

第六章 LCLP 事故序列模擬

6.1 前言

本論文第四個模擬的事故序列是爐心完全喪失冷卻,最終導致反應器壓力槽在低壓下失效(Loss of All Core Cooling with Vessel Failure at Low Pressure),在初期安全分析報告中的代號是 LCLP-PF-R-N。事故開始時,主蒸汽隔離閥關閉,引發反應器急停信號。反應器順利急停後,由於所有爐心注水系統全數失效,因此爐心冷卻水受到燃料衰變熱的汽化,使得爐心水位逐漸降低,導致爐心的裸露,以及接下來的爐心熔毀。在爐心水位降低到爐心 2/3 高度時,初期安全分析報告中假設運轉員打開一個安全釋壓閥,以降低反應器壓力。熔融的爐心最後開始向下流動,落入反應器壓力槽底部區間,並在該處積水淬熄瞬間,產生大量蒸汽。在該處積水被蒸乾之後,熔融爐心開始造成反應器底部溫度增加,最終反應器底部由於高溫之潛變效應而失效,熔融爐心開始流出反應器壓力槽,並落入下乾井。

熔融爐心在落入下乾井之後,逐漸將該處積水蒸乾,接著使得下乾井溫度超過 533K,引發被動淹覆器的動作,將乾井連接管的水引入,淹覆下乾井的熔融爐心。由於在程式中圍阻體移熱屬於低壓爐心淹覆器的運轉模式之一,因此喪失低壓爐心淹覆器,連帶也使得圍阻體移熱模式無法啟動,因此圍阻體壓力便在熔融爐心不斷汽化下乾井積水的影響下,到達圍阻體過壓保護裝

置的動作設定點，而開始洩壓，同時造成放射性分裂產物外釋。

6.2 輸入檔案設定

本事故序列的肇因為喪失所有爐心冷卻系統以及主蒸汽隔離閥關閉，因此在輸入檔案的 Initiators 中設定高壓爐心淹覆器、低壓爐心淹覆器、爐心隔離冷卻系統以及控制棒驅動水泵在事故開始時即失效，主蒸汽隔離閥及飼水泵亦在事故開始時關閉。

6.3 模擬結果

本事故序列所發生的重要事件以及其發生時間詳見表 6-1。在事故一開始時，依照輸入檔案設定，所有爐心冷卻系統全數失效，MSIV 及飼水泵同時關閉，引發反應器急停信號。2.494 秒時，再循環水泵跳脫，4.2 秒時，反應器急停。隨著爐心冷卻水為燃料棒衰變熱所汽化，安全釋壓閥不斷反覆開關，爐心水位亦逐漸降低，在 19.2 分鐘(1154.697 秒)時，爐心開始裸露。22.2 分鐘(1329.725 秒)時，程式依照原先設定，模擬運轉員打開一個安全釋壓閥的動作。在爐心裸露後約 1.9 小時，也就是 2.21 小時(7972.599 秒)時，熔融爐心開始自爐心處往下掉落至反應器壓力槽底部區間，並在淬熄瞬間產生大量蒸汽。在熔融爐心將反應器壓力槽底部區間的積水蒸乾後，該處反應器槽壁受到熔融爐心的衰變熱影響，溫度逐漸升高，最後在 5.24 小時(18861.475 秒)時，反應器壓力槽底部因高溫之潛變效應而發生破裂，熔融爐心開始

進入下乾井。由於此時下乾井處僅有約 10kg 的積水，因此熔融爐心僅被短暫冷卻，積水旋即在不到 2 秒鐘的時間內被蒸乾，接著下乾井的溫度快速上升，在約 1 分鐘後，也就是事故開始後 5.26 小時(18920.992 秒)時到達 533K，被動淹覆器發生作用，乾井連接管內的水流入下乾井而淹覆該處的熔融爐心。5.72 小時(20595.043 秒)時，反應器壓力槽底部發生更進一步的破裂，導致反應器內殘餘的熔融爐心全數流出。由於前面提及的原因，圍阻體內的移熱系統無法發揮作用，因此熔融爐心的衰變熱逐漸將圍阻體內的水汽化，並造成圍阻體內的壓力增加，在 17.69 小時(63673.363 秒)時，圍阻體內壓力到達圍阻體過壓保護系統的設定點，因此圍阻體開始經此系統洩壓，放射性分裂產物亦隨同外釋。各類放射性分裂產物的外釋量請見表 6-2。

6.4 結果分析

圖 6-1 是爐心功率，在事故開始時，由於主蒸汽隔離閥關閉，因此產生急停信號，4.2 秒後，反應器即急停，因此爐心功率急速下降至衰變熱功率。

圖 6-2 是主系統壓力，在事故一開始時，由於反應器內的冷卻水被爐心衰變熱所汽化，造成主系統內壓力升高，因此安全釋壓閥出現短暫的反覆開關，22.2 分鐘(1329.725 秒)時，由於爐心水位降低至爐心 2/3 高度，按照初期安全分析報告的敘述，運轉員打開一個安全釋壓閥，因此反應器開始洩壓，主系統壓力急

降。2.21 小時(7972.599 秒)時，熔融爐心開始落入反應器壓力槽底部區間，在為該處積水淬熄瞬間產生大量蒸汽，因此主系統壓力快速竄升，形成一個明顯的狹窄尖峰。5.24 小時(18861.475 秒)時，反應器壓力槽失效，熔融爐心自破口處流出，主系統壓力開始與圍阻體內壓力達到平衡，而與圍阻體壓力有相同的變化趨勢。5.72 小時(20595.043 秒)時，反應器底部進一步破裂，使得反應器內殘餘的熔融爐心落入下乾井，由於被動淹覆器在反應器壓力槽失效後 1 分鐘時即已發生作用，因此當這些殘餘爐心落入下乾井時，下乾井地板已經為大量積水所覆蓋，因此這些殘餘的熔融爐心會被積水所淬熄、產生蒸汽，而使主系統、圍阻體的壓力出現些微上升。接下來這些位於下乾井的熔融爐心不斷將圍阻體內積水汽化，使圍阻體內壓力升高，最後在 17.69 小時(63673.363 秒)時，圍阻體過壓保護裝置啟動，圍阻體開始洩壓，主系統壓力也隨之下降。

圖 6-3 是爐心水位圖，在事故開始後，由於沒有任何新的冷卻水注入爐心，因此爐心處原有的冷卻水慢慢為燃料衰變熱所汽化，而自安全釋壓閥流失，爐心水位逐漸降低，在 19.2 分鐘(1154.697 秒)時爐心裸露，隨後並開始熔毀。

圖 6-4 是安全釋壓閥的水蒸氣流量，由於事故開始時，安全釋壓閥反覆開關，因此流量出現上下震盪。22.2 分鐘(1329.725 秒)時，由於運轉員打開一個安全釋壓閥，主系統自該閥門持續洩壓，因此其餘閥門即未再出現反覆的開關動作，水蒸氣流量也未

再出現上下震盪。2.21 小時(7972.599 秒)時，由於熔融爐心開始落入反應器壓力槽底部區間，淬熄瞬間產生大量水蒸氣，因此水蒸氣流量又突然快速增加，而出現圖中最後一個狹窄尖峰。5.24 小時(18861.475 秒)反應器壓力槽失效之後，安全釋壓閥便不再有任何水蒸氣流量。

圖 6-5 為爐心第 33 節點的燃料溫度。19.2 分鐘(1154.697 秒)時，爐心裸露，在約 1700 秒時，此處燃料溫度便開始逐漸上升，5980 秒左右，此處的燃料已經完全熔融並流入其下方。

圖 6-6 為位於爐心的熔融物質量，在 22.3 分鐘(1340 秒)左右，開始出現爐心熔毀的現象，且熔融爐心質量不斷增加，直到 2.21 小時(7972.599 秒)時，熔融爐心開始落入反應器壓力槽底部區間，爐心處的熔融物質量才急速的下降。

圖 6-7 是反應器壓力槽底部區間的熔融物質量，在 2.21 小時(7972.599 秒)時，熔融爐心開始落入此區，因此其值出現急速的攀升。5.24 小時(18861.475 秒)時，由於反應器壓力槽的失效，部分熔融爐心流入下乾井，造成其值的陡降，5.72 小時(20595.043 秒)時，反應器底部的進一步破裂，使得所有殘存於反應器壓力槽底部區間的熔融爐心全數流出，而再一次使其值急降。

圖 6-8 所示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。由於爐心在事故發生後約 19 分鐘、也就是 1154.697 秒時即開始裸露而和反應器內水蒸氣接觸，因此在 28.7 分鐘(1720 秒)左右，燃料棒護套開始氧化，燃料束結構體則稍晚，在 30.3

分鐘(1820 秒)左右也開始出現氧化，兩者的氧化比例皆在極短時間內便達到最高值。

圖 6-9 及圖 6-10 為下乾井及濕井壓力。2.21 小時(7972.599 秒)時，熔融爐心開始落入反應器壓力槽底部區間，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，因此造成圍阻體內壓力快速升高。5.24 小時(18861.475 秒)時，反應器壓力槽失效，熔融爐心落入下乾井，由於此時下乾井約有 9.9 公斤積水，因此熔融爐心僅被短暫冷卻，積水旋即被蒸乾，下乾井溫度開始爬升，約 1 分鐘後，到達 533K，被動淹覆器啟動，乾井連接管的水開始流入下乾井，並在淬熄位於下乾井的熔融爐心時，產生大量水蒸氣而使圍阻體壓力再一次急速升高。5.72 小時(20595.043 秒)時，反應器底部的進一步破裂，使得殘留在壓力槽內的熔融爐心全數流出，造成下乾井積水的大量汽化，因此圖上可看到圍阻體壓力又出現快速的攀升。此後由於熔融爐心不斷汽化圍阻體內的積水，使得壓力不斷升高，最後在 17.69 小時(63673.363 秒)時，圍阻體過壓保護系統發生作用，圍阻體開始洩壓，放射性分裂產物也開始外釋。

圖 6-11 為 CsI 及 CsOH 外釋到環境中的量，在圍阻體過壓保護系統發生作用之後，放射性分裂產物開始外釋，因此 CsI 及 CsOH 的外釋量自此點開始快速爬升，並在短時間內達到穩定，此後 CsI 的外釋量僅微幅增加，但 CsOH 則仍然以相當大的幅度繼續外釋。

表 6-1 LCLP 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	MSIV Closed
0.0	Feedwater Manual Off
4.2	Reactor Scrammed
1154.697 (0.32 hr)	Core Uncovered
1329.725 (0.37 hr)	One SRV Opened by Operator
7972.599 (2.21 hr)	Relocation of Core Materials to Lower Head Started
18861.475 (5.24 hr)	Vessel Failed by Lower Head Rupture
18920.992 (5.26 hr)	Passive Flooder Activated
20595.043 (5.72 hr)	RPV Extensive Failure
63673.363 (17.69 hr)	COPS Activated

表 6-2 LCLP 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	0.9991844
2.CsI+RbI	7.97E-05
3.TeO ₂	0.00E+00
4.SrO	8.77E-08
5.MoO ₂	1.95E-10
6.CsOH+RbOH	3.13E-04
7.BaO	5.55E-08
8.La ₂ O ₃ +Pr ₂ O ₃ +Nd ₂ O ₃ +Sm ₂ O ₃ +Y ₂ O ₃	4.10E-09
9.CeO ₂	2.27E-08
10.Sb	2.44E-05
11.Te ₂	1.02E-04
12.UO ₂ +NpO ₂ +PuO ₂	6.13E-10

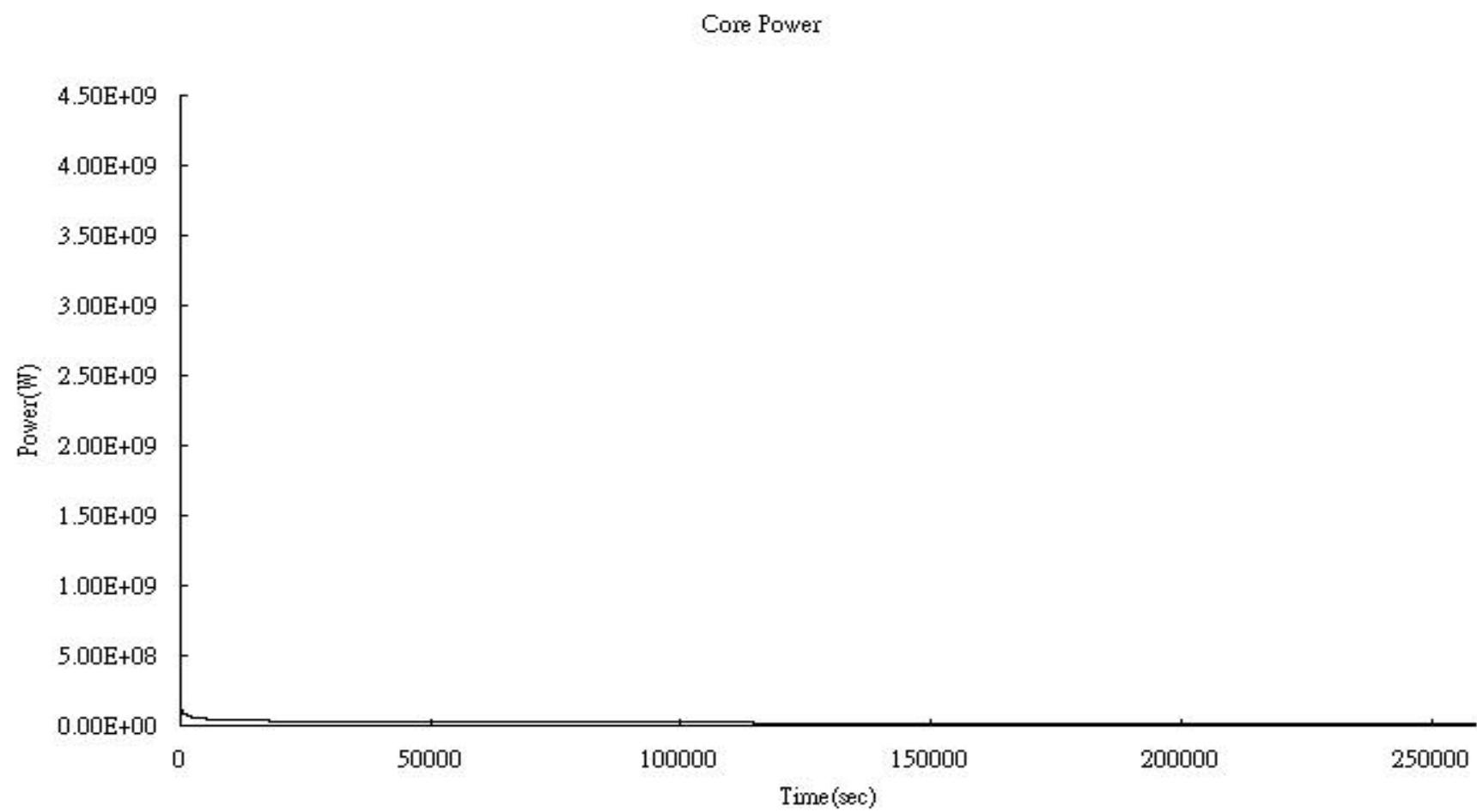


圖 6-1 LCLP 事故序列反應器爐心功率

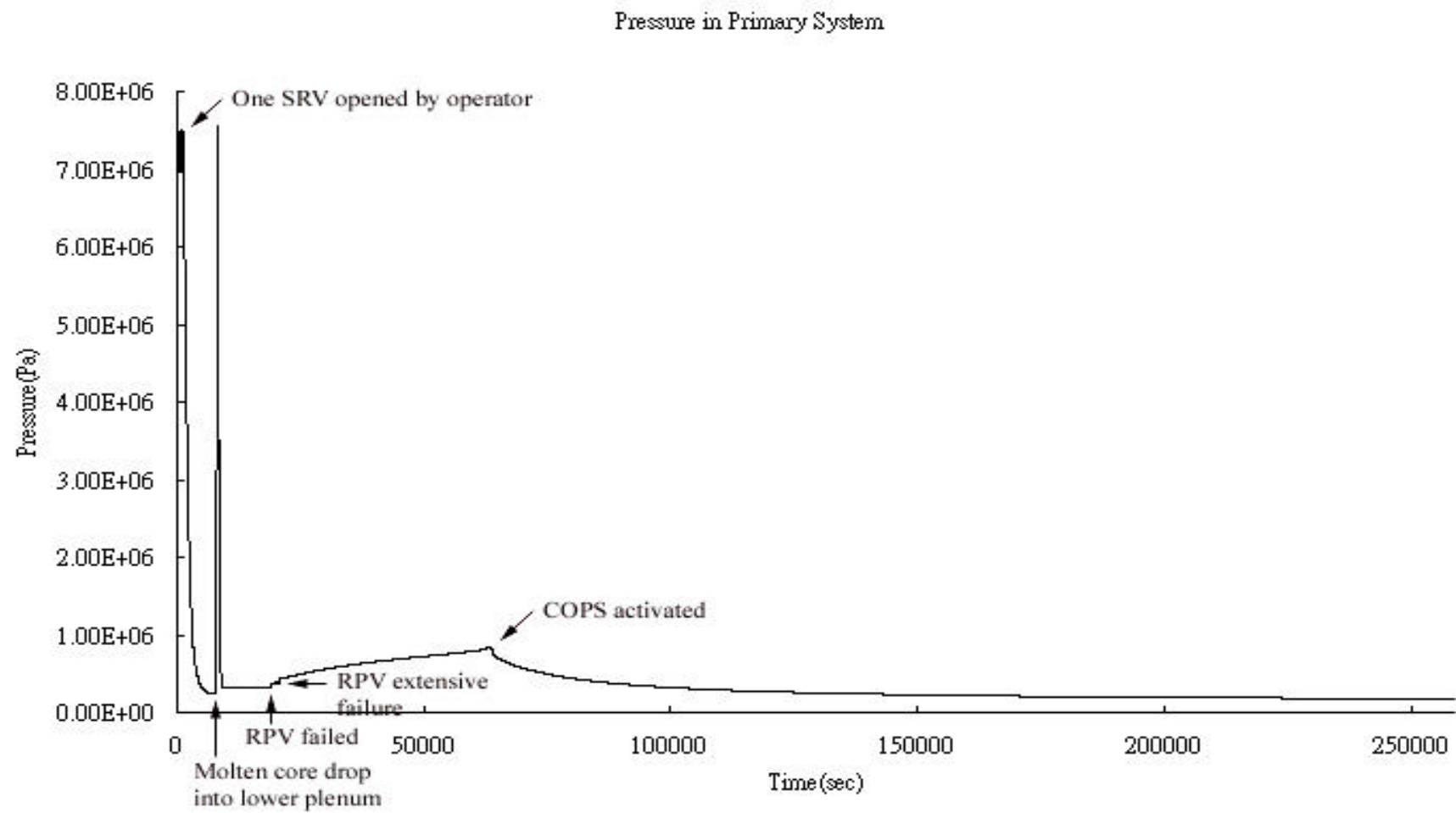


圖 6-2 LCLP 事故序列冷卻水系統壓力

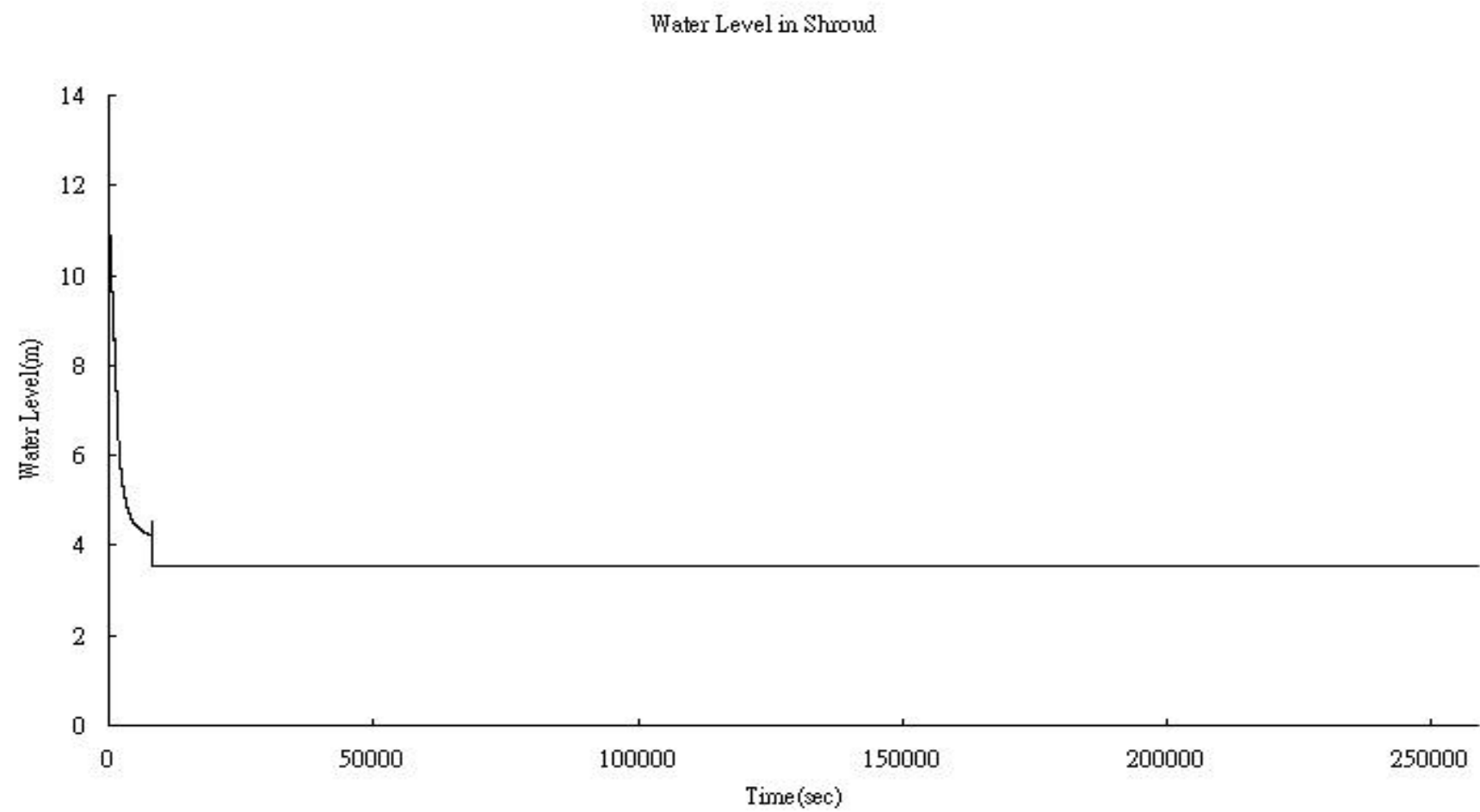


圖 6-3 LCLP 事故序列爐心水位

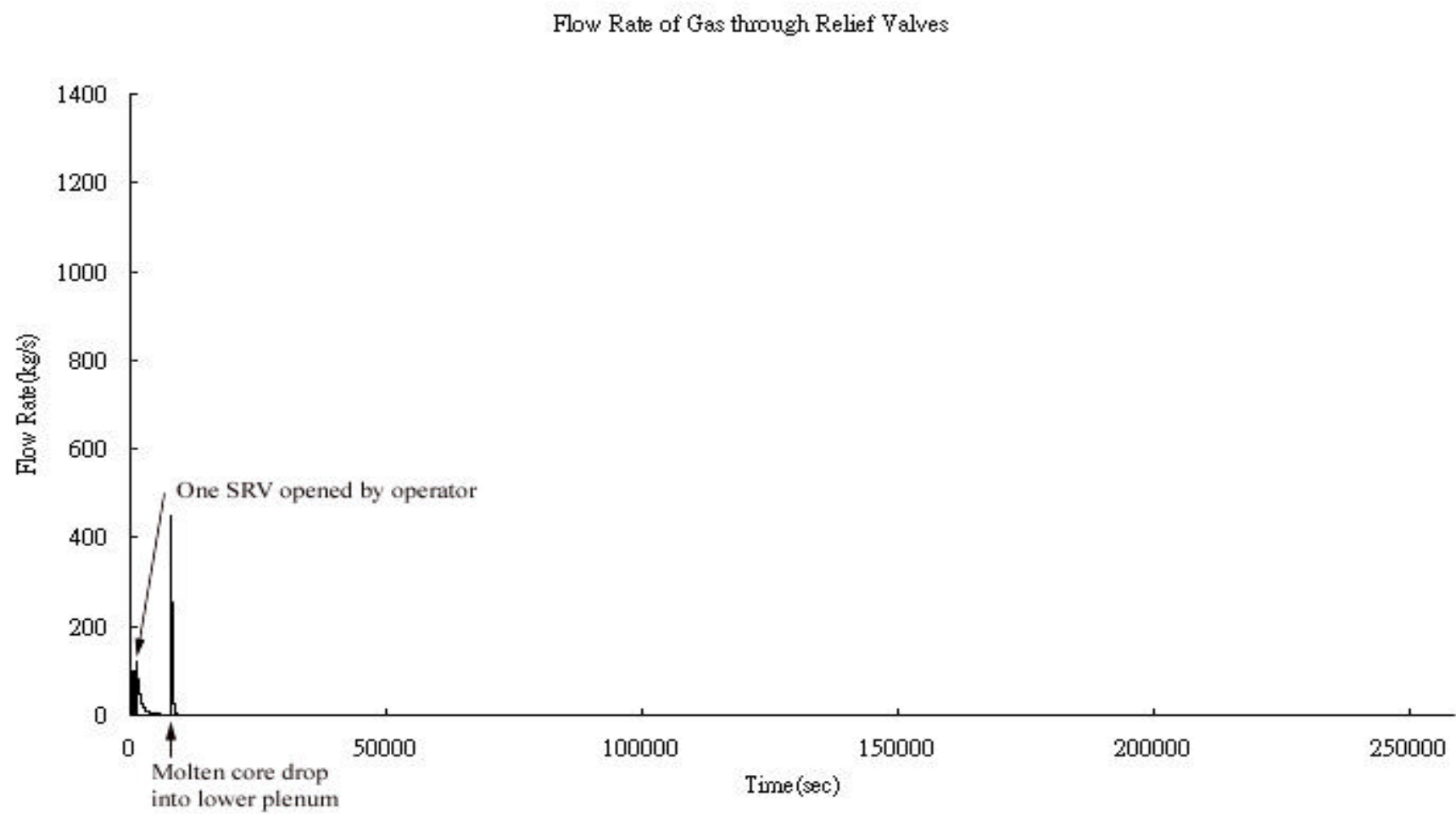


圖 6-4 LCLP 事故序列安全釋壓閥流量

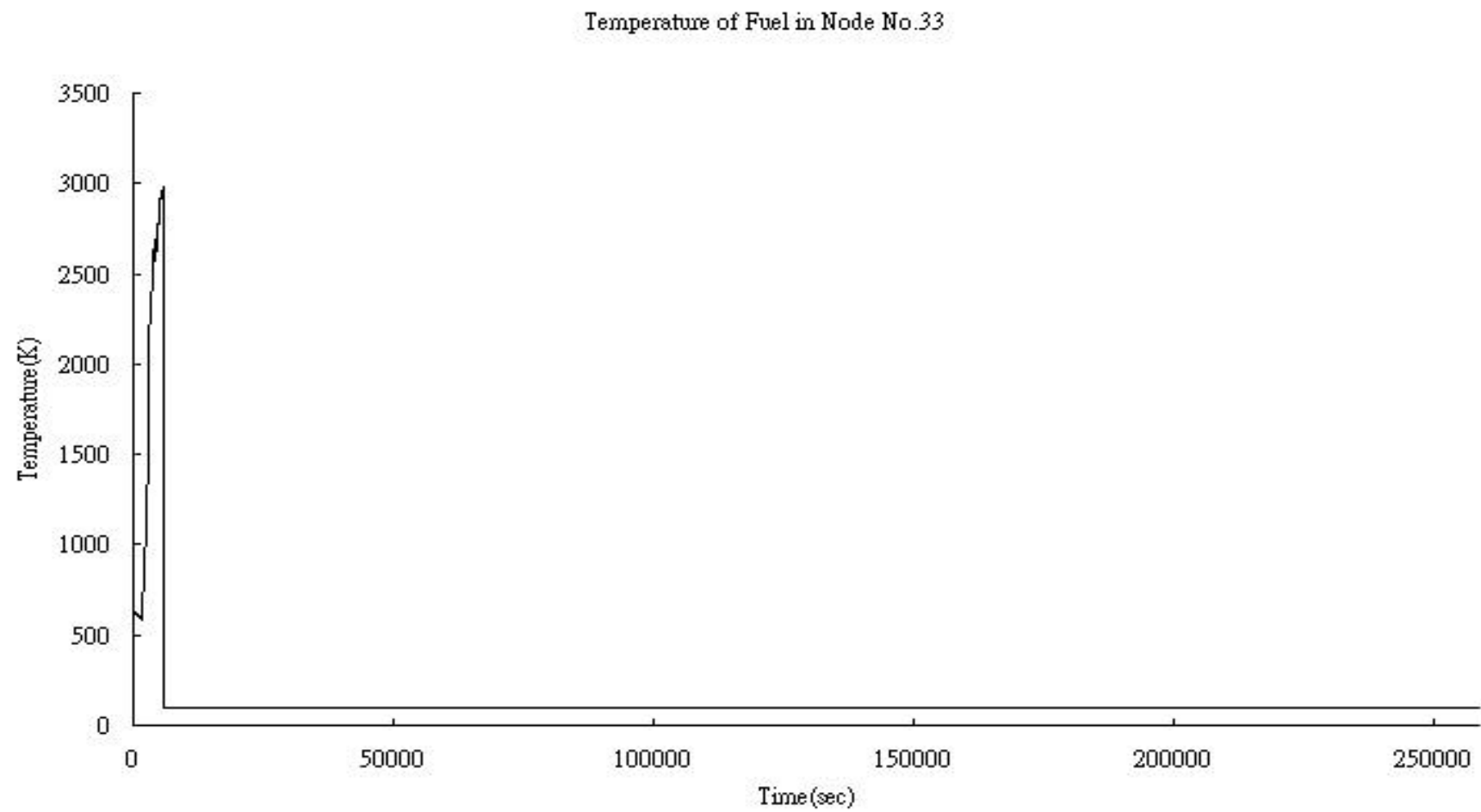


圖 6-5 LCLP 事故序列第 33 號節點燃料溫度

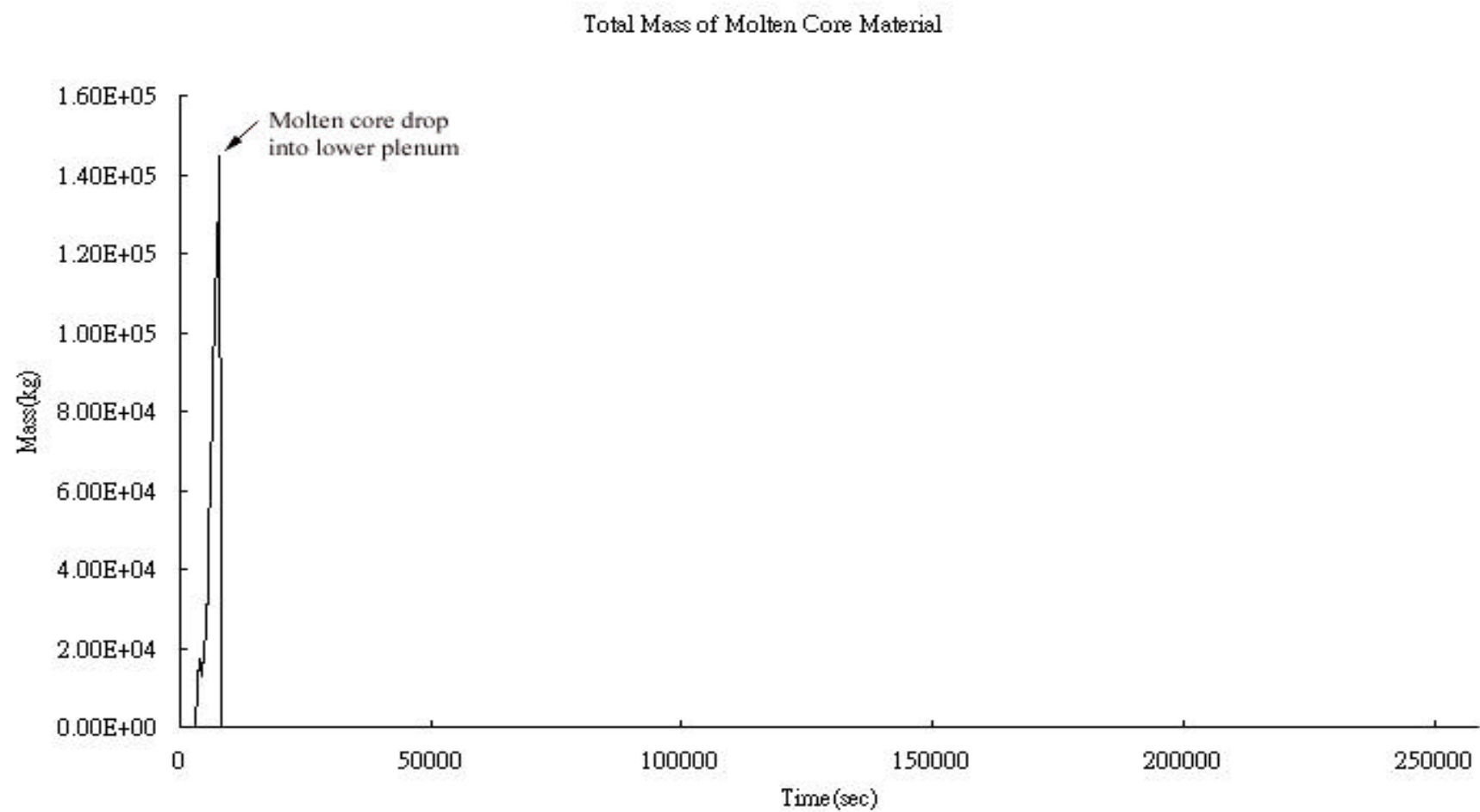


圖 6-6 LCLP 事故序列爐心位置熔融物總質量

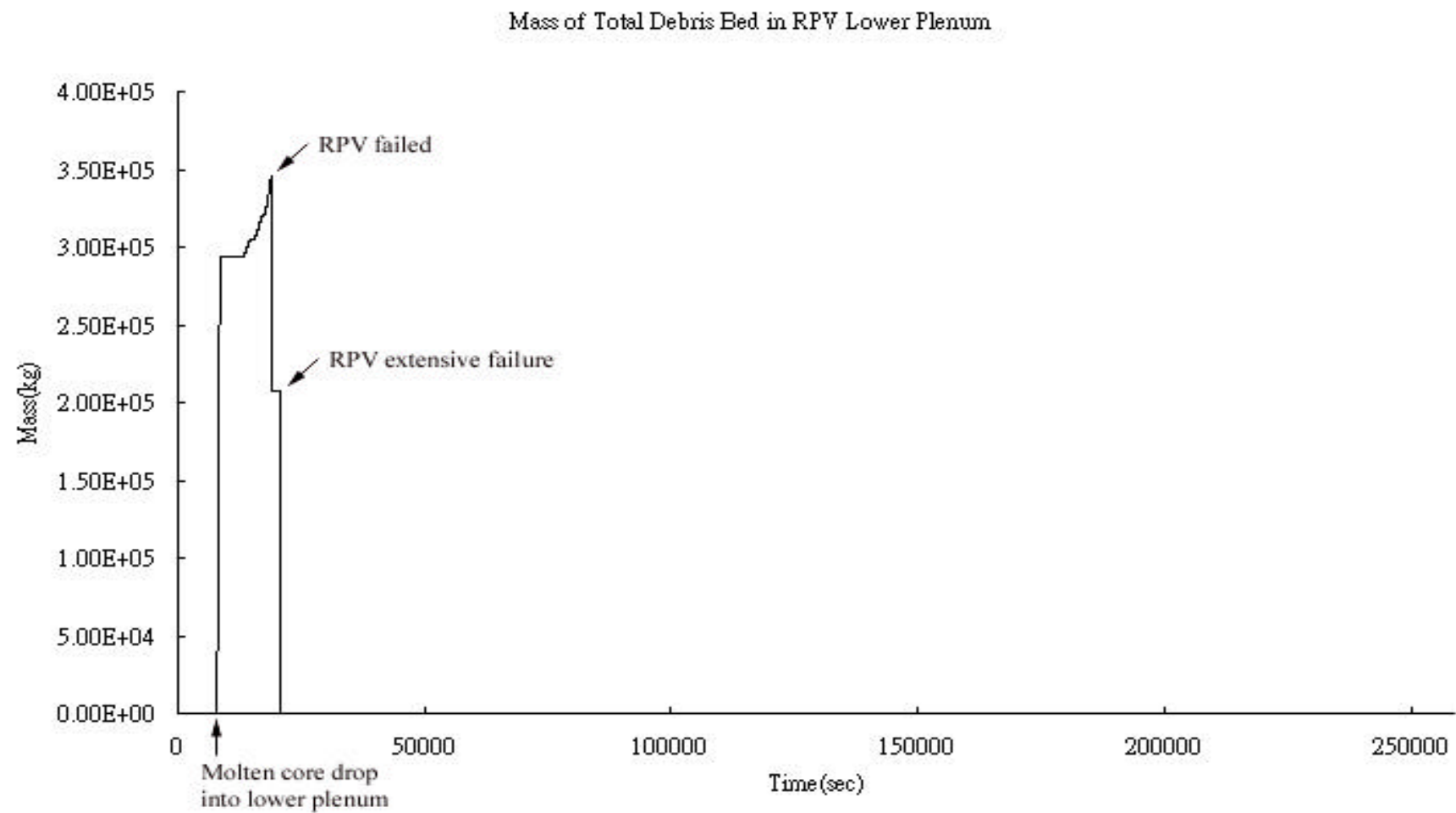


圖 6-7 LCLP 事故序列反應器壓力槽底部區間熔融爐心質量

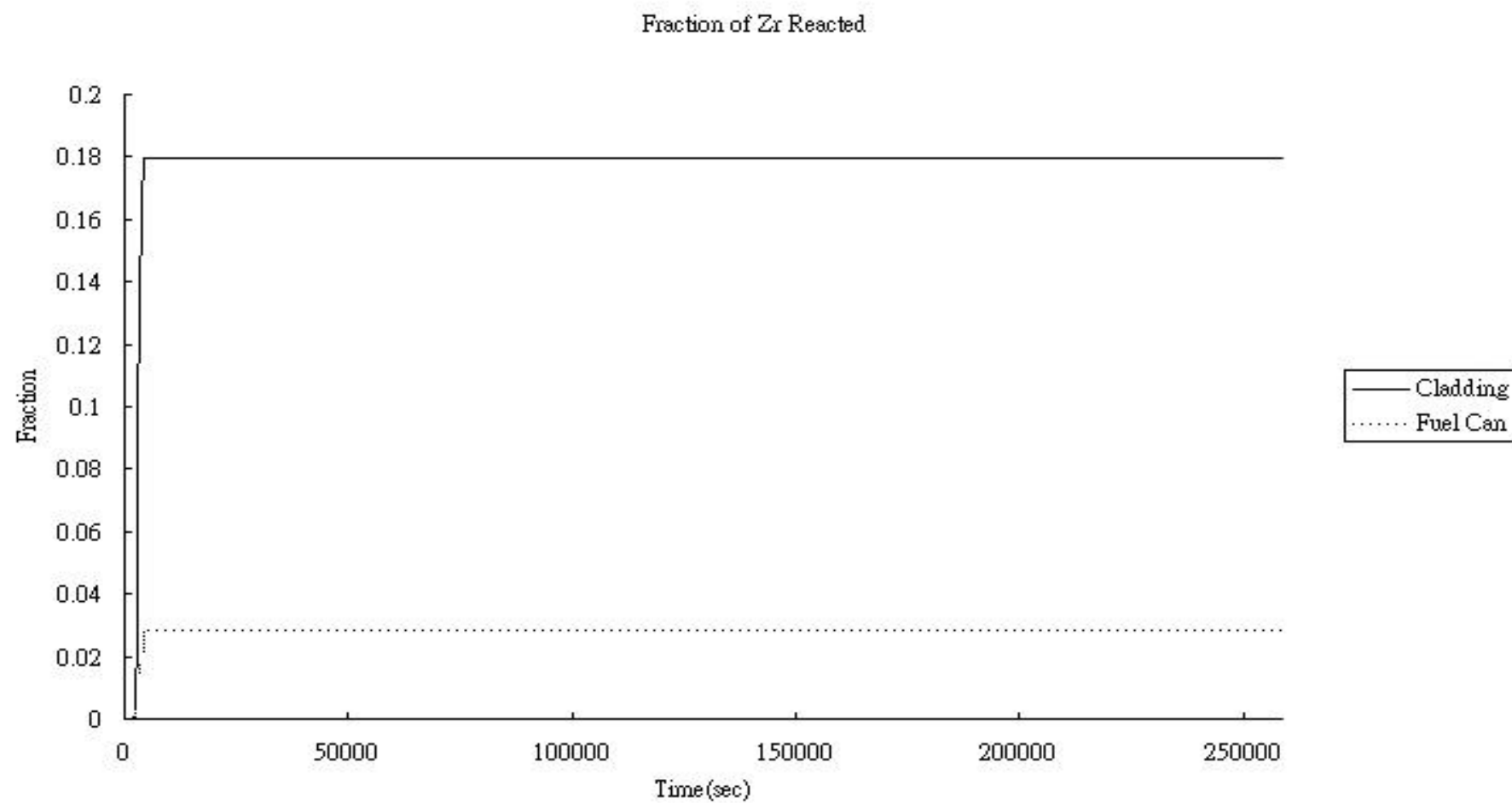


圖 6-8 LCLP 事故序列燃料棒護套及燃料束結構體鋯合金氧化比例

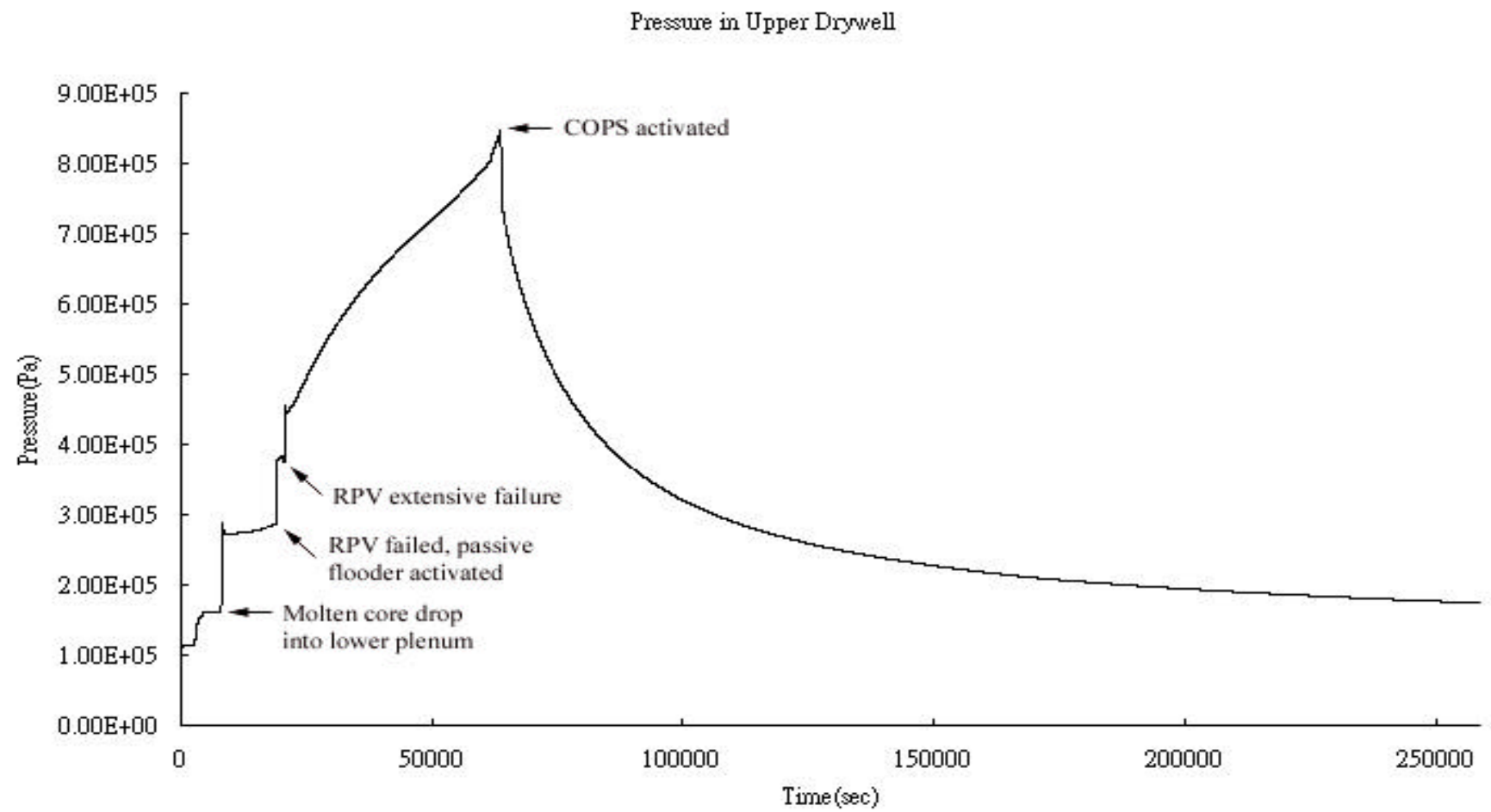


圖 6-9 LCLP 事故序列上乾井壓力

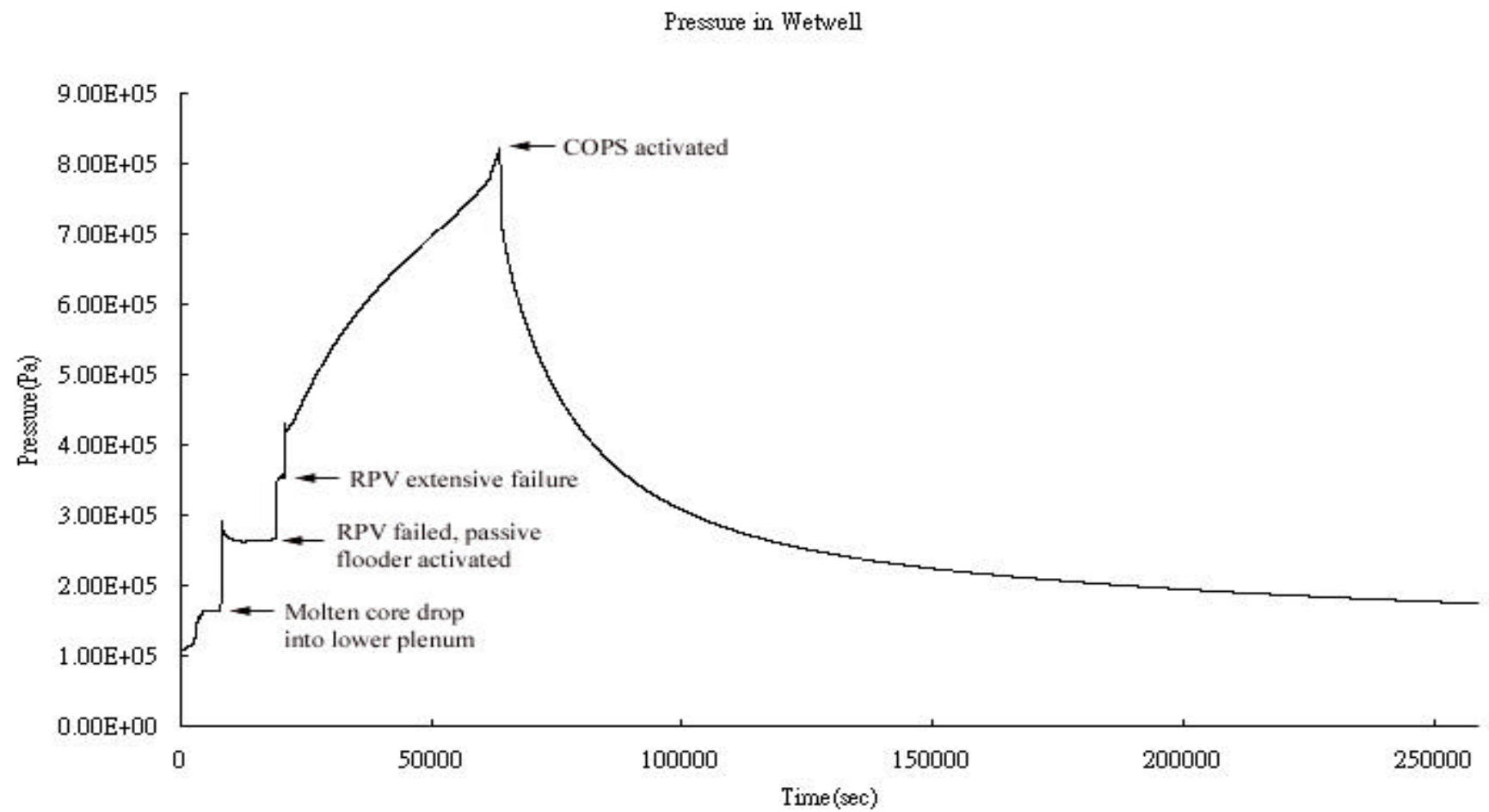


圖 6-10 LCLP 事故序列濕井壓力

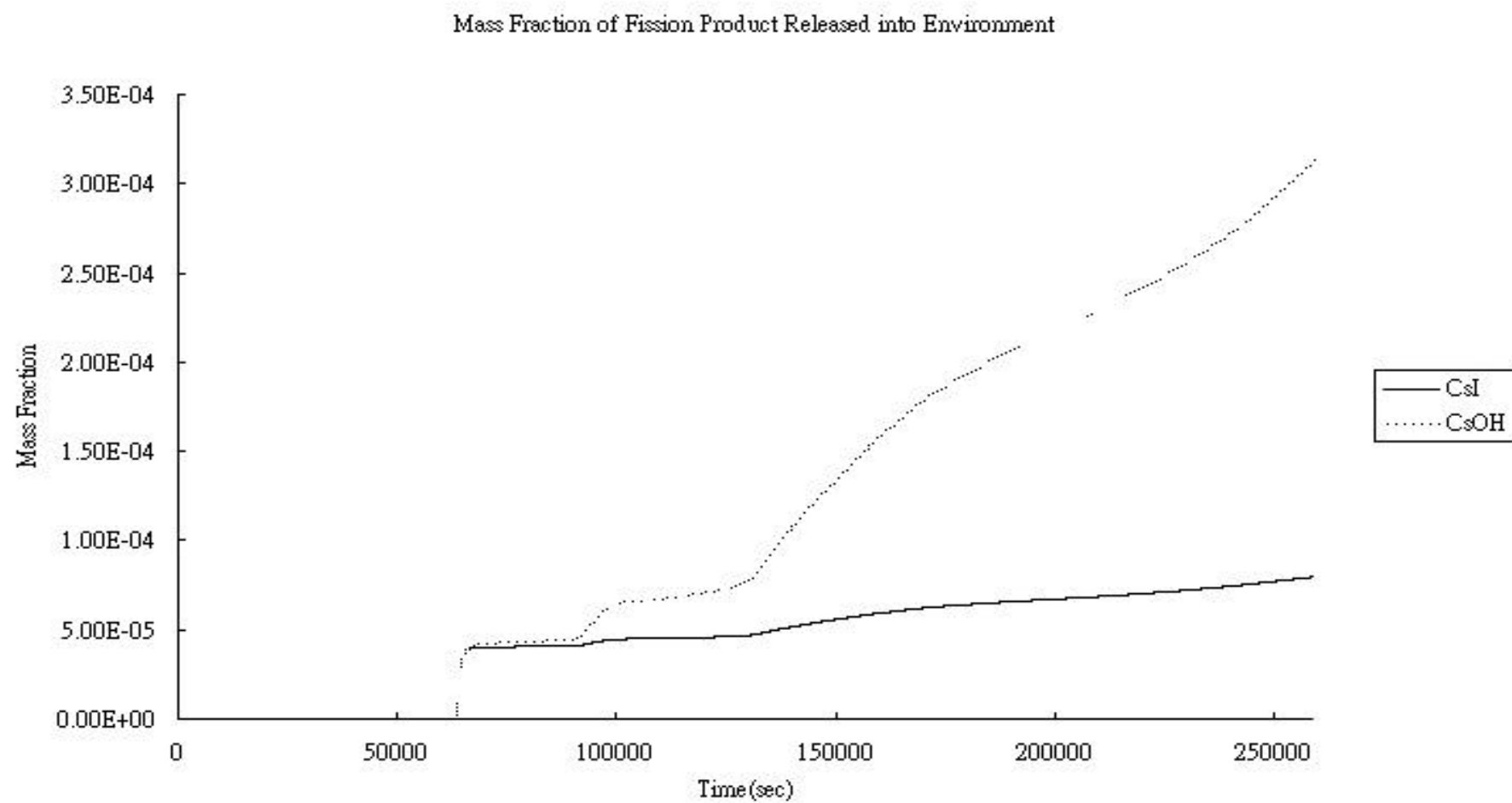


圖 6-11 LCLP 事故序列 CsI 及 CsOH 自圍阻體釋出量