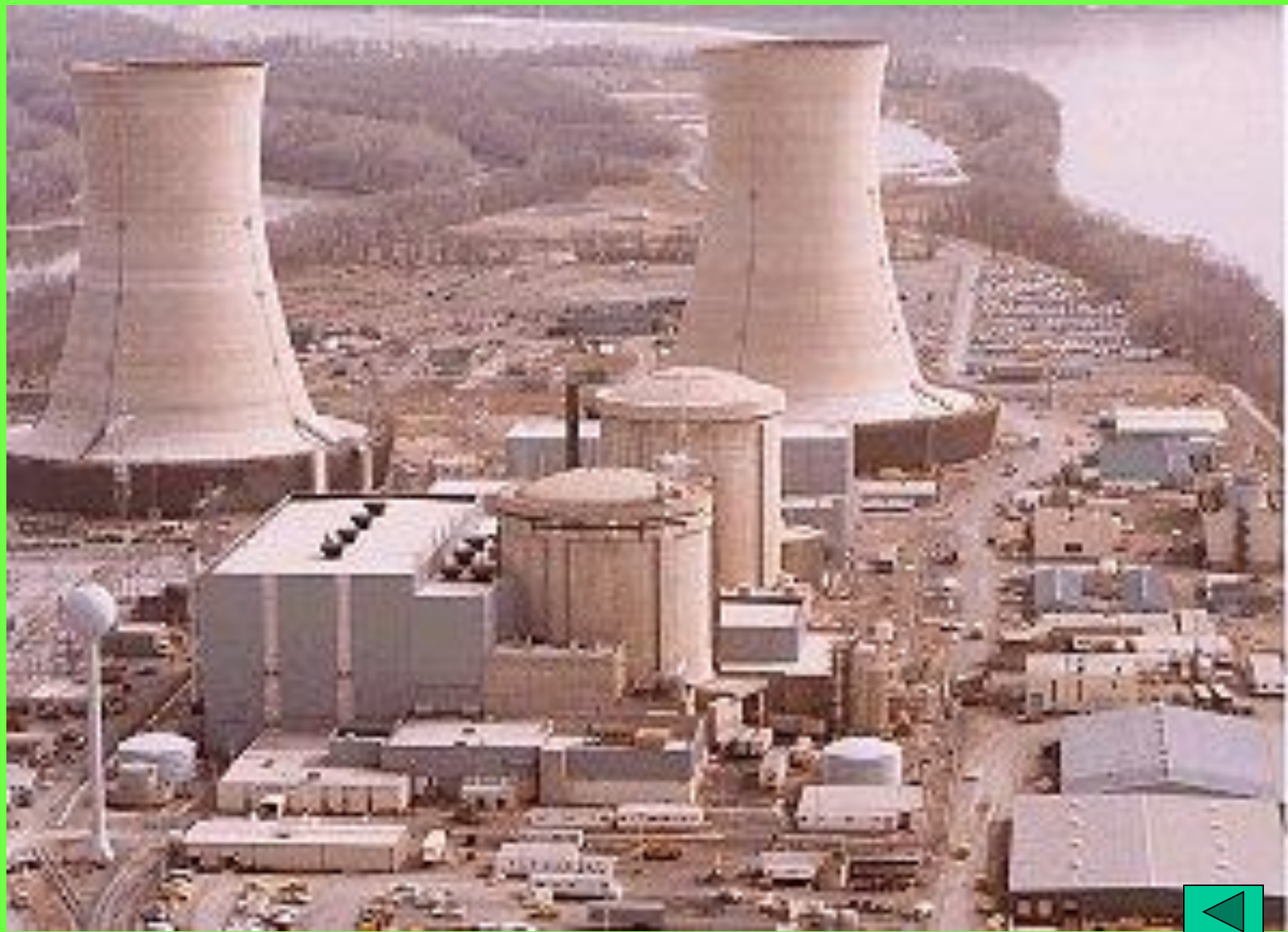
## 表二 國際核能事件分級制度

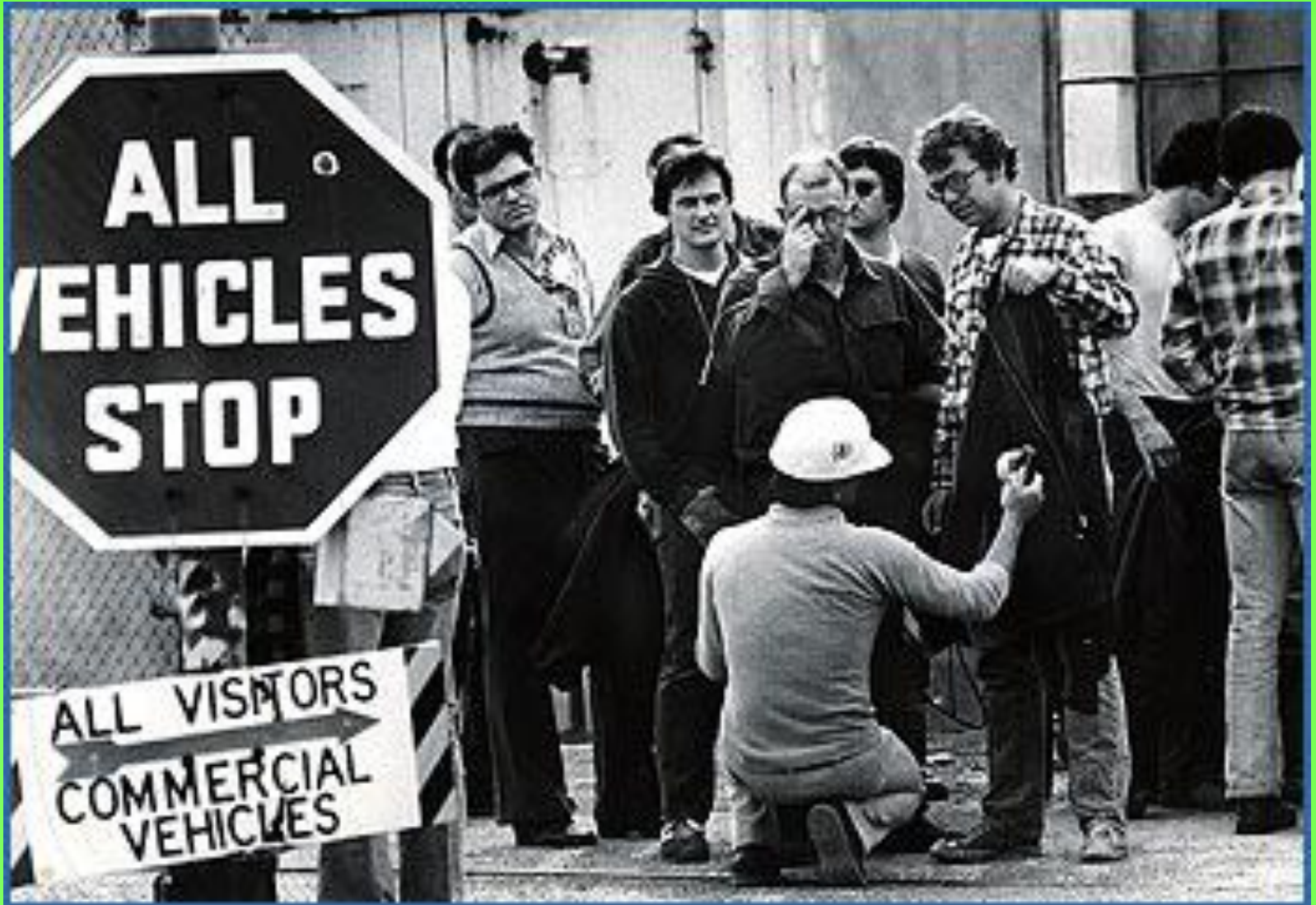
事件類	等級	標準	實例
核子事故	7級 (最嚴重意外事故)	(1)大量的放射性混合物外釋出爐心至廠外各處。放射性物質包含各類、長半衰期之分裂產物。 [相當釋放放射性量超過 $10^{11}$ 貝克(Bq)I-131之量] (2)可能造成民眾急性健康效應。 (3)廣泛造成區域性輻射延遲效應。 (4)對環境造成長期影響衝擊。 (5)影響程度超過四度。	如1986年4月在蘇聯(今之烏克蘭)發生之車諾比爾(Cheznobyl)核電廠事故。
	6級 (嚴重意外事故)	(1)核分裂產物外釋(相當釋放放射性量在 $10^{10} \sim 10^{11}$ 貝克I-131之放射性物質外釋量) (2)須全面施行區域性緊急計劃以減少嚴重之輻射健康效應。	如1957年在蘇聯(今之俄羅斯) Kyshtym 再處理廠發生之事故。
	5級 (廠外意外事故)	(1)造成核分裂產物之外釋(相當造成 $10^{10} \sim 10^{10}$ 貝克I-131之放射性物質外釋量)。 (2)局部施行緊急計劃(必要避難所及/或撤退之施行),以減低可能產生之輻射健康效應。 (3)爐心因操作失調和/或損壞而造成之嚴重事故。	①如1957年發生在英國 Windscale廠的事故。 ②如1979年發生在美國的三哩高核電廠事故。
	4級 (廠區意外事故)	(1)放射性物質外釋至廠外造成廠外民眾個人劑量達幾個毫西弗(Millisievert)。 (2)通常不作廠外防護措施,必要時方執行區域性之食物管制措施。 (3)廠區重要設備損壞,如爐心局部熔毀等。 (4)造成工作人員高劑量致死之超曝露(5支當)。	如法國Saint Laurent核電廠在1980年發生之事故。 如1983年阿爾及爾 Embalse 核電廠發生之事故。 如日本JCO 核燃料處理廠於1999年9月發生之臨界事故。
異常事件	3級 (嚴重事件)	(1)放射性物質之外釋至廠外造成廠外民眾個人劑量達 $10^{-1}$ 毫西弗程度事故。 (2)工作人員發生急性健康效應(全身曝露1支當) (3)若再發生安全系統故障將演變成事故之狀態	如西班牙 Vandellós 核電廠在1989年發生之事件。 如我國核二廠於1993年3月發生之人員超劑量事件。
	2級 (偶發事件)	(1)發生重大異常事件,但尚不足以影響到電廠之安全狀況。 (2)導致工作人員受到超出法定年劑量限制之事件。	如我國核三廠於1993年4月發生之廠區重大污染事件。
	1級 (異常警告)	(1)功能或運轉上之異常,但並未顯示有何危險狀態,只是顯示違反安全有關規定。 (2)由於設備故障,人為疏失或程序規定不健全導致之狀態。(此類異常狀態須與未違反運轉限制和正確依據適當程序書之狀況加以區別,這些狀況將劃分成未達級數之0級)。	如1999年9月我國核一廠於廠區內發生之廢料運送車掉落乾草事件。
偏差	0級 (未達級數)	無任何安全顧慮。	如我國核一、二廠於1999年7月因輸配線路磁塔倒覆而發生之急停事件。








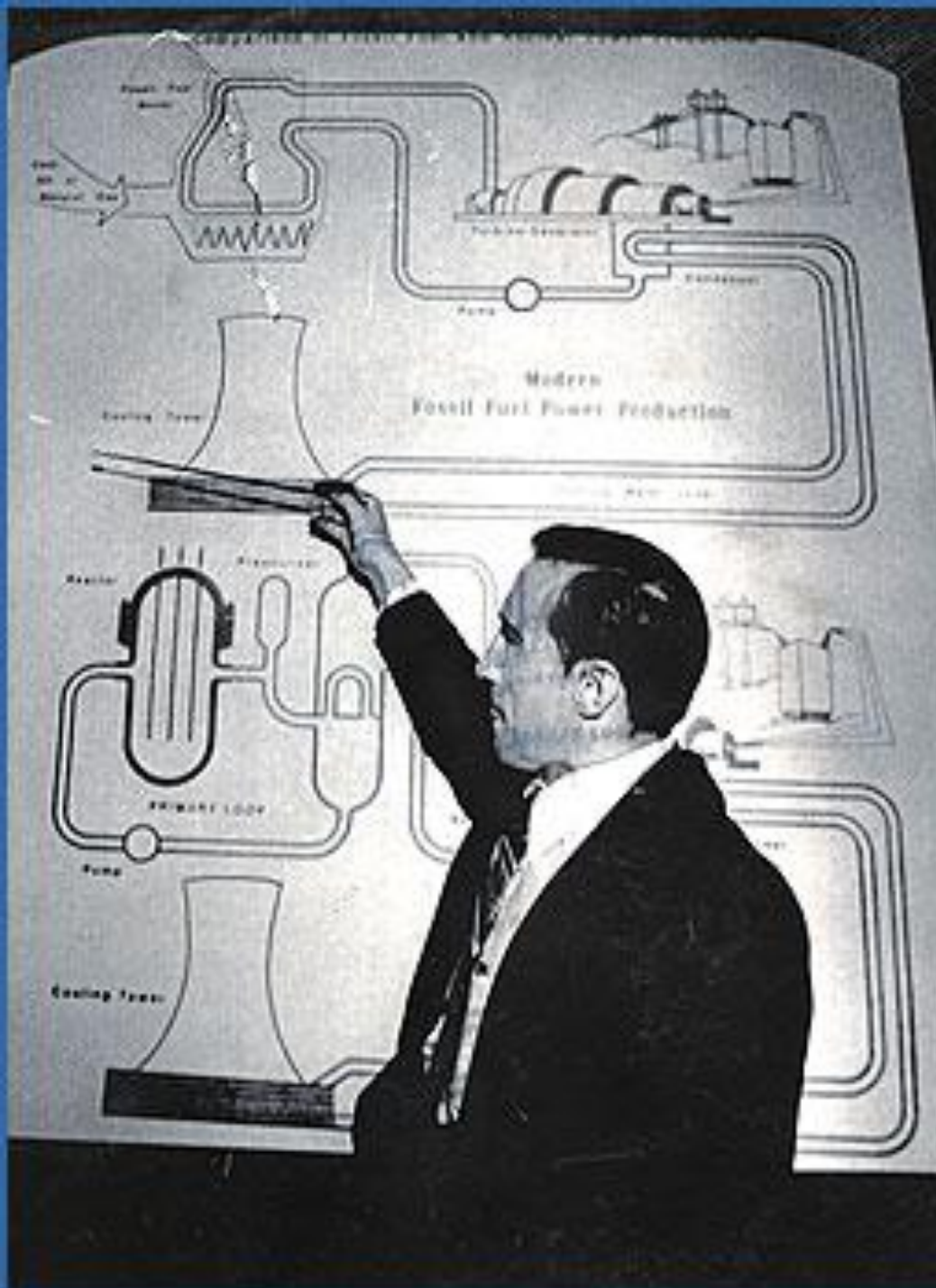




Workers from the nuclear power plant were checked for radiation exposure at the end of their shifts.

# 核能電廠緊急核子事故分類準則

事故類別	級別	劃分原則	
第一類緊急故 (異常事件)		異常事件之示警通知。	
第二類緊急事故 (緊急戒備)	A 級	無放射性物質外洩之緊急戒備事故。	
	B 級	有放射性物質外洩之緊急戒備事故。	
第三類緊急事故 (廠區緊急事故)	A 級	無放射性物質外洩之廠區緊急事故。	
	B 級	有放射性物質外洩，但廠區最大個人全身劑量率小(等)於 <b>0.5</b> 毫西弗/小時之廠區緊急事故。	
	C 級	有放射性物質外洩，但廠區最大個人全身劑量率大(等)於 <b>0.5</b> 毫西弗/小時之廠區緊急事故。	
第四類緊急事故 (全面緊急事故)	A 級	指已下令執行民眾防護行動之全面緊急事故(自第三類 <b>B</b> 、 <b>C</b> 級事故惡化演變而成者)。	
	B 級	指突發性之全面緊急事故(事故發生或演變突然，而無法循序準備與下令執行各項民眾防護行動者)。	

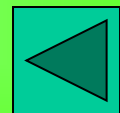


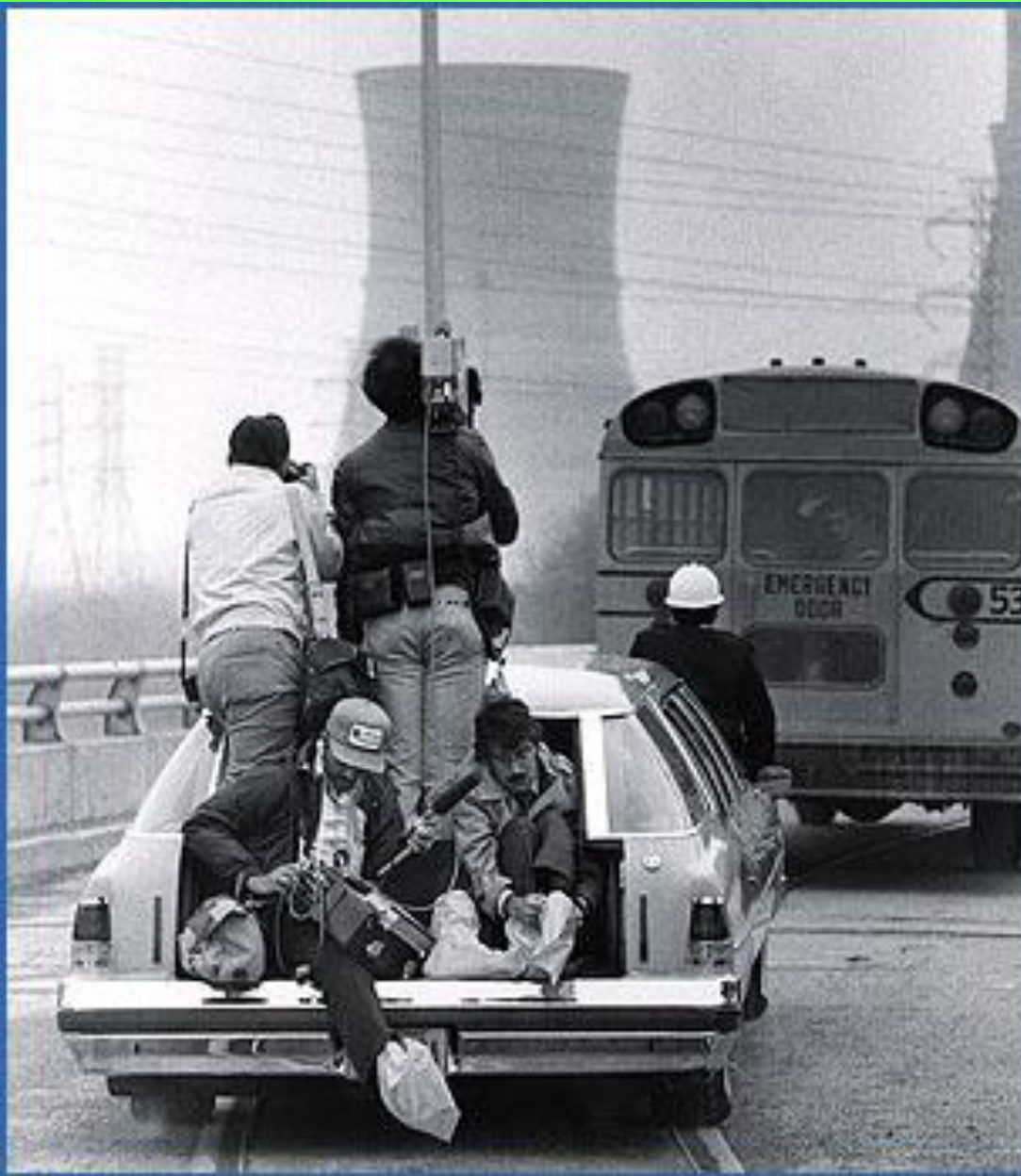
John G. Herbein, a spokesman for Metropolitan Edison, clashed with the press about his company's openness about the events in its crippled Unit 2 reactor.



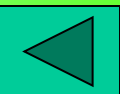


Pennsylvania Gov. Richard Thornburgh advised children and pregnant women to evacuate the area around Three Mile Island.





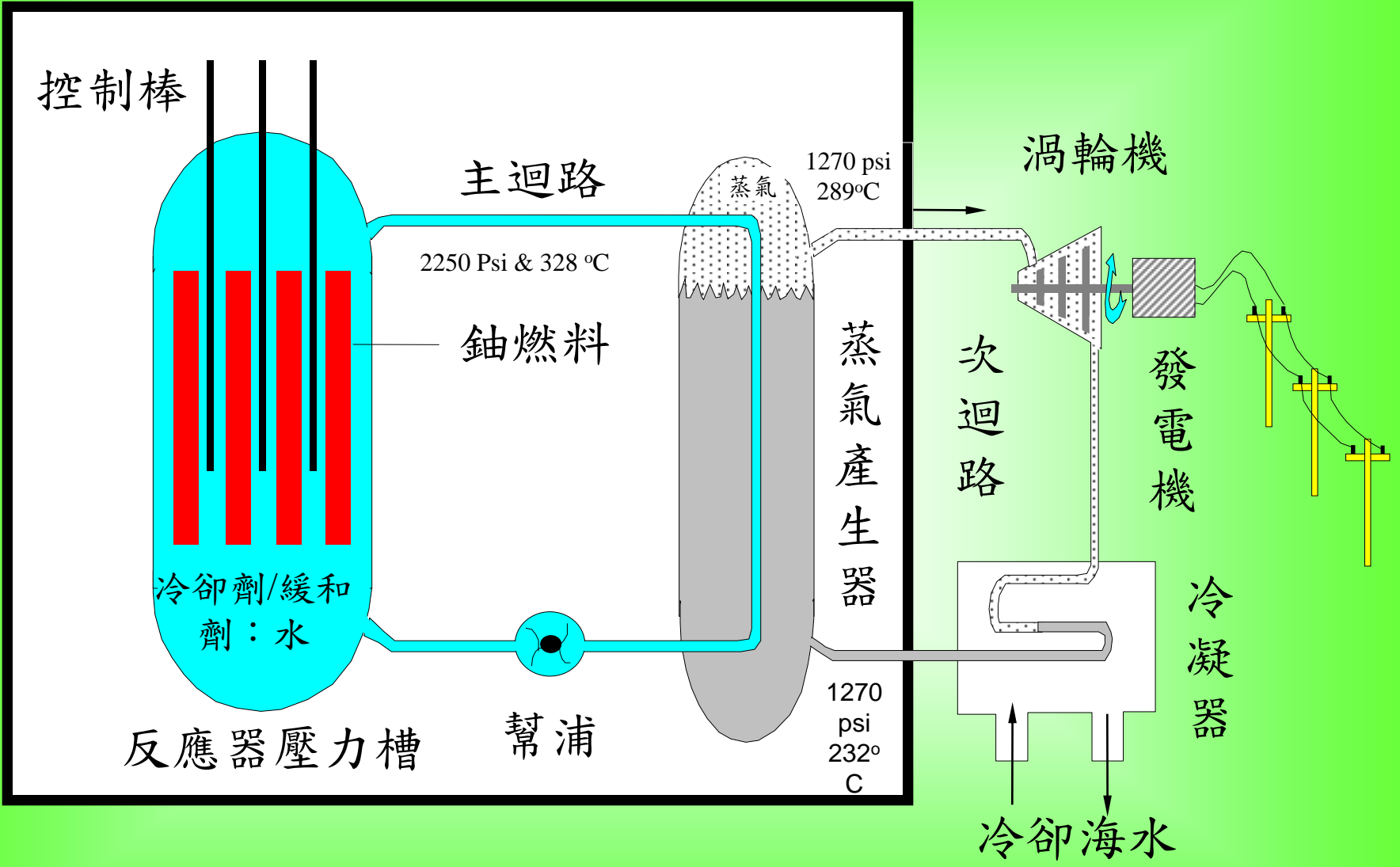
Four days after the accident,  
President Jimmy Carter,  
educated as a nuclear engineer,  
rode a school bus to the  
damaged plant, leading a  
delegation that included Gov.  
Thornburgh and the first Lady  
Rosalynn Carter.



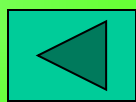


Carter, touring the reactor's control room, calmed public fears with his visit, even as technicians grappled with a potentially explosive gas bubble. ◀

圍  
阻  
體



壓水式反應器示意圖





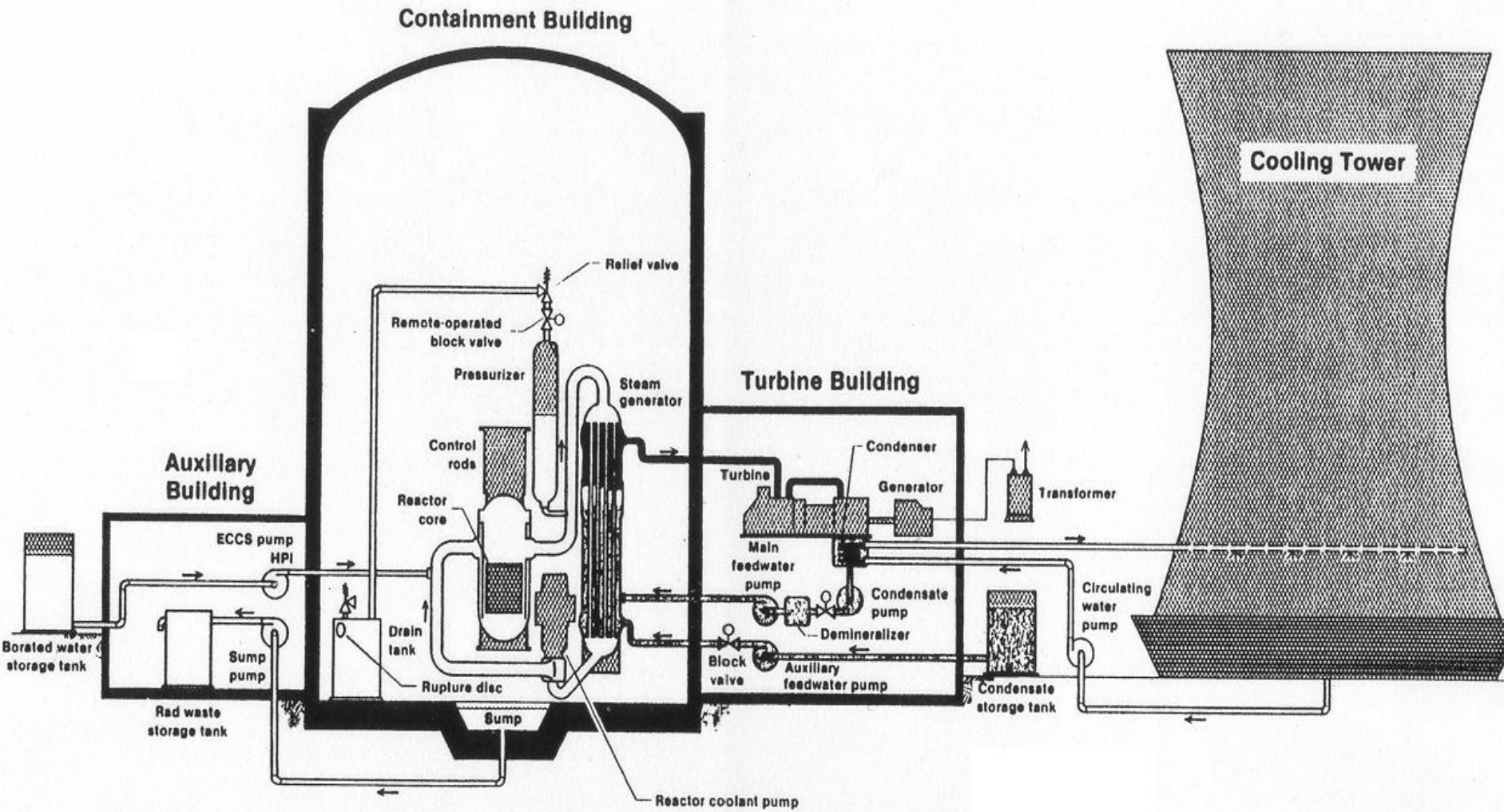
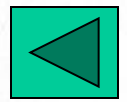
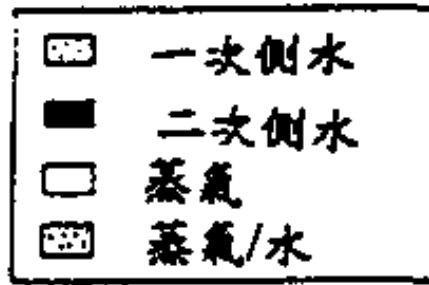


Figure 1. TMI-2 Schematic  
 (From Reference 3, NSAC-80-1)



2255psig

直立式可產生過熱蒸汽  
但在額定功率下喪失飼  
水，一分鐘乾涸



引導操作釋壓閥

逆斷閥

調壓槽

蒸汽產生器

蒸汽產生器

約100公噸核燃料

37000燃料棒

3175MWD/ton

泵

泵

爐心

爐心注水槽

A 迴路

B 迴路

Quench Tank / Reactor  
Coolant Drain Tank



反應器運轉流程圖 (4)



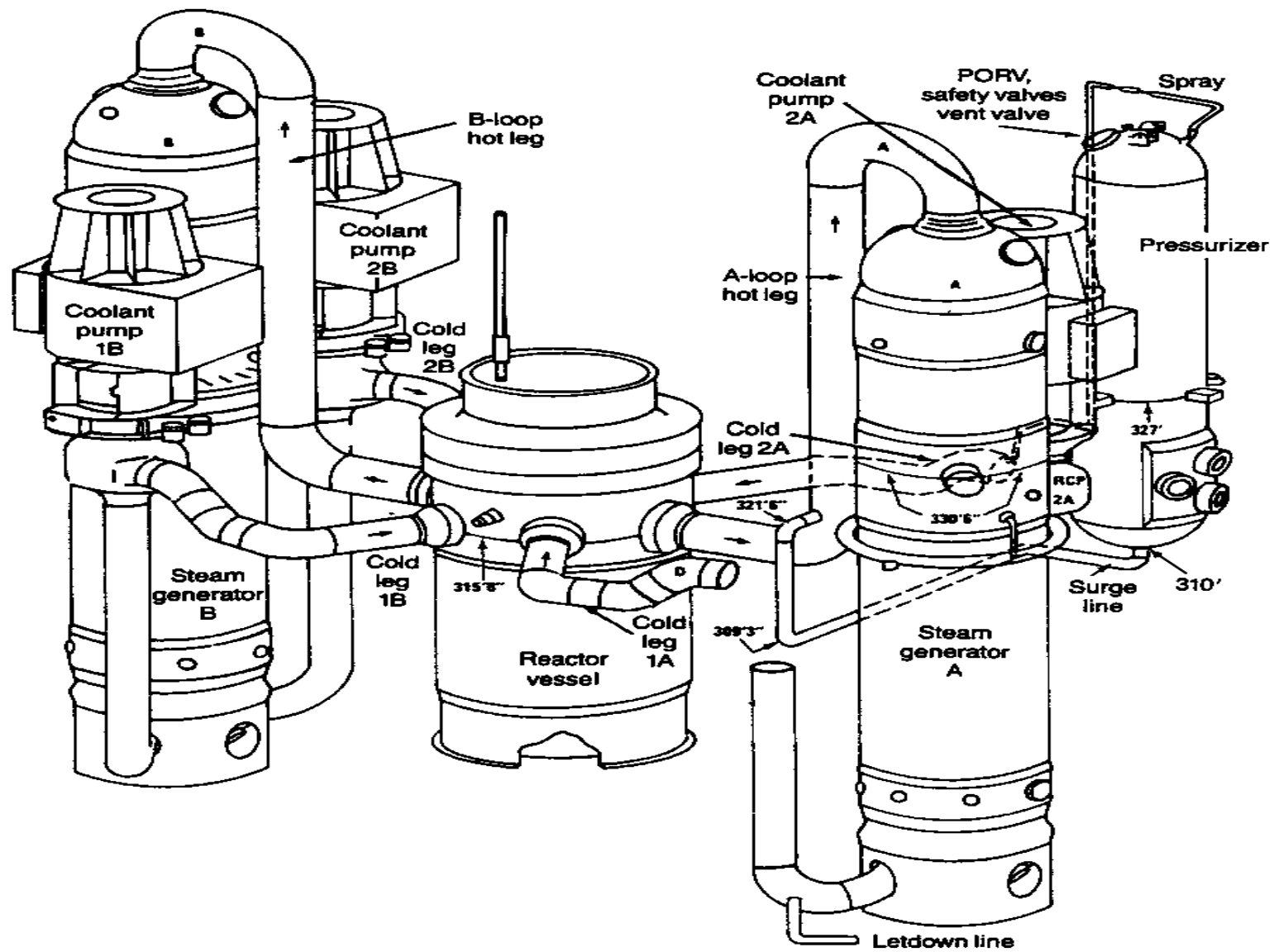
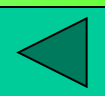


Figure 3. Primary System Isometric Schematic



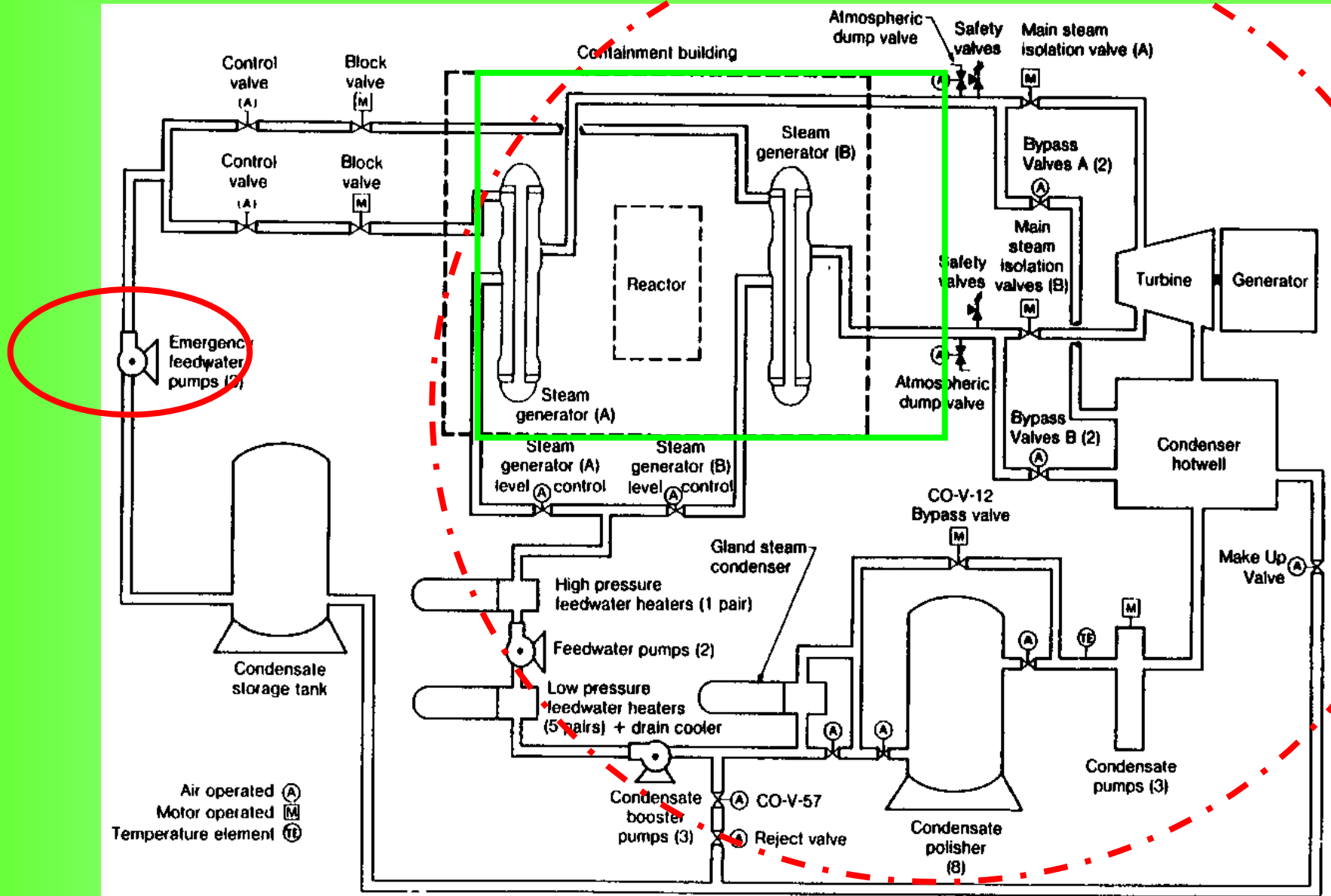
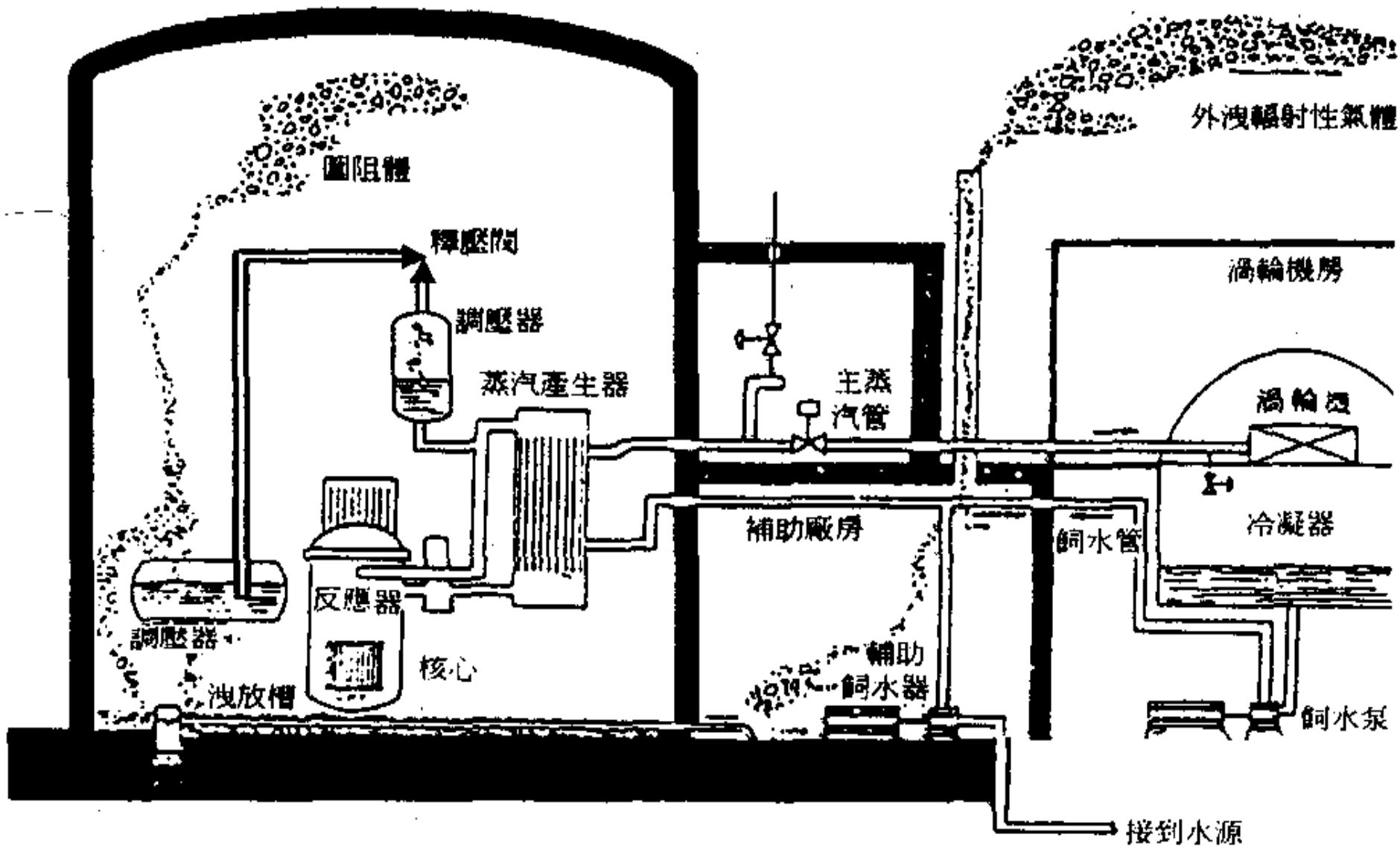


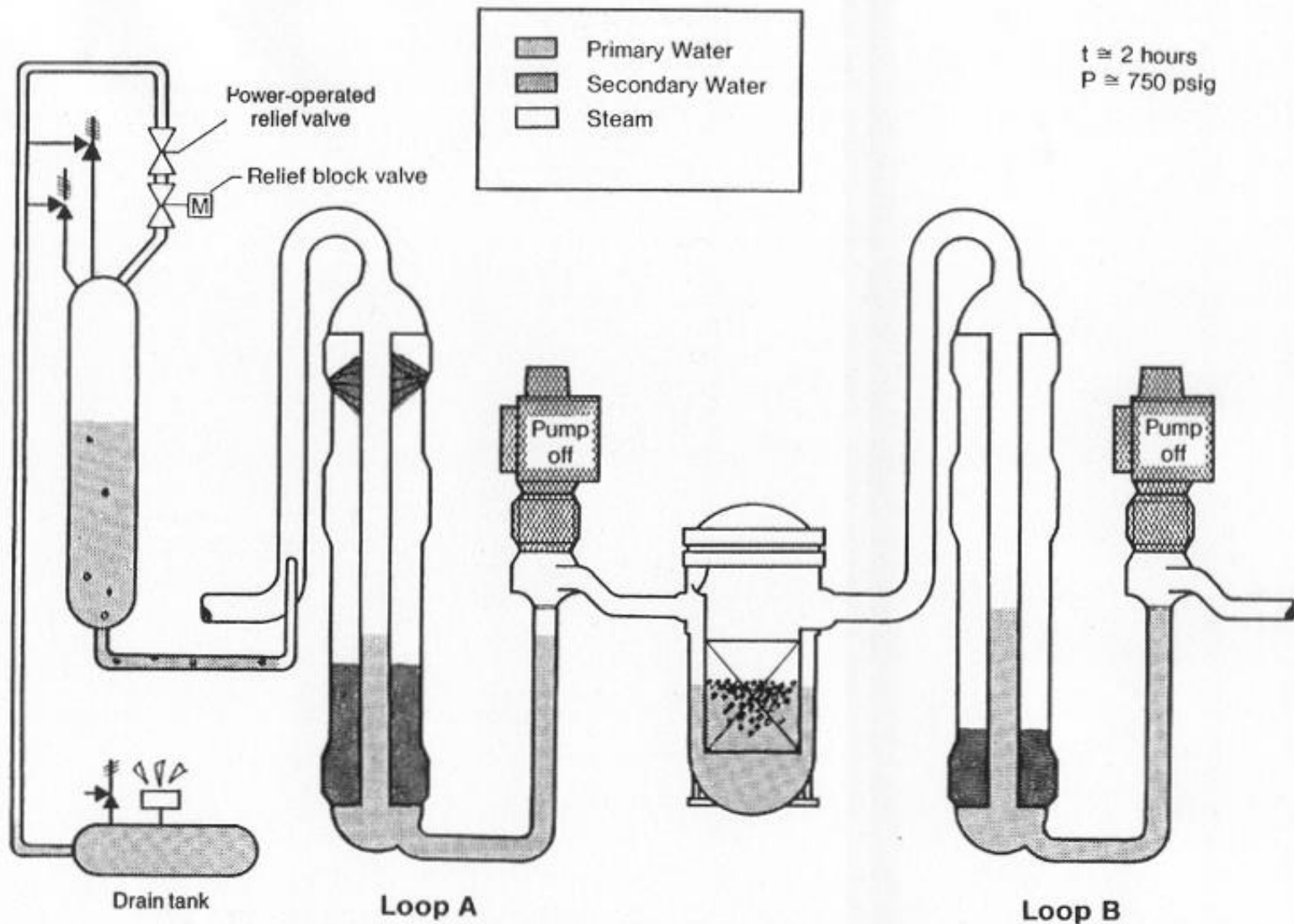
Figure C/FDW-1

Figure 4. Main and Emergency Feedwater Systems Schematic



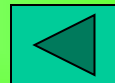
三哩島核能電廠放射性氣體外洩簡圖

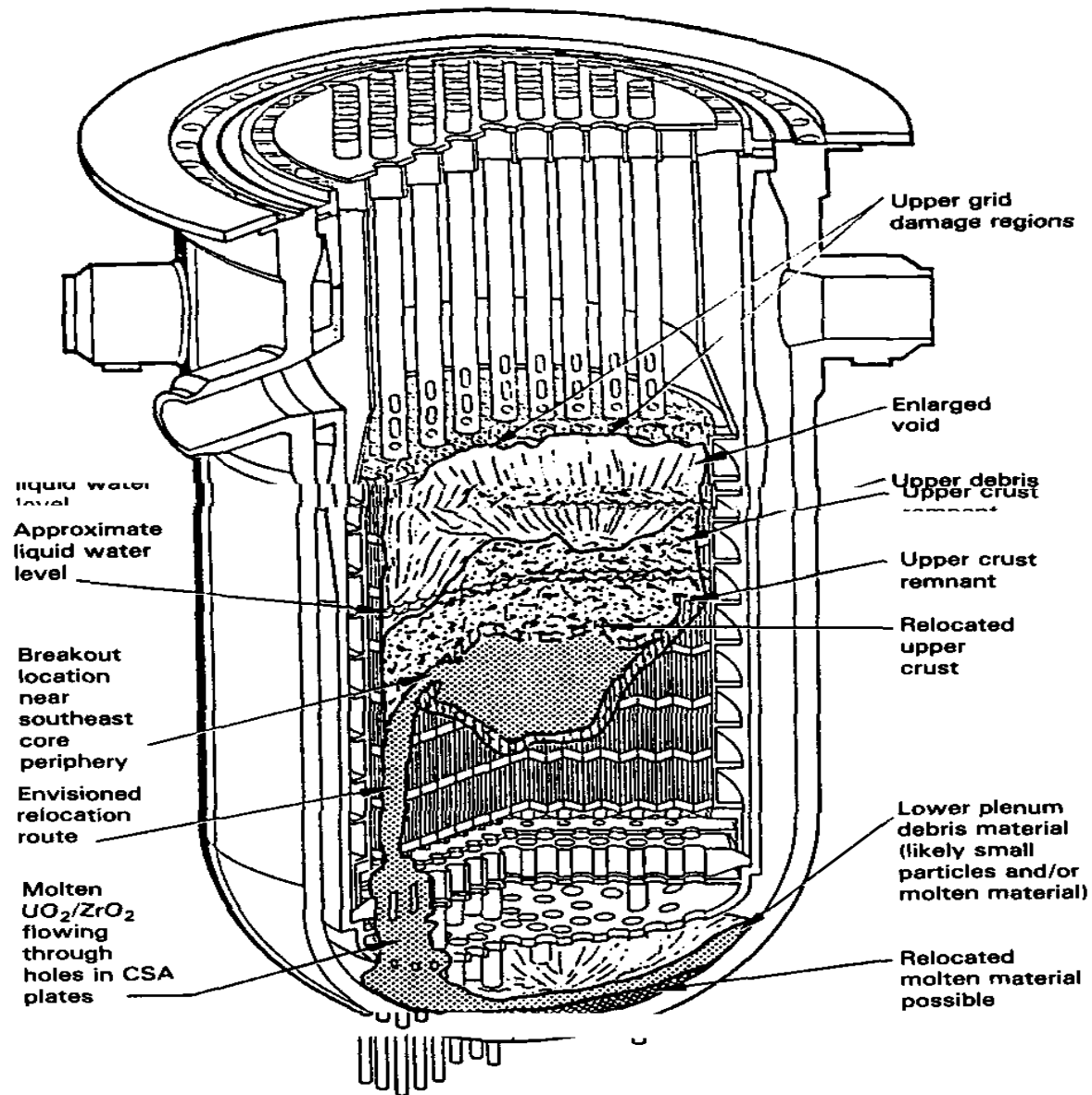




All pumps off. Reactor core drying out and heating up. Superheated steam flowing to pressurizer and to one steam generator and condensing.

Figure 8. Inadequate Core Cooling Configuration  
 (From Reference 3, NSAC-80-1)





**Figure** Hypothesized core damage configuration (226 minutes).



