

第七章 結論與未來展望

7.1 與初期安全分析報告間之重大差異

由於龍門電廠初期安全分析報告中所使用之 MAAP 程式為較早期之 3.0B 版本，其中所使用之諸多物理、化學模式等和 MAAP 4.0.4 版有所出入，且奇異公司為配合 ABWR 之設計，已改寫部分 MAAP 3.0B-ABWR 之原始碼，因此本論文模擬所得之結果，在某些方面出現與初期安全分析報告較大之歧異，此節將就其中較重大之部分予以討論。

(1) 爐心隔離冷卻系統水源之切換：

在 SBRC 事故序列的模擬中，爐心隔離冷卻系統是唯一可動作的爐心注水系統，依照初期安全分析報告的敘述，爐心隔離冷卻系統初始水源為凝結水貯存槽(Condensate Storage Tank, CST)，當抑壓池水水位過高時，爐心隔離冷卻系統之水源會自動由凝結水貯存槽切換至抑壓池，之後當抑壓池水溫度過高時，再由運轉員手動切回凝結水貯存槽。但在 MAAP 4.0.3 使用手冊中載明，一旦爐心隔離冷卻系統之水源切換至抑壓池後，即不能再切回凝結水貯存槽。經實際測試，發現手冊記載無誤，因此本論文之 SBRC 事故序列模擬結果中，爐心隔離冷卻系統在事故開始後 4.6 小時即因抑壓池水溫度過高，導致爐心隔離冷卻系統之渦輪水泵(Turbine Pump)跳脫，爐心隔離冷卻系統失效，而非如初期安全分析報告中的結果，在事故開始後 8 小時才因電池耗盡而失

效。

(2)抑壓池高水位設定值：

在 SBRC 事故序列的模擬之中，依照初期安全分析報告的結果，抑壓池水會在 1.3 小時到達高水位設定點，而使爐心隔離冷卻系統之水源由凝結水貯存槽切換至抑壓池。但在本論文的模擬結果中發現，抑壓池水在 0.7 小時即到達高水位設定點，較初期安全分析報告提早約 0.6 小時。關於此等差異，研究過程中曾對爐心隔離冷卻系統之流量、抑壓池容積等相關參數進行檢視，但並未發現輸入之錯誤。唯一較有疑問之參數為抑壓池高水位之設定值，由於在 MAAP 3.0B-ABWR 參數檔中該數字為一負值，在 MAAP 4.0.4 中會導致抑壓池水在模擬開始時即產生高水位信號，因此該參數在兩版本中之定義明顯不同，但初期安全分析報告中並未尋得此參數之值，因此在本論文中假設 MAAP 3.0B-ABWR 中之數值為相對於反應器底部所求得，並據此重新計算 MAAP 4.0.4 之輸入值。

由於 MAAP 4.0.4 程式本身之限制，爐心隔離冷卻系統水源於切換至抑壓池後，即無法再切回凝結水貯存槽，因此這意味著在抑壓池水到達高水位設定點之後，便不再有來自圍阻體外的較低溫之冷卻水注入爐心，亦即爐心僅有 0.7 小時的時間得到來自凝結水貯存槽的冷卻水之冷卻，而初期安全分析報告中，當抑壓池水溫度過高時，爐心隔離冷卻系統之水源可切回凝結水貯存槽並繼續運轉直到電池耗盡，因此爐心共計有 4.9 小時得到來自凝

結水貯存槽的冷卻水之冷卻，因而導致本論文 SBRC 事故序列模擬結果中，爐心裸露的時間遠較初期安全分析報告為早，也是何以抑壓池高水位之設定值，會對 SBRC 事故序列之模擬結果造成重大影響之原因。

(3)反應器壓力槽失效時間：

在初期安全分析報告中，所有事故序列在反應器壓力槽失效時，反應器壓力槽底部區間均留有積水，亦即熔融爐心在落入壓力槽底部區間後，無須將該處積水蒸乾，便可以造成反應器失效。但在本論文的模擬結果中，均無法複製如此的失效模式，不論是高壓事故序列或低壓事故序列，其反應器壓力槽失效模式均是先將壓力槽底部區間之積水蒸乾，且在積水蒸乾後仍須頗長之時間才會導致反應器失效。關於此點，在參數檔中更改壓力槽底部失效之相關參數，如材料性質、材料失效模式參數等，可以將失效時間略微提前，但仍遠較初期安全分析報告之失效時間為長，且亦無法使反應器在底部區間積水蒸乾前即失效，因此其成因可能為新舊版程式所使用之物理模式不同所致。此點差異在模擬結果中會造成兩點重大差異，其一是較晚的反應器失效時間將使得所有後續事件的發生時間被延遲，其二是在反應器失效時若壓力槽底部區間仍有殘餘積水，這些積水隨同熔融爐心一起進入圍阻體時，若為低壓事故序列，則這些伴隨熔融爐心一起落入下乾井的積水可以暫時冷卻熔融爐心，因此會使得被動淹覆器的啟動時間延後。若為高壓事故序列，依初期安全分析報告所言，這

些積水會在離開反應器壓力槽時形成蒸汽，幫助熔融爐心的挾帶，使得上乾井內亦有機會出現熔融爐心，而造成上乾井的溫度過高、引發乾井蓋封填材料的劣化(Seal Degradation)，最後使得放射性分裂產物在未經抑壓池刷洗的情況下直接自上乾井外釋，也就是抑壓池旁通(Suppression Pool Bypass)。本論文之 LCHP 事故序列模擬結果中，並無法複製初期安全分析報告中的挾帶現象，此為可能之原因。

(4)外釋之放射性分裂產物量：

在初期安全分析報告中，GE 僅列出 CsI 及 CsOH 之外釋量，除 LCHP 序列外，其餘序列之 CsI 及 CsOH 外釋之質量分率皆低於 1.0×10^{-7} ，但本論文模擬所得之結果，均較初期安全分析報告為高，即使更改參數檔中關於放射性核種釋出模式之“FISSION PRODUCTS AND AEROSOL PROPERTIES”乙節之參數，亦無法將模擬所得之外釋量降低至與初期安全分析報告中相同的水準。

7.2 放射性分裂產物分佈情形

在核電廠嚴重事故的分析當中，除了事故當時的情況演變、設備反應、處置措施以外，另一個重要的議題是事故後對外界環境的影響，也就是放射性分裂產物的外釋量。MAAP 4.0.4 除了可以模擬電廠內的各種物理、化學現象以外，亦可以計算自爐心釋出的放射性分裂產物的分佈，以及外釋至環境中的量。在 MAAP 4.0.4 中放射性分裂產物共計分為十二類，各類別中所包含的放射

性物質請參見先前四個分析案例之附表。針對第三 六章四個不同的事故序列，本節僅取 LCHP 序列作較詳細的分析，十二類放射性分裂產物中，則取 CsI 代表揮發性(Volatile)分裂產物，非揮發性(non-volatile)分裂產物則以 SrO 做為代表。

圖 7-1 是 CsI 在冷卻水系統中的含量變化，CsI 在爐心裸露後約 17 分鐘(1050 秒)開始出現，大部分 CsI 自爐心釋出後，即快速凝結於反應器內的結構體表面，因此冷卻水系統內的 CsI 主要是以沈積物(Deposited)的型態存在，2.5 小時(9000 秒)左右時，由於熔融爐心落入反應器壓力槽底部區間，淬熄瞬間產生的大量蒸汽使得 10 個安全釋壓閥開啟，因此部分 CsI 隨之進入抑壓池，使得冷卻水系統內的總量出現大幅度的下降，3.60 小時(12943.931 秒)時反應器壓力槽失效，使得沈積態的 CsI 因再揮發形成懸浮態(Aerosol)而減少，而懸浮態的 CsI 則因此而增加。但冷卻水系統內的 CsI 總量則在 3.61 小時(13000 秒)左右即趨於穩定，僅因沈積態 CsI 的再揮發進入圍阻體而緩慢減少。

圖 7-2 是 CsI 在圍阻體（不含抑壓池）內的含量變化，在反應器壓力槽失效前，僅有少量 CsI 經安全釋壓閥進入抑壓池，然後在 0.83 小時(3000 秒)左右時，由於真空破除器開始出現動作，因此抑壓池的 CsI 經由真空破除器進入圍阻體，使圍阻體內開始出現少量 CsI。反應器壓力槽失效後 0.345 秒，被動淹覆器隨即發生作用，抑壓池中的 CsI 隨著池水流入下乾井，因此圍阻體內的 CsI 急速增加，在圖上呈現出一幾近垂直的線段。接著下乾井與

抑壓池的水位達到平衡，抑壓池水不再大量流入下乾井，但因下乾井的熔融爐心仍然不斷將下乾井的水汽化，因此抑壓池水仍然緩慢流入下乾井，故在該段幾近垂直的線段之後，下乾井內的 CsI 量仍緩慢上升。

圖 7-3 是抑壓池內的 CsI 含量，在爐心開始釋出放射性分裂產物之後，CsI 即經由安全釋壓閥進入抑壓池，此後其值不斷上升，直到 3.60 小時(12943.931 秒)時反應器壓力槽失效，CsI 不再經由安全釋壓閥進入抑壓池，其值才不再上升。緊接著由於被動淹覆器發生作用，抑壓池內的 CsI 隨著池水流入下乾井，因此其值先是急速下降，然後再轉為緩慢下降，其變化趨勢恰與下乾井之變化趨勢相反，變化的原因則是相同。

圖 7-4 是外釋至環境中的 CsI 量，其值在一開始為零，直到 18.33 小時(65989.938 秒)時圍阻體過壓保護系統發生作用，CsI 才開始外洩至環境中，且主要以懸浮態存在。

所以綜合以上所述，CsI 不論是在冷卻水系統、圍阻體、或是抑壓池中，主要都是以沈積態存在，而外釋至外界環境時，則形成懸浮態。隨著事故的發展，CsI 首先會自冷卻水系統經由安全釋壓閥而進入抑壓池，抑壓池中的 CsI 則會經由真空破除器及被動淹覆器進入下乾井，在圍阻體過壓保護系統發生作用之後，抑壓池內的 CsI 亦會經此系統而外釋至環境中。

圖 7-5 為 SrO 在冷卻水系統中的含量變化，由圖中可以發現，冷卻水系統中的 SrO 幾乎都以沈積態存在，在爐心裸露後約 17

分鐘(1050 秒)開始出現，其質量分率並快速上升，在約 2.15 小時(7735 秒)時達到最高值，然後在 9000 秒左右，由於落入反應器壓力槽底部區間的熔融爐心被淬熄而帶來大量蒸汽，使得 10 個安全釋壓閥開啟，因此冷卻水系統中的 SrO 隨之進入抑壓池，而使冷卻水系統中的 SrO 含量出現較明顯的下降，此後直至模擬結束，其值都不再出現變化。由於 SrO 的揮發性極低，因此在冷卻水系統中的氣態 SrO 質量分率在絕大多數時間都為零，即使存在氣態 SrO，其質量分率亦不超過 7×10^{-19} 。

圖 7-6 是 SrO 在圍阻體（不含抑壓池）內的含量變化，約在 0.83 小時(3000 秒)左右時，由於真空破除器的動作，抑壓池的 SrO 開始進入圍阻體內其他區間，但其量非常少。3.60 小時(12943.931 秒)時，反應器壓力槽破裂，熔融爐心進入下乾井，這些落入下乾井的熔融爐心在約 3.83 小時(13770 秒)時，出現大量的壓力槽外釋放(Ex-vessel Release)，因此造成圍阻體內的 SrO 質量暴增，出現圖中幾近垂直的線段。由於被動淹覆器在 3.60 小時(12944.276 秒)時已經發生作用，因此在槽外釋放發生時，下乾井與抑壓池水是相通的，在槽外釋放結束後，隨著熔融爐心不斷將下乾井的水汽化，抑壓池水亦不斷流入下乾井，連帶將抑壓池內的 SrO 帶入下乾井，故在圖中該段幾近垂直、表示槽外釋放的線段之後，下乾井內的 SrO 量仍然維持緩慢而穩定的上升，直到 18.33 小時(65989.938 秒)圍阻體過壓保護系統發生作用，圍阻體自抑壓池開始洩壓、導致抑壓池壓力瞬間下降之故，原本由抑壓池流向下乾

井的水突然反向自下乾井流向抑壓池，連帶將下乾井的 SrO 帶入抑壓池，因此圖上 SrO 含量出現突然的小幅下降。在下乾井的壓力和抑壓池達到平衡之後，下乾井則再次因為積水為熔融爐心所汽化，而使抑壓池水恢復流向下乾井，因此下乾井處的 SrO 含量亦回到圍阻體過壓保護系統發生作用前的微幅上升狀況。

圖 7-7 是抑壓池內的 SrO 含量，在 SrO 開始自爐心燃料釋出後，即因為安全釋壓閥的開啟而進入抑壓池內，且質量持續上升。9000 秒左右時，由於先前所述 10 個安全釋壓閥的開啟，上升幅度突然增大。3.60 小時(12944.276 秒)時被動淹覆器發生作用，抑壓池水開始流向下乾井，連帶將抑壓池內的 SrO 帶入下乾井，因此抑壓池內的 SrO 含量出現突然的下降。3.83 小時(13770 秒)左右，由於下乾井熔融爐心的槽外釋放，連帶使得抑壓池的 SrO 含量出現暴增的現象，之後由於抑壓池內 SrO 隨池水持續流入下乾井，因此含量緩慢下降。直到 18.33 小時(65989.938 秒)圍阻體過壓保護系統發生作用，基於與前段相同的理由，抑壓池內 SrO 含量出現短暫的上升，而後再恢復為緩慢穩定的下降。

圖 7-8 是外釋至環境中的 SrO 量，在 18.33 小時(65989.938 秒)圍阻體過壓保護系統發生作用後，其外釋量急速上升然後達到穩定狀態，原先抑壓池內的懸浮態 SrO 幾乎全數外釋。

所以由圖 7-5 至圖 7-8 的分析，可以發現 SrO 與 CsI 類似，在冷卻水系統、圍阻體、以及抑壓池中，主要都是以沈積態存在，而外釋至外界環境時，則形成懸浮態。其遷移路徑，一開始亦是

從安全釋壓閥進入抑壓池，再經由真空破除器及被動淹覆器進入下乾井，在圍阻體過壓保護系統發生作用之後，再從抑壓池外釋至環境中。較為不同的是，由於 CsI 極易在高溫下揮發成為氣態，因此在爐心開始熔毀後不久，大部分的 CsI 即在反應槽內釋放出來(In-vessel Release)，但由於 SrO 不易揮發的特性，直到模擬結束，絕大多數的 SrO 仍然留在熔融爐心內。SrO 在這個事故序列中的反應槽外釋放使得抑壓池內的 SrO 含量大幅增加，但亦由於 SrO 不易揮發的特性，因此最後外釋至環境中的 SrO 僅相當於原先抑壓池中以懸浮態存在的量，並未因為反應槽外釋放而使得釋出至環境中的量上升。

7.3 被動淹覆器與圍阻體過壓保護系統對外釋量之影響

在 ABWR 之設計中，為了降低嚴重事故發生後的放射性分裂產物外釋量，因此新加入了兩個傳統沸水式反應器所沒有的設計：被動淹覆器與圍阻體過壓保護系統。為了瞭解該兩系統是否確能降低事故後的外釋量，在本論文中亦以 LCHP 事故序列模擬了該兩系統關閉狀況下，事故後的外釋情況。表 7-1 為被動淹覆器與圍阻體過壓保護系統有無時之最終外釋量比較，圖 7-9 為被動淹覆器與圍阻體過壓保護系統均關閉的狀況下，事故後的 CsI、CsOH 外釋量。圖 7-10 為裝置被動淹覆器、而無圍阻體過壓保護系統之 CsI、CsOH 外釋量。圖 7-11 為僅有圍阻體過壓保護系統、而無被動淹覆器之狀況。圖 7-12 則為兩系統皆有之情

形。由此表及四張圖上可以看出，僅裝置被動淹覆器時之外釋量最低，同時裝置兩系統下的外釋量次之，約為其十餘倍，但若考慮兩者之外釋途徑，前者為乾井裂縫，其截面積約僅圍阻體過壓保護裝置截面積之 3.5 分之一，若依照初期安全分析報告所言，未裝置圍阻體過壓保護裝置時，外釋途徑極可能為上乾井蓋之情況推斷，設置圍阻體過壓保護裝置所得之效益應仍屬正面。表 7-1 所列出之各類放射性分裂產物外釋量中，唯一較為特殊者是第一類惰性氣體(Noble gas)，其外釋量多寡之順序和其餘十一類分裂產物明顯不同，在裝置圍阻體過壓保護系統之狀況下，惰性氣體幾乎全數外釋，而未裝圍阻體過壓保護系統時，其外釋量約為總數的一半，其原因是：惰性氣體在整個事故過程中，始終以其原來的物理形式存在，也就是始終保持氣體狀態，因此這些惰性氣體會隨著圍阻體內其他氣體的流動而改變其在各區間之分佈。當爐心一開始熔毀，這些惰性氣體便立刻自燃料棒中釋出，然後經由安全洩壓閥進入濕井，此後大多數惰性氣體便停留在濕井中，部分會在稍後真空破除器開啟時進入下乾井。但在反應器壓力槽失效後，熔融爐心帶來的能量使得下乾井壓力不斷上升，因此下乾井的氣體持續經由乾井連接管流入濕井，連帶將先前經由真空破除器進入下乾井的惰性氣體帶回濕井，同時由於下乾井的壓力上升，使得真空破除器不再有機會開啟，因此濕井中的惰性氣體也不再有機會再次流入下乾井，最終使得所有惰性氣體均滯留於濕井中，在圍阻體過壓保護系統開啟時外釋至環境。而在未裝置圍阻體過壓保護系統的案例中，雖然惰性氣體也會因上述相同的

理由而滯留於濕井中，但在上乾井因為過壓而失效後，下乾井由於經由乾井連接管和上乾井相連，因此亦會經由上乾井失效處洩壓，下乾井壓力一旦降低，真空破除器便會隨之開啟，連帶使得部分滯留於濕井中之惰性氣體進入下乾井，再經由乾井連接管進入上乾井，然後自上乾井失效處外釋至環境。

表 7-2 是被動淹覆器與圍阻體過壓保護系統有無時之圍阻體失效時間比較，由表中可看出，由於圍阻體過壓保護系統啟動之設定壓力低於上乾井失效壓力，因此兩個裝有圍阻體過壓保護系統之案例，其圍阻體失效時間最早。而被動淹覆器方面，在裝有圍阻體過壓保護系統之情況下，裝置被動淹覆器會使得圍阻體較早失效；但在未裝置圍阻體過壓保護系統時，被動淹覆器的裝置反而使得圍阻體失效時間延後。不過由於被動淹覆器可有效降低下乾井溫度，並且避免熔融爐心 混凝土作用的發生，因此該裝置仍有其正面意義。

表 7-1 LCHP 事故序列中被動淹覆器與圍阻體過壓保護系統有無時之最終外釋量比較

放射性分裂產物種類	無 PF 及 COPS 時外釋量 (Mass Fraction)	僅有 PF 時外釋量 (Mass Fraction)	僅有 COPS 時外釋量 (Mass Fraction)	PF 及 COPS 皆有時外釋量 (Mass Fraction)
1.Noble gases and radioactivity inert aerosols	0.445	0.522	~1.0	0.999
2.CsI+RbI	0.201	1.77E-4	0.11	6.39E-3
3.TeO ₂	5.96E-5	0.0	3.64E-5	0.0
4.SrO	1.39E-6	7.93E-10	8.84E-7	1.43E-8
5.MoO ₂	4.30E-7	1.07E-10	3.34E-7	3.37E-9
6.CsOH+RbOH	0.164	4.53E-4	8.66E-2	6.77E-3
7.BaO	1.34E-4	3.23E-10	1.35E-4	6.83E-9
8.La ₂ O ₃ +Pr ₂ O ₃ +Nd ₂ O ₃ +Sm ₂ O ₃ +Y ₂ O ₃	3.78E-8	1.29E-12	2.41E-8	2.96E-11
9.CeO ₂	4.71E-8	7.04E-12	5.36E-8	1.31E-10
10.Sb	0.364	2.87E-6	3.91E-2	4.93E-6
11.Te ₂	3.12E-2	2.33E-6	1.30E-3	4.34E-6
12.UO ₂ +NpO ₂ +PuO ₂	5.67E-8	2.09E-14	6.22E-8	3.67E-13

表 7-2 LCHP 事故序列中被動淹覆器與圍阻體過壓保護系統有無時之圍阻體失效時間比較

	無 PF 及 COPS 時	僅有 PF 時	僅有 COPS 時	PF 及 COPS 皆有時
圍阻體失效時間(hour)	20.1	22.5	19.5	18.3

7.4 反應器壓力槽失效模式

在 MAAP 4.0.4 中，反應器壓力槽底部的失效模式共可分為五種：

- (1) 熔融爐心流入焊接於壓力槽底部、連通槽外的管路，這些管路包括控制棒通道 (CRD Tube)、儀器通道 (Instrument

Penetration)、以及洩水管(Drain Line)。當熔融爐心在這些管路中行進的距離超過參數檔中的設定值、或是管路中熔融爐心產生的衰變熱超出管路材料所能承受的值時，程式便判定壓力槽已失效。

- (2) 由於受熔融爐心衰變熱的影響，使得前段所述焊接於壓力槽底部的管路之焊道溫度升高，因而使其材料所能承受之應力下降，而在壓力槽內的高壓驅使下，造成焊道的失效，以及管路的射出(Penetration Tube Ejection)。由於此種失效模式的發生需要壓力槽處於高壓狀態下，因此通常僅見於高壓事故序列中。
- (3) 反應器壓力槽底部的槽壁由於受到熔融爐心放出的衰變熱影響，溫度逐漸升高，使得槽壁鋼材所能承受的應力下降，因而在槽內壓力以及熔融爐心質量的驅使下，造成槽壁的潛變而破裂(Creep Rupture)。此種失效模式於高低壓事故序列中均可能出現，尤其當反應器失效後，熔融爐心未全數落入圍阻體，仍有部分殘留於壓力槽底時，往往壓力槽會出現所謂 Extensive Failure 的現象，也就是壓力槽底部在殘餘熔融爐心的影響下，出現第二次的破裂。在 MAAP 4.0.4 中，此種 Extensive Failure 僅能以潛變的失效模式發生。
- (4) 熔融爐心在流經爐心支撐底板(Core Support Plate)的孔洞時，形成一股細小的液柱(Jet of Debris)，在接觸到壓力槽底部時，直接對槽壁進行燒蝕(Ablation)而將槽壁蝕穿。
- (5) 熔融爐心聚積在反應器壓力槽底部區間時，會在其表面形成一

層熔融金屬層，該熔融金屬層會逐漸侵蝕與其接觸的壓力槽壁，而使得壓力槽失效。

在本論文所模擬的四個事故序列中，除 LCHP 為高壓序列外，其他三者均為低壓序列，模擬所得的反應器壓力槽失效模式亦符合傳統上的預期，即高壓序列之失效模式為槽底管路的射出，低壓序列則為壓力槽底的潛變失效。同時由於在低壓序列中，首先失效的槽壁節點均非位於最底部，而是在底部稍上方處，因此壓力槽內的熔融爐心並不會全數流出，而會有部分殘留在壓力槽中，造成壓力槽底部第二次的破裂，也就是先前所述的 Extensive Failure。

至於第四及第五種失效模式，在本論文所模擬的四個事故序列當中，均無法呈現。第一種失效模式雖曾在研究過程的初期出現，但經深入探討後，發現該模式仍有未盡完善之處，因為在該模式中，當熔融爐心開始落入反應器壓力槽底部區間的瞬間，熔融爐心會立即侵入該等通道，且其侵入之距離極長，已超出反應器壓力槽底部數公尺之譜，此後其侵入距離便不再變動，因此程式便認定此時反應器壓力槽已失效，亦即反應器的失效時間與熔融爐心落入壓力槽底部區間的時間一致。但很明顯的，這樣的模擬結果在物理上並不合理，因此本論文在程式的輸入檔案中，加大參數 XLPT1 之值，即熔融爐心欲使反應器失效所需流經之通道長度，使反應器不致因此一不合理之模式而失效。

7.5 自動洩壓系統對高壓事故序列之影響

在高壓事故序列中，由於反應器內處於高壓狀態，因此僅有爐心隔離冷卻系統及高壓爐心淹覆器可將冷卻水打入爐心，一旦此兩系統供應之冷卻水流量不足以維持爐心水位時，自動洩壓系統會自行啟動，將反應器洩壓，以便流量較大之低壓爐心淹覆器可將冷卻水打入爐心。但在自動洩壓系統的模擬邏輯中，啟動洩壓功能除需爐心低水位信號外，尚需要低壓爐心淹覆器之啟動信號。由於在本論文所模擬之高壓序列中，所有緊急注水裝置均為失效狀態，亦即無法產生自動洩壓系統所需之低壓爐心淹覆器啟動信號，因此自動洩壓系統將不會發生作用，故在本論文所研究之高壓序列中，自動洩壓系統之有無不應影響事故之發展。但以 LCHP 事故序列實際模擬之結果顯示，雖然自動洩壓系統未曾在事故中啟動，但該系統之有無的確影響重要事件發生之時間，包括最後外釋至環境中的放射性分裂產物量亦出現重大差異。LCHP 事故序列之模擬結果比較請見表 7-3，事故最終外釋之 CsI 及 CsOH 量請見圖 7-13 及圖 7-14。推測造成此種現象之原因可能來自數值運算過程，但無法肯定確實之成因。

表 7-3 LCHP 事故序列下，有無自動洩壓系統時之重要事件發生時間

發生之重要事件	有 ADS 時之重要事件發生時間(sec)	無 ADS 時之重要事件發生時間(sec)
MSIV Closed	0.0	0.0
Reactor Scrammed	0.0	0.0
RCIC On	0.0	0.0
High Water Level in Suppression Pool, RCIC Suction from Suppression Pool	1.855	1.855
Core Uncovered	4.2	4.2
Relocation of Core Materials to Lower Head Started	1156.681	1155.704
Vessel Failed by Lower Head Rupture	8997.025	8793.868
RPV Extensive Failure	12943.931	12733.187
Passive Flooder Activated	12944.276	12733.542
COPS Activated	65989.938	69582.008

7.6 各事故序列中之氫氣產生量

表 7-4 為本論文所分析之四個事故序列中，氫氣的產生量及燃料棒護套、燃料組件鋯合金之氧化比例。由表中可看出，LCHP 序列之氫氣產生量明顯遠高於其他三個低壓序列，且其燃料棒護套、燃料組件鋯合金氧化程度亦是最高，與其氫氣產生量最大之結果相符。該序列之所以有最大之氫氣產生量，其原因在於 LCHP 序列中，除自動開啟之安全釋壓閥外，爐心內產生之水蒸氣並無其他途徑可離開冷卻水系統，因此該等水蒸氣便與爐心內的鋯合金發生反應，而產生了較多的氫氣。反觀其他三個事故序列，SBRC 及 LCLP 序列中，運轉員手動開啟了安全釋壓閥，LBLC 序列中，水蒸氣可由主蒸汽管破口處離開冷卻水系統，因此該等

表 7-4 各事故序列中之氫氣產生量及燃料組件鋳合金氧化比率

	SBRC	LBLC	LCHP	LCLP
Mass of H ₂ Generated(kg)	288.5	372.1	622.3	330.6
Zr Oxidation Fraction of Cladding	0.162	0.206	0.351	0.180
Zr Oxidation Fraction of Fuel Can	0.0188	0.0276	0.0379	0.0281

事故中，所產生之氫氣量便較少。但不論其氫氣量多寡，由於 ABWR 圍阻體以充入氮氣之方式惰化，因此事故過程中均未發生燃燒或爆炸之情況。

7.7 未來工作建議

由於 MAAP 4.0.4 與 MAAP 3.0B-ABWR 間存在諸多差異，因此在模擬結果上，出現頗多歧異之處，未來如有進一步探討之計畫，以下所列可為深入研究之課題：

- (1) 反應器壓力槽失效之模式：由於本論文中模擬所得之壓力槽失效時間遠較初期安全分析報告中結果為長，其原因是否來自 MAAP 4.0.4 對壓力槽失效模式之更新，有待探究。
- (2) 放射性分裂產物之外釋量：本論文模擬所得之外釋量雖大於初期安全分析報告中之結果，但由於 GE 公司之 MAAP 3.0B-ABWR 為 VAX 版本，本論文所使用之 MAAP 4.0.4 為 PC 版本，且放射性分裂產物之模擬為大量微小數字之運算，因此

造成外釋量不同之成因究竟來自程式編譯器不同、使用之電腦設備不同、運算過程之截位誤差、亦或是新舊程式中對放射性分裂產物外釋模式之差異，值得進一步討論。

(3) MAAP 4.0.4 程式本身之數值穩定性：在 LCHP 序列中，自動洩壓系統從未發生作用，但該裝置之有無，卻大幅影響最終之結果。此現象是源自模擬程式本身之數值穩定性抑或有其他原因，仍待證明。

(4) 放射性分裂產物遷移過程之追蹤：在本論文中，放射性分裂產物之分佈共分為 13 個區域（冷卻水系統內 8 個區域，圍阻體 5 個區域）及三種型態（氣態、懸浮態、沈積態），亦即共有 39 個放射性產物量之變數，且此 39 個變數有其相互之間的關係，位在不同區域之放射性產物可能互相交換、同一區域內的放射性產物亦可能改變其型態，而 MAAP 中並未對此提供分析工具，造成對放射性分裂產物遷移過程追蹤之困難。

(5) 爐心熔融狀況之分析：本論文所分析之四個案例，所有爐心在事故中均完全熔毀而落至下方，但在各案例之第六張圖“爐心位置熔融物總質量”及第七張圖“反應器壓力槽底部區間熔融爐心質量”間，出現十餘萬公斤之差別，究竟該等數字中包含哪些部分之質量，目前仍不十分清楚，有待進一步探討。

(6) CsI 及 CsOH 外釋量的變化：在本論文分析的四個案例中，除 LBLC 事故序列以外，其餘三者都可以發現 CsI 及 CsOH 外釋量並非呈現持平或穩定上升的情況，而是在不同時間會有不同

的上升率，但造成該等情況的原因仍不十分清楚，有待探討。

- (7) 與 MAAP 3.0B-ABWR 結果之比較：本論文之模擬結果在與初期安全分析報告進行比對時，常面臨初期安全分析報告中未提供足夠數據、資訊之困境。如能向 GE 取得較詳細之 MAAP 3.0B-ABWR 模擬結果，便可進行更完整之比較。

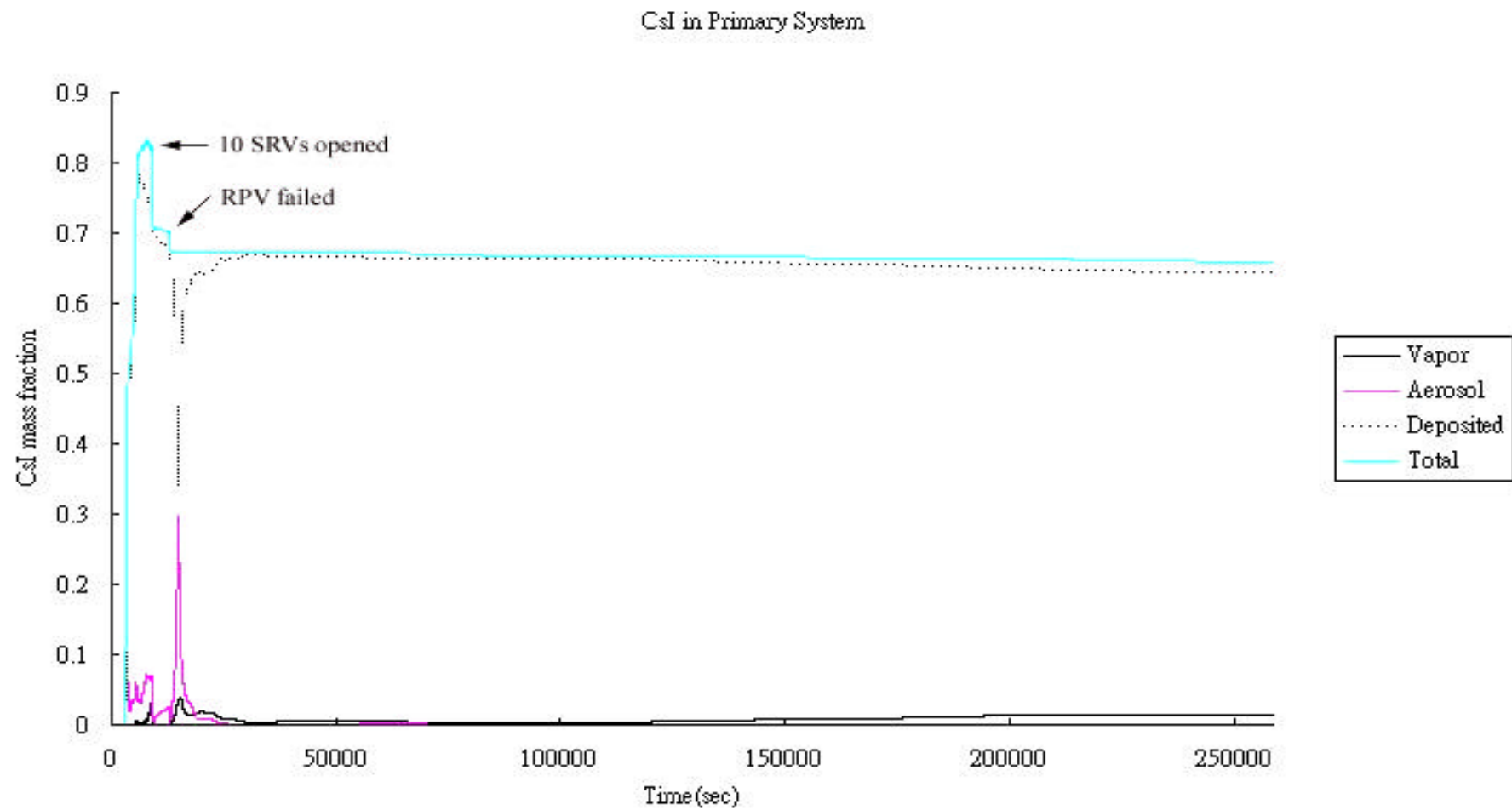


圖 7-1 LCHP 事故序列冷卻水系統中 CsI 之含量變化

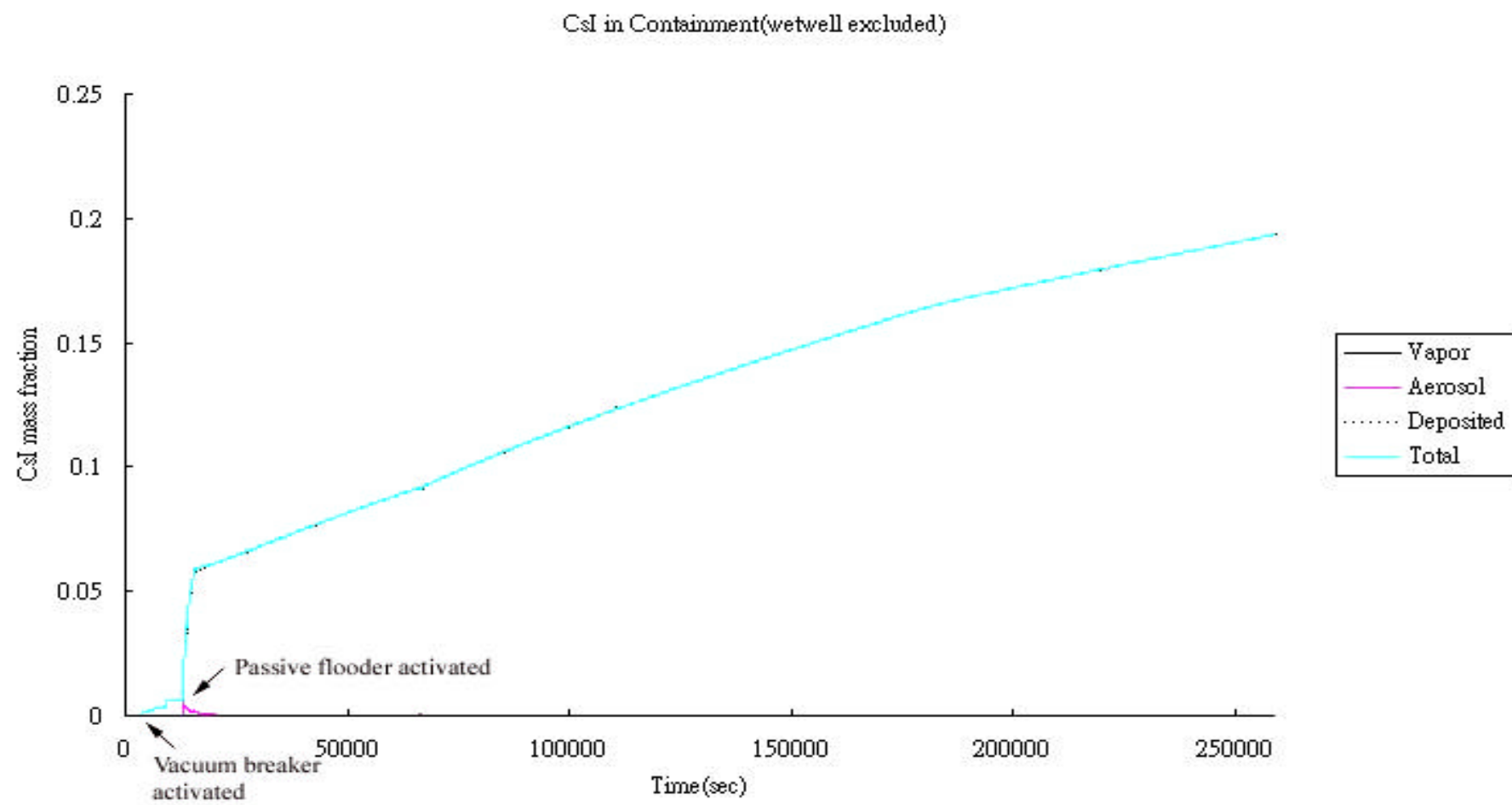


圖 7-2 LCHP 事故序列圍阻體（不含抑壓池）中 CsI 之含量變化

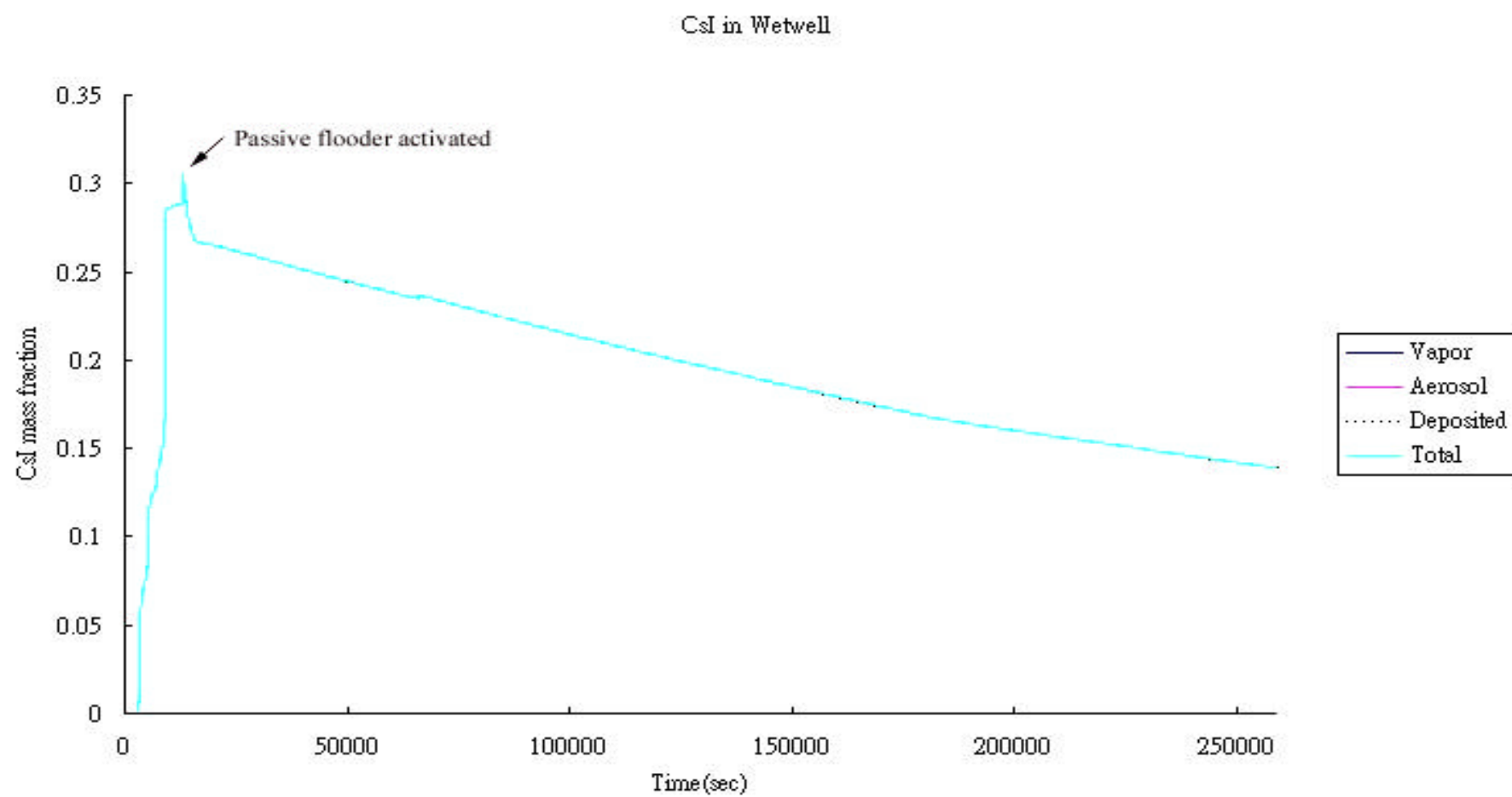


圖 7-3 LCHP 事故序列抑壓池中 CsI 之含量變化

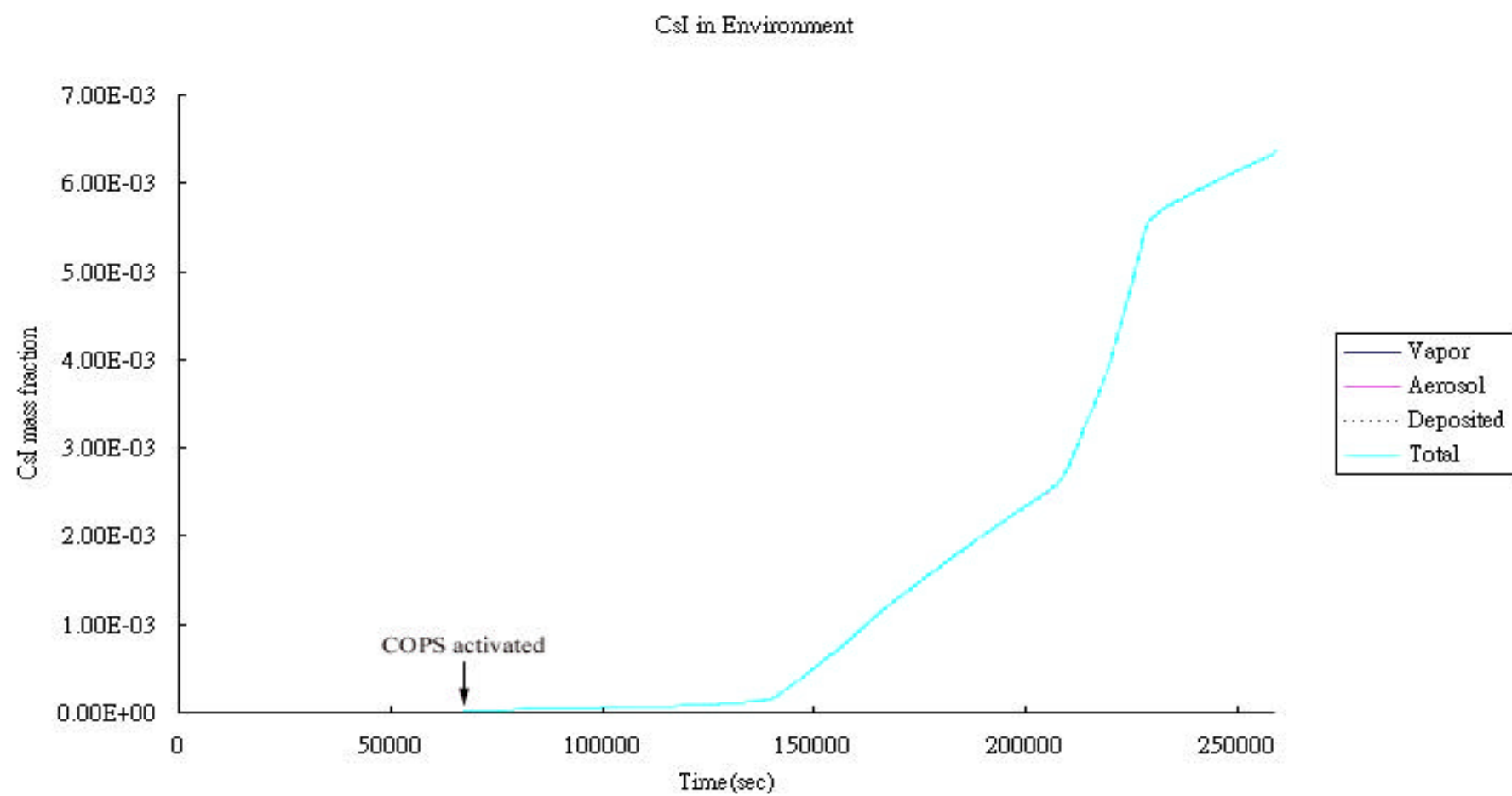


圖 7-4 LCHP 事故序列環境中 CsI 之含量變化

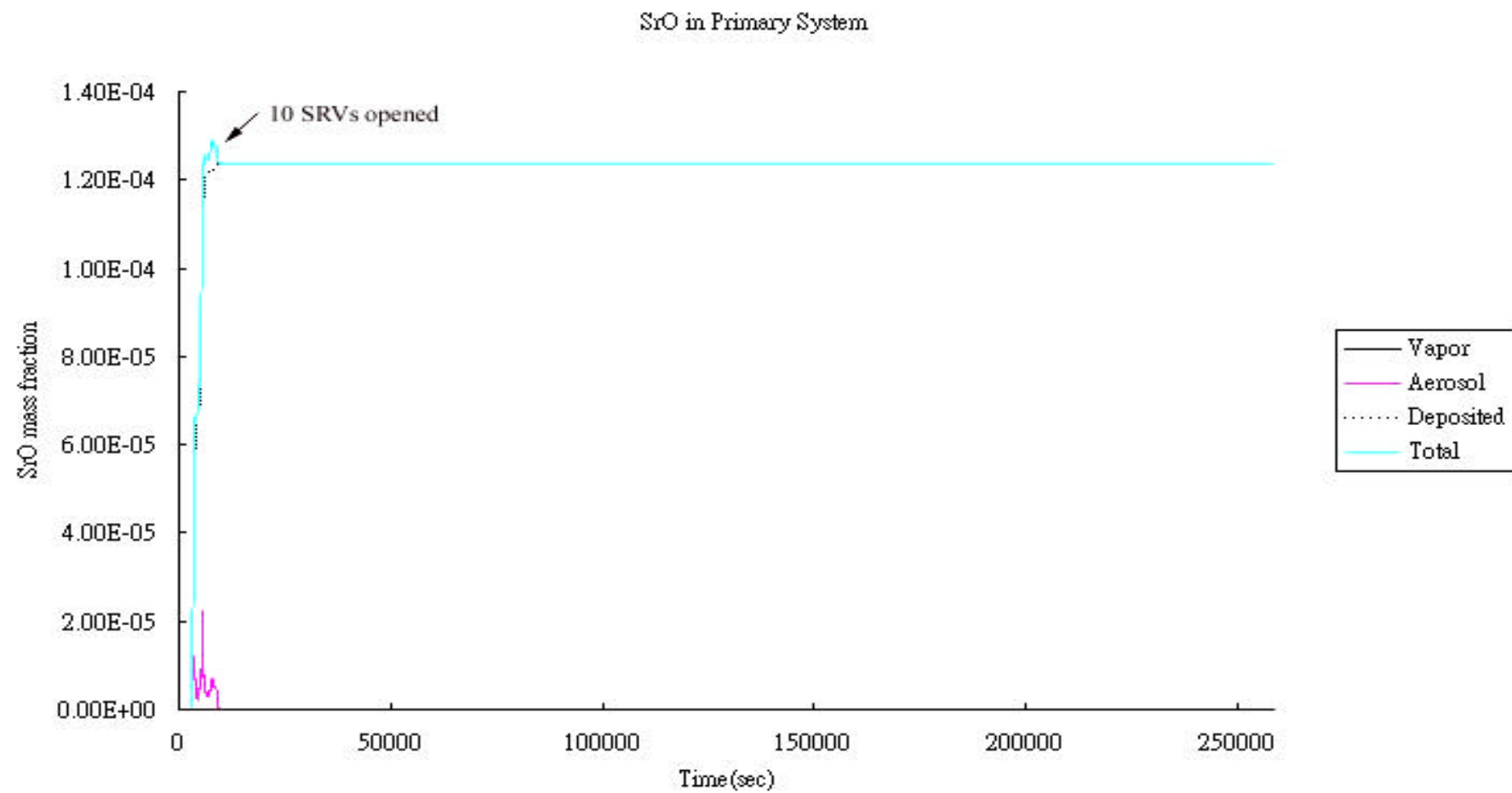


圖 7-5 LCHP 事故序列冷卻水系統中 SrO 之含量變化

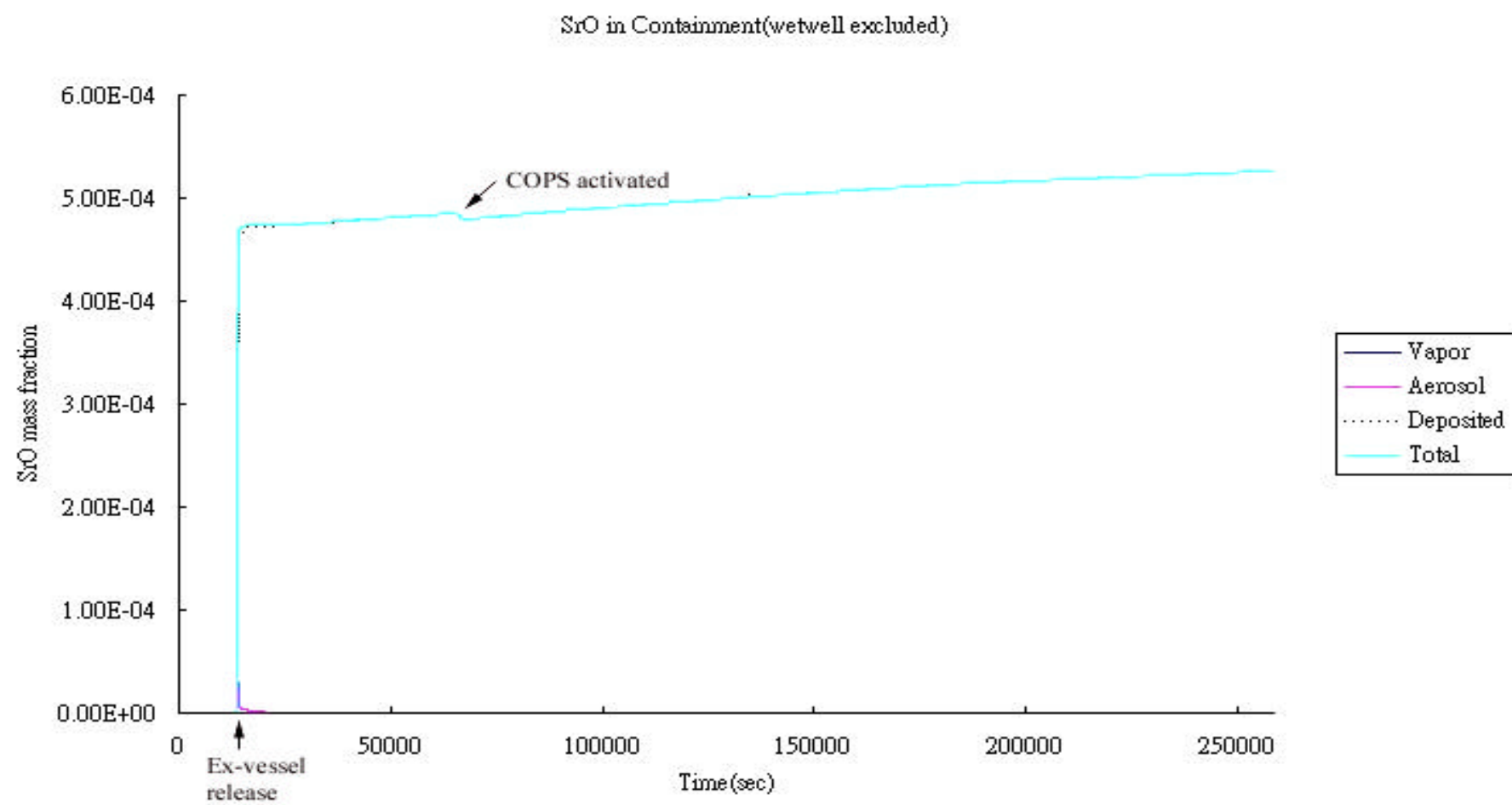


圖 7-6 LCHP 事故序列圍阻體（不含抑壓池）中 SrO 之含量變化

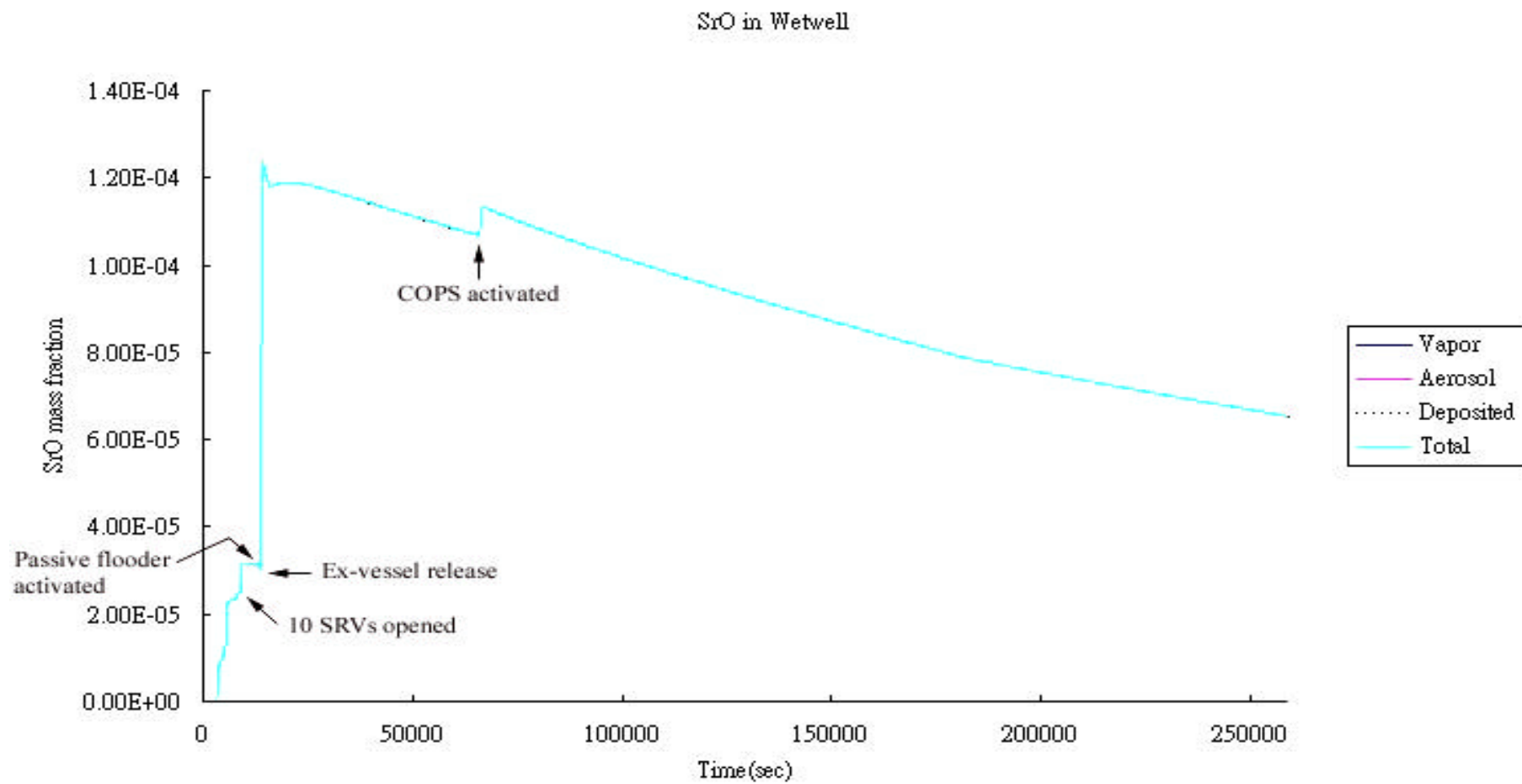


圖 7-7 LCHP 事故序列抑壓池中 SrO 之含量變化

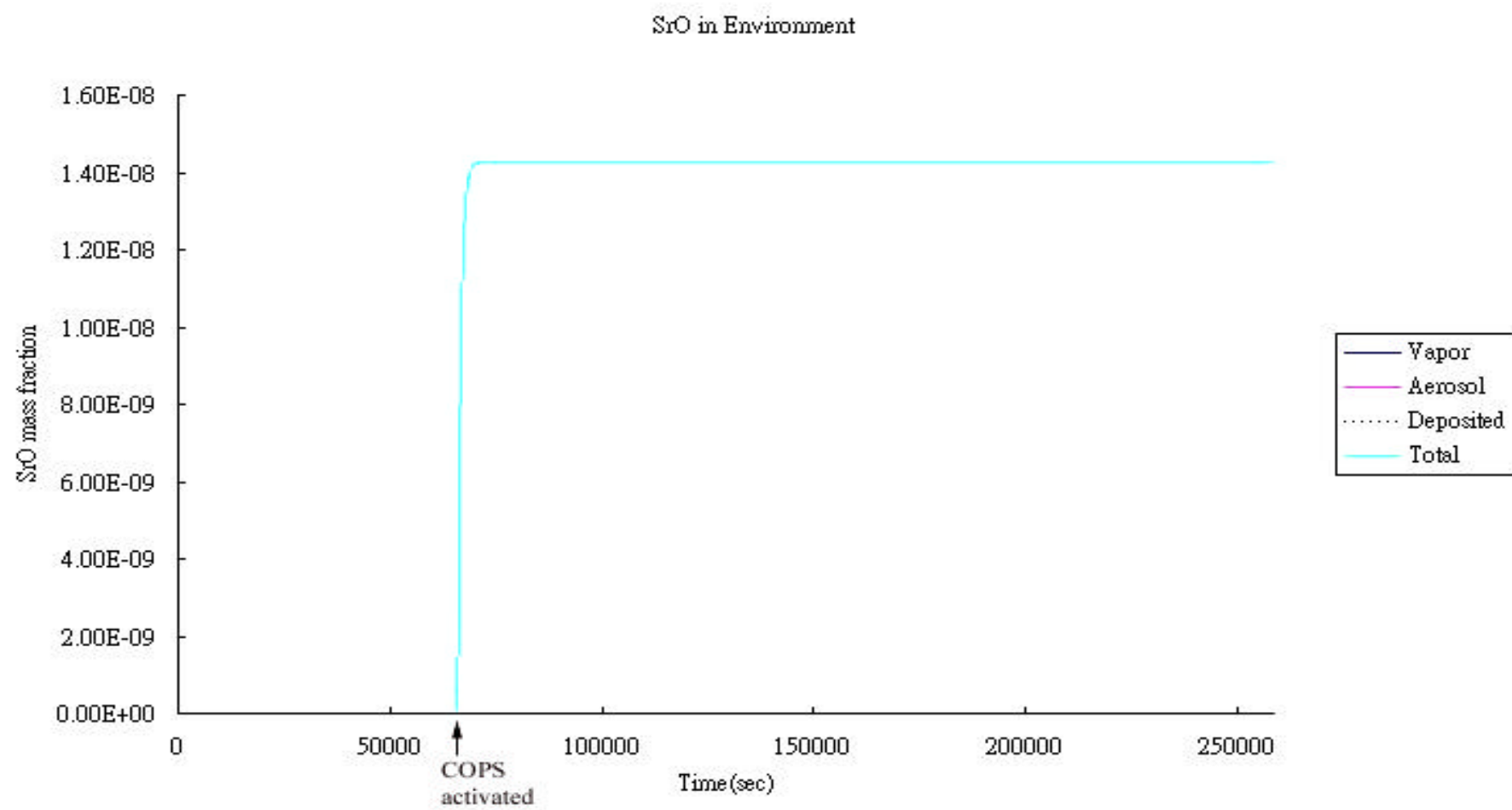


圖 7-8 LCHP 事故序列環境中 SrO 之含量變化

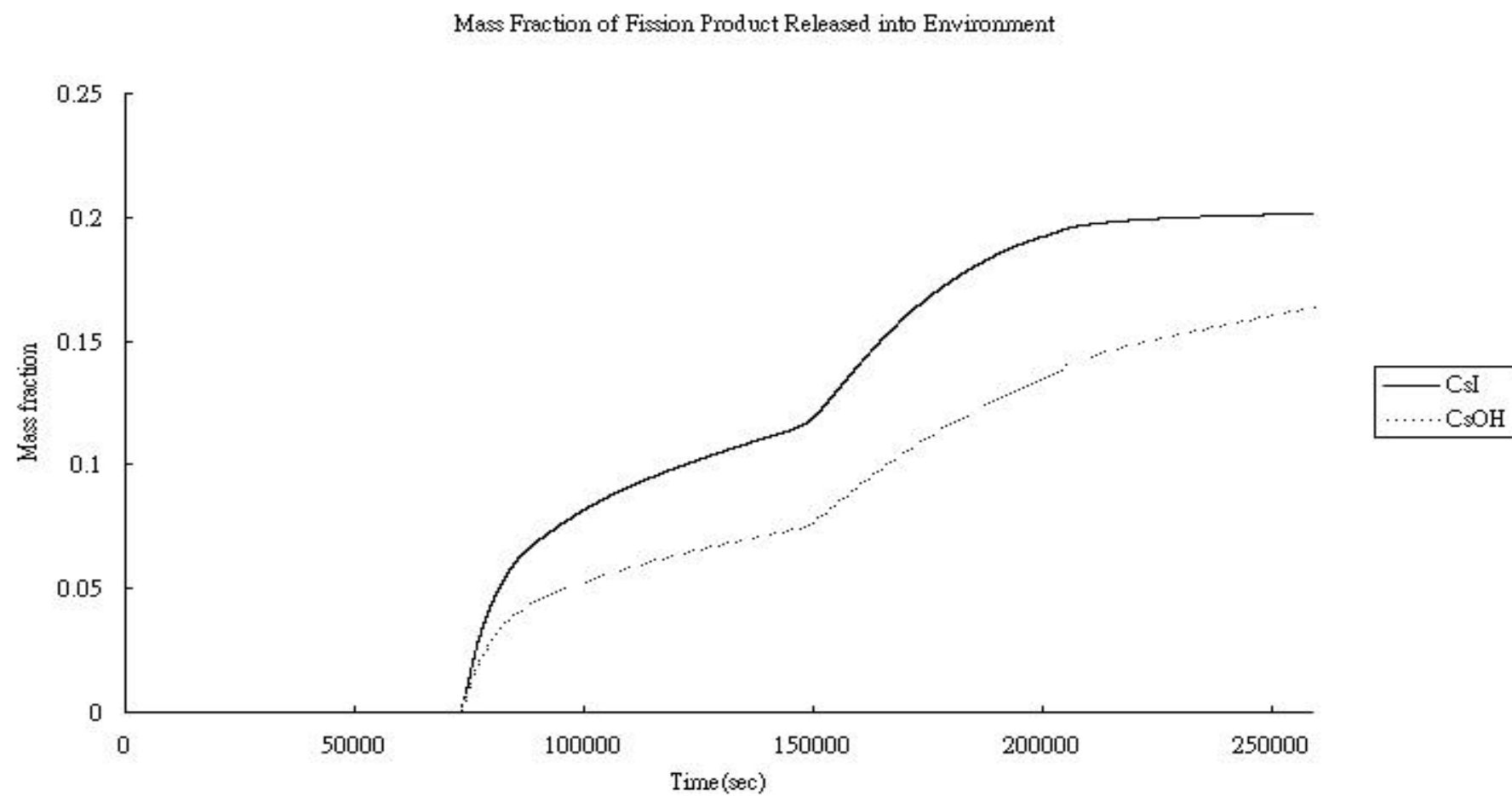


圖 7-9 LCHP 事故序列無被動淹覆器及圍阻體過壓保護系統時之 CsI、CsOH 外釋量

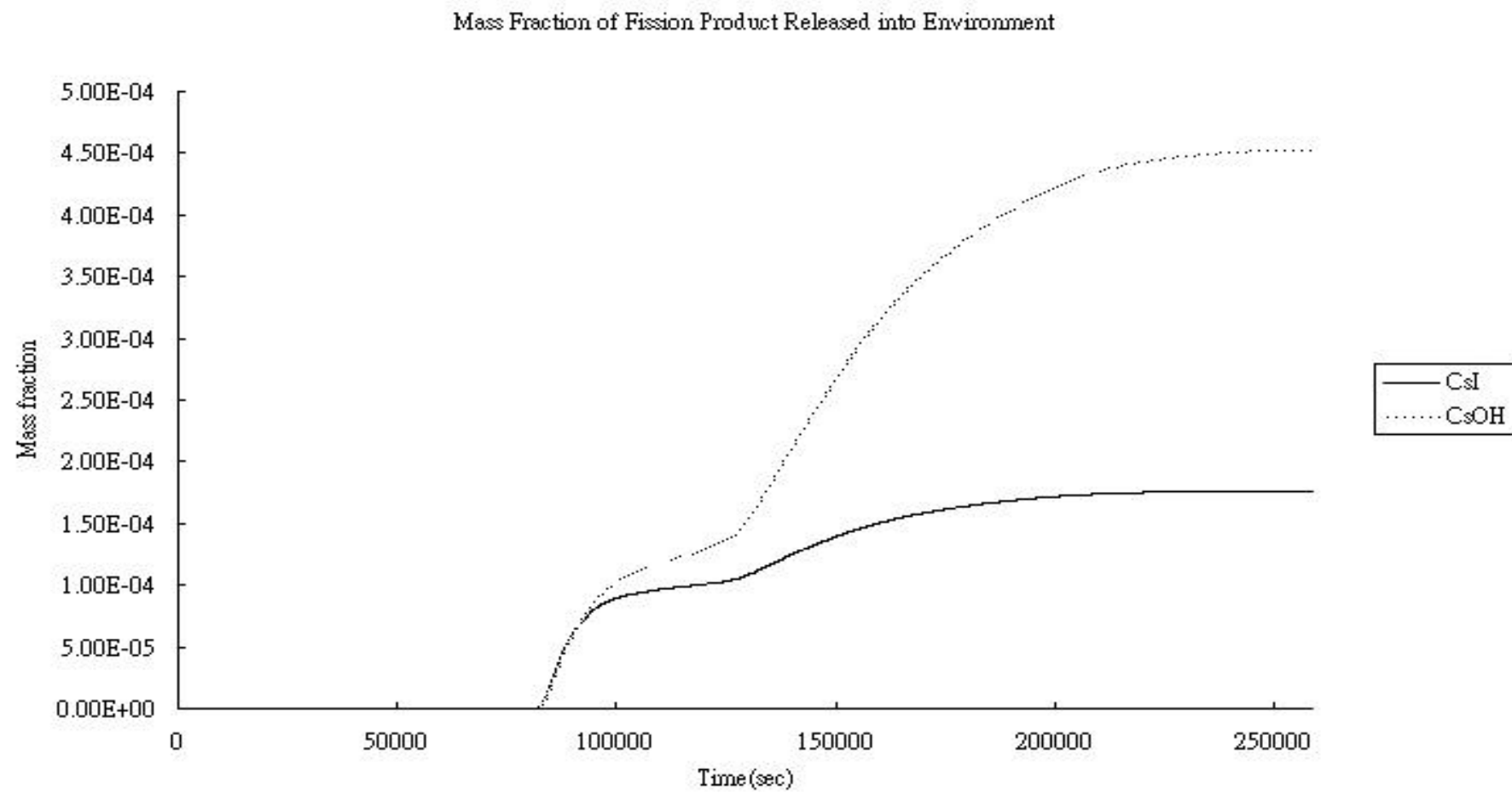


圖 7-10 LCHP 事故序列僅有被動淹覆器時之 CsI、CsOH 外釋量

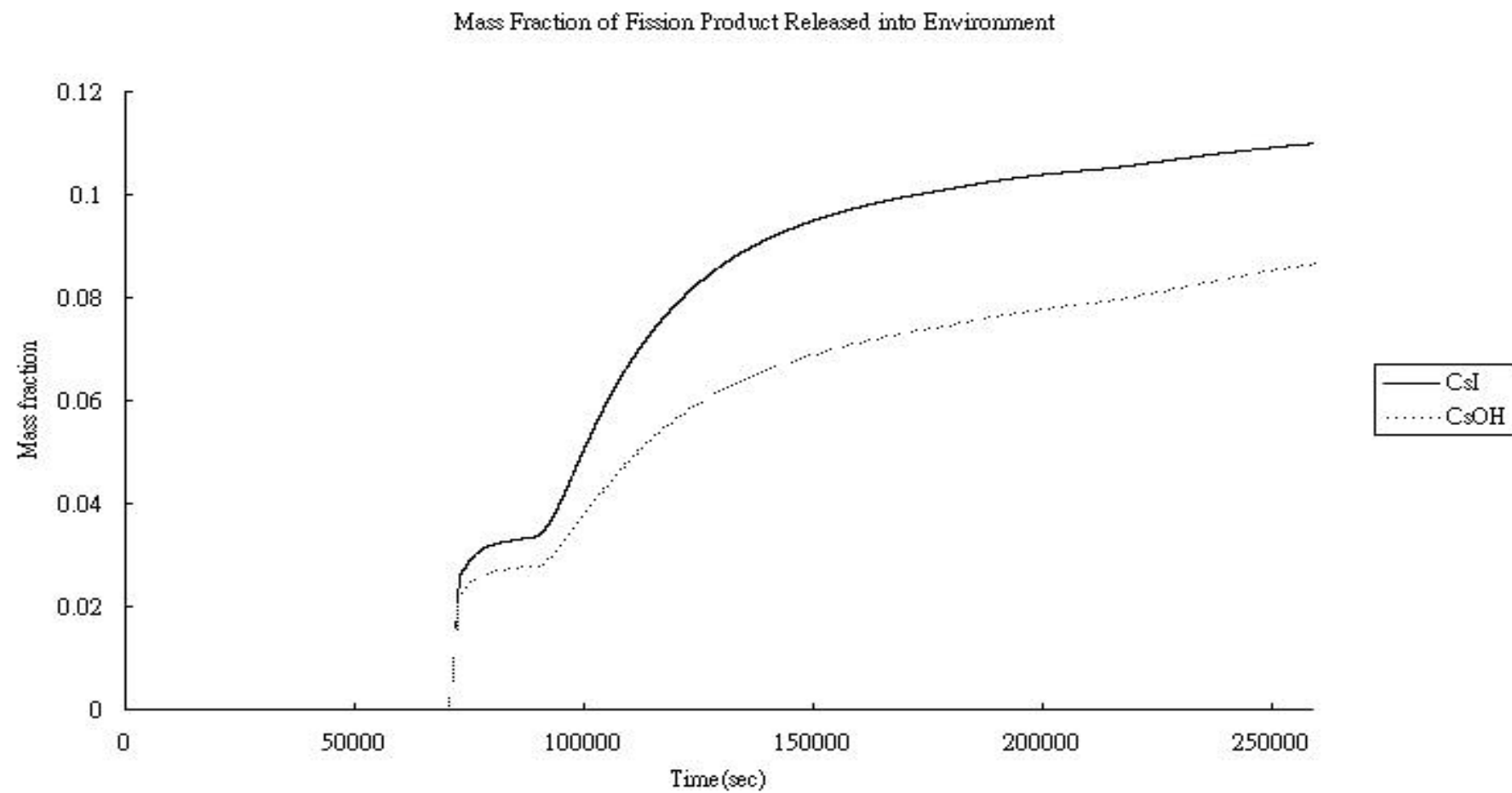


圖 7-11 LCHP 事故序列僅有圍阻體過壓保護系統時之 CsI、CsOH 外釋量

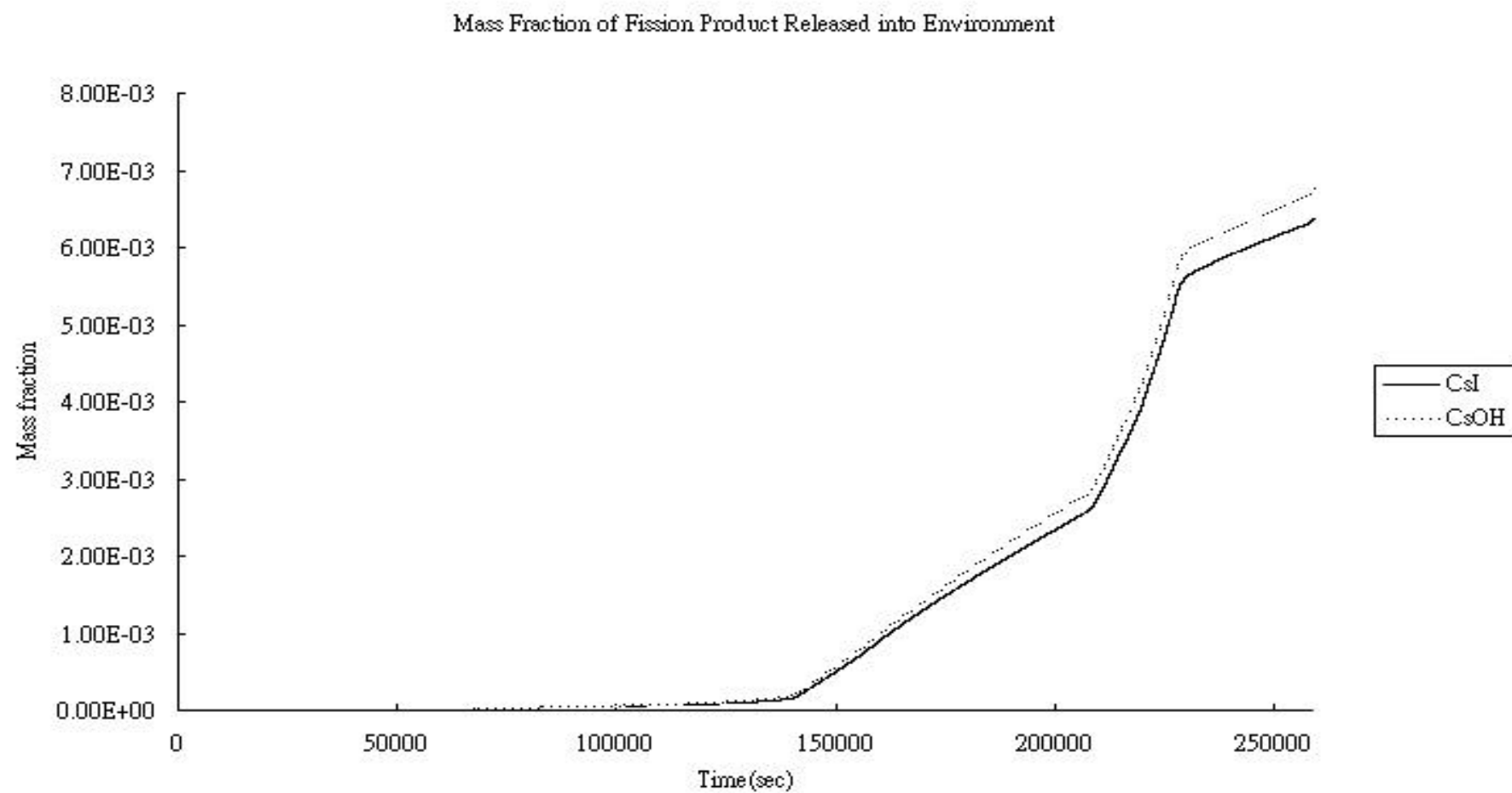


圖 7-12 LCHP 事故序列有被動淹覆器及圍阻體過壓保護系統時之 CsI、CsOH 外釋量

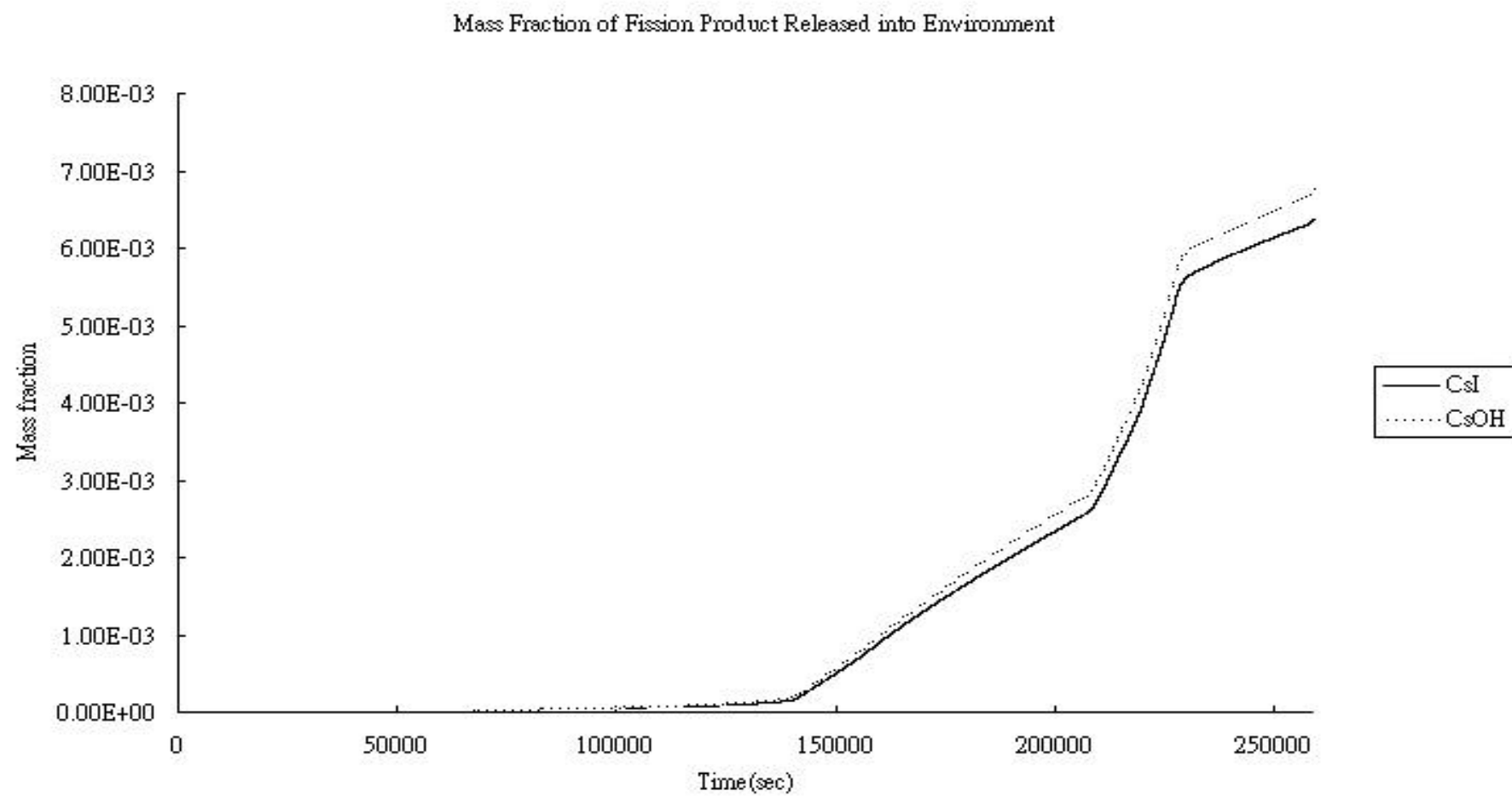


圖 7-13 LCHP 事故序列有自動洩壓系統時之 CsI、CsOH 外釋量

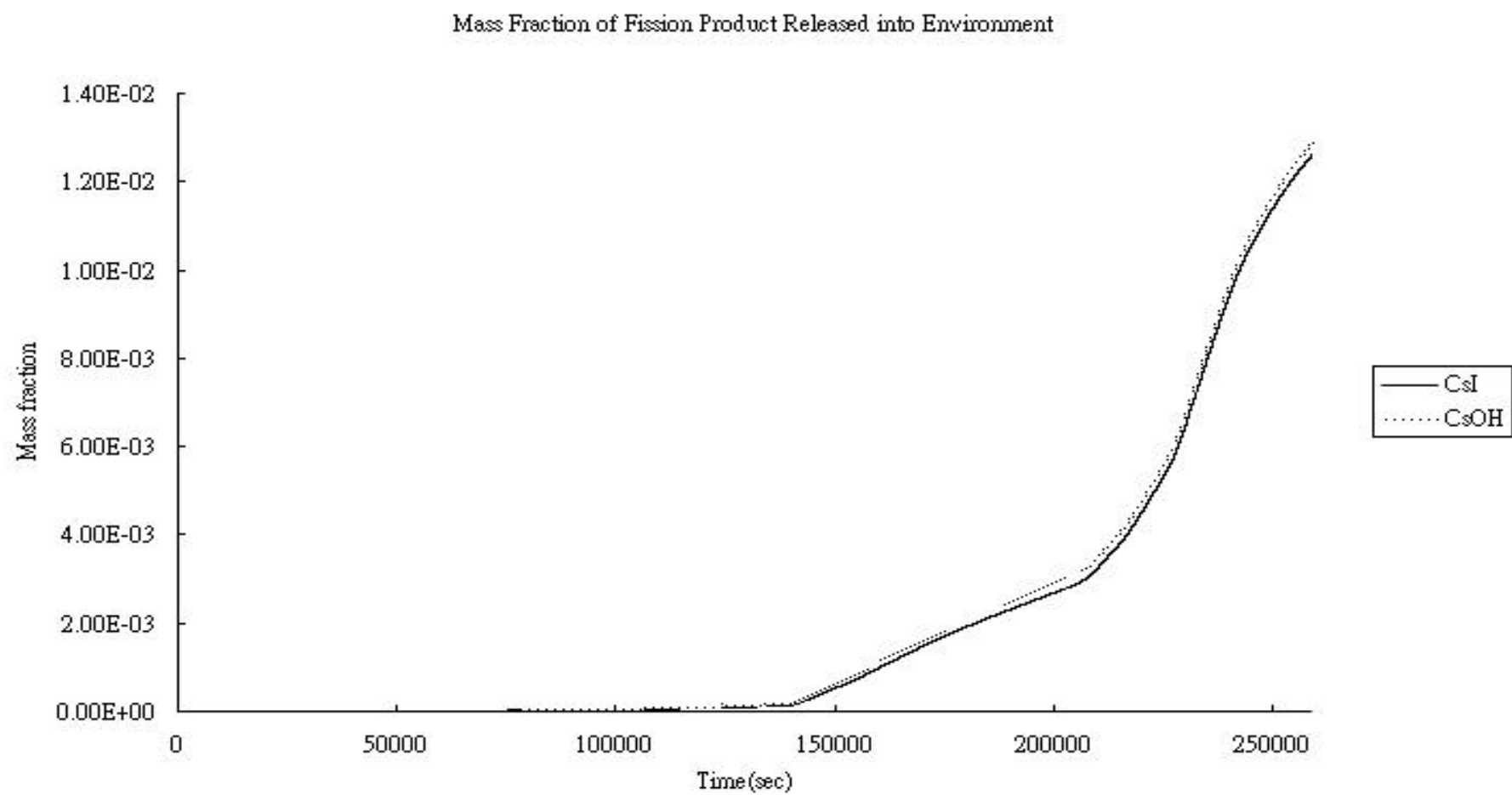


圖 7-14 LCHP 事故序列無自動洩壓系統時之 CsI、CsOH 外釋量