

# 第五章 LCHP 事故序列模擬

## 5.1 前言

第三個模擬的嚴重事故序列是爐心完全喪失冷卻、反應器在高壓下失效(Loss of All Core Cooling with Vessel Failure at High Pressure)，在初期安全分析報告中的代號是 LCHP-PF-P-M。事故的肇因是電廠全黑，同時爐心冷卻系統全數失效、且反應器壓力槽無法釋壓。在本論文所模擬的第一個事故序列、也就是電廠全黑的案例中，雖然事故的肇因亦是電廠全黑，使得高壓爐心淹覆器、低壓爐心淹覆器等需要交流電源的爐心注水系統無法啟動，但爐心隔離冷卻系統仍可正常運作，且運轉員在爐心水位降低後，亦可順利啟動釋壓閥，將反應器壓力槽洩壓。但本案例中，除電廠全黑外，爐心隔離冷卻系統亦假設其失效，同時運轉員無法將反應器壓力槽洩壓，因此其事故發展與單純的電廠全黑有很大的不同，後果嚴重程度亦有差別。

事故開始時，電廠喪失包括廠內柴油發電機在內的所有交流電源，爐心隔離冷卻系統雖不需要交流電源運作，但亦同時失效。主蒸汽隔離閥在事故開始時即關閉，因此反應器隨即因主系統壓力過高而急停。反應器急停後，爐心衰變熱不斷將冷卻水汽化，這些水蒸氣經由安全釋壓閥流入抑壓池，因此爐心水位逐漸降低，又無冷卻水補充，爐心隨後開始裸露，並且逐漸熔毀而向下流動。此時運轉員試圖開啟釋壓閥降低主系統壓力，但釋壓閥

亦失效，因此主系統仍保持在高壓狀態。熔融爐心在落入反應器壓力槽底部區間之後，逐漸將該區積水蒸乾，並且使該處反應器槽壁溫度逐漸升高，最後造成控制棒焊道失效。控制棒焊道失效之後，熔融爐心開始進入下乾井，由於當時反應器壓力槽仍處於高壓狀態，因此熔融爐心受壓而向外噴出，並且碎裂成小顆粒，快速將熱量傳遞給下乾井的氣體，瞬間使下乾井溫度上升至 533K，因而使被動淹覆器發生作用，乾井連接管的水開始流入下乾井，淹覆下乾井地板上的熔融爐心。熔融爐心帶來的衰變熱不斷使圍阻體內壓力上升，最後圍阻體壓力到達設定點，圍阻體過壓保護裝置啟動，放射性分裂產物開始外釋。

## 5.2 輸入檔案設定

根據龍門電廠初期安全分析報告中的敘述，本事故序列的肇因為電廠全黑及喪失所有冷卻系統，同時主蒸汽隔離閥在事故開始時即關閉，因此在輸入檔案中的 Initiators 中，必須將交流及直流電源、高壓爐心淹覆器、低壓爐心淹覆器、爐心隔離冷卻系統、控制棒驅動水泵及主蒸汽隔離閥關閉。另外根據實際模擬經驗發現，若根據原始參數檔內的設定，無法使計算結果得到類似初期安全分析報告中的圍阻體直接受熱現象，因此根據參數檔內的說明，將參數 FENTRC 之值更改為 1.0，以啟動 DCH1 model。在原始參數檔中，假設反應器壓力槽破裂後，流出的熔融爐心只可能存在於上下乾井及乾井連接管，但根據初期安全分析報告，在本

案例中，熔融爐心可能因為水蒸氣的挾帶作用(Entrainment)而進入濕井，因此將參數 JNCM(4)更改為 4。

### 5.3 模擬結果

本事故序列的重大事件及其發生時間如表 5-1。在事故一開始時，電廠進入全黑狀態，所有爐心注水系統全數失效，同時主蒸汽隔離閥關閉，飼水泵跳脫，產生急停信號。0.16 秒時，再循環水泵跳脫，4.2 秒時，反應器順利急停。由於爐心的衰變熱無法移除，冷卻水不斷被汽化，因此爐心水位逐漸降低，在 0.32 小時(1156.681 秒)時爐心裸露，接著燃料棒便開始熔毀。熔融的爐心材料在 2.50 小時(8997.025 秒)時開始向下流至反應器壓力槽底部區間，並在約 4000 秒後、也就是 3.60 小時(12943.931 秒)時，由於控制棒焊道失效，使得反應器壓力槽破裂，熔融爐心開始因反應器內高壓而向外噴出。噴出的熔融爐心快速的將熱量傳遞給下乾井內的大氣，使得下乾井溫度瞬間上升，達到被動淹覆器的設定溫度 533K，因此乾井連接管內的水開始流進下乾井。此後由於下乾井的熔融爐心持續汽化該處的積水，因此圍阻體內壓力不斷上升，直到 18.33 小時(65989.938 秒)時，圍阻體過壓保護系統啟動，圍阻體開始自此處洩壓，放射性分裂產物亦隨同外釋。各類放射性分裂產物的外釋比例如表 5-2 所示。

## 5.4 結果分析

圖 5-1 是爐心功率，在事故開始後 4.2 秒，反應器即順利急停，因此爐心功率驟降至衰變熱功率。

圖 5-2 是主系統壓力，由於事故開始後，所有爐心注水系統皆無法啟動，因此反應器內的壓力因爐心衰變熱而不斷上升，使得安全釋壓閥出現反覆的開關動作。到了 3.60 小時(12943.931 秒)時，反應器壓力槽失效，因此主系統壓力驟降，開始與圍阻體壓力達到平衡，隨圍阻體內壓力一同緩慢上升，直到 18.33 小時(65989.938 秒)時，圍阻體開始經由圍阻體過壓保護系統洩壓，因此壓力再次下降。

圖 5-3 是爐心水位，由於所有爐心注水系統都無法運作，因此在此事故開始後，爐心水位即因燃料棒衰變熱而不斷下降，使得爐心在 0.32 小時(1156.681 秒)開始裸露，隨後並逐漸熔毀。

圖 5-4 是釋壓閥水蒸氣流量，在事故開始後，由於安全釋壓閥的反覆開關，因此流量上下震盪，2.50 小時(8997.025 秒)時，由於熔融爐心開始落入反應器壓力槽底部區間，為該處積水所淬熄，因此產生大量蒸汽，形成圖上一個明顯的狹窄尖峰。在約 3.17 小時(11400 秒)左右，由於反應器壓力槽底部區間內的積水全數被熔融爐心所蒸乾，因此不再有蒸汽產生，安全釋壓閥也就不再出現流量。

圖 5-5 所示為爐心第 33 號節點處的燃料溫度，在爐心開始裸露後不久、大約 2000 秒左右時，此處溫度即開始逐漸攀升，7400 秒左右時，此處燃料開始熔毀並落至下方。

圖 5-6 為位於爐心的熔融物總質量，在 2870 秒左右時，爐心開始熔毀，而且熔融物質量不斷上升，直到 2.50 小時(8997.025 秒)時，熔融爐心開始向下落至反應器壓力槽下方區間，因此熔融物質量迅速下降，在 2.63 小時(9450 秒)左右，熔融物幾乎全數流出原來爐心位置。

圖 5-7 是反應器壓力槽底部區間的熔融爐心總質量，在 2.50 小時(8997.025 秒)時，位於爐心處的熔融物開始向下掉落，因此其值快速竄升，約在接近 9700 秒時，熔融爐心全數落入此區，因此其值保持穩定不再變動，直到 3.60 小時(12943.931 秒)時，反應器壓力槽失效，熔融爐心在高壓的驅使下，急速自破口處噴出，因此其值急速下降至約 47.5kg 而不再變化，也就是說事故最終仍有少部分熔融爐心殘存於反應器壓力槽底部。

圖 5-8 為燃料棒護套及燃料束結構體鋯合金於爐心內氧化的比例。由於在事故開始後，沒有任何的冷卻水注入爐心，因此爐心溫度快速上升，而使原有的冷卻水汽化產生水蒸氣並造成爐心裸露，在 30 分鐘(1800 秒)左右時即開始出現爐心鋯合金材料氧化的現象。

圖 5-9 及圖 5-10 分別為上乾井及濕井壓力，在 2.50 小時(8997.025 秒)時，由於熔融爐心開始向下落入反應器壓力槽底部

區間，被該處積水淬熄瞬間產生大量水蒸氣，這些水蒸氣經由安全釋壓閥進入濕井，因而造成圍阻體內壓力突然升高。3.60 小時(12943.931 秒)時，反應器壓力槽失效，自反應器破口處噴出的熔融爐心快速將熱量交給下乾井內大氣，因此圍阻體內壓力再次竄升，此後由於熔融爐心的衰變熱將下乾井內的水汽化，圍阻體內壓力不斷升高，最後在 18.33 小時(65989.938 秒)時，圍阻體過壓保護系統發生作用，圍阻體內壓力開始降低。

圖 5-11 為釋出至外界環境之 CsI 及 CsOH 量，其值在 18.33 小時(65989.938 秒)圍阻體過壓保護裝置啟動時開始爬升，直到模擬結束時，其值仍持續上升中。

表 5-1 LCHP 事故序列中發生之重要事件及其發生時間

時間(sec)	發生之重要事件
0.0	Scram Signal Received
0.0	Feedwater Pump Tripped
0.0	MSIV Closed
1.855	High Vessel Pressure Scram
4.2	Reactor Scrammed
1156.681 (0.32 hr)	Core Uncovered
8997.025 (2.50 hr)	Relocation of Core Materials to Lower Head Started
12943.931 (3.60 hr)	Vessel Failed by Ejection of CRD Tubes
12944.276 (3.60 hr)	Passive Flooder Activated
65989.938 (18.33 hr)	COPS Activated

表 5-2 LCHP 事故序列中之放射性分裂產物外釋量

放射性分裂產物種類	外釋量 (Mass Fraction)
1.Noble gases and radioactivity inert aerosols	0.9987833
2.CsI+RbI	6.39E-03
3.TeO <sub>2</sub>	0.00E+00
4.SrO	1.43E-08
5.MoO <sub>2</sub>	3.37E-09
6.CsOH+RbOH	6.77E-03
7.BaO	6.83E-09
8.La <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Pr <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Nd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Sm <sub>2</sub> O <sub>3</sub> +Y <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2.96E-11
9.CeO <sub>2</sub>	1.31E-10
10.Sb	4.93E-06
11.Te <sub>2</sub>	4.34E-06
12.UO <sub>2</sub> +NpO <sub>2</sub> +PuO <sub>2</sub>	3.67E-13

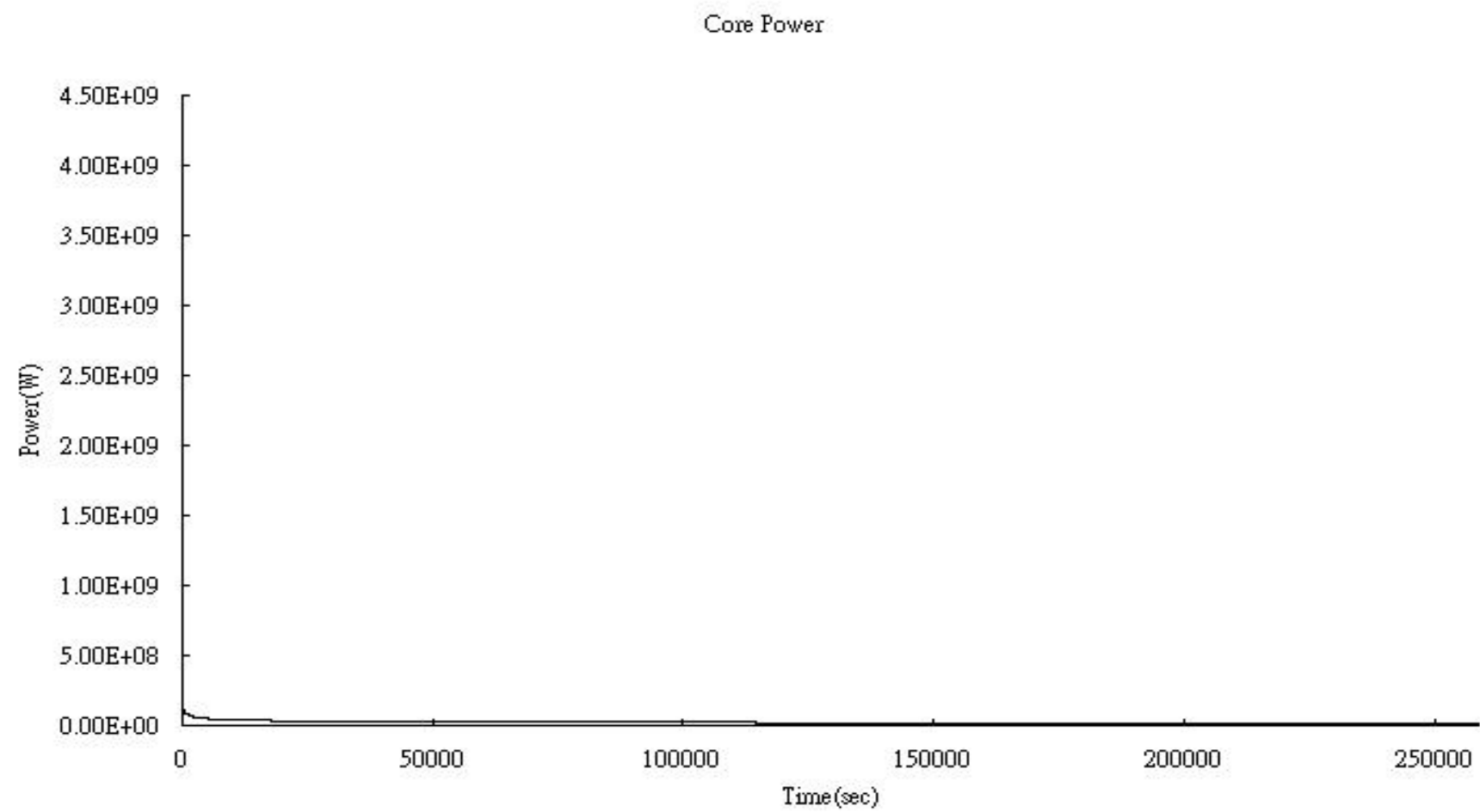


圖 5-1 LCHP 事故序列反應器爐心功率



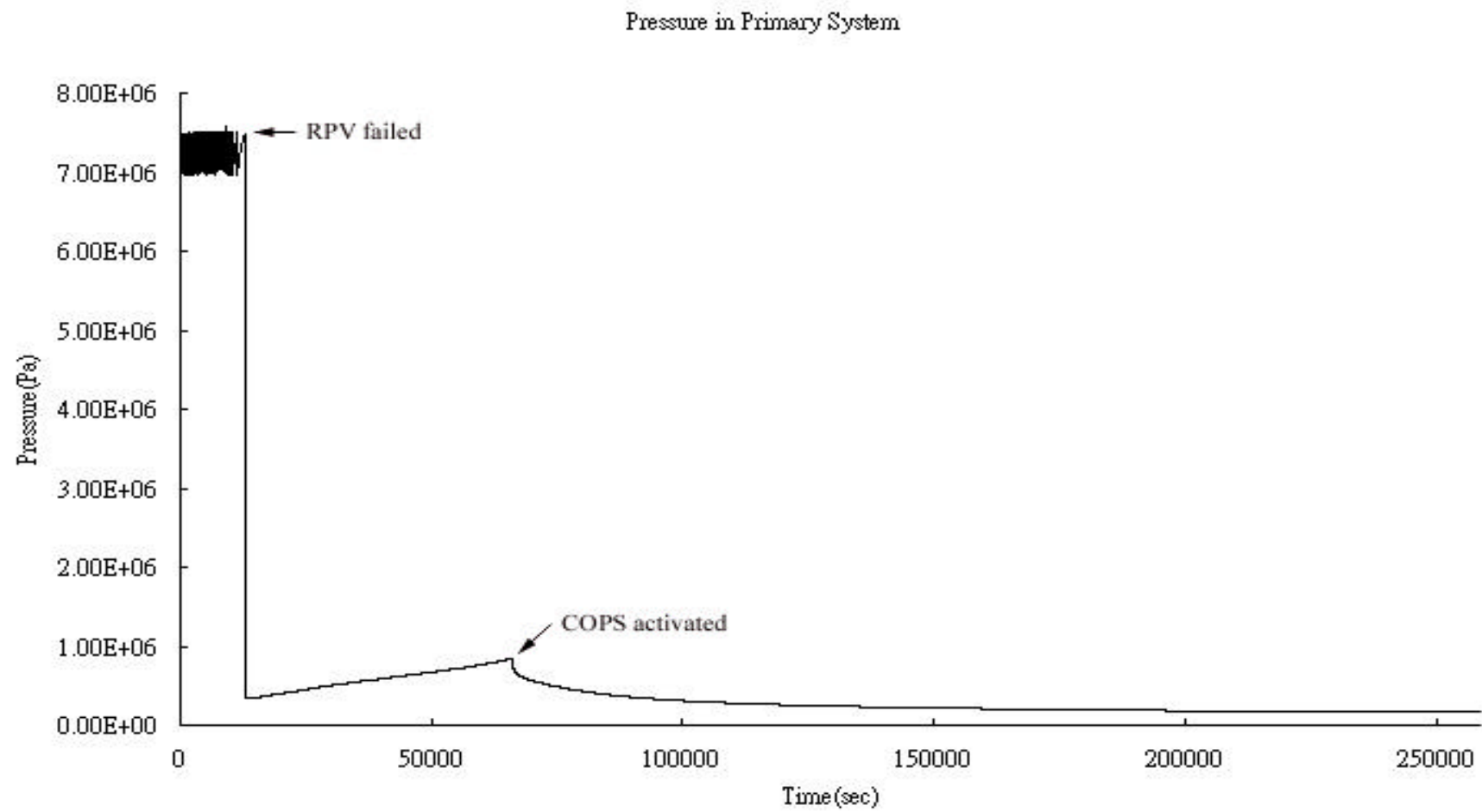


圖 5-2 LCHP 事故序列冷卻水系統壓力

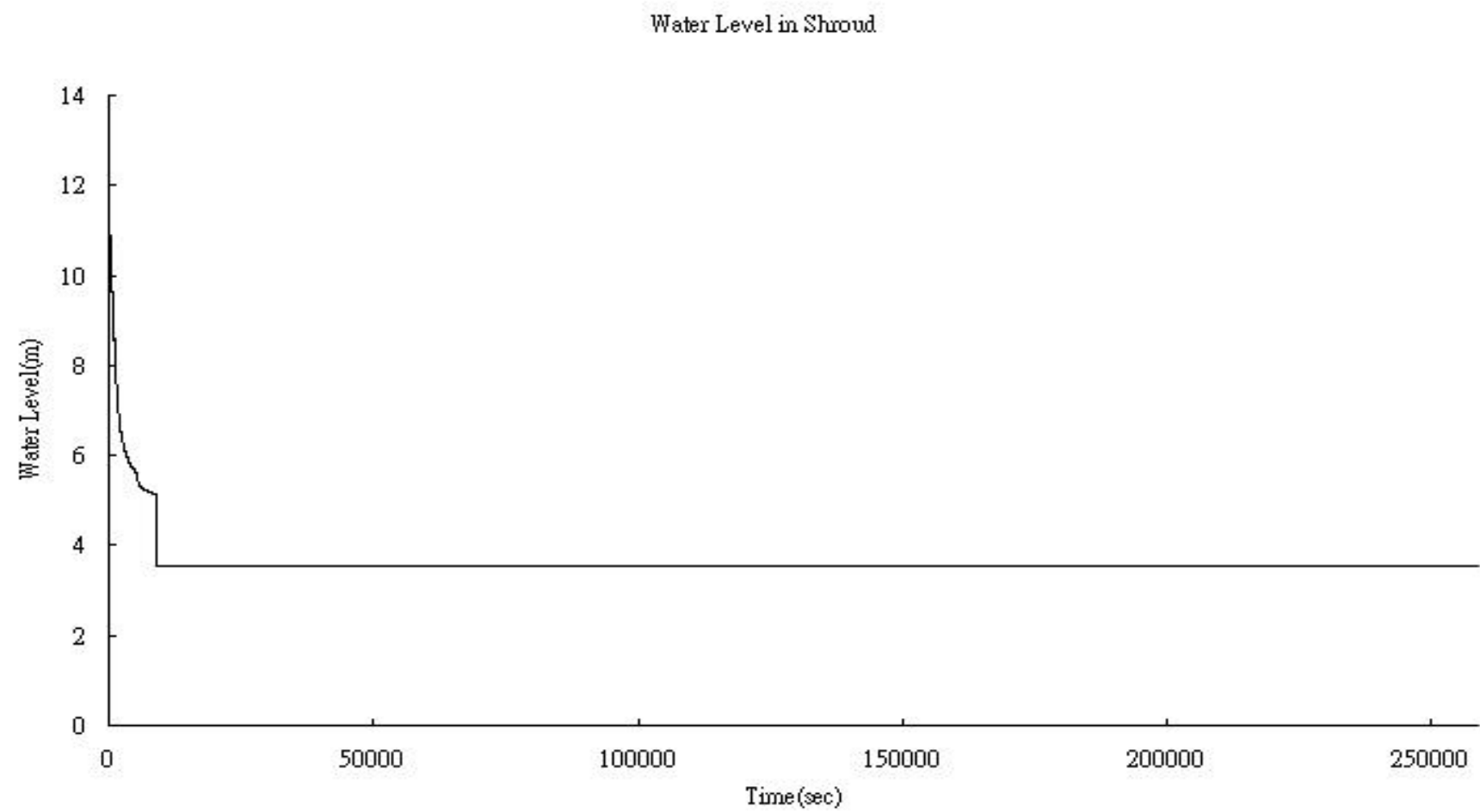


圖 5-3 LCHP 事故序列爐心水位

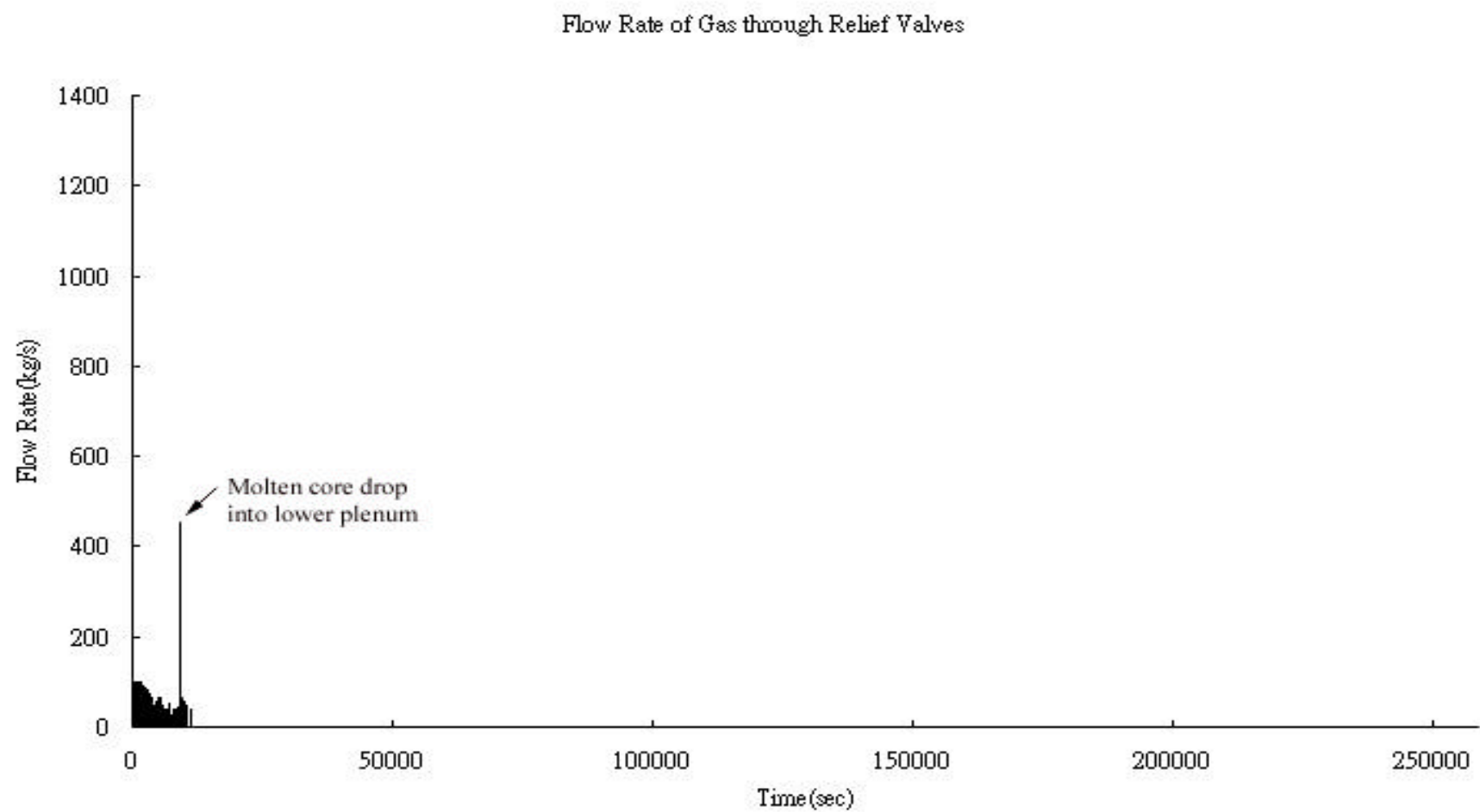


圖 5-4 LCHP 事故序列安全釋壓閥流量

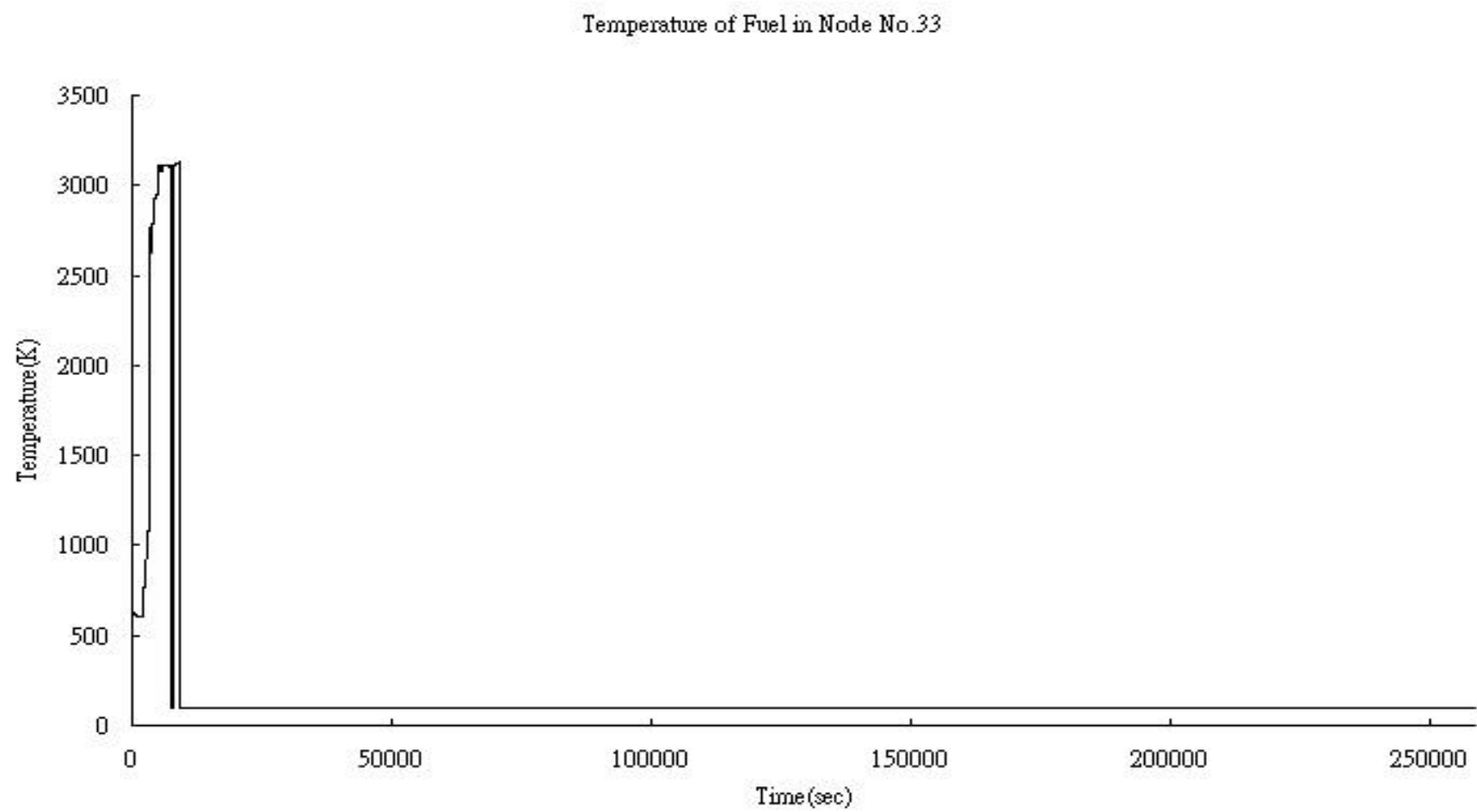


圖 5-5 LCHP 事故序列第 33 號節點燃料溫度

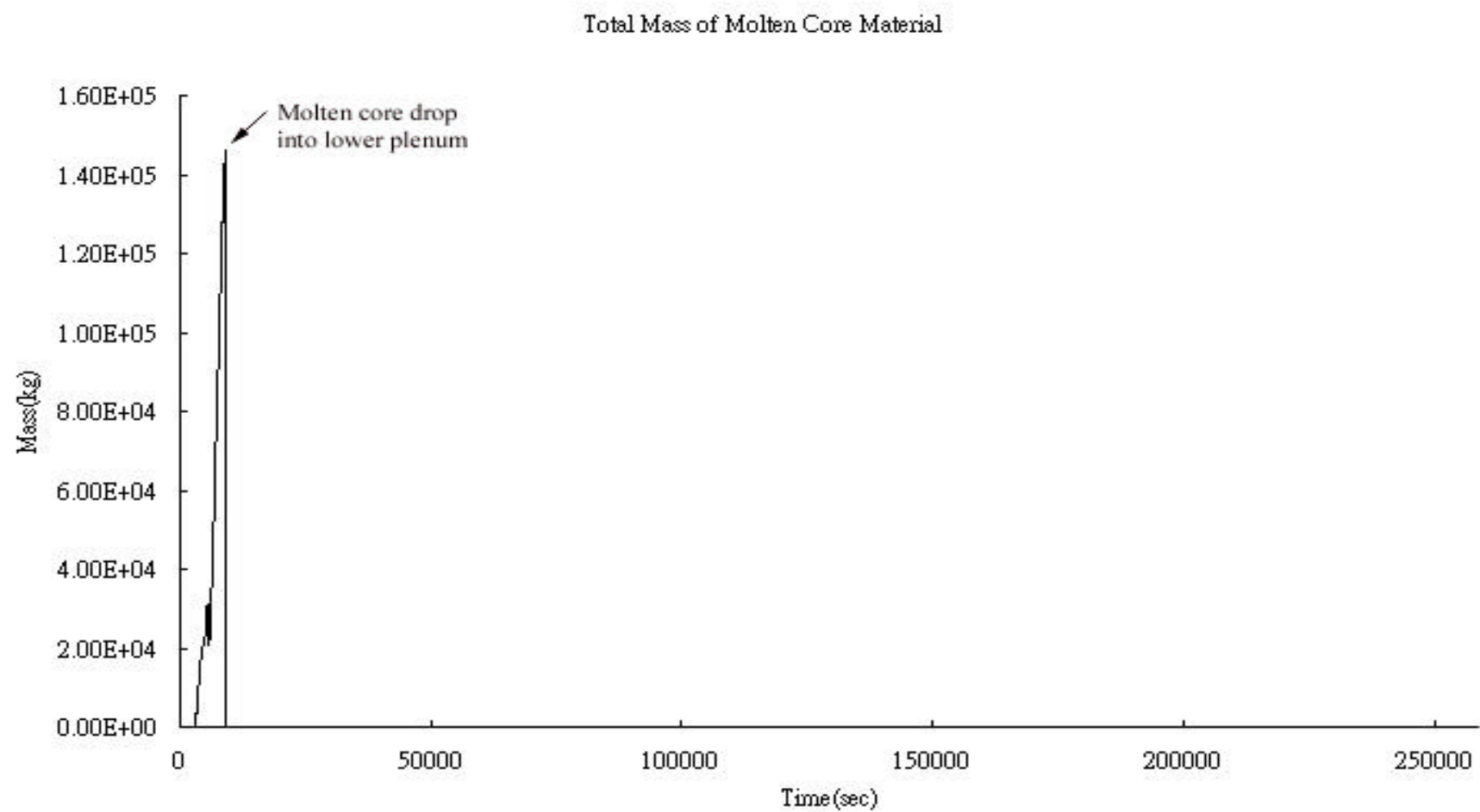


圖 5-6 LCHP 事故序列爐心位置熔融物總質量

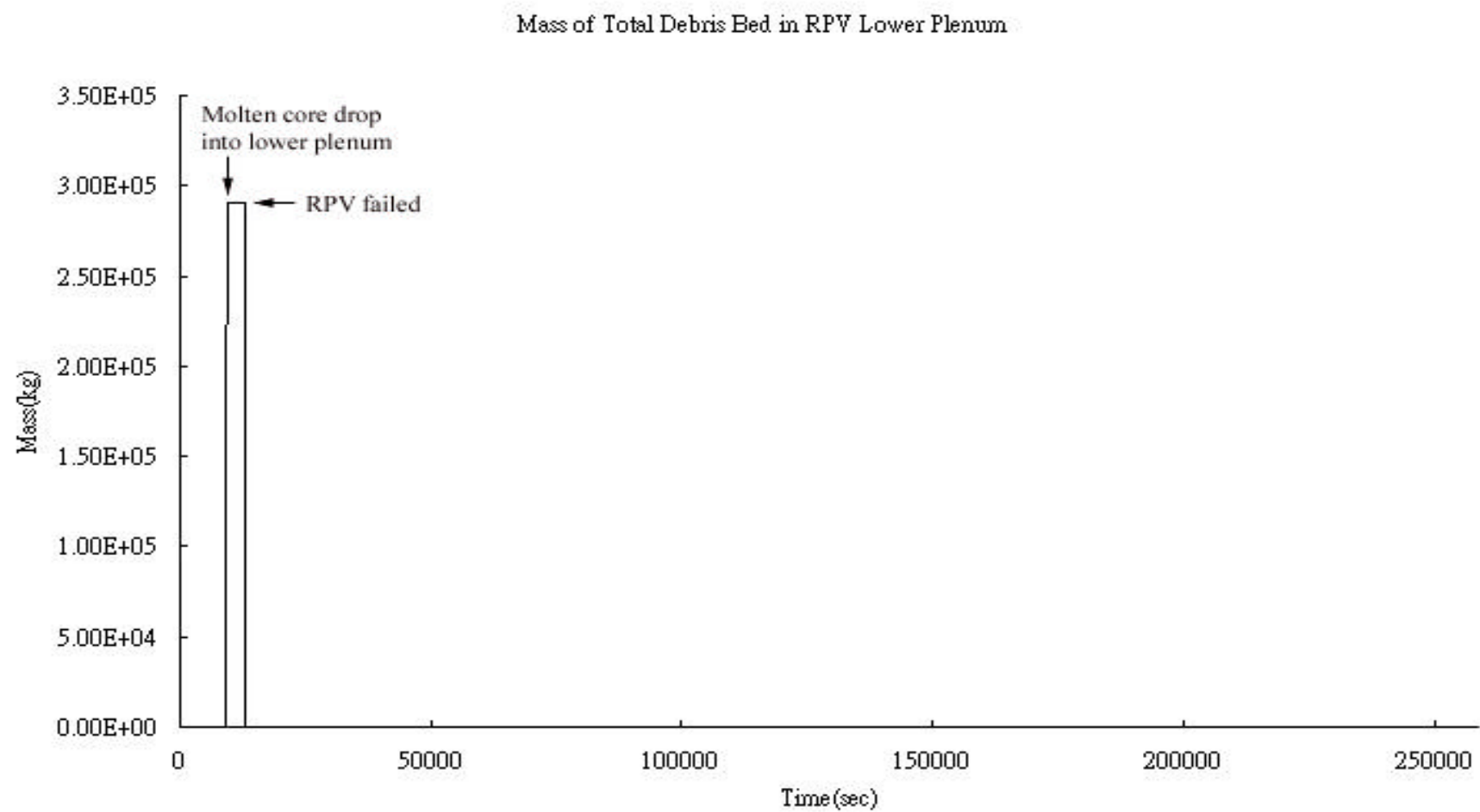


圖 5-7 LCHP 事故序列反應器壓力槽底部區間熔融爐心質量

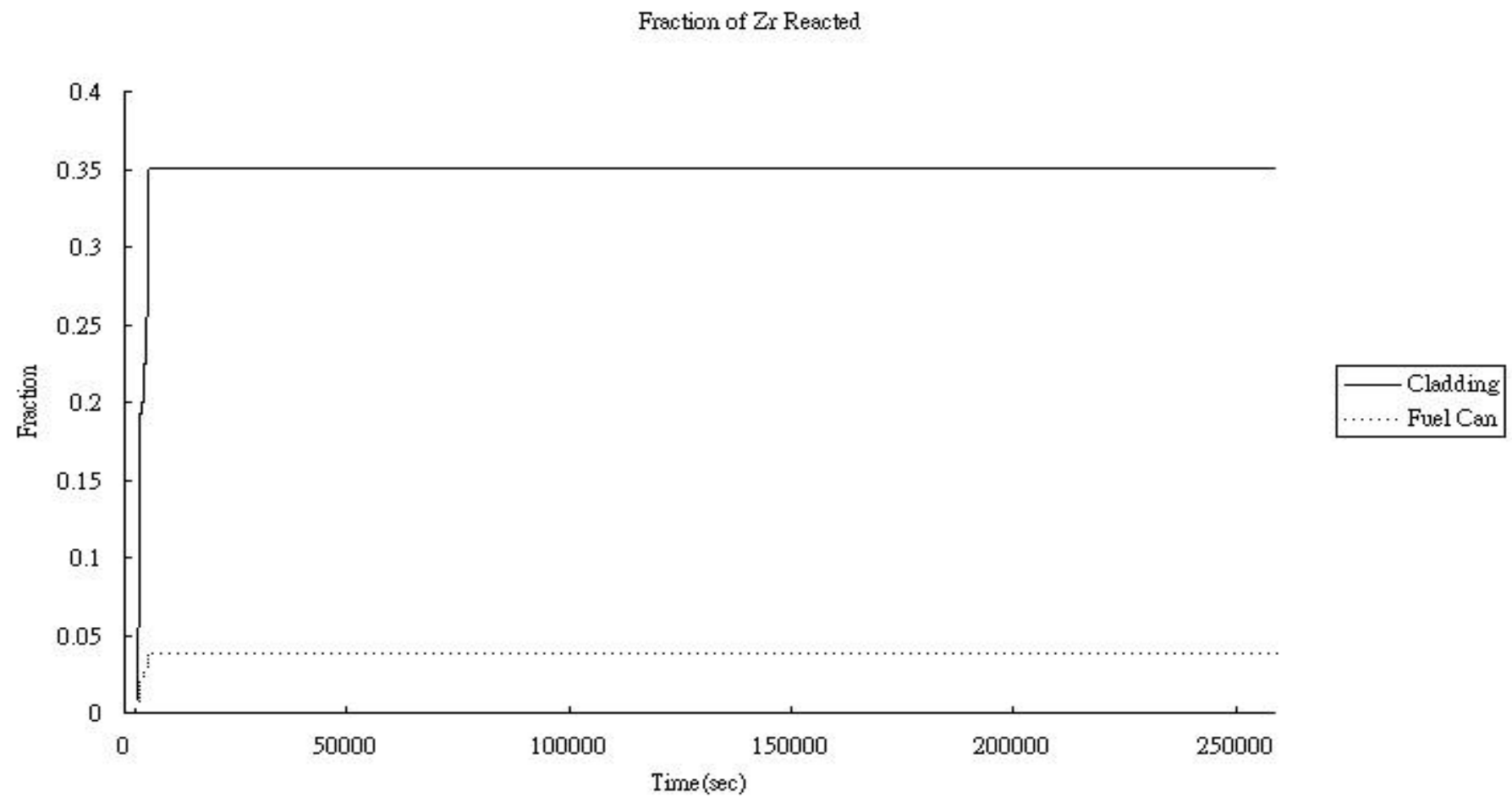


圖 5-8 LCHP 事故序列燃料棒護套及燃料束結構體鋯合金氧化比例

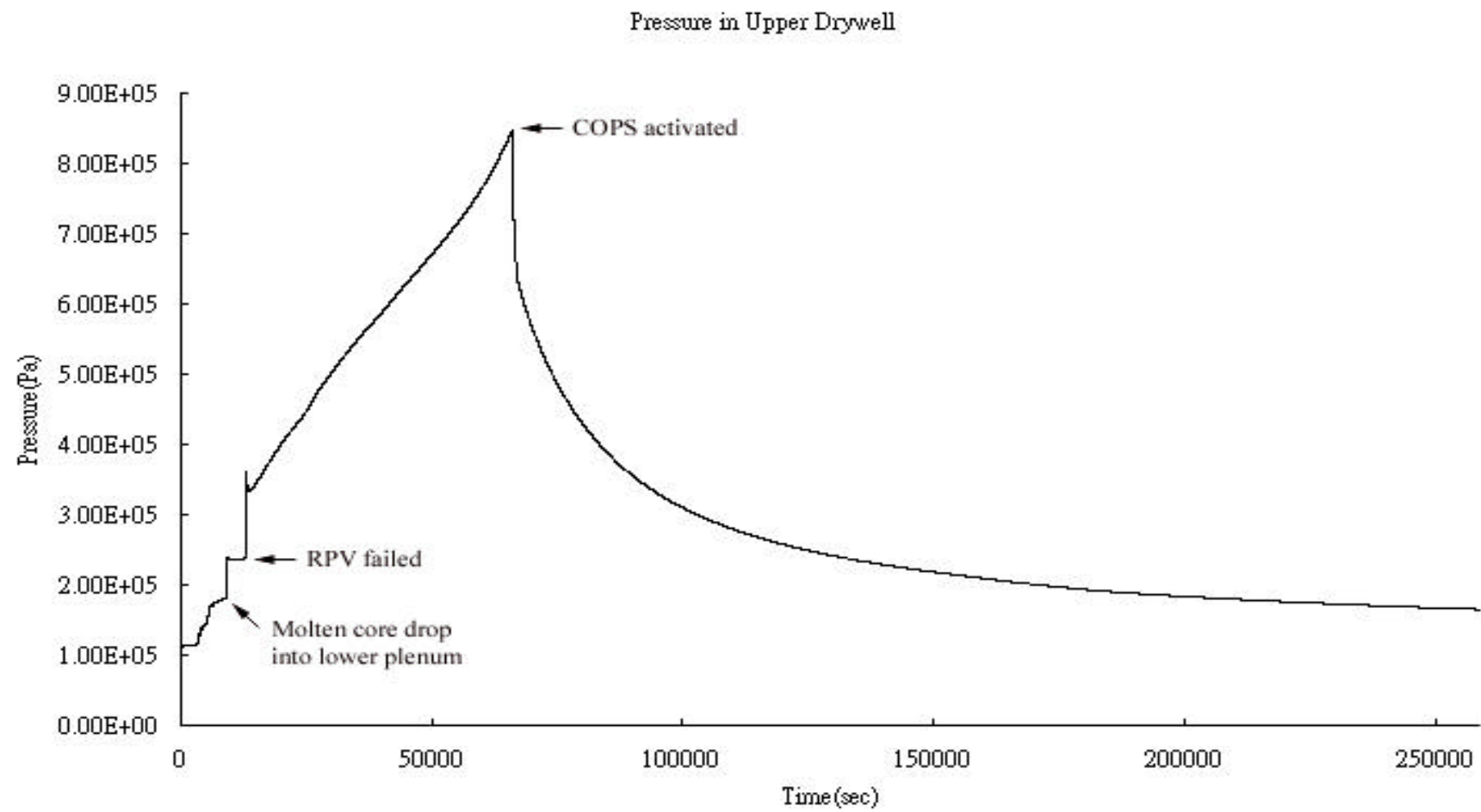


圖 5-9 LCHP 事故序列上乾井壓力



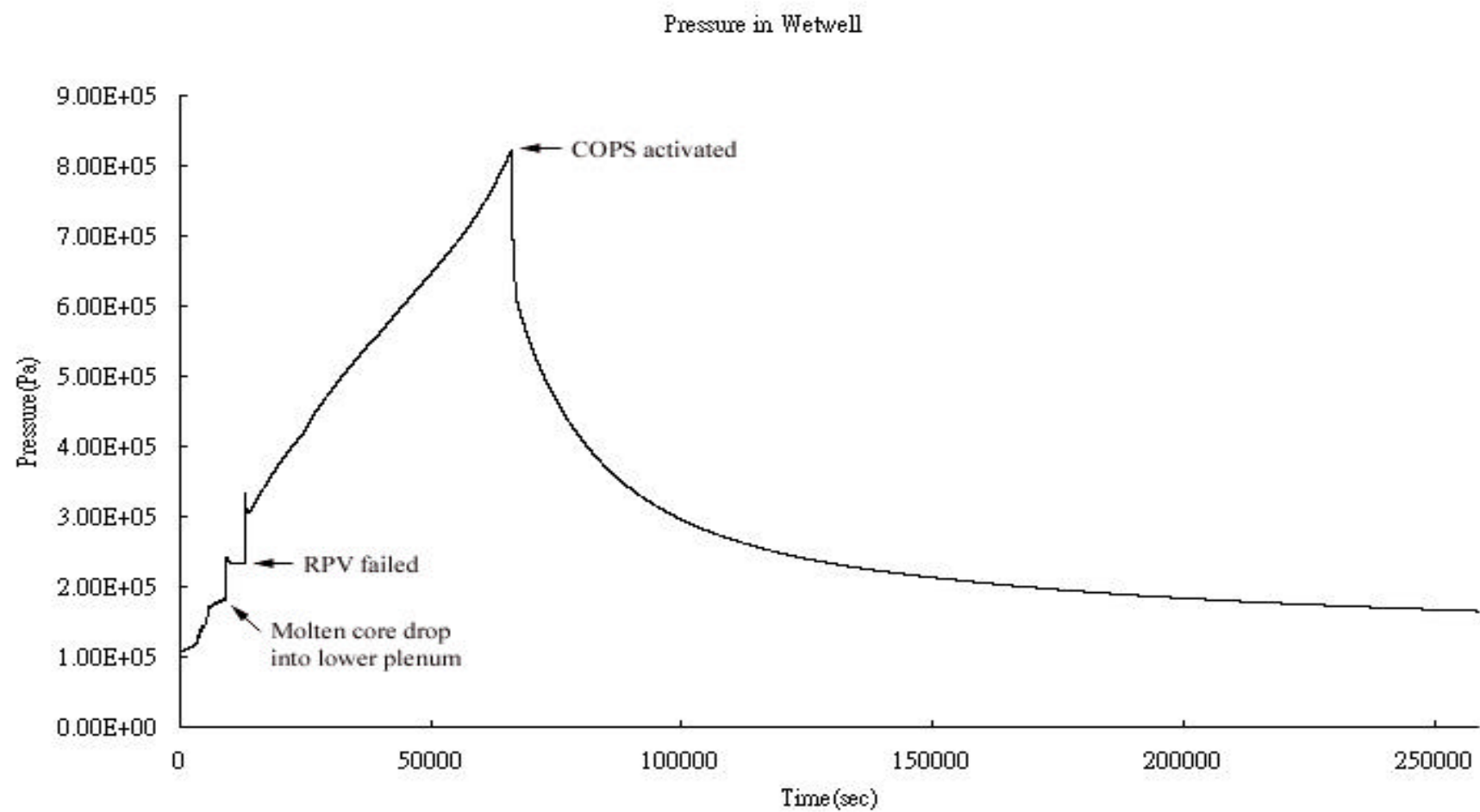


圖 5-10 LCHP 事故序列濕井壓力

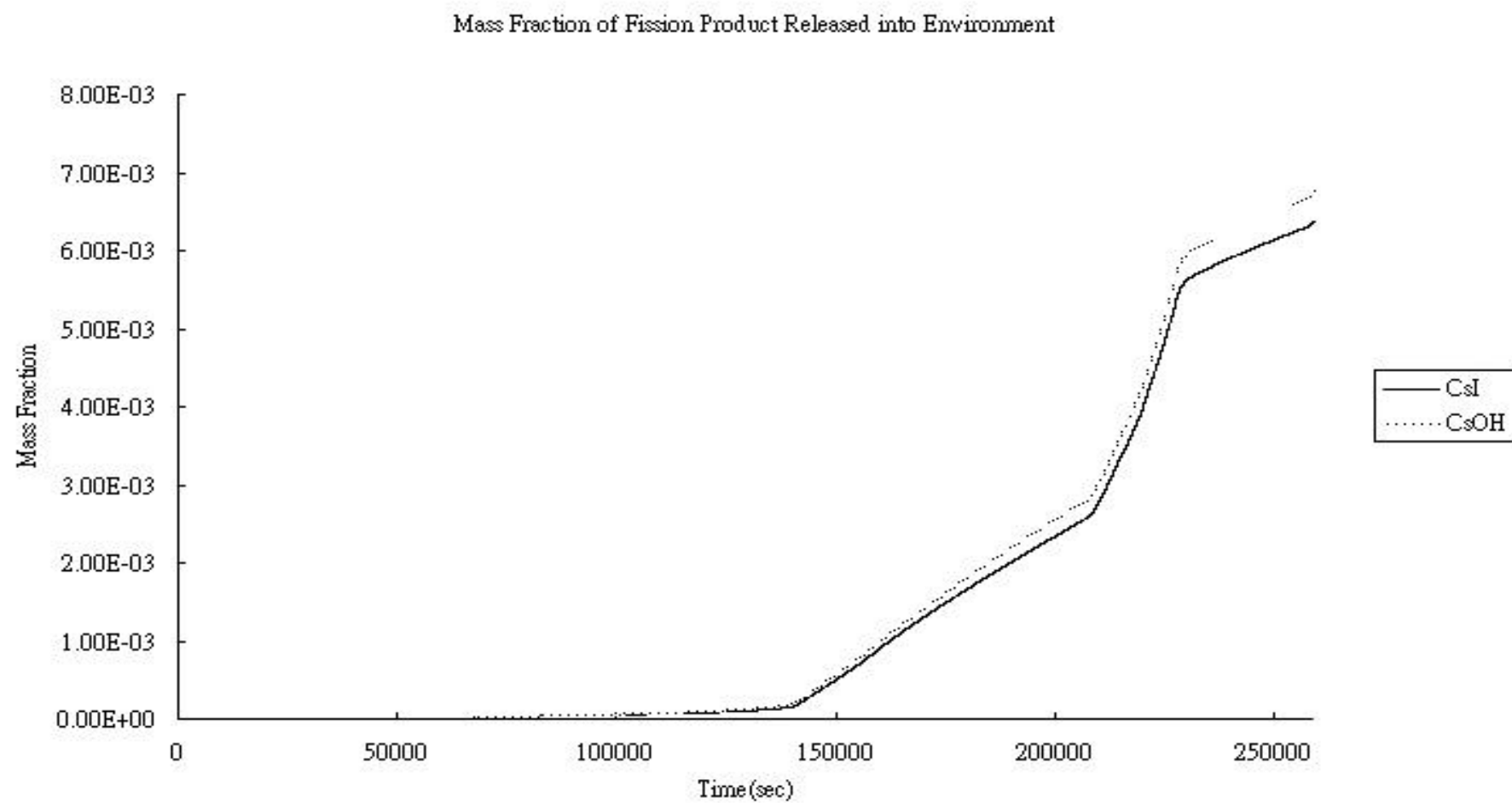


圖 5-11 LCHP 事故序列 CsI 及 CsOH 自圍阻體釋出量