

第三章 SBRC 事故序列模擬

3.1 前言

在本論文中，第一個模擬的嚴重事故是電廠全黑 (Station Blackout with RCIC)，在初期安全分析報告中的代號是 SBRC-PF-R-N。在龍門電廠全黑事故的模擬中，假設電廠喪失包括全部柴油發電機的所有交流電源，除爐心隔離冷卻系統 (Reactor Core Isolation Cooling System, RCIC) 以外，所有的注水系統均無法執行功能。爐心隔離冷卻系統的正常運轉需要電池供應電力，因此在電池電力耗盡之後，爐心隔離冷卻系統亦失效，爐心內的衰變熱無法移除，反應器內的冷卻水逐漸被蒸發，造成爐心熔毀。熔融的爐心流至反應器底部區間，使得反應器壓力槽 (Reactor Pressure Vessel, RPV) 底部失效，熔融爐心落入圍阻體。落入圍阻體的熔融爐心持續釋放能量，最終使得圍阻體過壓保護系統 (Containment Overpressure Protection System, COPS) 因圍阻體內壓力過高而發生作用，使得圍阻體喪失完整性，造成少量分裂產物外釋。

3.2 輸入檔案設定

在輸入檔案的 "Initiators" 該節中，依照初期安全分析報告的敘述，在事故一開始時即將所有交流電源及柴油發電機設定為失效狀態，主蒸汽隔離閥 (Main Steam Line Isolation Valve, MSIV) 亦

在事故開始時同時關閉。除爐心隔離冷卻系統仍可正常運作以外，所有高低壓爐心注水系統，包含高壓爐心淹覆器(High Pressure Core Flooder, HPCF)、低壓爐心淹覆器(Low Pressure Core Flooder, LPCF)以及飼水泵(Feedwater Pump)、控制棒驅動水泵(Control Rod Drive Pump)均全數關閉。另外在本事故的模擬中，為了與龍門電廠之初期安全分析報告結果進行比較，因此模仿報告中之運轉員動作(Operator Action)，在爐心裸露(Core Uncover)後、爐心水位降至爐心 2/3 高度時，開啟一個安全釋壓閥(Safety Relief Valve, SRV)進行洩壓，因此模擬結果較近似於反應器壓力槽低壓失效之事故序列。

3.3 模擬結果

程式計算所得之重要事故時序詳如表 3-1。依照程式輸入檔案(Input File)內的設定，交流電源及柴油發電機均在事故開始(0.0 sec)時失效，除爐心隔離冷卻系統外，所有高低壓注水系統，包含高壓爐心淹覆器、低壓爐心淹覆器以及飼水泵、控制棒驅動水泵亦全部失效，再循環水泵(Recirculation Pump)則亦同時跳脫，急停信號產生。為與龍門電廠初期安全分析報告中結果進行比較，因此主蒸汽隔離閥比照初期安全分析報告中之設定，在 0.0 sec 時關閉，而非由程式自行決定其關閉時間。

事故開始 2.061 秒後，由於主蒸汽隔離閥的關閉，反應器壓力槽內壓力快速增加，使安全釋壓閥到達設定點而陸續啟動釋

壓。4.2 秒時，程式依照參數檔(Parameter File)內設定，將反應爐急停。17.416 秒時，爐心水位降至爐心隔離冷卻系統啟動設定點，30 秒後，也就是 47.416 秒時，爐心隔離冷卻系統啟動，開始由 CST(Condensate Storage Tank)取水注入反應器。0.75 小時(2690.162 秒)時，由於抑壓池(Suppression Pool)水位過高，爐心隔離冷卻系統改由抑壓池取水。1.29 小時(4654.687 秒)時，爐心水位回復至 Level-8，爐心隔離冷卻系統關閉。接下來由於燃料衰變熱不斷將冷卻水汽化，使爐心水位降低，造成爐心隔離冷卻系統的再啟動。在爐心隔離冷卻系統第三次啟動後約 223 秒，由於抑壓池水溫過高，而使爐心隔離冷卻系統水泵跳脫，爐心隔離冷卻系統自此失效。爐心隔離冷卻系統失效後約 0.89 小時(3197 秒)，也就是事故開始後 5.52 小時(19875.689 秒)，由於爐心衰變熱不斷蒸發冷卻水，爐心開始裸露。8.97 小時(32281.133 秒)時，熔融爐心開始向下掉落至反應器壓力槽底部區間(Lower Plenum)，在熔融爐心淬熄瞬間產生大量蒸汽。12.75 小時(45908.098 秒)時，反應器壓力槽底部因受熔融爐心加熱，溫度不斷升高，而導致壓力槽底部因高溫之潛變效應而破裂。壓力槽破裂後，熔融爐心落至反應器下方的爐穴區(Pedestal)混凝土地板上，但由於來自抑壓池之水蒸氣在圍阻體內各處凝結之故，此時爐穴區已有約 2200Kg 之少量積水，因此落進爐穴區之熔融爐心並未直接與混凝土地板發生熔融爐心混凝土作用(Molten Core Concrete Interaction, MCCI)，而是被此處積水所淬熄，但由於水量並不多，因此積水快速被蒸乾，使爐穴溫度上升，而使被動淹覆器(Passive Flooder,

PF)在 12.78 小時(46016.270 秒)時發生作用，乾井連接管(Drywell Connecting Vent, DCV)內的水流入爐穴，冷卻了熔融爐心。此時熔融爐心雖然被冷卻，但由於其衰變熱仍然不斷加熱爐穴區的水而產生蒸汽，使得圍阻體內壓力持續上升，因此在 17.50 小時(63017.176 秒)時，到達圍阻體過壓保護系統啟動壓力設定點，圍阻體開始經由圍阻體過壓保護系統洩壓，同時使得少量分裂產物開始經此外釋。MAAP4.0.4 計算所得之各類型放射性物質的外釋比例如表 3-2 所示，其中 TeO_2 之外釋量為 0，其成因是由於參數 FTEREL 依據 GE 之 MAAP 3.0B-ABWR 參數檔內容而設定為 0，因此放射性分裂產物中所有 Te 都將與燃料棒護套之鋳合金發生反應，而不會有任何釋出。

3.4 結果分析

圖 3-1 是反應器爐心功率圖，在事故開始後 4.2 秒，反應器即急停，因此爐心功率急速下降至衰變熱功率。

圖 3-2 為冷卻水系統壓力，在 20000 秒前，由於安全釋壓閥不斷開關，因此壓力上下震盪。5.75 小時(20689.889 秒)時，爐心水位降至 $2/3$ ，此時程式依照先前所述，模擬運轉員開啟一個安全釋壓閥之動作，因此反應器快速洩壓，到 8.97 小時(32281.133 秒)時，熔融爐心落入反應器底部區間，淬熄瞬間產生的大量水蒸汽，造成壓力的急速上升，而這些蒸汽經由釋壓閥導入抑壓池，形成圖上一個十分明顯的尖峰，抑壓池也因為這些突增的水蒸

氣，造成壓力的上升，使得真空破除器(Vacuum Breaker)反覆開關。12.75 小時(45908.098 秒)時，反應器壓力槽底部失效，冷卻水系統壓力隨即與爐穴區壓力達到平衡，隨圍阻體內壓力一同緩慢上升，直到 17.50 小時(63017.176 秒)時，圍阻體過壓保護系統發生作用，圍阻體開始洩壓，冷卻水系統壓力亦隨之下降。

圖 3-3 為爐心水位，由於爐心隔離冷卻系統曾三度啟動對反應器注水，因此造成圖上的兩次明顯震盪，第三次的啟動由於抑壓池溫度過高，而在啟動後 223 秒即跳脫，未在圖上留下第三個明顯震盪。嗣後爐心隔離冷卻系統即未能再啟動，水位也因冷卻水被爐心衰變熱不斷蒸發而持續下降。

圖 3-4 是安全釋壓閥流量圖，在圖中可以明顯看到由於安全釋壓閥頻繁的開啟/關閉動作，而形成大量的震盪；圖中發生在 32281.133 秒的狹窄尖峰，是由於此時熔融爐心開始掉落至反應器底部區間，因而在淬熄瞬間形成大量水蒸氣，使反應器內壓力快速上升，造成 6 個安全釋壓閥開啟，因而反應器又快速洩壓。

圖 3-5 為爐心中第 33 號節點的燃料溫度圖。在程式中，爐心由內而外分為五個環圈，由下而上分為十段，第 33 號節點位於由內而外的第三圈、由下而上的第五段，在圖中可以看到在 21000 秒左右，由於爐心水位降低至第 33 號燃料節點處，燃料溫度開始上升，最後此處爐心熔毀並開始往下掉落，直到 28800 秒時此處完全熔毀並掉落至下方。在本論文所分析的四個案例中，整個爐心在事故最後均完全熔毀，此點是 MAAP 4.0.4 與舊版 MAAP

不同之處。

圖 3-6 為爐心位置熔融物的總質量，在爐心開始裸露後約 48 分鐘(2900 秒)，爐心開始熔毀，熔融爐心質量持續上升，直到 8.97 小時(32281.133 秒)時熔融爐心開始往下掉落至反應器壓力槽底部區間，爐心位置的熔融物總質量開始快速下降，在大約 600 秒後，所有熔融爐心完全掉落至反應器壓力槽底部區間。

圖 3-7 為反應器壓力槽底部區間熔融爐心質量，在 8.97 小時(32281.133 秒)時，原來位於爐心處的熔融爐心開始往下掉落，因此此處熔融爐心質量快速上升，直到 12.75 小時(45908.098 秒)時，反應器壓力槽失效，熔融爐心由反應器壓力槽破損處落入爐穴區，此處熔融爐心質量快速下降。在本圖中可以發現，反應器壓力槽底部區間之熔融爐心質量峰值約為 322000kg，而圖 3-6 中顯示爐心位置之熔融物質量峰值約為 142000kg，兩者之間相差 180000kg，且在本論文所模擬之其餘三個案例中亦發現相同情況。研究過程中曾嘗試找出造成此現象之原因，但經計算爐心中所有燃料、組件之總質量後，仍無法明確得知該等質量差異之成因，因此推測 MAAP 對爐心位置及壓力槽底部區間之熔融物質量定義有所差別，因此造成該等質量上之差異。

圖 3-8 所示為燃料棒護套及燃料束結構體(Fuel Channel Box)鋳合金於爐心內氧化的比例。鋳合金的氧化會產生熱量及氫氣，氫氣在釋壓閥開啟時，會經由抑壓池進入圍阻體，而有可能在圍阻體內產生燃燒、甚至爆炸。然而在龍門電廠所採用的先進型沸

水式反應器(Advanced Boiling Water Reactor, ABWR)設計中，圍阻體內皆以充入氮氣方式惰化(Inerted Containment)，因此在整個事故過程中，圍阻體內完全沒有發生氫氣的燃燒或爆炸。

圖 3-9 所示為上乾井壓力，圖 3-10 為濕井壓力，在事故開始後，由於反應器壓力槽內的水蒸氣經由釋壓閥進入抑壓池，造成濕井內壓力緩慢上升，連帶使得圍阻體內其他區間壓力亦緩慢上升。在 5.75 小時(20689.889 秒)時，由於操作員打開一個安全釋壓閥的動作，使得壓力的上升速度加快，在 24000 秒左右，由於爐心水位已經低於所有爐心組件，因此水蒸氣產生量快速減少，濕井壓力開始下降，乾井壓力則大略持平。8.97 小時(32281.133 秒)時，由於熔融爐心開始掉落至反應器壓力槽底部區間，瞬間產生大量蒸汽，因此安全釋壓閥流量快速上升，造成濕井及乾井壓力也急速上升，直到 12.75 小時(45908.098 秒)時，反應器壓力槽失效，落入爐穴區的熔融爐心將爐穴區的積水汽化，圍阻體內各處壓力再次急速上升，12.78 小時(46016.270 秒)時，被動淹覆器啟動，自乾井連接管流入爐穴區的水被爐穴區的熔融爐心汽化，圍阻體內壓力持續上升，直到 17.50 小時(63017.176 秒)時，圍阻體過壓保護系統啟動，圍阻體內壓力快速下降。

圖 3-11 為 CsI 及 CsOH 自圍阻體釋出量，在 17.50 小時(63017.176 秒)圍阻體過壓保護系統啟動時，其值自零開始急速上升，而後大略持平，在約 41.67 小時(150000 秒)時，原存在於反應器壓力槽內部組件之 CsI 及 CsOH 再次大量釋出，因此自圍阻

體釋出量隨之再次升高。關於 CsI 及 CsOH 在該等時間出現大量釋出之原因，目前仍無法確定。研究過程中曾追蹤濕井及冷卻水系統內部各組件狀況，但發現 CsI 及 CsOH 的大量釋出與濕井中抑壓池水的沸騰與否並無關係，與冷卻水系統中各部組件的表面溫度變化亦無直接關係，因此目前僅能由冷卻水系統及圍阻體內各區間之分裂產物質量得知該等大量釋出可能與冷卻水系統內的分裂產物再揮發現象有關，確實原因仍不明。

表 3-1 SBRC 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
4.2	Reactor Scrammed
47.416	RCIC On
2690.162 (0.75 hr)	High Water Level in Suppression Pool, RCIC Suction from Suppression Pool
16679.123 (4.63 hr)	High Suppression Pool Temperature for RCIC, RCIC Turbine Pump Tripped
19875.689 (5.52 hr)	Core Uncovered
20689.889 (5.75 hr)	One SRV Opened by Operator
32281.133 (8.97 hr)	Relocation of Core Materials to Lower Head Started
45908.098 (12.75 hr)	Vessel Failed by Lower Head Rupture
46016.270 (12.78 hr)	Passive Flooder Activated
46021.219 (12.78 hr)	RPV Extensive Failure
63017.176 (17.50 hr)	COPS Activated

表 3-2 SBRC 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	0.9994848
2.CsI+RbI	1.93E-04
3.TeO ₂	0.00E+00
4.SrO	9.38E-07
5.MoO ₂	7.76E-10
6.CsOH+RbOH	4.11E-04
7.BaO	3.24E-07
8.La ₂ O ₃ +Pr ₂ O ₃ +Nd ₂ O ₃ +Sm ₂ O ₃ +Y ₂ O ₃	3.21E-08
9.CeO ₂	1.41E-07
10.Sb	9.87E-05
11.Te ₂	1.84E-04
12.UO ₂ +NpO ₂ +PuO ₂	1.62E-09

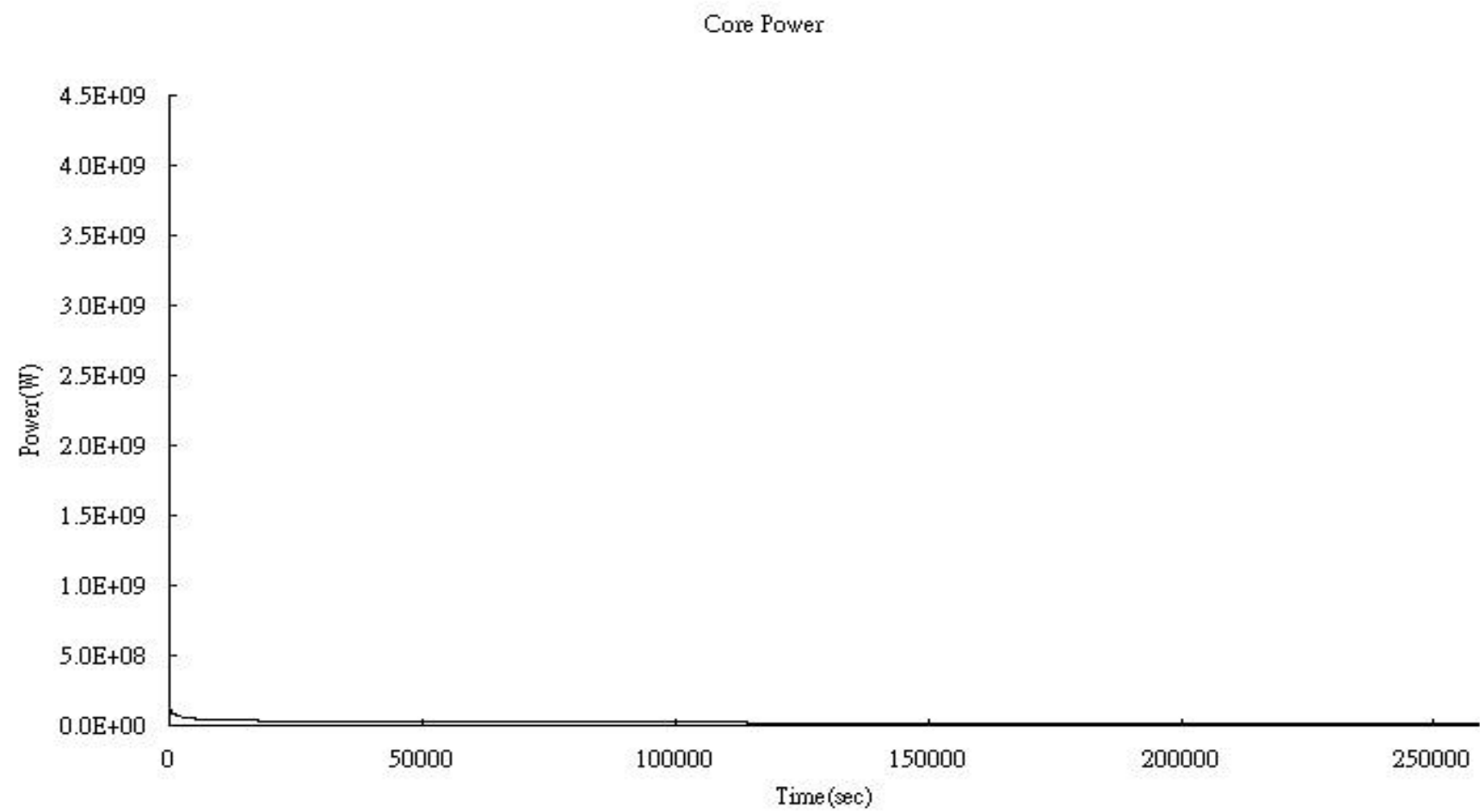


圖 3-1 SBRC 事故序列反應器爐心功率

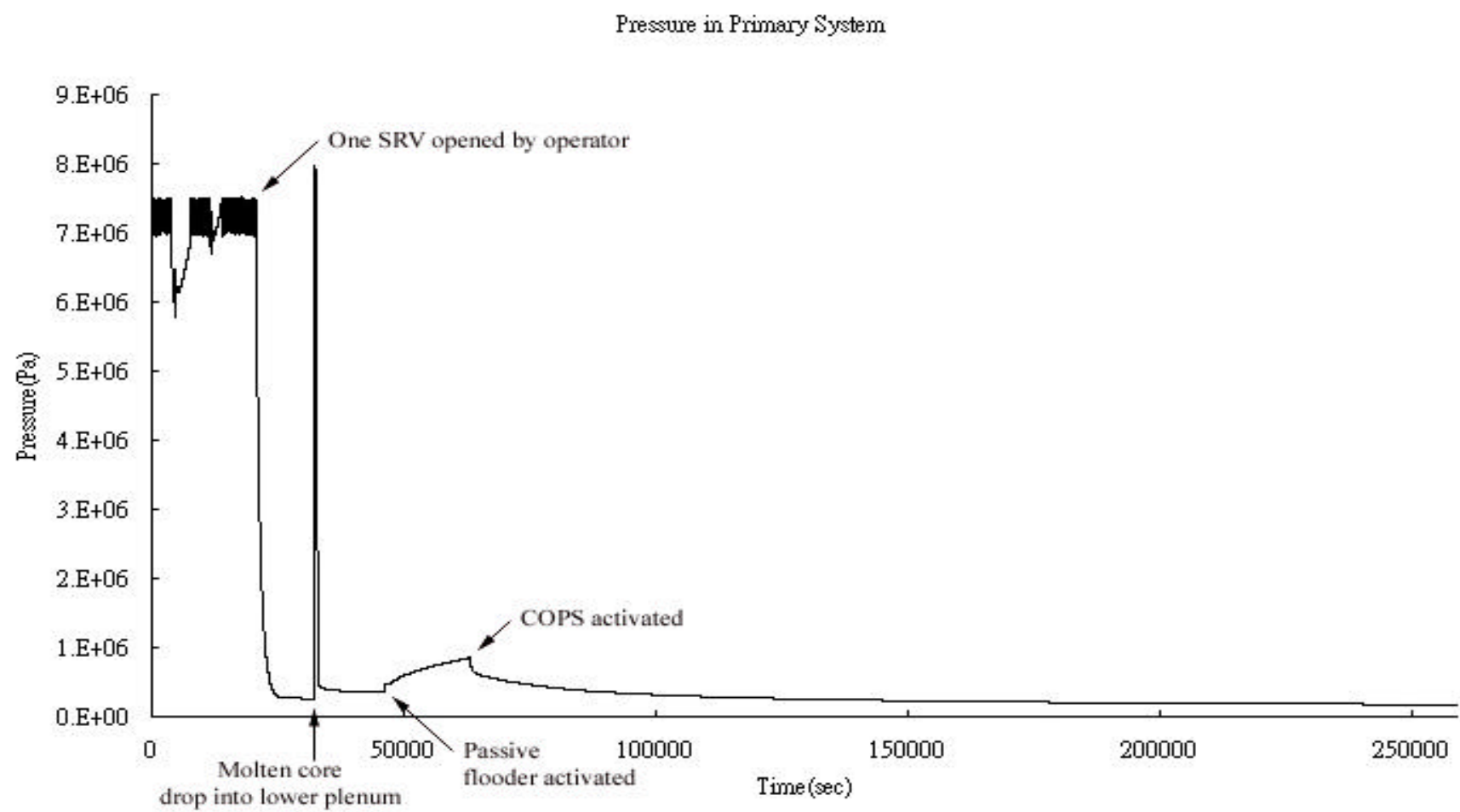


圖 3-2 SBRC 事故序列冷卻水系統壓力

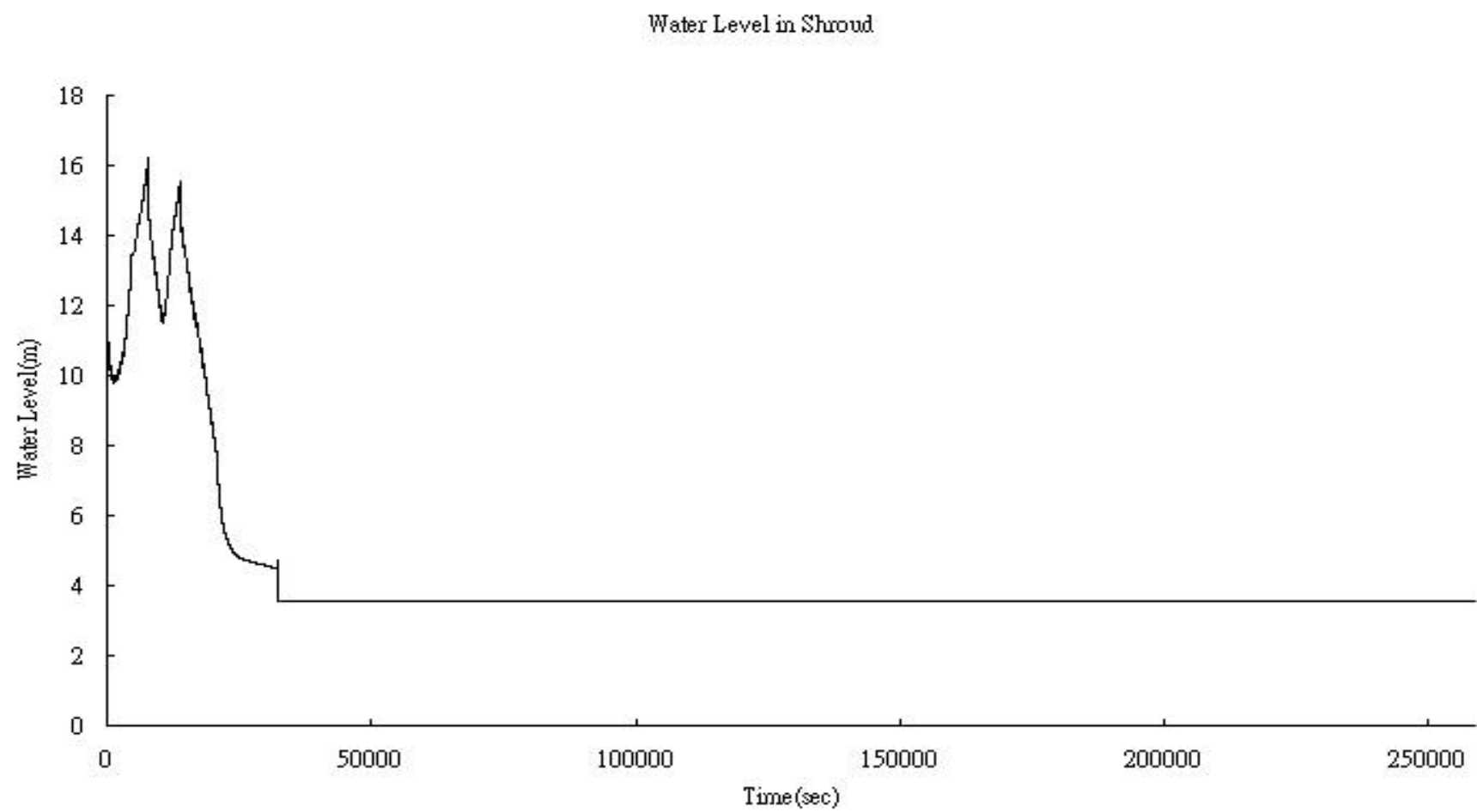


圖 3-3 SBRC 事故序列爐心水位

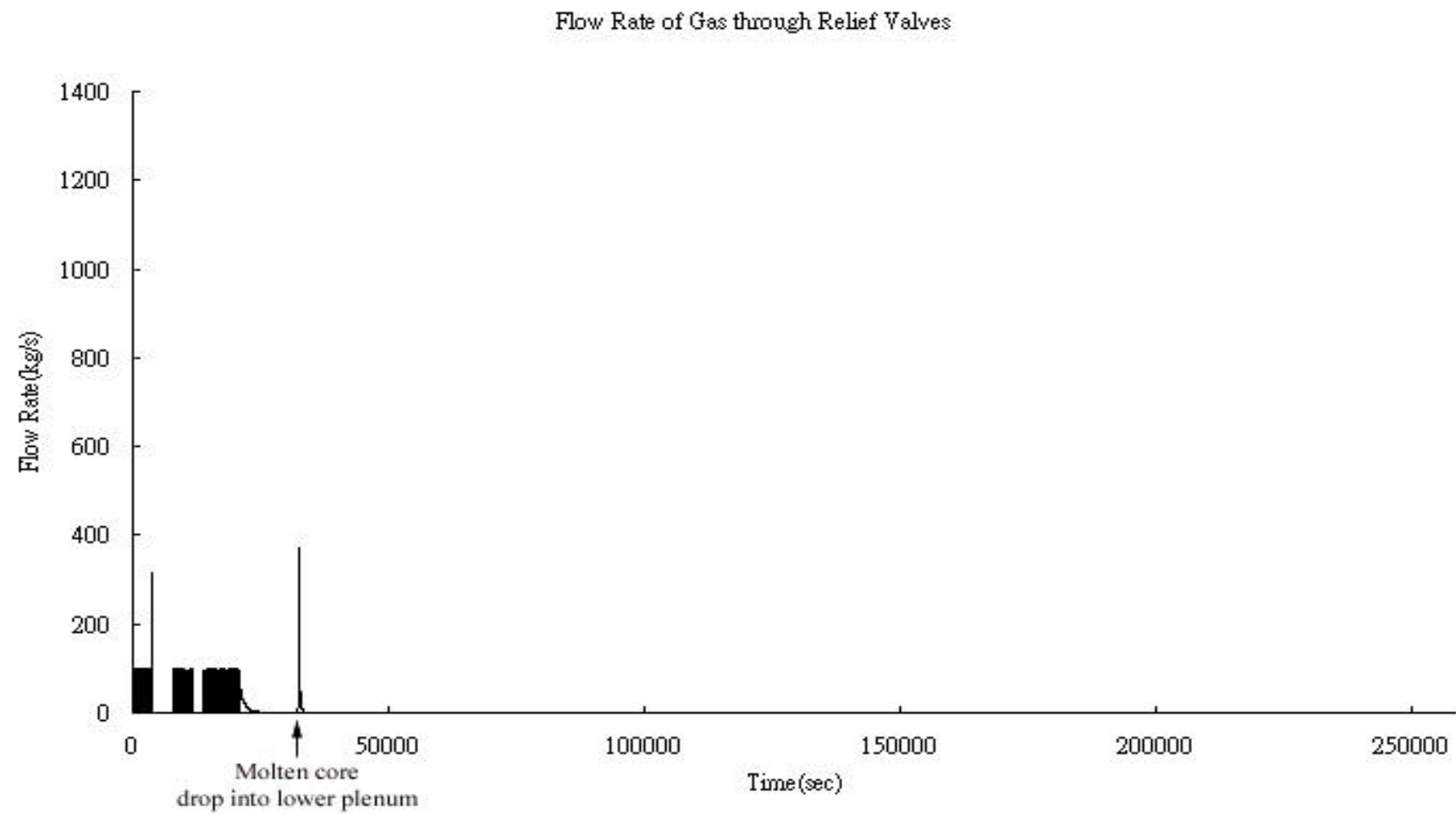


圖 3-4 SBRC 事故序列安全釋壓閥流量

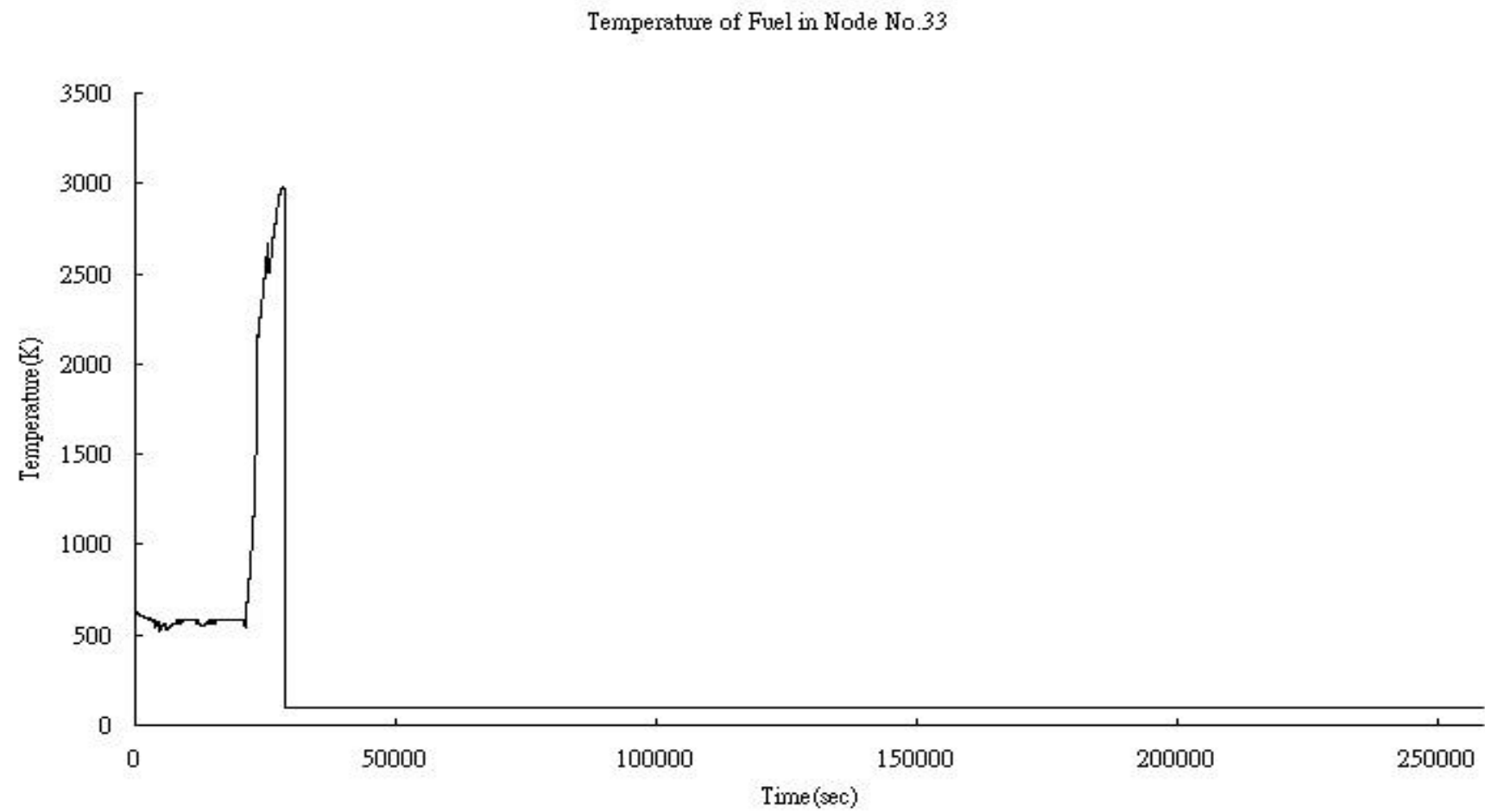


圖 3-5 SBRC 事故序列第 33 號節點燃料溫度

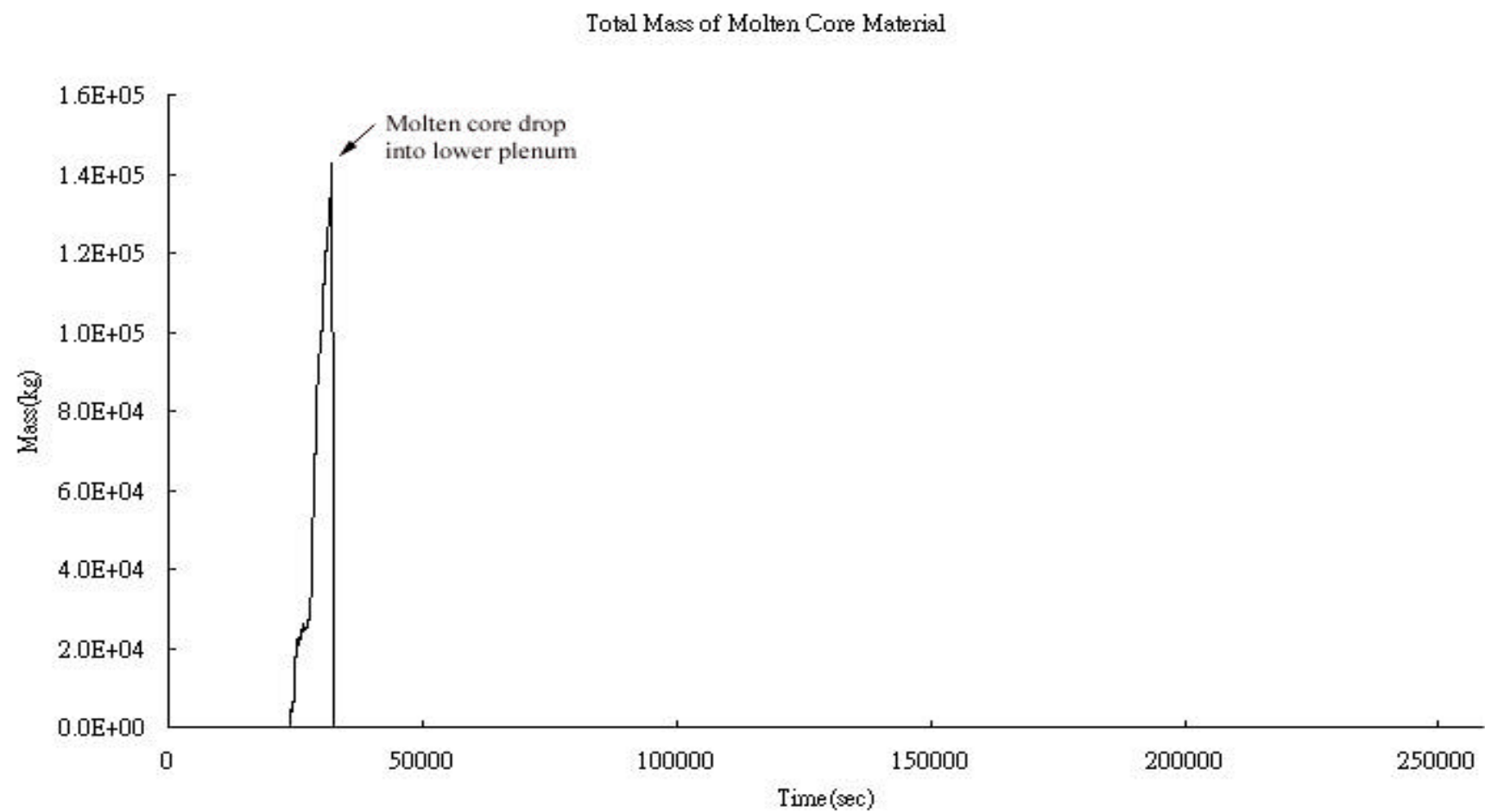


圖 3-6 SBRC 事故序列爐心位置熔融物總質量

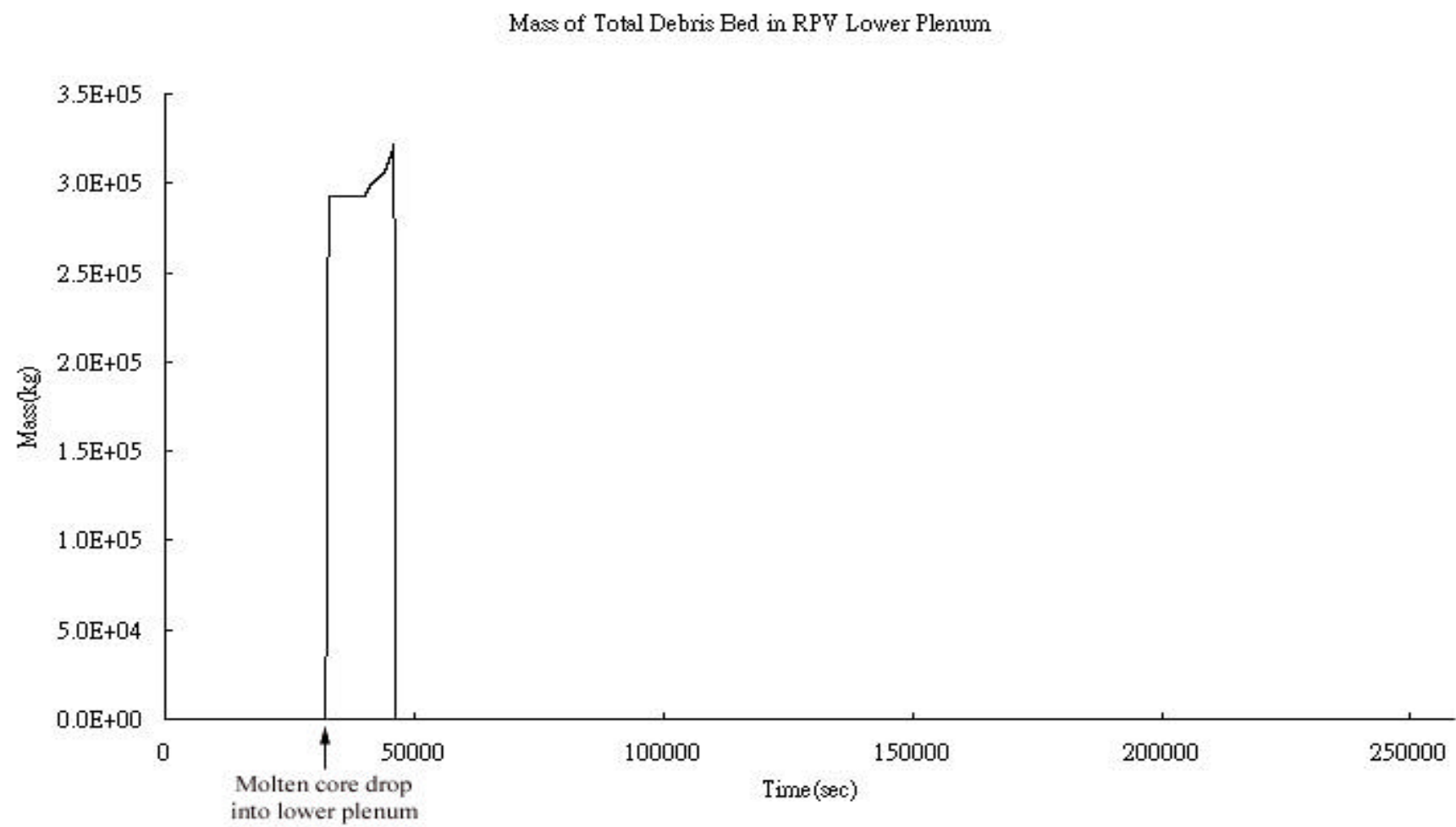


圖 3-7 SBRC 事故序列反應器壓力槽底部區間熔融爐心質量

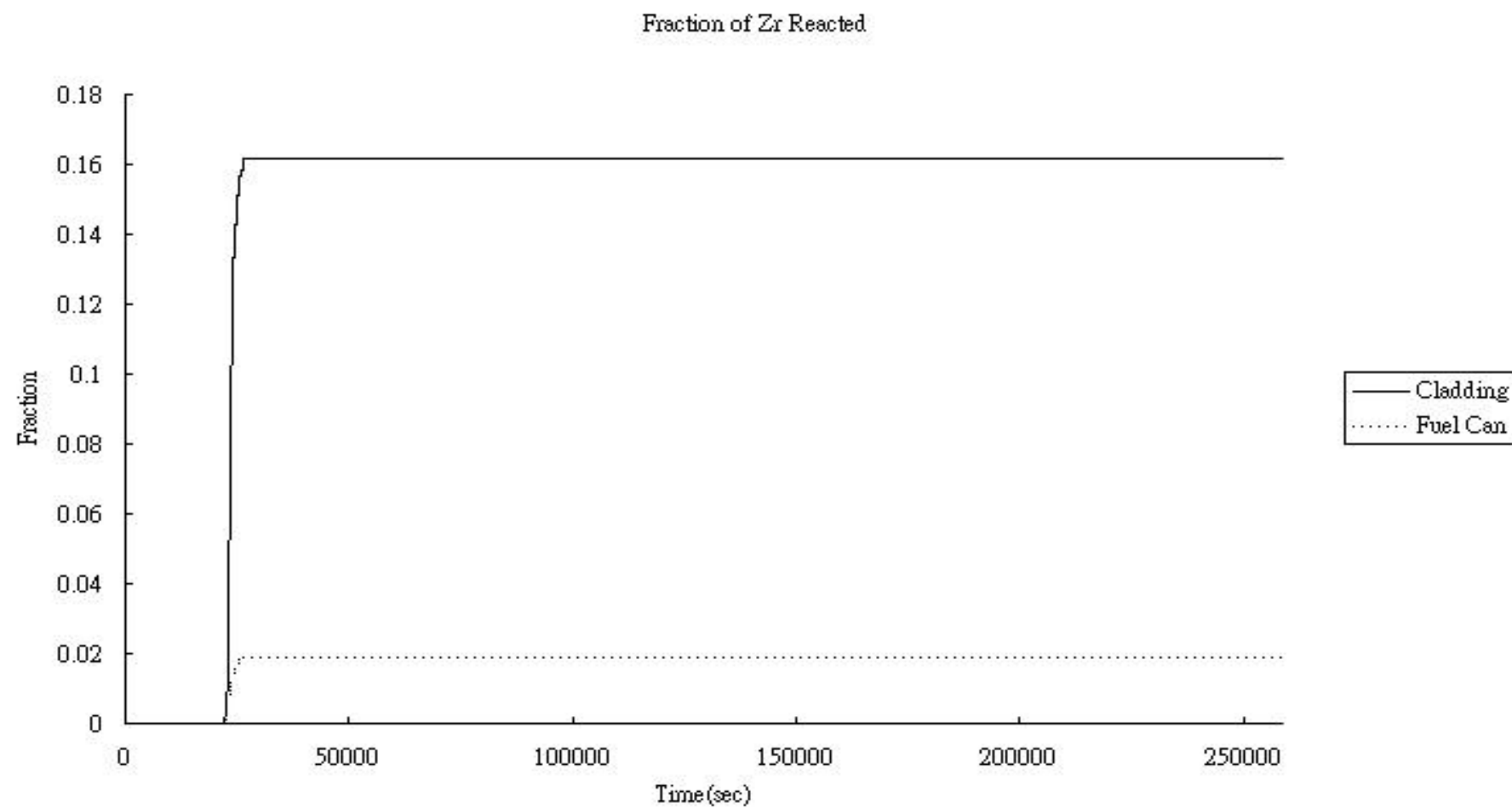


圖 3-8 SBRC 事故序列燃料棒護套及燃料束結構體鋯合金氧化比例

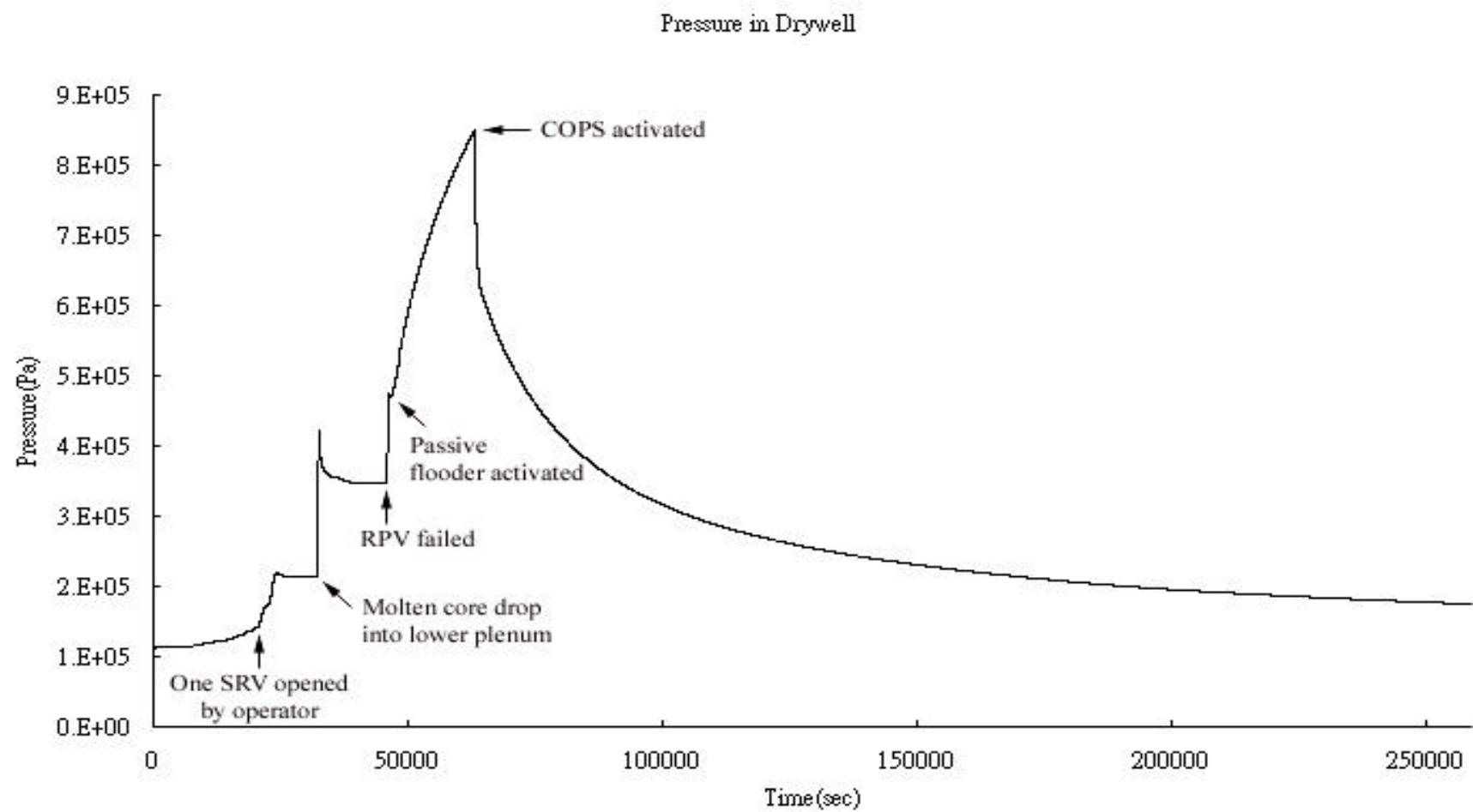


圖 3-9 SBRC 事故序列上乾井壓力

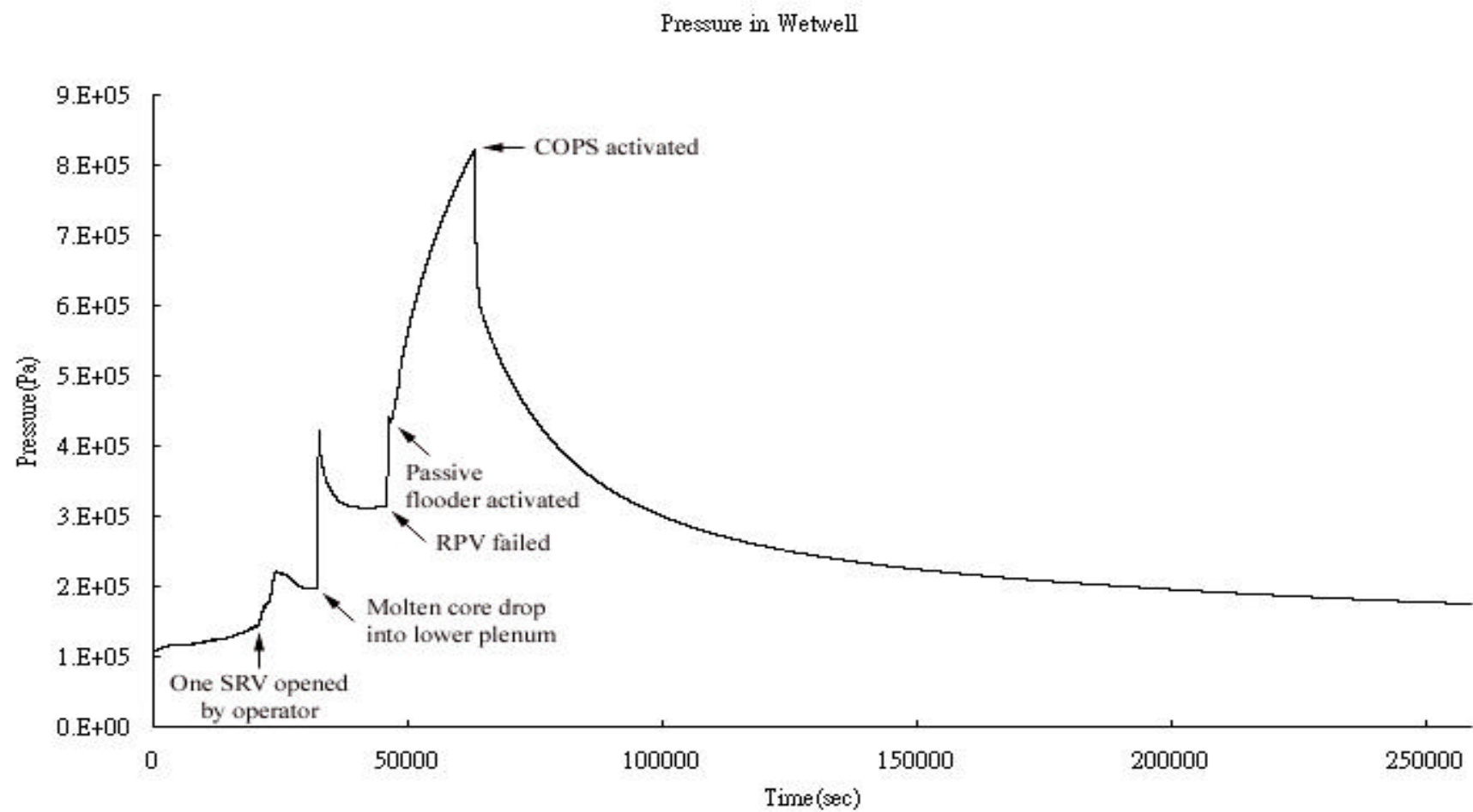


圖 3-10 SBRC 事故序列濕井壓力

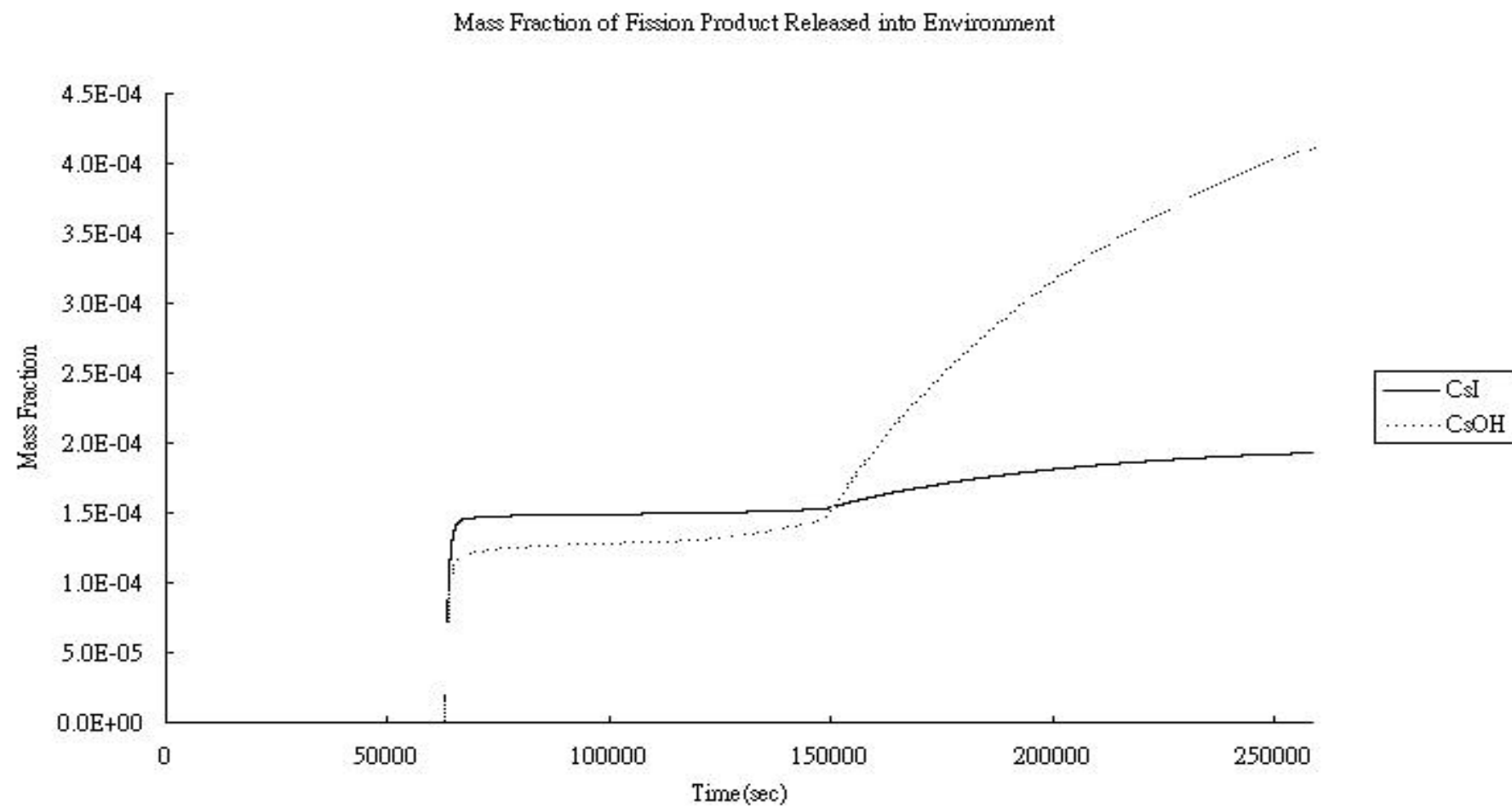


圖 3-11 SBRC 事故序列 CsI 及 CsOH 自圍阻體釋出量