

第四章 LBLC 事故序列模擬

4.1 前言

本論文模擬的第二個嚴重事故是大破口冷卻水流失事故 (Large LOCA with Failure of All Core Cooling), 在初期安全分析報告中的代號是 LBLC-PF-R-N。本事故序列的肇因是大破口冷卻水流失 (Large Break Loss of Coolant Accident, Large Break LOCA), 發生破口的位置是主蒸汽管。事故發生後, 由於自主蒸汽管流入上乾井的蒸汽造成乾井壓力上升到達急停設定點, 因此引發急停信號, 使得主蒸汽隔離閥關閉、飼水泵跳脫、以及反應器急停。由於本事故序列的模擬中, 假設所有冷卻系統皆無法啟動, 因此沒有任何冷卻水流入反應器壓力槽, 再加以位於爐心的冷卻水不斷被衰變熱汽化, 這些蒸汽自主蒸汽管破口處流出, 因此爐心水位快速下降, 造成爐心裸露, 接著爐心開始熔毀, 並向下落入反應器底部區間, 並在隨後將反應器壓力槽底部熔穿, 落入下乾井。熔融爐心落入下乾井之後, 所帶來的熱量使此處溫度快速上升, 因此被動淹覆器發生作用, 使乾井連接管的水流入下乾井而淹覆熔融爐心。但由於所有移熱系統皆無法動作, 因此來自熔融爐心的衰變熱仍然使圍阻體內壓力不斷升高, 最終使得圍阻體過壓保護系統動作, 造成少量放射性分裂產物外釋至外界環境。

4.2 輸入檔案設定

在本事故的模擬中，依照初期安全分析報告所言，關閉所有緊急冷卻系統，包括高壓爐心淹覆器、低壓爐心淹覆器、爐心隔離冷卻系統，控制棒驅動水泵(CRD PUMP)亦設定為關閉。主蒸汽隔離閥及飼水泵則模仿實際事故發生時之情形，由程式自行計算關閉時間。破口位置方面，由於 GE 提供之參數檔中已將破口位置設定於主蒸汽管處，因此無須更動此參數。破口面積如依據 GE 提供之參數檔內預設值計算，則發生爐心裸露的時間將遠較初期安全分析報告中之結果為晚，而 GE 並未於報告中明確提及模擬本事故序列時使用之破口面積，因此本論文假設破口面積相當於主蒸汽管截面積，也就是模擬主蒸汽管完全斷裂之最嚴重情況。

4.3 模擬結果

MAAP 計算所得之重要事故時序詳如表 4-1。在事故開始時，程式依照輸入檔案之設定，關閉包含爐心隔離冷卻系統在內的所有高低壓注水裝置以及控制棒驅動泵。同一時間，主蒸汽管發生破口，0.053 秒後，由於乾井高壓力，引發反應器急停信號，1.65 秒時，主系統壓力過低，使得主蒸汽隔離閥關閉，連帶使飼水泵跳脫。急停信號產生後 4.2 秒，也就是 4.253 秒時，反應器急停。6.693 秒時，再循環水泵跳脫。由於冷卻水系統壓力的降

低，再加以注水系統全數失效，因此冷卻水快速的汽化，造成爐心水位降低，使得爐心在 4.7 分鐘(284.544 秒)時裸露，且由於衰變熱的持續產生，爐心開始熔毀。在事故開始後 1.83 小時(6598.004 秒)，熔融爐心開始向下落入反應器壓力槽底部區間，再經過約 1000 秒後，反應器壓力槽底部區間的積水幾乎全數被蒸乾，5.12 小時(18448.809 秒)時，反應器壓力槽底部因高溫之潛變效應而破裂，熔融爐心開始落入下乾井的混凝土地板上，此時下乾井處約有 9500kg 積水，熔融爐心落入下乾井時，由於被積水淬熄，造成下乾井壓力的快速上升。5.16 小時(18567.105 秒)時，下乾井處積水被蒸乾，因此造成溫度快速上升，在 5.22 小時(18778.105 秒)、也就是下乾井積水被蒸乾後約 3 分半鐘時，由於此處溫度上升到達 533K，使得被動淹覆器啟動，乾井連接管內的水流入下乾井，將熔融爐心淹覆。6.24 小時(22457.195 秒)時，反應器壓力槽底部發生進一步的破裂，所有尚留存於反應器壓力槽底部區間之熔融爐心全數落入下乾井，淬熄瞬間又再次造成下乾井壓力的突然上升。由於熔融爐心衰變熱不斷汽化下乾井內的積水，使得圍阻體內壓力持續上升，最後在事故開始後 19.05 小時(68566.656 秒)時，圍阻體壓力到達圍阻體過壓保護系統設定值，圍阻體開始經此系統洩壓，放射性分裂產物亦開始自圍阻體內外釋至外界環境。各類型放射性物質的外釋比例如表 4-2 所示。

4.4 結果分析

圖 4-1 是反應器爐心功率圖，在事故發生後 4.253 秒，反應器即急停，因此爐心功率急遽下降至衰變熱功率。

圖 4-2 為主系統壓力，由於本事故序列為大破口冷卻水流失，因此在事故一開始，主系統壓力即迅速下降至與上乾井壓力十分接近。1.83 小時(6598.004 秒)時，熔融爐心開始向下掉落至反應器壓力槽下方區間，由於當熔融爐心開始落下時，此區域仍充滿冷卻水，因此熔融爐心被冷卻水所淬熄而產生大量蒸汽，造成主系統內壓力的急速竄升。5.12 小時(18448.809 秒)時，反應器壓力槽破裂，此後主系統壓力即與圍阻體內壓力達到平衡，而呈現相同的變化趨勢。16.80 小時(60463.656 秒)時，濕井溫度達到飽和，因此抑壓池水開始汽化，造成圍阻體內壓力更快速的上升，直到 19.05 小時(68566.656 秒)時，圍阻體過壓保護系統啟動，圍阻體內壓力才開始下降。

圖 4-3 是爐心水位，在圖中可以看到由於沒有任何冷卻水的補充，因此爐心水位非常快速的下降，在 4.7 分鐘(283.672 秒)時即造成爐心暴露。

圖 4-4 是 SRV 流量圖，由於在事故發生後，主蒸汽管上的破口即造成主系統壓力急速下降，因此在整個模擬過程中，SRV 始終未曾開啟，因此其流量亦始終為零。

圖 4-5 是爐心第 33 號節點燃料溫度，在爐心裸露之後不久，其溫度即開始快速上升，事故開始後約 1900 秒時，此處燃料棒開始熔毀並往下流動，5050 秒左右，此處燃料棒完全熔毀並落至下方。

圖 4-6 為爐心處的熔融物總質量，在爐心裸露後約 20.5 分鐘 (1230 秒)，爐心開始熔融，而且熔融物質量不斷上升，直到 1.83 小時(6598.004 秒)時，熔融爐心開始向下落入反應器壓力槽底部區間，因此位於爐心處的熔融物質量開始快速下降，7300 秒左右時，熔融爐心全部掉入反應器壓力槽底部區間。

圖 4-7 是反應器壓力槽底部區間的熔融爐心總質量，在 1.83 小時(6598.004 秒)時，爐心的熔融物開始落至此處，因此在圖上可看到其值自零開始快速爬升，直到 5.12 小時(18448.809 秒)時，反應器壓力槽破裂失效，因此熔融爐心開始流出，在圖上開始急遽下降；6.24 小時(22457.195 秒)時，反應器壓力槽底部進一步破裂，因此尚留在底部區間的熔融爐心全數落入下乾井。

圖 4-8 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。由於事故發生後不久，爐心即已裸露，因此其值很快便爬升至最高值。

圖 4-9 所示為上乾井壓力，事故發生後，由於破口處位於主蒸汽管，因此流出的蒸汽直接進入上乾井，造成此處的壓力瞬間上升，1.83 小時(6598.004 秒)時，熔融爐心落入反應器壓力槽底部區間時為該處冷卻水所淬熄，瞬間形成大量水蒸氣，因此使得

主系統及圍阻體內的壓力急速上升。5.12 小時(18448.809 秒)時，反應器壓力槽失效，熔融爐心開始落入下乾井，由於此時下乾井內約有 9570kg 積水，因此落入下乾井的熔融爐心再一次發生淬熄，產生的水蒸氣使得圍阻體內壓力又一次急速上升。此後由於落入圍阻體內的熔融爐心的衰變熱，圍阻體內壓力不斷持續升高，16.80 小時(60463.656 秒)時，抑壓池水溫度更達到飽和而開始汽化，使得圍阻體內壓力更快速的上升，直到 19.05 小時(68566.656 秒)時，圍阻體過壓保護系統發生作用，開始釋放圍阻體壓力。

圖 4-10 所示為濕井壓力，其變化趨勢及重要事件發生時間點與圖 4-9 的上乾井壓力相同。

圖 4-11 為自圍阻體外釋之 CsI 及 CsOH 量，在圍阻體過壓保護裝置啟動前，其外釋量為零，19.05 小時(68566.656 秒)時，圍阻體過壓保護裝置發生作用，開始釋放圍阻體內壓力，連帶也使放射性分裂產物開始外釋。由圖上可看出 CsI 及 CsOH 的外釋值在 COPS 啟動後快速上升，之後 CsI 的外釋量便幾乎不再增加，而 CsOH 則持續外釋。

表 4-1 LBLC 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 |
|----------------------|--|
| 0.000 | Break in Primary System (LOCA) |
| 0.053 | High Drywell Pressure for Scram |
| 1.650 | MSIV Closed, Feedwater Pump Tripped |
| 4.253 | Reactor Scrammed |
| 283.672 (4.73 min) | Core Uncover |
| 6598.004 (1.83 hr) | Relocation of Core Materials to Lower Head Started |
| 18448.809 (5.12 hr) | Vessel Failed by Lower Head Rupture |
| 18778.105 (5.22 hr) | Passive Flooder Activated |
| 22457.195 (6.24 hr) | RPV Extensive Failure |
| 68566.656 (19.05 hr) | COPS Activated |

表 4-2 LBLC 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 | 0.9999136 |
| 2.CsI+RbI | 1.58E-05 |
| 3.TeO ₂ | 0.00E+00 |
| 4.SrO | 2.75E-07 |
| 5.MoO ₂ | 2.70E-08 |
| 6.CsOH+RbOH | 6.58E-05 |
| 7.BaO | 1.18E-07 |
| 8.La ₂ O ₃ +Pr ₂ O ₃ +Nd ₂ O ₃ +Sm ₂ O ₃ +Y ₂ O ₃ | 7.21E-09 |
| 9.CeO ₂ | 1.88E-08 |
| 10.Sb | 2.42E-03 |
| 11.Te ₂ | 2.13E-03 |
| 12.UO ₂ +NpO ₂ +PuO ₂ | 1.38E-10 |

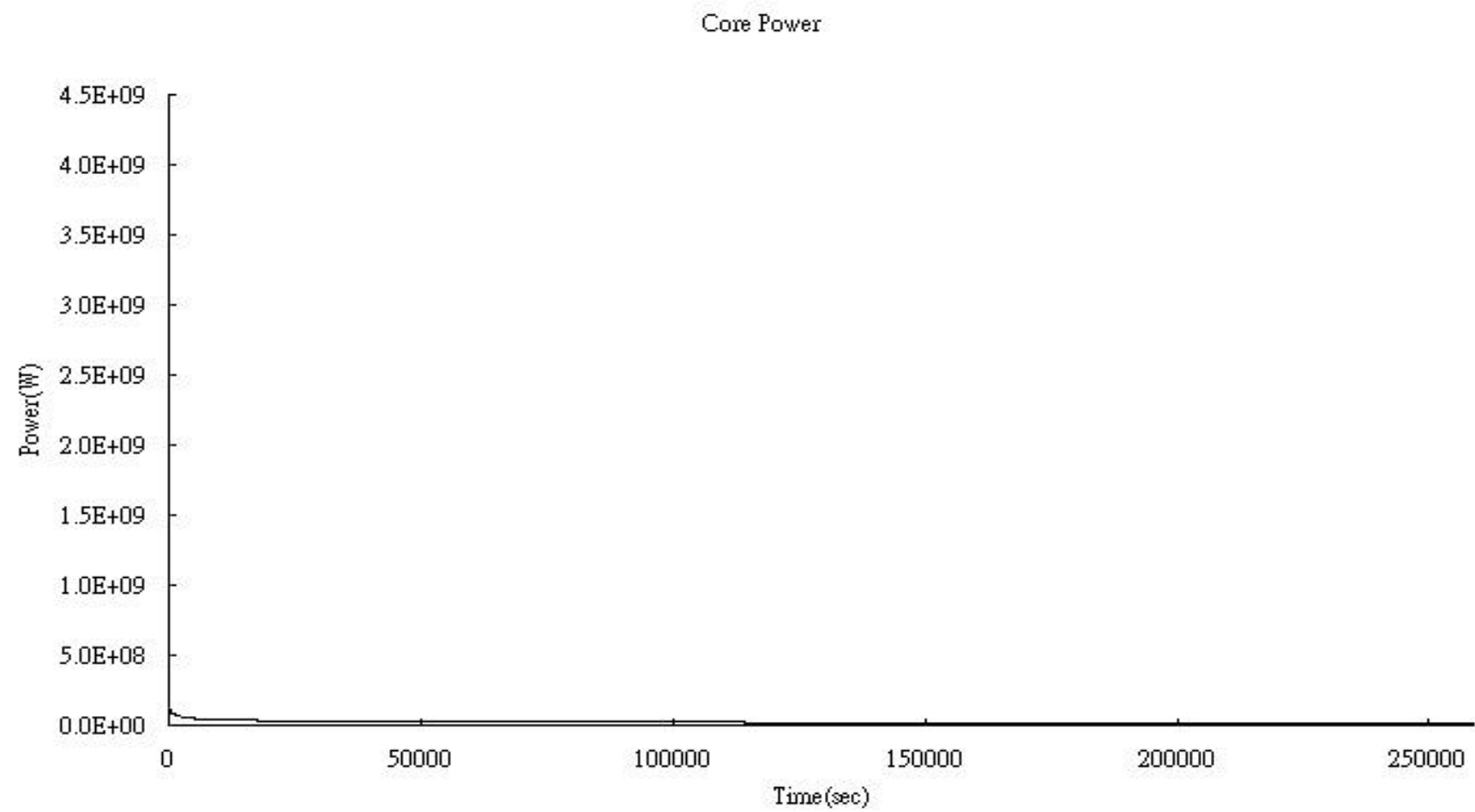


圖 4-1 LBLC 事故序列反應器爐心功率

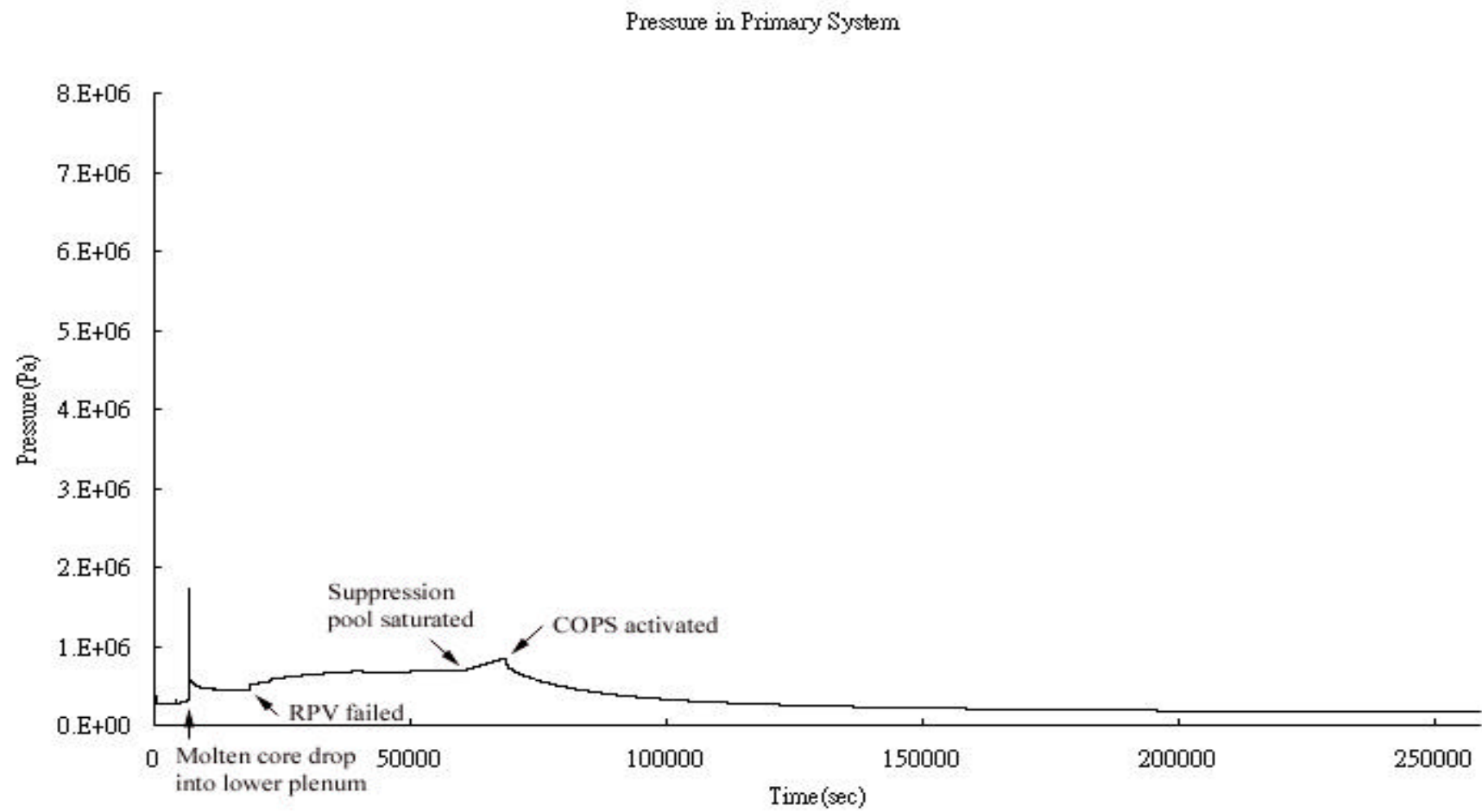


圖 4-2 LBLC 事故序列冷卻水系統壓力

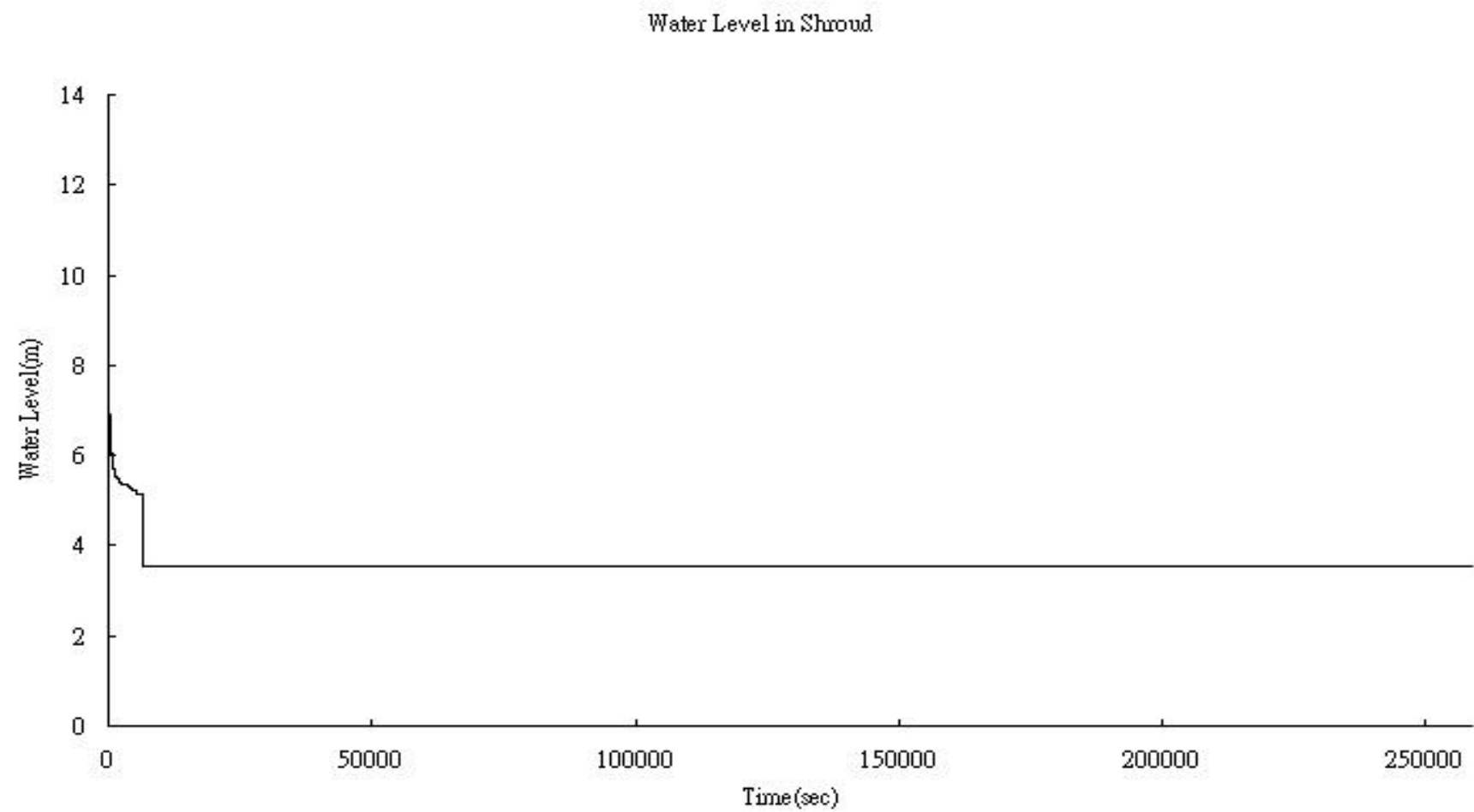


圖 4-3 LBLC 事故序列爐心水位

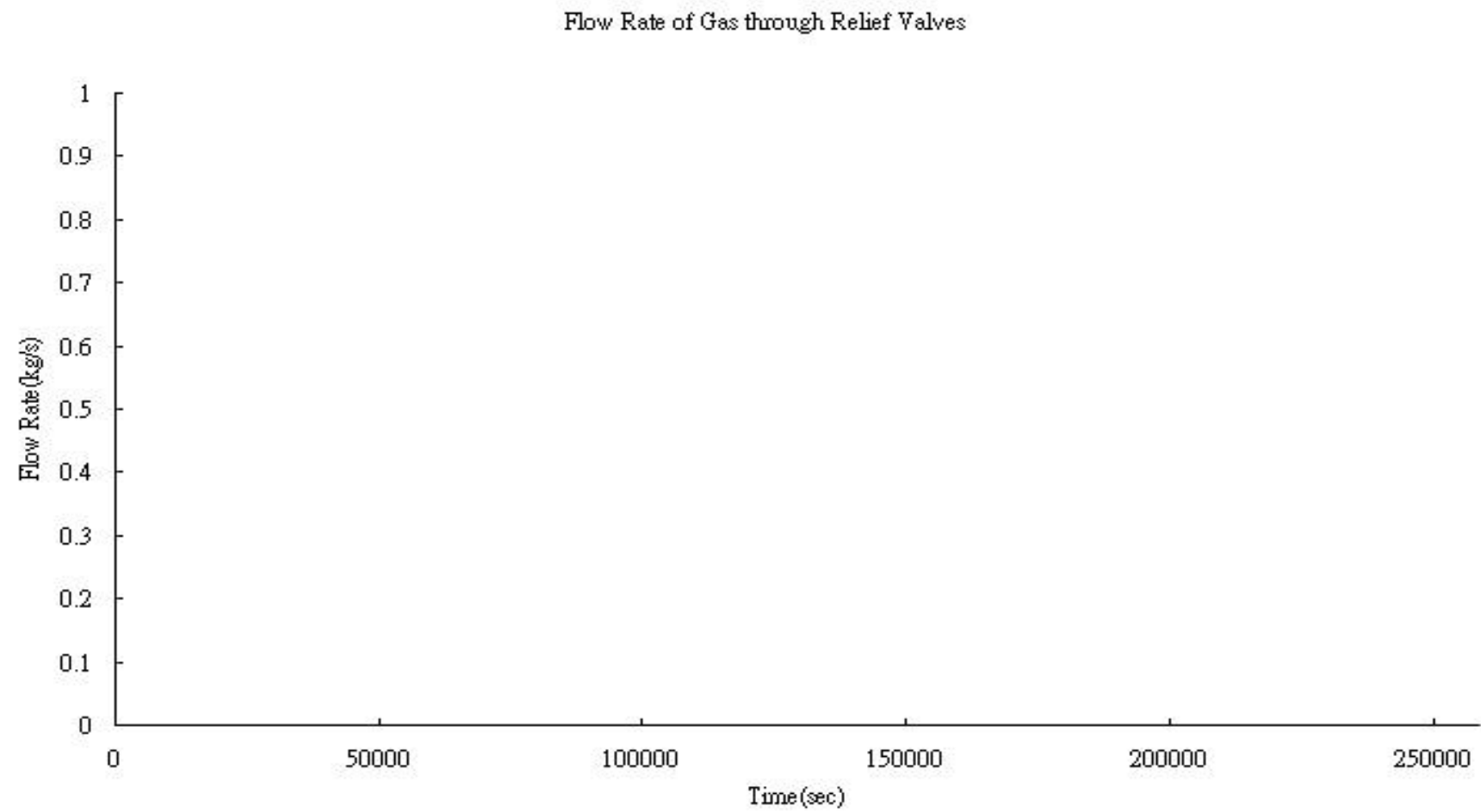


圖 4-4 LBLC 事故序列安全釋壓閥流量

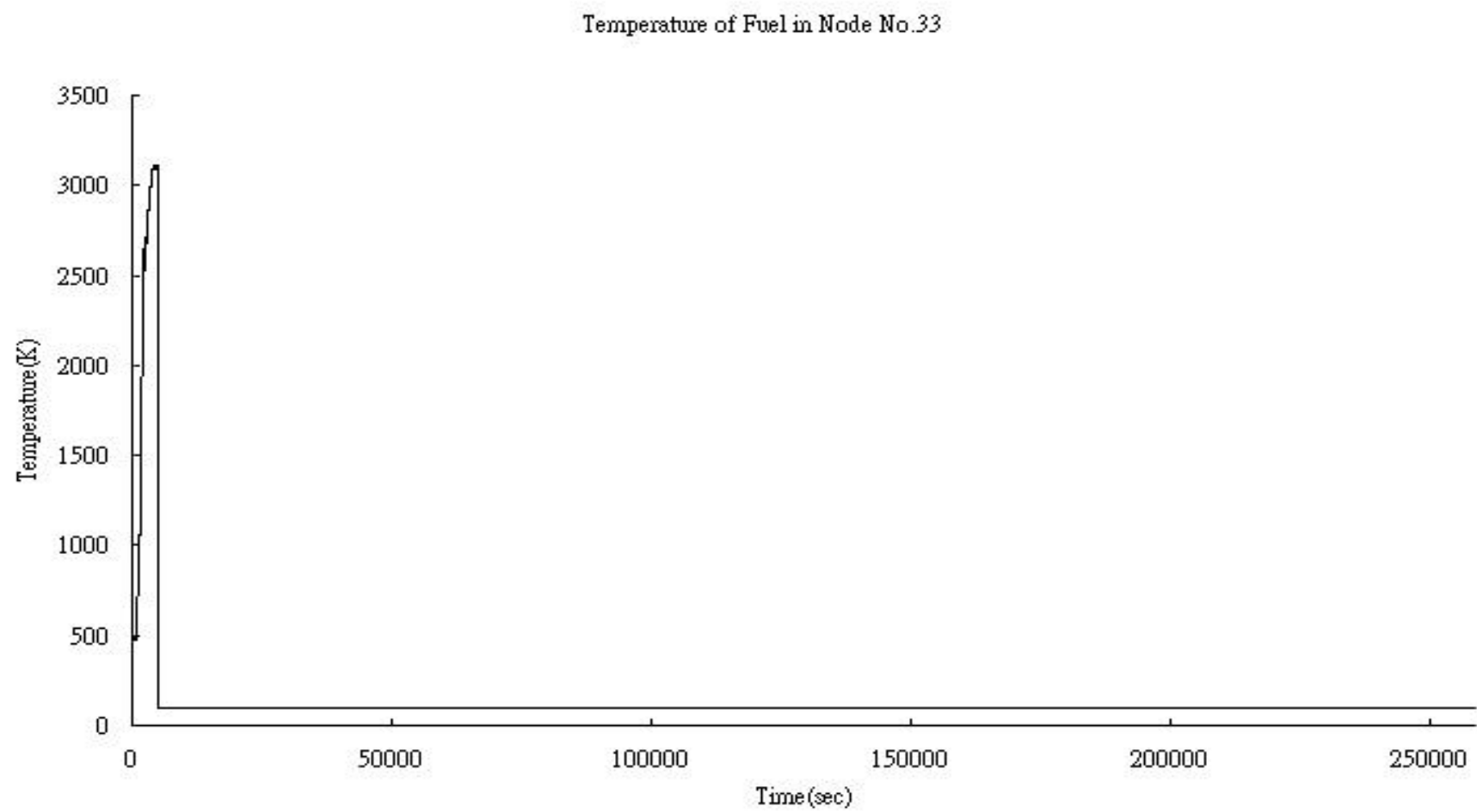


圖 4-5 LBLC 事故序列第 33 號節點燃料溫度

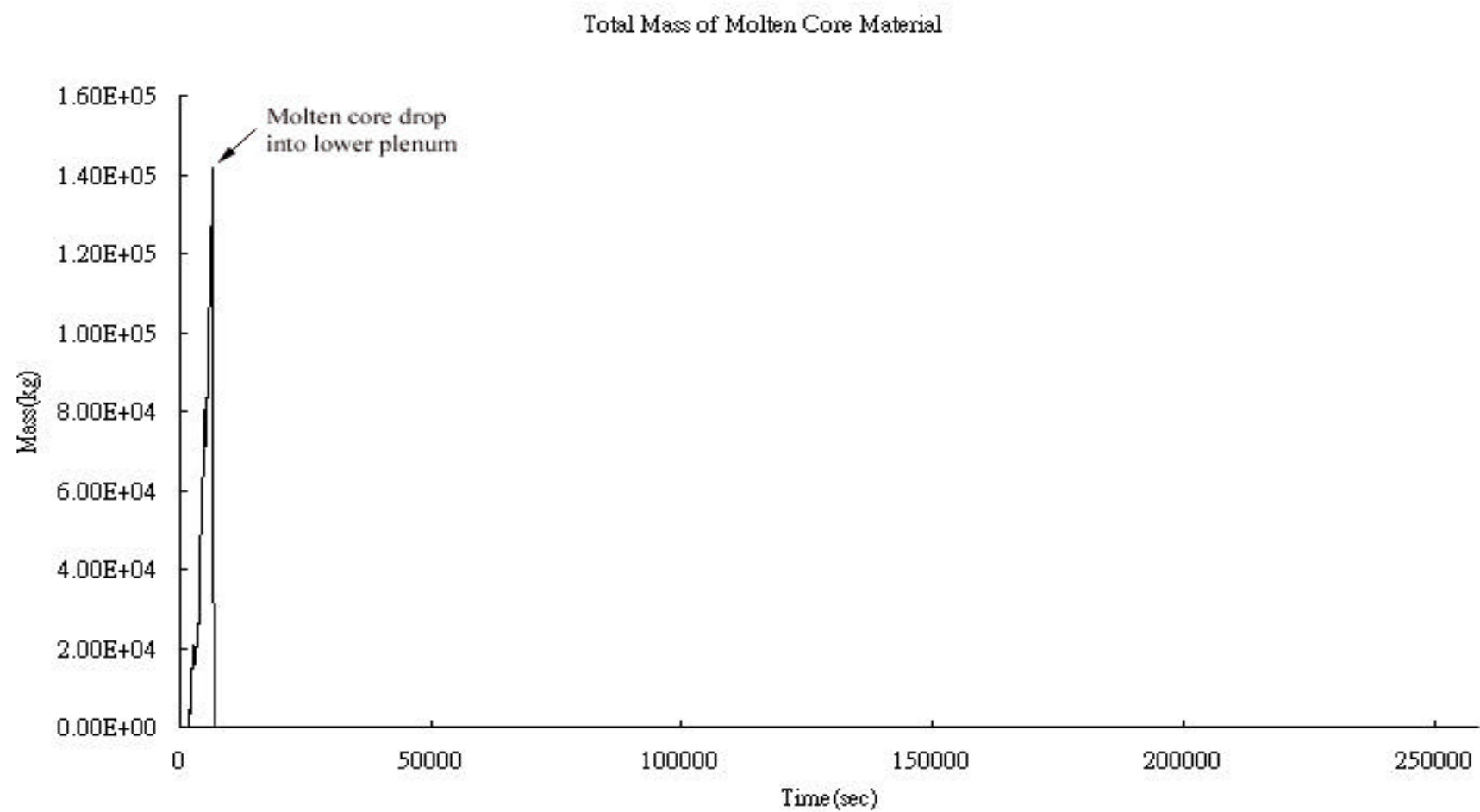


圖 4-6 LBLC 事故序列爐心位置熔融物總質量

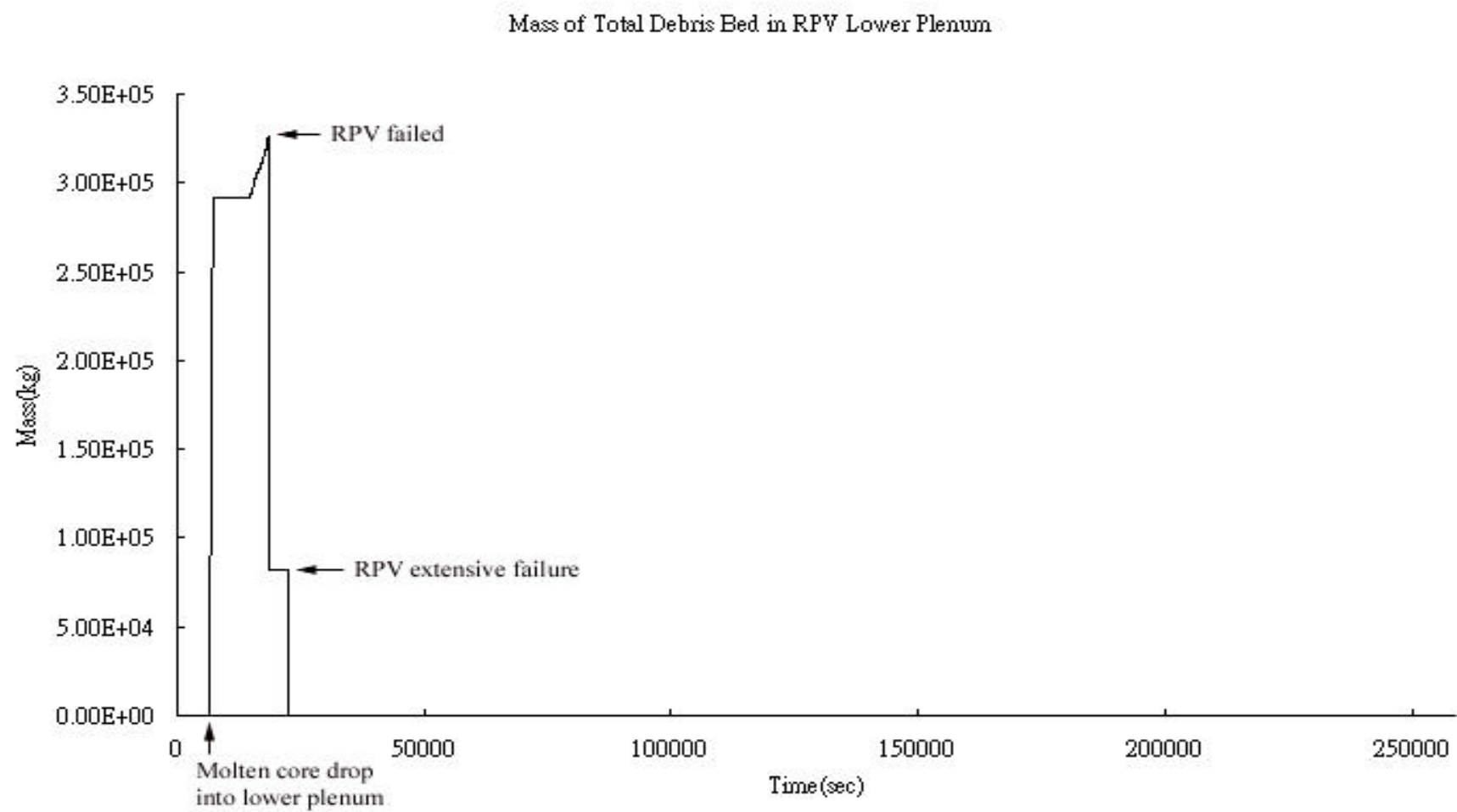


圖 4-7 LBLC 事故序列反應器壓力槽底部區間熔融爐心質量

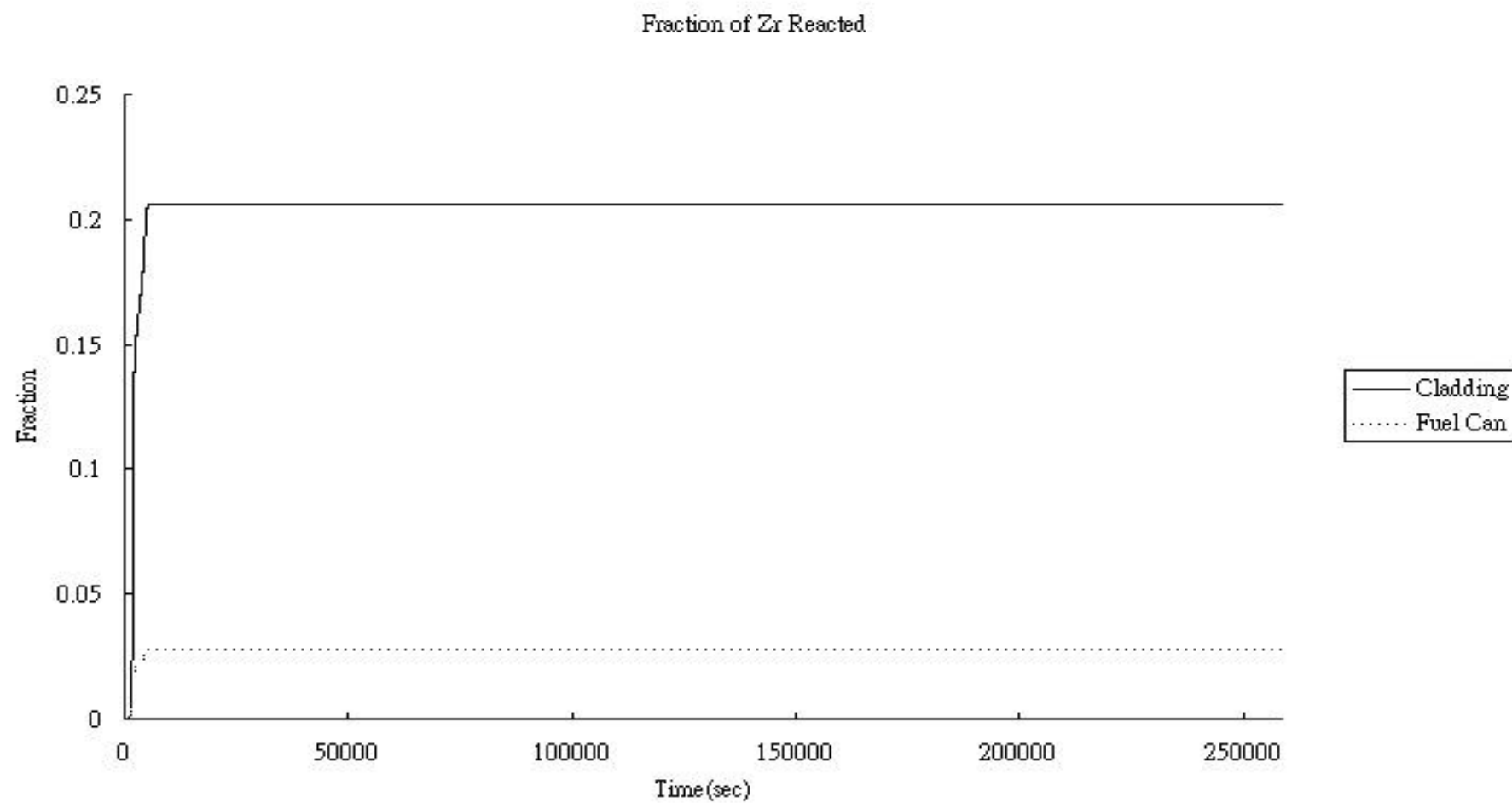


圖 4-8 LBLC 事故序列燃料棒護套及燃料束結構體鋯合金氧化比例

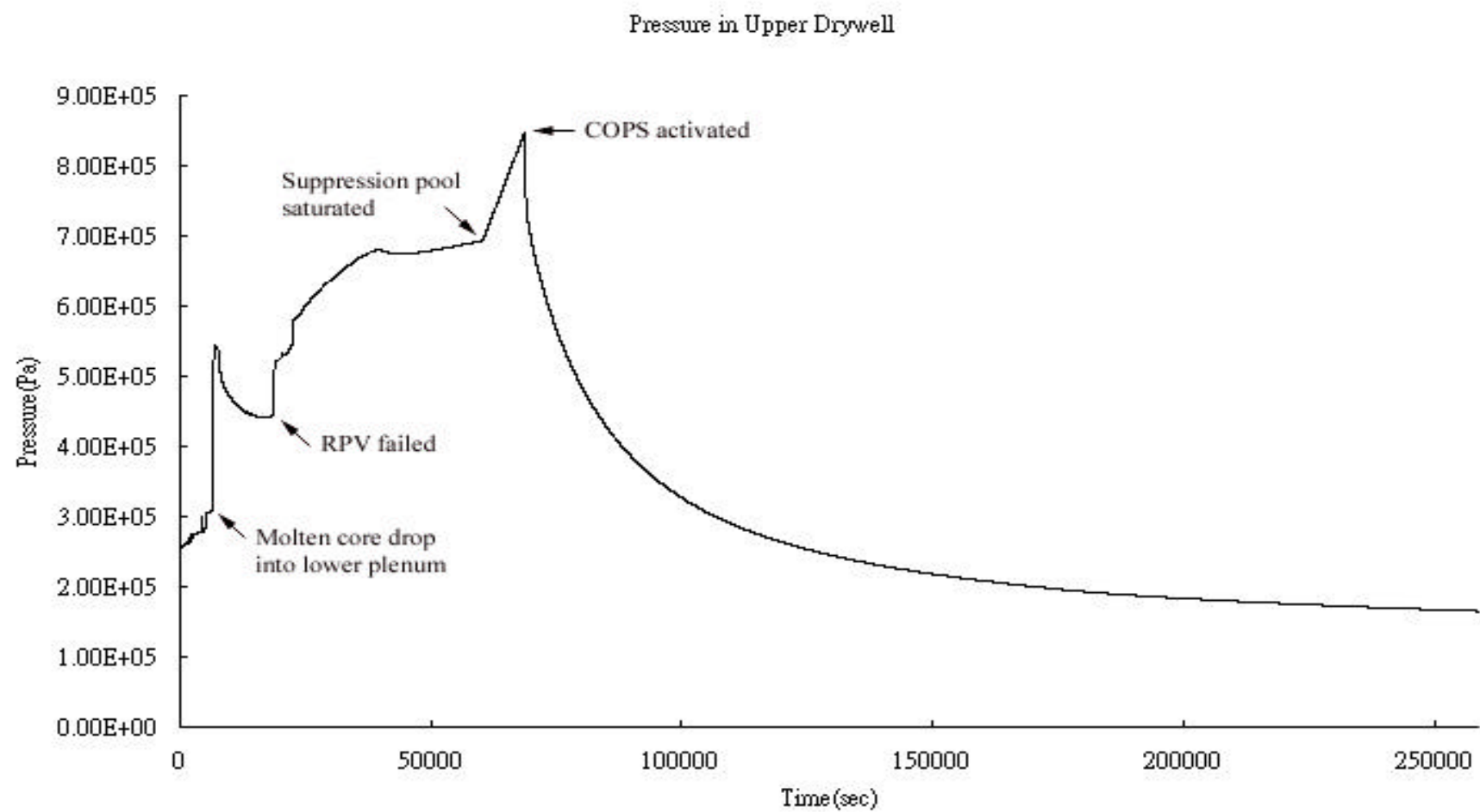


圖 4-9 LBLC 事故序列上乾井壓力

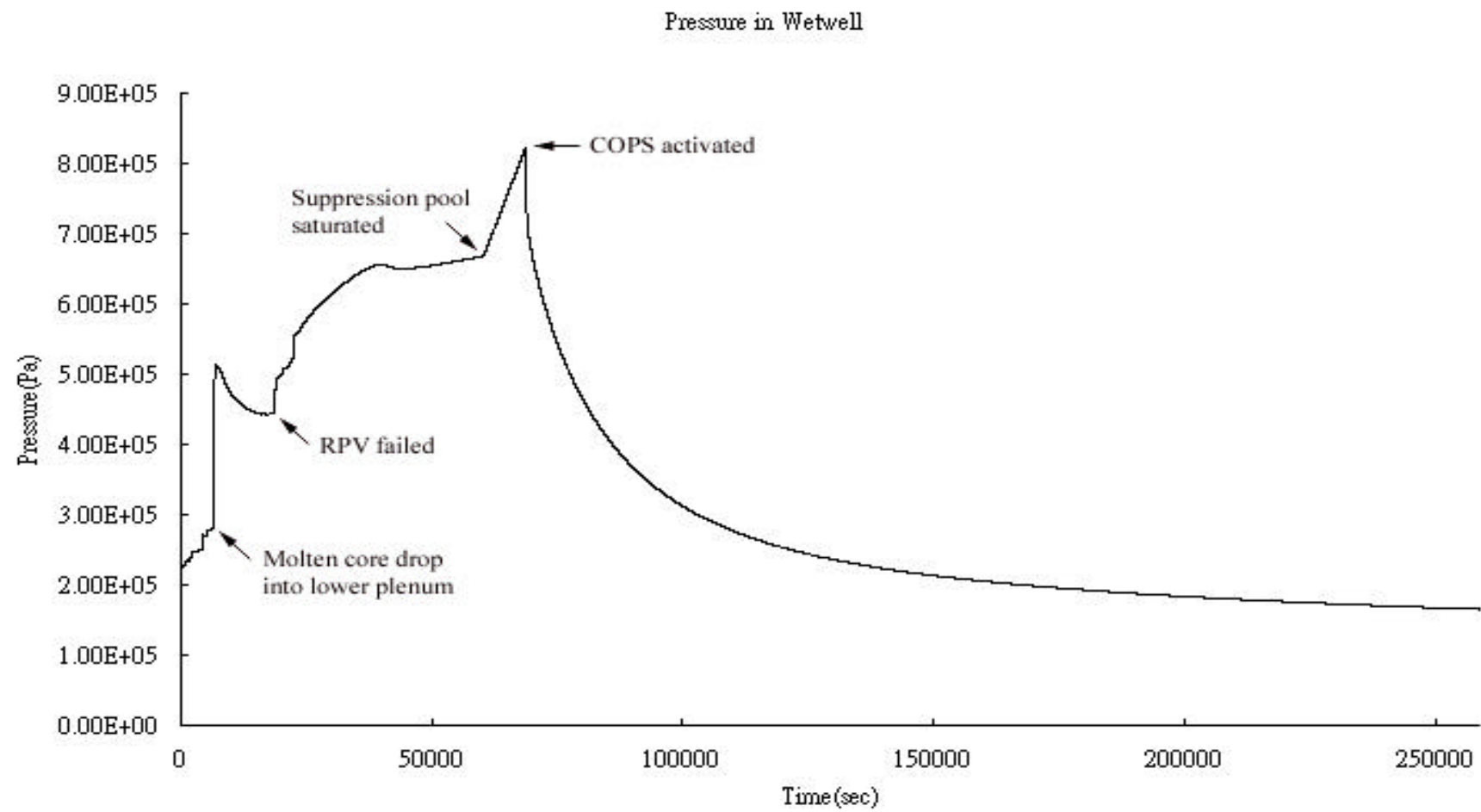


圖 4-10 LBLC 事故序列濕井壓力

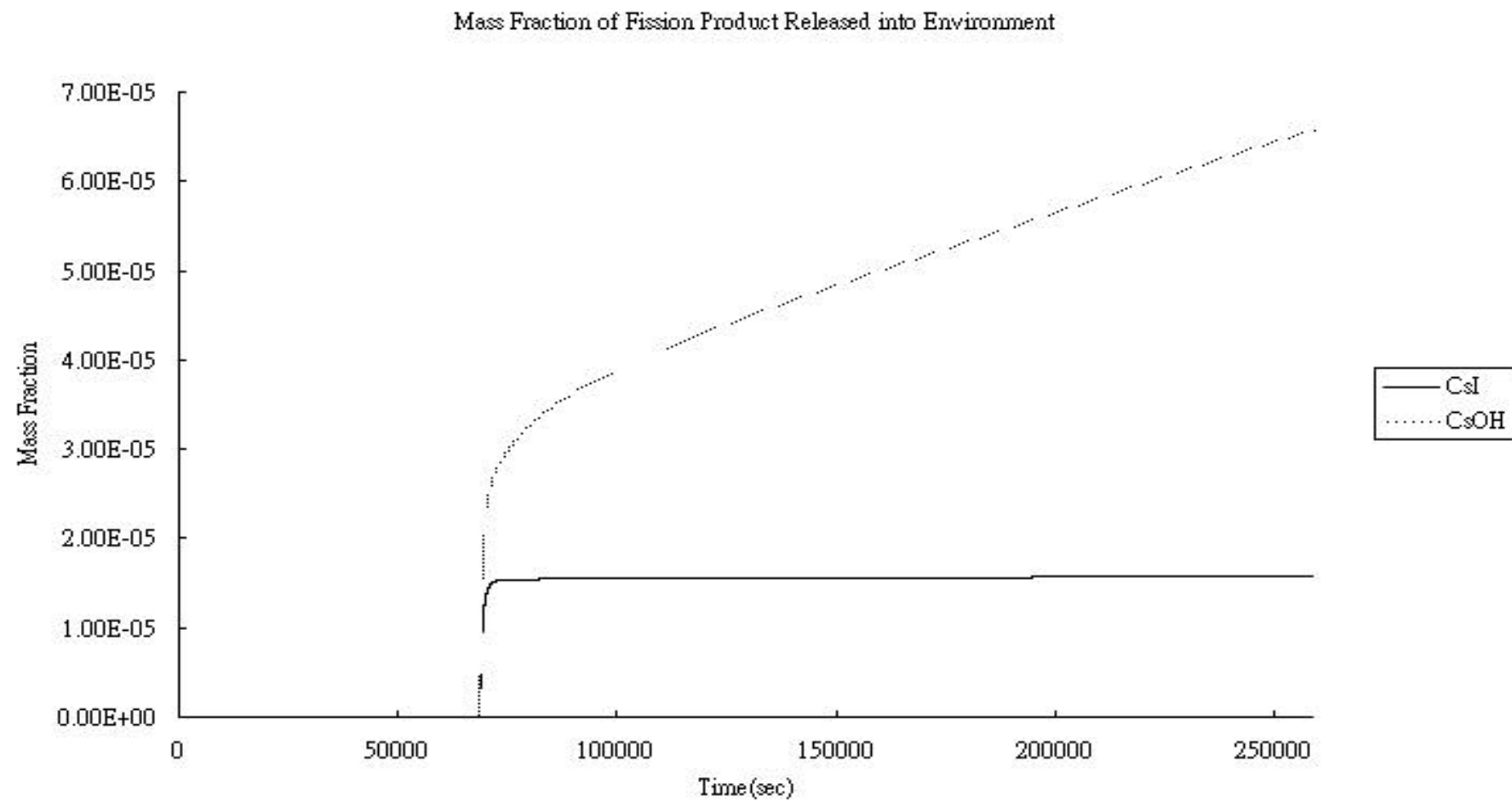


圖 4-11 LBLC 事故序列 CsI 及 CsOH 自圍阻體釋出量