

附錄 B 核一廠 MAAP 4.0.4 程式嚴重事故序列分析及結果

B.1 前言

B.1.1 MAAP 4 程式簡介

MAAP4 (Modular Accident Analysis Program) 程式[16]係由 Fauske & Associates, Inc. (FAI)公司在美國電力研究院 (Electric Power Research Institute, EPRI) 的資助下所完成。MAAP4 程式為一核電廠嚴重事故之整合分析程式，可以分析反應器冷卻水系統及圍阻體於嚴重事故中的反應。MAAP4 具模擬核電廠各類型之特殊安全設施 (Engineered Safety Features, ESFs) 的功能，因此可以用來分析運轉人員於事故過程中所採取應變措施對事故演變的影響。MAAP4 程式被世界各電力公司用於核電廠嚴重事故處理導則 (Severe Accident Management Guideline, SAMG) 的建立與驗證。

MAAP4 程式的前身為 MAAP3 程式，集合核工業界於 IDCOR (Industrial Degraded Core Rule Making) 計畫中所發展之各嚴重事故現象分析程式，成為整合性之嚴重事故分析工具。MAAP 程式可以同時模擬反應器冷卻水系統與圍阻體於嚴重事故中的熱水流反應；以及放射性物質自燃料丸或熔融爐心池釋出後，於冷卻水系統與圍阻體內的傳達遞現象。在熱水流現象方面，MAAP4 模擬了核能電廠嚴重事故中的重要現象包括：一次側系統的冷卻水流失事故 (loss of coolant accident, LOCA) 中的沖放 (blow down) 及沸騰蒸發 (boil off)，爐心裸露 (core uncover) 後的燃料溫度升高 (heatup)，爐心熔毀 (core meltdown) 與反應器壓力槽熔穿 (reactor vessel failure)，鋳合金的氧化 (zircaloy oxidation)，氫氣的產生及燃燒，熱端管路內的自然循環 (natural circulation in hot leg)，熔融爐心與混凝土作用 (molten core-concrete interactions, MCCI)，圍阻體 (containment) 負載等相關之熱水流及熱傳現象。在放射性物質外釋方面，MAAP4 考慮了分裂產物自燃料棒的釋出，釋放出之放射性物質在一次側冷卻水系統中的沈積 (sedimentation) 與傳遞，以及沉積之放射性物質的再蒸發 (evaporation) 現象。MAAP 也考慮了熔融爐心材料與混凝土作用時，放射性物質會因化學型態的改變，進而被混凝土分解時所產生的氣體帶入圍阻體大氣，以及懸浮粒子 (aerosol) 在圍阻體中的沈積和碰撞等行為。

MAAP4 在許多之嚴重事故的現象模擬上均採用簡單之模式，規避繁雜之計算，以節省電腦計算時間。透過模式參數的調整，MAAP4 所使用的嚴重事故現象分析模式均能大致預測相關實驗的結果，但這些模式參數容許一定之不準確度的存在，可作靈敏度 (sensitivity) 分析。其在動量守恒方面，僅以類穩態 (quasi-steady state) 的動量守恒方程式轉換成代數方程式，不去解繁瑣的聯立動態微分方程式，以有效地節省計算時間。但亦因 MAAP4 使用非常簡單的參數化模式，使得其結果可能造成某種程度的誤差，所以必須將結果與使用較詳細模式之系統程式的結果做驗證工作，以確定 MAAP4 程式結果的可信度。

MAAP4 程式分為 BWR 及 PWR 兩種版本，可以模擬各種不同的圍阻體設計，包括壓水式反應器的冰冷凝型圍阻體 (ice condenser containment)，大乾型圍阻體 (large dry containment)，以及沸水式反應器的 Mark I，Mark II，Mark III 與 ABWR 圍阻體。

B.1.2 核一廠 MAAP 4 輸入數據

本報告所採用的版本為 MAAP 4.0.4。MAAP 4 的輸入參數包括：反應器冷卻水系統及圍阻體相關幾何數據；重要運轉參數，安全系統相關參數與設定點，以及重大事故及安全系統的相關控制(Event Code)。核一廠 MAAP 4 輸入數據係由中原大學機械系建構，經由核能研究所進一步的修改，本分析中所使用的版本亦為核能研究所進行 SAMG 發展時所用的版本。

MAAP 4 程式沸水式反應器冷卻水系統，熱水流分析係將圍阻體分為數個相連之控制體積如圖 B.1 所示。核一廠 MAAP 4 輸入數據中的控制體積共有 5 個，表 B.1 所列為各控制體積的大小。

B.2 事故序列定義

NEDC-33045P 之爐心熔損程度評估指引利用圍阻體輻射強度評估爐心熔損程度，再利用爐心水位、圍阻體氫氣濃度等佐證判定之熔損程度之正確性。核電廠嚴重事故中，圍阻體輻射強度、圍阻體氫氣濃度與事故序列有密切的關係。在訂定爐心熔損程度評估指引重要參數的設定值時，不可能考慮所有的狀況，故僅能以一具代表性的值為基準，而所謂之具代表性的值，係 BWR Owners Groups 歸納嚴重事故分析的結果所獲得。本分析中以核一廠為例，針對評估指引參數設定之重要事故序列進行分析，分析結果可以做為日後使用指引時的參考。其原因為核電廠嚴重事故分析包括許多複雜的物理及化學現象，模擬時即有許多不確定性，MAAP4 程式僅是數個嚴重事故分析程式中的一個，故其結果應做為定性之參考。

本分析之嚴重事故的選取是在了解，事故中冷卻水系統處於高、中、低壓狀況下，放射性物質自燃料外釋、放射性物質於冷卻水系統中的滯留、氫氣的產生、氫氣與冷卻水系統中的滯留、爐心注水對氫氣產生量的影響、圍阻體噴灑系統對圍阻體大氣空浮的影響。本分析中共考慮了 13 個事故序列，事故序列分為兩大類即暫態與冷卻水流失事故，暫態以電廠全黑事故為代表。在冷卻水流失事故中，破口(大、中、小)的定義係根據安全度評估的報告：其中破口面積 $>0.3 \text{ ft}^2$ 為大破口，破口面積在 0.004 與 0.3 ft^2 之間(水管路) / 0.025 與 $<0.3 \text{ ft}^2$ 之間(蒸汽管路)為中破口，破口面積在 0.0007 與 0.004 ft^2 之間(水管路) / 0.004 與 0.025 ft^2 之間(蒸汽管路)為小破口。除非有特別說明，所分析之事序列中均假設緊急注水設備均喪失功能。本分析中之事故序列定義如下所述：

案例一：為大破口冷卻水流失事故，破口位置為再循環管路，破口面積為 0.4905 m^2 ，相當於再循環管路截面積的 2 倍(即 Double End Break)。此事故序列的冷卻水系統壓力是全部分析之事故序列中最低的。

案例二：為中破口冷卻水流失事故，破口位置為再循環管路，破口面積為 0.02787 m^2 ，相當於再循環管路截面積的 11.4%。

案例三：為小破口冷卻水流失事故，破口位置為再循環管路，破口面積為 0.0003716 m^2 ，相當於再循環管路截面積的 0.15%。

案例四：為大破口冷卻水流失事故，破口位置為主蒸汽管路，破口面積為 0.202683 m^2 ，相當於主蒸汽管路的截面積。

案例五：為中破口冷卻水流失事故，破口位置為主蒸汽管路，破口面積為 0.02787 m^2 ，相當於主蒸汽管路截面積的 13.8%。

案例六：為小破口冷卻水流失事故，破口位置為主蒸汽管路，破口面積為 0.0023226 m^2 ，相當於主蒸汽管路截面積的 1.2%。

案例七：為電廠全黑事故，事故中假設爐心隔離冷卻系統(Reactor Core Isolation Cooling System, RCIC)不可用。此事故序列的冷卻水系統壓力是全部分析之事故序列中最高的。

案例八：為電廠全黑事故，事故中假設 RCIC 不可用，但 ADS 被手動引動。

案例九：為電廠全黑事故，事故中假設 RCIC 有起動。

案例十：為大破口冷卻水流失事故，與案例一類似，但假設圍阻體噴灑系統於熔融爐心自爐心區掉落時啟動。

案例十一：為大破口冷卻水流失事故，與案例一類似，但假設注水系統於熔融爐心自爐心區掛落前 10 分鐘啟動，終止事故的惡化。

案例十二：為電廠全黑事故，與案例七類似，但假設圍阻體噴灑系統於熔融爐心自爐心區掉落時啟動。

案例十三：為電廠全黑事故，與案例七類似，但假設高壓注水系統於熔融爐心自爐心區掛落前 5 分鐘啟動。

B.3 結果與討論

B.3.1 綜合說明

分析案例的重要事件之時序如表 B.3.1 所列。對沸水式反應器而言，爐心裸露是事故開始惡化的徵兆。

表 B.3.1 所列之 GAP RELEASE 是指燃料棒護套開始破裂的時間；START OF ZR CLADDING RELOCATION 是指燃料護套過熱損毀開始移位掉落的時間；RELOCATION OF CORE MATERIAL 是指熔融爐心自爐心區域開始掉落至壓力槽底部空間的時間。比較案例一至案例六的結果，如表所示，對冷卻水流失事故而言，再循環管路破口事故要比相對應大小之主蒸汽管路破口事故，惡化速率較快。在再循環管路大破口冷卻水流失事故中，在事故開始的瞬間，冷卻水幾乎已全部流失。再循環管路的中破口事故，雖然破口面積小於主蒸汽管路的大破口面積(0.02787 m^2 VS 0.202683 m^2 ，約十分之一)，其惡化的速率仍然較快。另外也可以發現當冷卻水系統流失事故的破口變小時，事故惡化的速率變緩，即當破口變小時，爐心裸露，GAP RELEASE、START OF ZR CLADDING RELOCATION 及氫氣產生的時間，均會延遲(再循環管路與主蒸汽管路的破管皆然)。其中較為特殊的是再循環管路的小破口事故其壓力槽失效的時間要比中破口事故壓力槽失效的時間來的早。其原因為壓力槽失效模式因壓力高低而有所不同所造成。再比較案例五及六的結果，主蒸汽管路的中/小破口冷卻水流失事件，其破口小到某一程度時，RELOCATION OF CORE MATERIAL 及壓力槽失效的時間與破口的大小沒有明顯的關係。比較案例一

及案例十的結果可以發現，圍阻體噴灑系統的運轉，也會影響到冷卻水系統熱水流反應，但影響的程度非常的小。

在電廠全黑事故中，ADS 的是否啟動對重要事件的時序，除了 START OF ZR CLADDING RELOCATION 及壓力槽失效外，並無太大的影響，其原因為主蒸汽管路上的釋壓閥仍會在反應爐高壓的情況下動作開啟洩壓。

案例十一之低壓事故中，熔融爐心自爐心區域掉落前 10 分鐘的注水啟動可以及時阻止爐心熔融及壓力槽失效；但在案例十三之高壓事故中，熔融爐心自爐心區域掉落前 5 分鐘的注水啟動還是無法防止爐心熔融及壓力槽失效。

表 B.3.2 所列為案例二(低壓事故)及案例七(高壓事故)壓力槽失效時放射性物質自燃料外釋及釋放至圍阻體的比例。表中之 RCS Retention Fraction 是指自燃料釋出之放射性物質滯留在冷卻水系統的比例。如表所示，冷卻水系統維持高壓的事故中，放射性核種外釋比例可以分為四群；外釋比例最高的為惰性氣體、CSI、CSOH 及 TeO₂，其釋放比例在 28~100%間；次高的為 Sb，釋放比例為 2%；再次者為 BaO 及 SrO，釋放比例在 0.05~0.09%間；剩下核種的釋放率均非常的低，幾近於 0。在冷卻水系統滯留的比例，高者可達 90%(如 SrO 及 BaO)，次高者在 80%左右(CSI 及 CSOH)，再其次為 CeO₂ 及 Sb，為 22~30%之間。惰性氣體則為 1.0%，此與其特性有關。表中的 TeO₂ 因為是由原先在爐心中的 Te 氧化而來，因此其與 Te 的冷卻水系統滯留比例會超過 100%。另外滯留比例為 0 的核種(Mo, Le203 及 UO₂)則是因為自燃料釋出的量都跑到融溶爐心池中(Corium Pool)。當冷卻水系統完全洩壓後，揮發性較高核種(惰性氣體、CSI、CSOH 及 TeO₂)的釋放比例均較高壓案例為高，有顯著釋放比例值的揮發性較低核種為 SrO、BaO 及 Sb，其釋放比例皆較高壓案例為高。在冷卻水系統滯留比例方面，則所有核種(Mo, Le203 及 UO₂ 除外)的滯留比例都遠低於高壓系統。

表 B.3.3 列出各案例分析之高揮發性核種自燃料外釋的情形。表中所列之 Release Duration 是指自放射性物質開始外釋，至釋放比例達 90%的時間。該表所列之數值為壓力槽失效時的狀況。如表所示，惰性氣體自燃料釋出的比例大於 CSI 及 CSOH，而後者的釋出比例又大於 TeO₂。一般而言，冷卻水系統壓力較低的事故，其高揮發性分裂產物的外釋比例略大於冷卻水系統高壓力事故的外釋比例。表 B.3.3 亦列出自燃料外釋之分裂產物滯留於冷卻水系統的比例。如表所示，在高壓事故序列中，惰性氣體於冷卻水系統滯留的比例約在 1.3%(及)以下，但在低壓事故序列中，滯留的比例都在 10⁻³%以下。惰性氣體外的高揮發性核種於冷卻水系統滯留的比例則大於惰性氣體的滯留比例。高壓事故中，滯留比例約為 80~90%；低壓事故中，滯留比例約為 30~78%(如 CSI 在 Large LOCA 為 62%，Medium LOCA 為 29.81%，Small LOCA 為 77.08%)。一般而言，當冷卻水系統壓力越高時，放射性物質於冷卻水系統滯留的比例越高。比較再循環管路破口案例與主蒸汽管破口案例，可以發現破口位置對 CsI 及 CsOH 等放射性物質於冷卻水系統滯留的比例亦有很大的影響。再循環管路破口事故的冷卻水系統滯留比例大於主蒸汽管破口者。比較案例一/案例十與案例七/案例十二的結果可以發現，圍阻體噴灑系統的運轉亦會影響放射性物質於冷卻水系統的滯留比例。亦即圍阻體噴灑運轉，使得圍阻體壓力降低，加速放射性物質由破口跑到圍阻體，因而減少滯留於冷卻水系統的比例。

表 B.3.4 所列為熔融爐心自爐心區域掉落壓力槽底部區間前，放射性物質自燃料外釋及滯留於冷卻水系統的比例。在嚴重事故發展的過程中，爐心燃料棒

因喪失冷卻而逐漸熔損，並逐漸向下移動。當爐心底部支撐板亦因溫度過高而失效時，熔融爐心會掉落到壓力槽底部區間；通常壓力槽底部區間仍有殘餘的冷卻水，掉落的熔融爐心會被淬熄，產生大量的水蒸汽，使得冷卻水系統壓力上升，水蒸汽的流動亦會影響放射性物質於冷卻水系統的滯留。由於熔融爐心掉落發生的時間在壓力槽失效之前，因此可以預期熔融爐心掉落時，放射性物質自燃料外釋的比例會比壓力槽失效時為低。如表 B. 3. 1 所示，在冷卻水系統壓力較低時，壓力槽失效與熔融爐心掉落的時間差距較冷卻水系統壓力較高者為大，因此放射性物質在冷卻水系統的滯留比例差異也會比較大，亦即低壓事故的差異會比較大，比較表 B. 3. 3 及表 B. 3. 4 可以看到這個結果，低壓事故的差異可以高達約 50%(如案例二，再循環管路破)。另外也可以由表列的結果發現，惰性氣體及其他高揮發性放射性物質於冷卻水系統的滯留比例在熔融爐心掉落及壓力槽失效時有很大的差異。

表 B. 3. 5 所列為各案例分析氫氣產生量、氫氣自冷卻水系統釋放至圍阻體總量以及氫氣在冷卻水系統的滯留比例。該表所列之數值包括熔融爐心掉落及壓力槽失效兩個事件發生的時間。分析表 B. 3. 5 所示的資料可以發現，冷卻水系統高壓事故中氫氣產生量大於低壓事故的氫氣產生量。比較案例七與案例十三，可以發現在熔融爐心掉落前五分鐘注水會增加氫氣產生量，此乃因注水使得鋁水反應更加劇烈所致，其增加量達 22~40%。比較表 B. 3. 3，B. 3. 4，B. 3. 5 的數值可以發現，氫氣於冷卻水系統的滯留比例與惰性氣體於冷卻水系統的滯留比例之趨勢相同，數值亦相去不遠(同一個數量級)。

B. 3. 2 事故序列分析結果

B. 3. 2. 1 大破口冷卻水流失事故

案例一為再循環管路之大破口冷卻水流失事故。圖 B. 3. 2. 1-1 所示為冷卻水系統壓力，如圖所示，冷卻水系統系統壓力在事故開始後即驟降至圍阻體的壓力，當熔融爐心由爐心區域掉落到壓力槽底部區間時，熔融爐心淬熄所產生的大量水蒸汽會造成冷卻水系統壓力的一個小尖峰，圖 B. 3. 2. 1-2 所示為爐心水位，事故發生後，冷卻水的流失造成水位的驟降。圖 B. 3. 2. 1-3 及圖 B. 3. 2. 1-4 所示為再循環管路大破口冷卻水流失事故之破口冷卻水及水蒸汽流率的時變圖。圖 B. 3. 2. 1-4 的小尖峰為熔融爐心由爐心區域掉落到壓力槽底部區間時，熔融爐心淬熄所產生的大量水蒸汽自破口流出所造成。圖 B. 3. 2. 1-5 所示為爐心燃料最高溫度，如圖所示，溫度的最高點發生在當熔融爐心自爐心區域掉落至壓力槽底部區間時，因為熔融爐心淬熄產生的水蒸汽，會加速鋁-水反應，造成燃料溫度攀升，但是之後的溫度劇降為爐心掉落。圖 B. 3. 2. 1-6 所示為爐心內燃料棒護套氧化的比例，比較圖 B. 3. 2. 1-5 及圖 B. 3. 2. 1-6 可以發現，鋁水反應的速率與燃料溫度上升的速率有直接的關係。爐心掉落時所產生的大量水蒸汽會大幅加速護套氧化的速率。圖 B. 3. 2. 1-7 所示為圍阻體的壓力。如圖所示，熔融爐心自爐心區域的掉落以及壓力槽失效會造成圍阻體壓力的上升。

圖 B. 3. 2. 1-8 所示為惰性氣體自燃料外釋及外釋至圍阻體比例。如圖所示，當燃料棒護套開始破裂，隨著破裂比例的增加，外釋的比例會快速的增加，但會達到一個平衡區域，此時外釋的比例約為 6. 25%，即惰性氣體存在於燃料棒護套間隙的比例。當燃料丸的溫度持續升高，達到所謂的 START OF ZR CLADDING RELOCATION 限值，外釋的比例再度極速攀升。如圖所示，極小比例的惰性氣體

會被滯留在冷卻水系統內，即大部份自燃料釋出惰性氣體會釋放到圍阻體。0.9 小時左右，釋放到圍阻體的惰性氣體即達到平衡。

圖 B. 3. 2. 1-9 所示為 CsI 自燃料外釋及釋放至圍阻體的比例。MAAP4 分析中假設所有的碘均會與 Cs 結合，剩餘之 Cs 會以 CsOH 的形式存在。如圖所示，熔融爐心自爐心區域掉落到壓力槽底區間並不會造成釋放至圍阻體大氣的比例大幅上升，這是因為滯留於冷卻水系統之 CsI 常會沈積在結構物的表面，比較不受水蒸氣流率的影響。圖 B. 3. 2. 1-10 所示為 TeO₂ 自燃料外釋及釋放到圍阻體大氣的比例，其趨勢與 CsI 類似。

圖 B. 3. 2. 1-11 所示為圍阻體各區間之惰性氣體濃度，如圖所示，自冷卻水系統再循環管路破口釋出之惰性氣體會在圍阻體各區間傳遞，造成各區間的濃度有很大的差異，差異最大時可達一個數級以上。【NEDC-33045P 在計算爐心熔損程度評估指引的圍阻體輻射強度時，假設放射性物質會均勻分佈於圍阻體大氣】。

圖 B. 3. 2. 1-12 所示為圍阻體各區間之 CsI 的空浮分佈，如圖所示，其大體行為與惰性氣體非常類似。MAAP4 程式中，除惰性氣體外，放射性物質可以氣態 (vapor)，空浮 (aerosol)，及沈積於結構物表面三種形式存在。即自冷卻水系統進入圍阻體大氣的放射性物質可以經由各種機制沈積於圍阻體結構物的表面。圖 B. 3. 2. 1-13 所示為 CsI 於圍阻體各區間沈積的分佈。圖 B. 3. 2. 1-14 所示為圍阻體大氣之 CsI 存在於三種形態的比例。由於存在於氣態的比例極低，故在圖中幾乎顯現不出。如圖所示，當熔融爐心自爐心區域掉落至壓力槽底部區間時，部份 CsI 自冷卻水系統釋出，造成以空浮及沉積型式存在的比例上升。圖 B. 3. 2. 1-15 ~ 圖 B. 3. 2. 1-17 所示為 TeO₂ 的相關結果。

圖 B. 3. 2. 1-18 所示為氫氣產生量及釋放至圍阻體大氣的氫氣量，如圖所示當熔融爐心自爐心區域掉落至壓力槽底部區間時，熔融爐心粹熄所產生的水蒸氣，造成氫氣產生量的瞬間上升，也會將氫氣自冷卻水系統推入圍阻體。在此低壓事故中，八成以上的氫氣都會釋放到圍阻體。圖 B. 3. 2. 1-19 所示為氫氣在圍阻體各區間的分佈，其行為與惰性氣體非常類似【同樣 NEDC-33045P 所發展之爐心熔損評估指引中假設氫氣會均勻的分佈於圍阻體大氣】。圖 B. 3. 2. 1-20 則為一次系統內氣體溫度。

案例四為主蒸汽管路之大破口冷卻水流失事故。表 B. 3. 1 的結果顯示主蒸汽管路破口事故的惡化速率較再循環管路破口事故為慢。圖 B. 3. 2. 1-21 所示為冷卻水系統壓力，圖 B. 3. 2. 1-22 所示為爐心水位，比較圖 B. 3. 2. 1-2 與圖 B. 3. 2. 1-22 可以發現，在主蒸汽管路破口事故中，爐心維持為水覆蓋的時間較長，這是因為破口流率較再循環管路破口事故者為低(見圖 B. 3. 2. 1-3 與圖 B. 3. 2. 1-23)所造成。圖 B. 3. 2. 1-24 為破口水蒸氣流率，圖 B. 3. 2. 1-25 為爐心燃料最高溫度，圖 B. 3. 2. 1-26 為爐心內燃料棒護套氧化的比例，B. 3. 2. 1-27 為圍阻體的壓力。圖 B. 3. 2. 1-28~ B. 3. 2. 1-30 為高揮發性放射性物質自燃料及圍阻體外釋的比例(量)。如表 B. 3. 3 及表 B. 3. 4 所列，在主蒸汽管路破口事故中，放射性物質滯留於冷卻水系統的比例較再循環管路破口事故者為低；原因為主蒸汽管路破口時，爐心到破口的流徑較長，故放射性物質較有機會沉積在反應爐結構物及內部組件的表面上。圖 B. 3. 2. 1-31 為氫氣產生量及釋放至圍阻體的量。比較主蒸汽管路與再循環管路破口事故的結果，前者的氫氣產生量較多，此乃因其比再循環管路破口事故有較多的水/蒸汽與燃料發生鋸水反應之故，至於其滯留於冷卻水系統的比例則在一成左右。

B.3.2.2 中小破口冷卻水流失事故

這類型事故共分析四個案例，案例二、三、五及六，再循環管路及主蒸汽管路各兩個。破口大小為 0.02787 m^2 、 0.0003716 m^2 (再循環管路中小破)及 0.02787 m^2 、 0.0023226 m^2 (主蒸汽管路中小破)，破口(大、中、小)的定義係根據 PRA 的報告。相關圖號：案例二為圖 B.3.2.2-1~B.3.2.2-11，案例五為圖 B.3.2.2-12~B.3.2.2-22，案例三為圖 B.3.2.2-23~B.3.2.2-33，案例六為圖 B.3.2.2-34~B.3.2.2-44。

從圖 B.3.2.2-1 及圖 B.3.2.2-12 可以知道案例二(再循環管路中破)及案例五(主蒸汽管路中破)仍屬於低壓事故。其對應的重要事件之时序仍以再循環管路之中破較主蒸汽管路者為嚴重，壓力槽失效的時間差為 0.3 小時。在高揮發性放射性物質外釋方面，在壓力槽失效時，自燃料外釋的比例案例二較案例五為大，釋放到圍阻體的量也比較大，因此滯留於冷卻水系統的比例(量)相對地降低，此應該是案例二的一次系統壓力較案例五為低之故。但在熔融爐心掉落時，此種情形剛好相反，此應該是熔融爐心掉落時產生大量的水蒸汽助長案例五自燃料外釋的比例及與釋放到圍阻體的量，而使得滯留於冷卻水系統的比例比案例二為低。圖 B.3.2.2-1~B.3.2.2-11 與圖 B.3.2.2-12~B.3.2.2-22 為這兩個案例相關之分析結果圖形，其參數之趨勢都與案例一/案例四相似。

從圖 B.3.2.2-23 及圖 B.3.2.2-34 可以知道案例三(再循環管路小破)及案例五(主蒸汽管路小破)屬於中壓事故。其對應的重要事件之时序仍以再循環管路之小破較主蒸汽管路者為嚴重，壓力槽失效的時間差為 2 小時。值得注意的是，壓力槽失效的時間，再循環管路小破要比再循環管路中破來的早(約 1.6 小時)。在高揮發性放射性物質外釋方面，則與低壓事故的熔融爐心掉落時之外釋情形一致，即在自燃料外釋的比例及與釋放到圍阻體的量方面，案例五要比案例三大，滯留於冷卻水系統的比例則相對地案例五要比案例三小。其可能的原因為中壓事故時，主蒸汽管路小破時因為一次系統的壓力上下變化較大(如圖 B.3.2.2-34 所示)，蒸汽的流動率較水大，因而助長高揮發性放射性物質的外釋。圖 B.3.2.2-23~B.3.2.2-33 與圖 B.3.2.2-34~B.3.2.2-44 為這兩個案例相關之分析結果圖形，其參數之趨勢也都與案例一/案例四相似。

B.3.2.3 電廠全黑事故

圖 B.3.2.3-1 所示為案例七冷卻水系統一次側壓力。雖然反應器的急停造成功率驟降，但因假設 RCIC 及 HPCI 皆無法起動，爐內的蒸汽無法消耗，造成冷卻水系統一次側壓力開始上升。當冷卻水系統壓力上升到安全釋放閥的設定點時，釋放閥啟動洩壓，水蒸汽經釋放閥釋放至圍阻體，圖 B.3.2.3-3 及圖 B.3.2.3-4 所示為釋放閥的水蒸汽及液態水流率。釋放閥的開故與關閉造成冷卻水系統壓力的振盪，直到壓力槽底部破裂，冷卻水系統才完全洩壓。在壓力槽失效之前的兩個壓力突升則各為熔融爐心掉落及爐心支撐板失效。

冷卻水自安全釋放閥的流失，造成爐心水位的下降，圖 B.3.2.3-2 所示為爐心水位的變化。圖 B.3.2.3-5 所示為爐心燃料最高溫度，如圖所示，在爐心裸露後大幅攀升；燃料溫度上升的速率會因鋁-水反應速率的加快(見圖 B.3.2.3-6)而提升。圖 B.3.2.3-7 所示為圍阻體壓力的時變圖，如圖所示，熔融爐心自爐心區域掉落及壓力槽失效會造成圍阻體壓力的上升。

圖 B. 3. 2. 3-8~圖 B. 3. 2. 3-10 所示為高揮發性放射性物質惰性氣體、CSI 及 TeO₂ 自燃料外釋以及釋放至圍阻體的比例(量)。如圖 B. 3. 2. 3-8 所示，惰性氣體的外釋分為兩階段，即燃料護套間隙外釋及燃料丸過熱之外釋。比較圖 B. 3. 2. 3-8 及圖 B. 3. 2. 1-8 可以發現，冷卻水系統壓力不同時，惰性氣體滯留於冷卻水系統的比例(量)也會有很大的差別，即低壓事故者較小，高壓事故者較大。比較圖 B. 3. 2. 3-9，圖 B. 3. 2. 3-10，圖 B. 3. 2. 1-9，圖 B. 3. 2. 1-10 可以發現，CSI 及 TeO₂ 亦有相似的趨勢，但高低壓力間的差異不若惰性氣體來得大(近百萬倍與個位數倍之差)。

圖 B. 3. 2. 3-11 所示為惰性氣體在圍阻體各區間的分佈，與圖 B. 3. 2. 1-11 比較，惰性氣體在圍阻體各區間的分佈與再循環管路大破口冷卻水流失事故者的差異不大。圖 B. 3. 2. 3-12~圖 B. 3. 2. 3-17 之 CSI 及 TeO₂ 在圍阻體各區間的分佈亦有相似的趨勢。

圖 B. 3. 2. 3-18 所示為氫氣產生量及釋放至圍阻體的量，在此高壓事故中，幾乎所有的氫氣都會釋放到圍阻體，如圖所示，熔融爐心掉落時氫氣產生量會於瞬間驟升。

圖 B. 3. 2. 3-20 所示為電廠全黑事故中，一次系統內氫體溫度，如圖所示，在爐心裸露後，氣體溫度開始攀升，接著於熔融爐心掉落、壓力槽乾涸及壓力槽失效各有程度大小不同的上升。

案例八之電廠全黑事故(RCIC OFF AND ADS MANUAL ON)的 MAAP 分析結果示於圖 B. 3. 2. 3-21~圖 B. 3. 2. 3-36 各參數的趨勢與案例七相當類似。比較圖 B. 3. 2. 3-21 與圖 B. 3. 2. 3-1 顯示，ADS 動作可以有效且很快的將反應爐的高壓力迅速的降低，但因假設 RCIC 及 HPCI 皆不可用，因此緩和事故的嚴重性的效果有限。如表 B. 3. 1 所列。案例八之重要事件時序除了 CORE UNCOVERY 及 H₂ GENERATED FROM CORE 外，都略晚於案例七的重要時序，但壓力槽失效的時間差異較大。如表 B. 3. 3 所示，案例八之高揮發性放射產物自燃料外釋、釋放到圍阻體大氣的比例高於案例七的比例，但冷卻水系統的滯留效應卻低於案例七，此也是是 ADS 動作的關係。另一項較大的差異為外釋持續的時間，案例八持續時間小於案例七持續的時間。

案例九之電廠全黑事故與案例七類似，但假設 RCIC 可用。因為 RCIC 只運轉 8 小時(DC 電源的限制)，因此在 RCIC 停止運轉後，反應爐壓力及水位的圖形(如圖 B. 3. 2. 3-37~圖 B. 3. 2. 3-38 所示)在 8 小時之後皆與案例七者類似。如表 B-2 所示，因為有 RCIC 補水，因此重要事件的時序整個往後延後，而限於前述 RCIC 的運轉時間，壓力槽失效還是在事故開始後 18.287 小時發生。其他 MAAP 分析結果各參數的趨勢圖(圖 B. 3. 2. 3-39~圖 B. 3. 2. 3-46)與案例七類似。圖 B. 3. 2. 3-47 則為 CST 水的體積之時變圖。

B. 3. 2. 4 圍阻體噴灑之影響

本分析主要是探討圍阻體噴灑對圍阻體大氣空浮的影響。

案例十亦為再循環管路之大破口冷卻水流失事故，但假設圍阻體噴灑系統於熔融爐心自爐心區域的掉落時起動噴灑(且只有一串及乾井噴灑)。案例分析之冷卻水系統熱水流反應的結果與案例四大致一樣，不再於此贅述。圖 B. 3. 2. 4-1~圖 B. 3. 2. 4-3 所示為高揮發性放射性物質自燃料外釋以及釋放至圍阻體的比例

(量)。與案例一之結果相比較，本案例中滯留於冷卻水系統的比例(量)較低，這是因為圍阻體噴灑系統的運轉，降低了圍阻體的壓力，使得冷卻水系統破口流率變大，帶出了較多的放射性物質。圖 B. 3. 2. 4-4 所示為案例十與案例一的圍阻體壓力比較，圍阻體壓力在圍阻體噴灑系統起動後明顯的降低。圖 B. 3. 2. 4-5~圖 B. 3. 2. 4-8 所示為圍阻體噴灑系統起動後對圍阻體內 CSI 及 TeO₂ 存在形態(氣態與空浮態)的影響。如圖所示，除了氣態 TeO₂ 的影響較小外，圍阻體噴灑系統可以有效地降低圍阻體內之氣態與空浮態之放射性物質。根據 MAAP 運跑的資料顯示圍阻體噴灑系統的除污因素可達 70(FOR CSI, 1.52/0.0215)。圖 B. 3. 2. 4-9 所示為氫氣產生量及釋放至圍阻體的量。由表五可知，當圍阻體噴灑系統運轉時，會造成氫氣產生量的上升。

案例十二為電廠全黑事故，RCIC 不可用，但亦假設圍阻體噴灑系統於熔融爐心自爐心區域的掉落時起動噴灑(且只有一串及乾井噴灑)。案例分析之冷卻水系統熱水流反應的結果與案例七大致一樣。與上面再循環管路大破口冷卻水流失事故一樣，在壓力槽失效時，放射性物質滯留於冷卻水系統的比例較案例七者為低(見表 B. 3. 3、圖 B. 3. 2. 4-10~圖 B. 3. 2. 4-12)。圍阻體壓力也在圍阻體噴灑系統起動後明顯的降低(圖 B. 3. 2. 4-13)。另外圖 B. 3. 2. 4-14~圖 B. 3. 2. 4-17 所示為圍阻體噴灑系統起動後對圍阻體內 CSI 及 TeO₂ 存在形態(氣態與空浮態)的影響。同樣地，阻體噴灑系統可以有效地降低圍阻體內之氣態與空浮態之放射性物質。圖 B. 3. 2. 4-18 所示為氫氣產生量及釋放至圍阻體的量。由表 B. 3. 5 可知，當圍阻體噴灑系統運轉時，會造成氫氣產生量的上升。

B. 3. 2. 5 爐心注水之影響

本分析探討爐心注水的影響，主要是指對氫氣產生量的衝擊。案例十一及案例十三均假設爐心已有部份熔損時起動注水。案例十三為高壓事故序列，高壓爐心注水於熔融爐心掉落前 5 分鐘起動，結果顯示，氫氣產生量與釋放到圍阻體氫氣量有比案例七者明顯的增加(見圖 B. 3. 2. 5-1 及圖 B. 3. 2. 5-2)。案例十一為低壓事故序列，低壓爐心注水於熔融爐心掉落前 10 分鐘起動，結果顯示，沒有發生熔融爐心掉落及壓力槽失效而得以終止事故。不過仍根據 MAAP 運跑資料做一比較，取案例一熔融爐心掉落的時間點 0.8 小時為參考點，案例十一已將氫氣產生量從案例一的 130Kg 減少到 121Kg，而在 1.5 小時時即達到飽和 146 Kg 不會再增加。其與案例一之比較圖如圖 B. 3. 2. 5-3 及圖 B. 3. 2. 5-4 所示。

表 B.1 MAAP 4.04 核一廠圍阻體之控制體積大小

MAAP 計算區塊 (圍阻體之控制體積名稱)	體積 (立方公尺)
Pedestal	320.96
Drywell	3925.2
Downcomer	496.5
Torus	4898.9
Reactor Building	34830.0

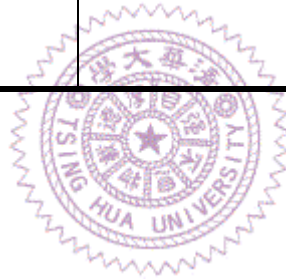


表 B.3.1 事故重要事件時序(小時)

	Case 1 Large LOCA (RecircLine)	Case 2 Medium LOCA (RecircLine)	Case 3 Small LOCA (RecircLine)
Core Uncovery	0.00214(7.703 sec)	0.046(165.161sec)	0.557(2006.483sec)
H2 GENERATED FROM CORE	0.00123(4.438 sec)	0.104(375.161sec)	0.793(2853.438sec)
GAP RELEASE	0.0558(200.708sec)	0.180(648.441sec)	1.022(3680.467sec)
START OF ZR CLADDING RELOCATION	0.487(1753.639sec)	0.667(2402sec)	1.381(4972.466sec)
RELOCATION OF CORE MATERIALS	0.80(2880.863sec)	1.056(3800sec)	1.924(6925.416sec)
RPV FAILED	2.823(10165.271sec)	5.317(19141sec)	3.781(13612.985sec)
	Case 4 Large LOCA (MSL)	Case 5 Medium LOCA (MSL)	Case 6 Small LOCA (MSL)
Core Uncovery	0.198(714sec)	0.387(1394sec)	0.903(3251sec)
H2 GENERATED FROM CORE	0.373(1343sec)	0.552(1988sec)	1.149(4135sec)
GAP RELEASE	0.513(1847sec)	0.699(2517sec)	1.394(5017sec)
START OF ZR CLADDING RELOCATION	0.830(2987sec)	1.318(4746sec)	1.814(6530sec)
RELOCATION OF CORE MATERIALS	1.474(5307 sec)	1.754(6313sec)	2.454(8834sec)
RPV FAILED	4.913(17687sec)	5.61(20187sec)	5.848(21052sec)
	Case 7 SBO(RCIC Off)	Case 8 SBO (RCIC Off) (ADS MAN ON)	Case 9 SBO(RCIC On)
Core Uncovery	0.761	0.761	11.642
H2 GENERATED FROM CORE	1.038	1.038	12.436
GAP RELEASE	1.297	1.318	12.942
START OF ZR CLADDING RELOCATION	1.691	2.051	13.559
RELOCATION OF CORE MATERIALS	2.298	2.51	17.769
RPV FAILED	4.247	5.8	18.287

表 B.3.1 事故重要事件時序(續)

	Case 10 Large LOCA CTMT SPRAY (RECIRC)	Case 11 Large LOCA WITH INJECTION (RECIRC)	Case12 SBO RCIC OFF WITH CTMT SPRAY
Core Uncovery	0.00214(7.703 sec)	0.00214(7.703 sec)	0.761
H2 GENERATED FROM CORE	0.00123(4.438 sec)	0.00123(4.438 sec)	1.038
GAP RELEASE	0.0558(200.708sec)	0.0558(200.708sec)	1.297
START OF ZR CLADDING RELOCATION	0.487(1753.639sec)	0.487(1753.639sec)	1.691
RELOCATION OF CORE MATERIALS	0.80(2880.863sec)	--	2.41
RPV FAILED	2.290(8243.665)	--	5.057
	Case 13 SBO RCIC OFF WITH INJECTION		
Core Uncovery	0.761		
H2 GENERATED FROM CORE	1.038		
GAP RELEASE	1.297		
START OF ZR CLADDING RELOCATION	1.691		
RELOCATION OF CORE MATERIALS	18.241		
RPV FAILED	18.716		

表 B.3.2 放射性物質外釋比例(壓力槽失效)

EVENT	LARGE LOCA IN RECIRC LINE			SBO WITHOUT RCIC		
	CASE 2			CASE 7		
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment (%)	RCS Retention Fraction(%)	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)
Noble Gas	100	100	--	100	98.9	1.09
CsI	91.1	70.19	29.81	81.6	20.0	79.99
CsOH	91.09	58.46	41.54	81.56	19.95	80.05
Te ₂ /TeO ₂	95.4	104.47(註 1)	20.33	28.24	18.21	106.59(註 2)
SrO	0.13	72.48	27.7	0.05	10.0	90.0
Mo	3.09E-5	0	0	1.16E-5	0	0
BaO	0.342	79.43	20.77	0.09	10.16	90.18
Le ₂ O ₃ *	1.585E-5	0	0	4.57E-5	0	0
CeO ₂	2.68E-5	95.6	3.07	8.83E-6	3.68	30.52
Sb	38.3	82.25	17.74	1.88	77.2	22.8
UO ₂	2.53E-5	0	0	4.599E-5	0	0

(註 1)：根據 MAAP 運轉資料，TeO₂ 在爐心的初始值為 0，Te₂ 則為 35.17266 Kg。事故進行中，TeO₂ 在爐心的值一直維持在 0，在 RCS 的值從 0 增加為 0.65 Kg 左右，在 CTMT 的值從 0 增加為 3.45 Kg 左右，在 Corium Pool 的值則維持在 0。Te₂ 則變化如後，在爐心的值從 35.17266 Kg 減到 0，在 RCS 的值則維持在 0，在 CTMT 的值維持在 0，在 Corium Pool 的值則從 0 增加為 32 Kg 左右。Release to Containment 的比值為在 CTMT 的值除以 Release From Fuel 的值。其中 Release From Fuel 的值為 35.17266 Kg 扣除(1)Te₂/TeO₂ 在爐心的值及(2)Te₂/TeO₂ 在 Corium Pool 的值。因此會有在 CTMT 的值大於 Release From Fuel 的值之情形，而使比值超過 100%。

(註 2)：RCS Retention 比例則為 Te₂ 在 RCS 的值及 TeO₂ 在 RCS 的值之和除以 Release From Fuel 的值，因此也會有此兩值之和大於 Release From Fuel 的值之情形，而使比值超過 100%。

表 B. 3. 3 高揮發性物質外釋比例(壓力槽失效)

	Case 1 Large LOCA (RecircLine)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	100	2.64E-6	0.083(300S)	0.834
CsI	42.3	38.41	61.59	0.25(900S)	0.668
CsOH	42.29	37.8	62.2	0.25(900S)	0.668
Te2/TeO2	26.9	64.14	60.70	0.33(1200S)	0.584
	Case 2 Medium LOCA (RecircLine)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	99.99	4.18E-3	0.25(900S)	1.335
CsI	91.1	70.19	29.81	0.337(1201S)	1.251
CsOH	91.09	58.46	41.54	0.337(1201S)	1.251
Te2/TeO2	75.4	104.47	20.33	0.50(1801S)	2.752
	Case 3 Small LOCA (RecircLine)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	99.16	0.84	1.085(3906S)	1.92
CsI	78.3	22.91	77.08	1.252(4507S)	1.753
CsOH	78.33	22.81	77.19	1.252(4507S)	1.753
Te2/TeO2	48.1	33.32	91.48	1.335(4807S)	1.753
	Case 4 Large LOCA (MSL)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	99.99	0.00286	0.5836(2101)	2.168
CsI	90.5	68.41	31.59	0.75(2701)	2.00
CsOH	90.478	68.06	31.94	0.75(2701)	2.00
Te2/TeO2	71.5	98.3	26.5	0.83(3001)	1.92

表 B. 3. 3 高揮發性物質外釋比例(壓力槽失效)

Case 5 Medium LOCA (MSL)

Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment (%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	99.99	1.64E-3	0.75(2701S)	2.21
CsI	87.2	66.19	33.81	0.917(3301S)	2.043
CsOH	87.22	65.2	34.8	0.917(3301S)	2.043
TeO ₂	65.0	108.48	16.32	1.00(3601S)	2.00

Case 6 Small LOCA (MSL)

Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment (%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	100	8.15E-6	1.50(5402S)	1.696
CsI	81.0	62.07	37.92	1.667(6002S)	1.502
CsOH	81.03	41.64	58.36	1.667(6002S)	1.502
TeO ₂	49.8	57.33	67.48	1.75(6302S)	1.481

Case 7 SBO WITH RCIC Off

Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment (%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	98.66	1.34	1.36(4808S)	2.42
CsI	86.7	21.4	78.59	1.59(5709S)	2.17
CsOH	81.03	22.82	84.22	1.59(5709S)	2.17
TeO ₂	61.1	31.12	93.68	1.67(6010S)	2.09

Case 8 SBO WITH RCIC Off ADS MAN ON

Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment (%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	100	5.46E-7	1.42(5106)	1.84
CsI	83.8	71.09	28.9	1.59(5706)	1.75
CsOH	83.8	71.09	28.93	1.59(5706)	1.75
TeO ₂	62.3	118.95	5.86	1.67(6006)	2.17

表 B. 3. 3 高揮發性物質外釋比例(壓力槽失效)(續)

Case 9 SBO WITH RCIC On					
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment (%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	99.28	0.72	13.02(46856S)	4.75
CsI	86.7	8.47	91.52	13.27(47757S)	4.50
CsOH	86.66	8.4	91.58	13.27(47757S)	4.50
TeO ₂	70.0	19.3	105.51	13.43(48357S)	4.4
Case 10 RECIRC Large LOCA WITH CTMT SPRAY					
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	99.76	0.24	0.08(300S)	0.81
CsI	54.3	50.79	49.21	0.25(900S)	0.65
CsOH	54.32	50.78	49.22	0.25(900S)	0.65
TeO ₂	9.16	104.65	20.16	0.33(1200S)	0.58
Case 11 RECIRC Large LOCA WITH INJECTION					
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	NA	NA	NA	NA	NA
CsI	NA	NA	NA	NA	NA
CsOH	NA	NA	NA	NA	NA
TeO ₂	NA	NA	NA	NA	NA
	NA	NA	NA	NA	NA
Case12 SBO RCIC OFF WITH CTMT SPRAY					
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	100	4.92E-4	1.34	2.42
CsI	46.4	39.04	60.96	1.67	2.17
CsOH	46.4	26.73	73.27	1.67	2.17
TeO ₂	11.9	35.02	89.79	1.84	2.09

表 B. 3. 3 高揮發性物質外釋比例(壓力槽失效)(續)

Species	Case 13 SBO RCIC OFF WITH INJECTION				
	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)	Release Duration(hr)
Noble Gas	100	99.36	0.64	1.34	2.42
CsI	91.8	20.2	79.8	1.67	2.17
CsOH	91.3	16.33	83.67	1.67	2.17
TeO ₂	82.1	22.58	102.22	1.75	2.09



表 B. 3. 4 高揮發性物質外釋比例(Relocation)

Case 1 Large LOCA (RecircLine)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	57.30	99.42	0.57	0.083
CsI	40.6	34.62	65.38	0.25
CsOH	40.58	34.62	65.38	0.25
Te2/TeO2	2.57	60.85	63.98	0.33
Case 2 Medium LOCA (RecircLine)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	49.9	83.01	16.98	0.25
CsI	36.7	20.54	79.46	0.337
CsOH	36.68	20.54	79.46	0.337
TeO2	2.06	21.08	103.77	0.50
Case 3 Small LOCA (RecircLine)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	42.93	32.16	67.84	1.085
CsI	39.9	3.5	96.46	1.252
CsOH	39.88	3.54	96.46	1.252
TeO2	15.0	3.73	121.08	1.335
Case 4 Large LOCA (MSL)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	47.48	86.65	13.35	0.5836(2101sec)
CsI	40.3	34.38	65.62	0.75(2701sec)
CsOH	40.34	34.38	65.62	0.75(2701sec)
Te2/TeO2	12.3	44.75	80.06	0.83(3001sec)
Case 5 Medium LOCA (MSL)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	46.93	87.91	12.1	0.75
CsI	44.1	39.88	60.12	0.917
CsOH	44.14	39.88	60.12	0.917
TeO2	3.79	45.8	79.01	1.00

表 B. 3. 4 高揮發性物質外釋比例(Relocation)(續)

Case 6 Small LOCA (MSL)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	57.87	86.78	13.22	1.50
CsI & RbI	51.4	31.63	68.37	1.667
CsOH & RbOH	51.39	31.63	68.37	1.667
TeO ₂	14.3	39.0	85.8	1.75
Case 7 SBO WITH RCIC Off				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	43.51	37.31	62.69	1.34
CsI	39.9	4.9	95.09	1.59
CsOH	39.88	4.9	95.09	1.59
TeO ₂	10.1	7.18	117.63	1.67
Case 8 SBO(ADS MAN ON)(RCIC Off)				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	40.79	78.36	21.64	1.42
CsI	37.7	30.26	69.74	1.59
CsOH	37.65	30.26	69.74	1.59
TeO ₂	2.05	35.29	89.55	1.67
Case 9 SBO WITH RCIC On				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	85.2	78.61	21.39	1.30
CsI	84.9	6.5	93.5	1.33
CsOH	84.94	6.5	93.5	1.33
TeO ₂	64.1	8.71	116.09	1.35
Case 10 RECIRC Large LOCA WITH CTMT SPRAY				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	44.93	99.53	0.47	0.08(300S)
CsI	41.2	35.29	64.7	0.25(900S)

表 B.3.4 高揮發性物質外釋比例(Relocation)(續)

CsOH	41.23	35.3	64.69	0.25(900S)
TeO ₂	2.73	63.66	61.17	3.33(1200S)
Case 11 RECIRC Large LOCA WITH INJECTION				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	--	--	--	0.08(300S)
CsI	--	--	--	0.25(900S)
CsOH	--	--	--	0.25(900S)
TeO ₂	--	--	--	3.33(1200S)
Case12 SBO RCIC OFF WITH CTMT SPRAY				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	48.0	99.16	0.84	1.34
CsI	44.8	21.74	78.26	1.67
CsOH	44.8	21.74	75.6	1.67
TeO ₂	11.6	30.0	94.8	1.84
Case 13 SBO RCIC OFF WITH INJECTION				
Species	Release From Fuel(%)	Release to Containment(%)	RCS Retention Fraction(%)	First Release Time(hr)
Noble Gas	92.1	96.52	3.48	1.34
CsI	89.5	14.02	85.94	1.67
CsOH	89.5	12.46	86.57	1.67
TeO ₂	83.5	29.0	95.76	1.84

表 B.3.5 氫氣產生量與外釋比例

CASE		AT CORE RELOCATION TIME			
		Release From Fuel(Kg)	Release to Containment(Kg)	(%)	RCS Retention Fraction(%)
1	Large LOCA (RecircLine)	130	112	86.15	13.85
2	Medium LOCA (RecircLine)	124	101	81.45	18.55
3	Small LOCA (RecircLine)	246	234	95.12	4.88
4	Large LOCA (MSL)	158	144	91.14	8.86
5	Medium LOCA (MSL)	277	250	90.25	9.75
6	Small LOCA (MSL)	224	198	88.39	11.61
7	SBO (RCIC Off)	240	239	99.58	0.42
8	SBO (RCIC Off) (ADS MAN ON)	228	226	99.12	0.88
9	SBO (RCIC On)	271	267	98.52	1.42
10	Large LOCA (RecircLine) WITH CTMT SPRAY	193	180	93.26	6.74
11	Large LOCA (RecircLine) WITH INJECTION	121*	110	91.66	8.34
12	SBO RCIC OFF WITH CTMT SPRAY	257	254	98.83	1.17
13	SBO (RCIC OFF) WITH INJECTION	337	329	97.62	3.38
CASE		AT RPV FAILED TIME			
		Release From Fuel(Kg)	Release to Containment(Kg)	(%)	RCS Retention Fraction(%)
1	Large LOCA (RecircLine)	197	155	78.68	21.32
2	Medium LOCA (RecircLine)	245	233	95	5
3	Small LOCA (RecircLine)	304	279	91.78	8.22
4	Large LOCA (MSL)	284	278	97.89	2.11
5	Medium LOCA (MSL)	342	337	98.54	1.46
6	Small LOCA (MSL)	300	289	96.33	3.67
7	SBO (RCIC Off)	329	317	96.35	3.65

表 B. 3. 5 氫氣產生量與外釋比例(續)

8	SBO (RCIC Off) (ADS MAN ON)	304	298	98.03	1.97
9	SBO (RCIC On)	401	392	97.76	2.24
10	Large LOCA (RecircLine) WITH CTMT SPRAY	282	249	88.30	11.70
11	Large LOCA (RecircLine) WITH INJECTION	146	126	86.3	13.7
12	SBO RCIC OFF) WITH CTMT SPRAY	358	346	96.64	3.36
13	SBO (RCIC OFF) WITH INJECTION	406	394	97.04	2.94



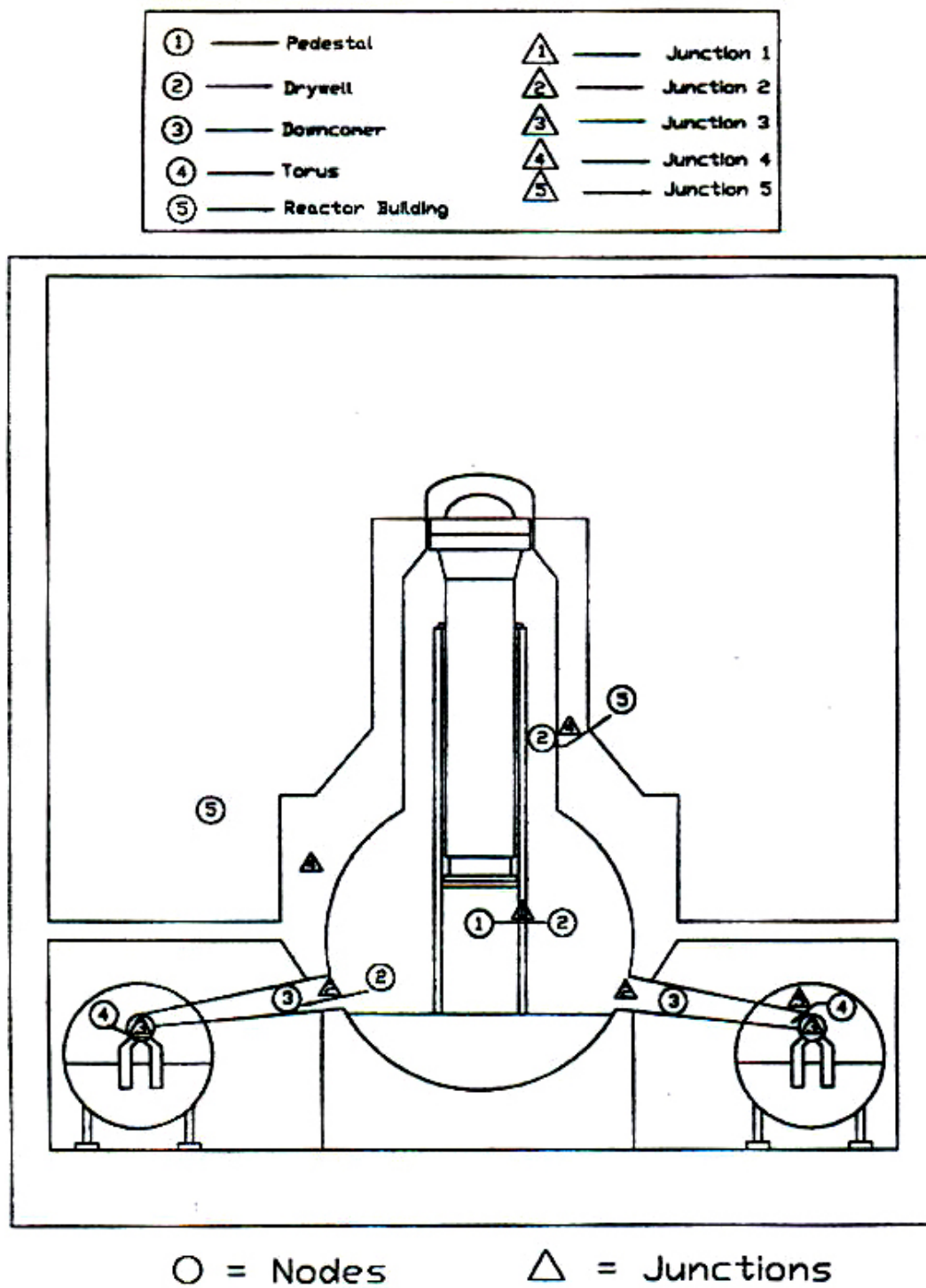
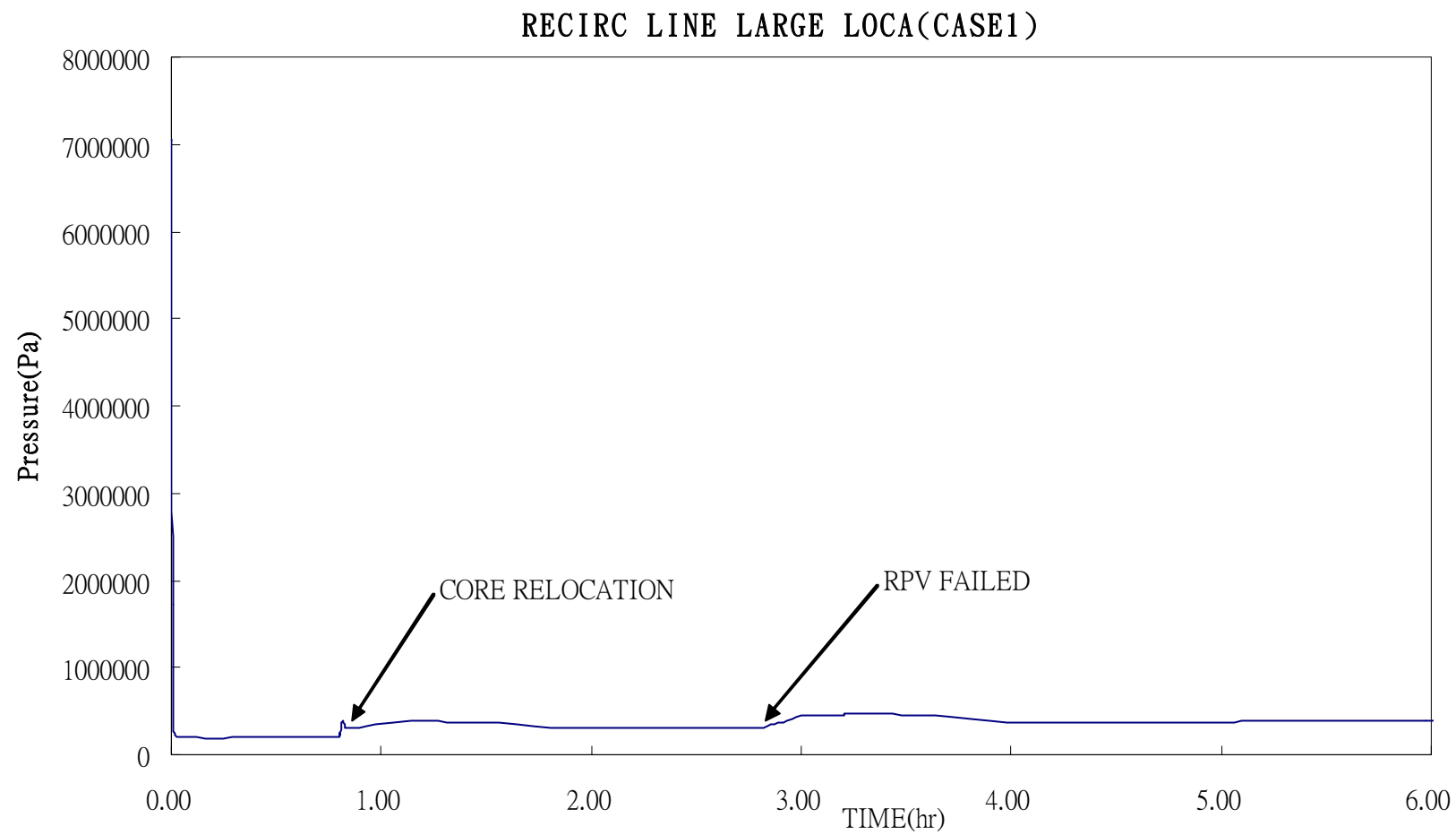
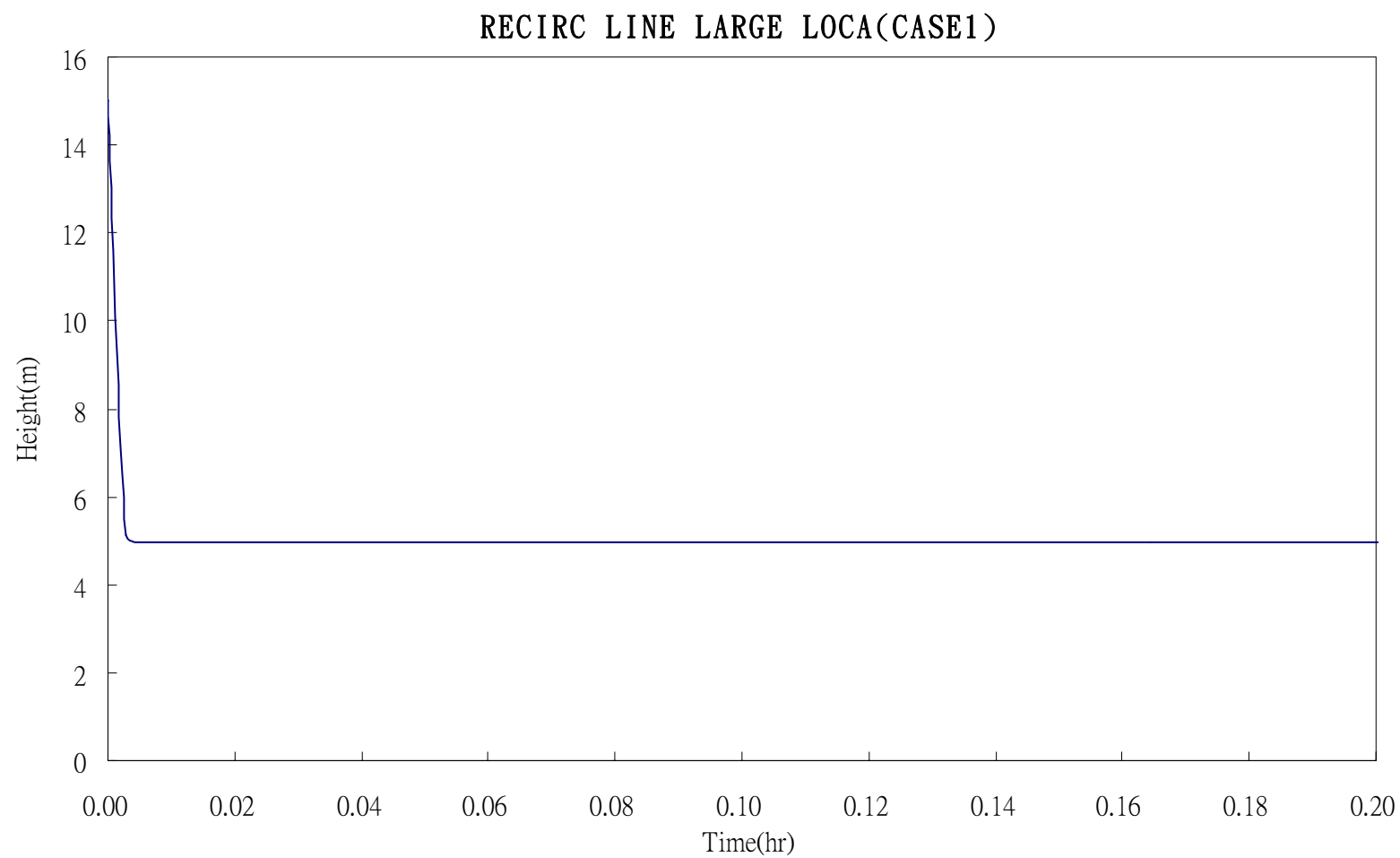


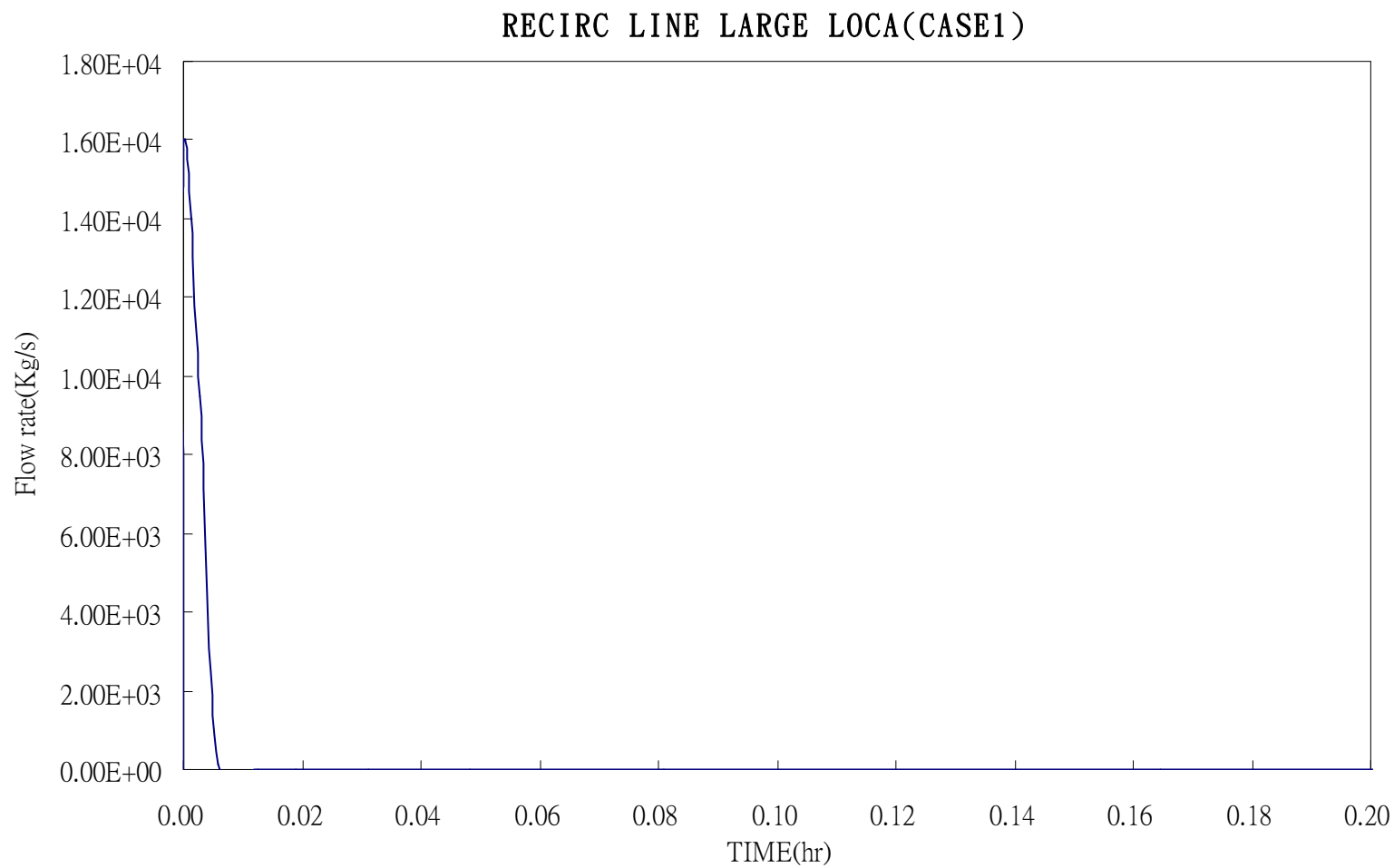
圖 B.1 核一廠圍阻體之控制體積(MAAP 4 輸入數據)



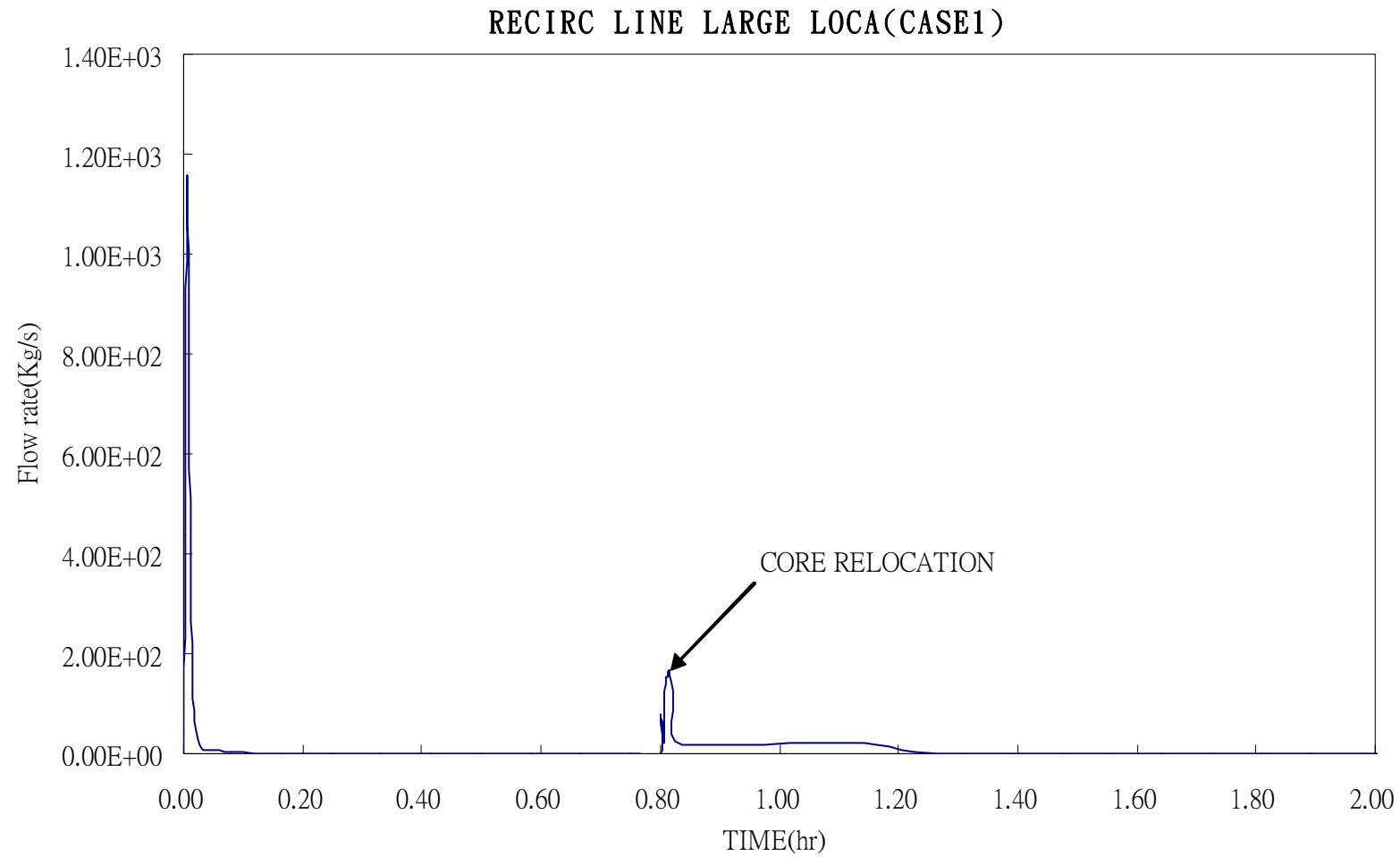
圖B.3.2.1-1 一次系統壓力



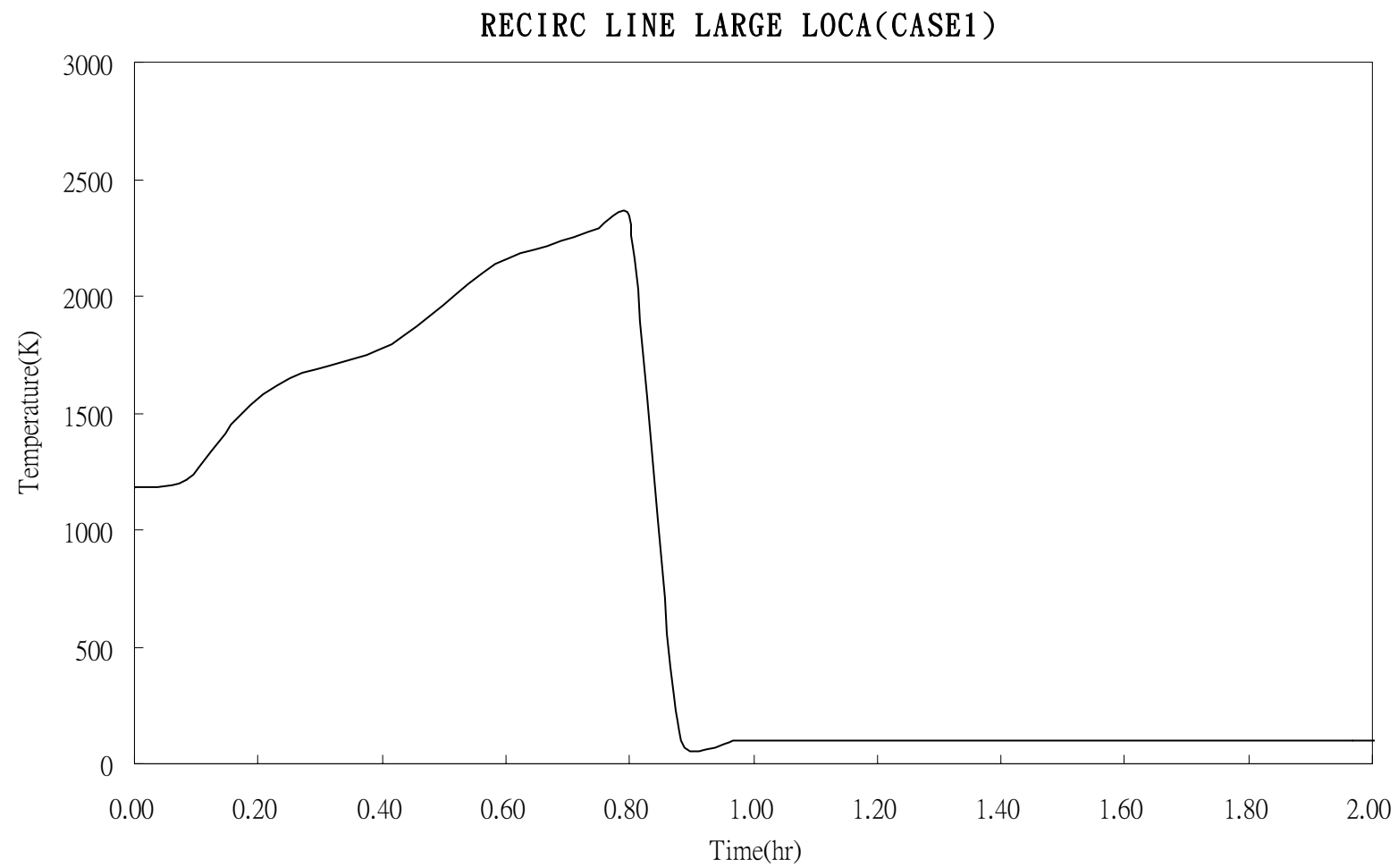
圖B. 3. 2. 1-2 爐心水位



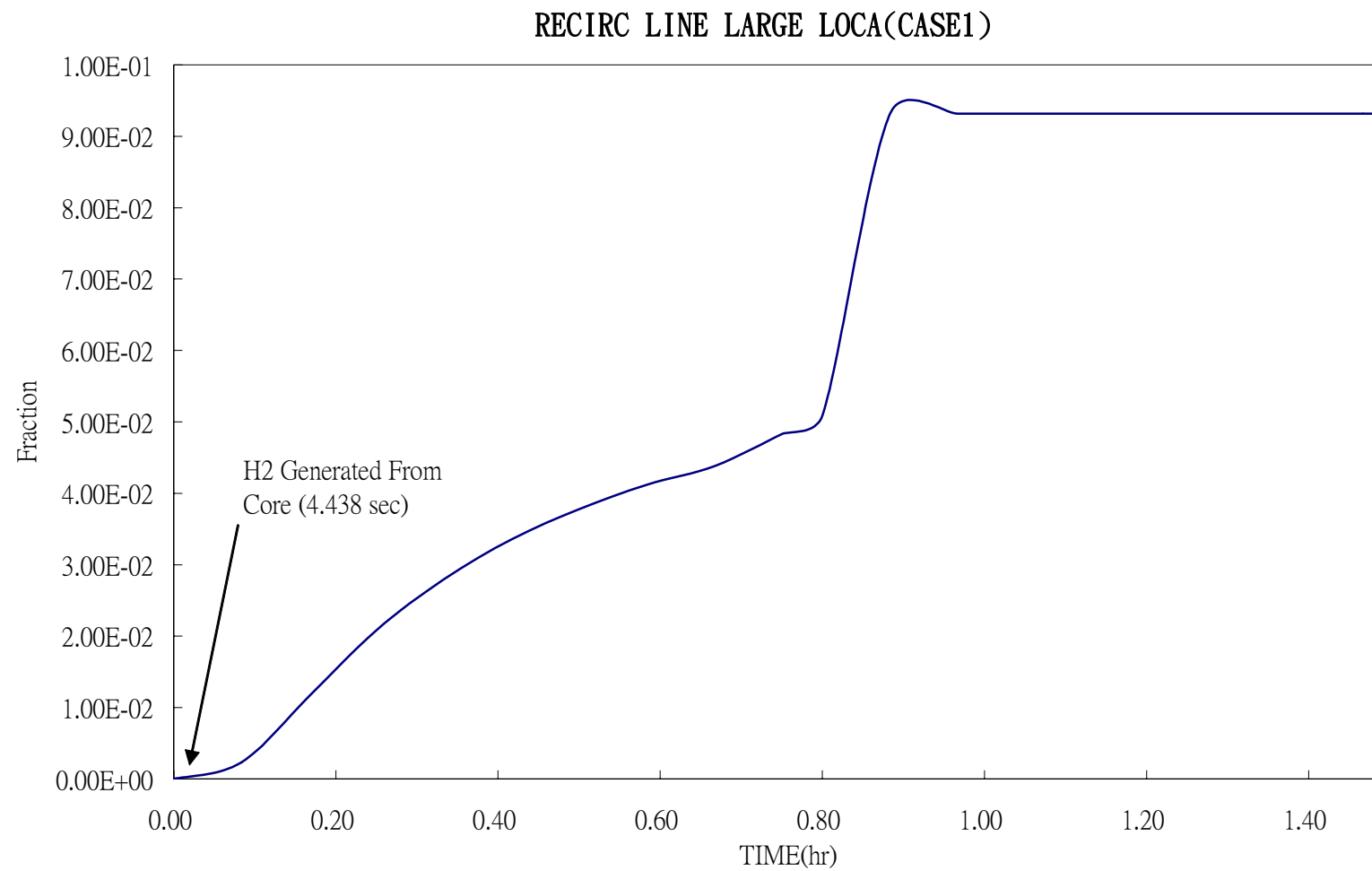
圖B. 3. 2. 1-3 破口冷卻水流率



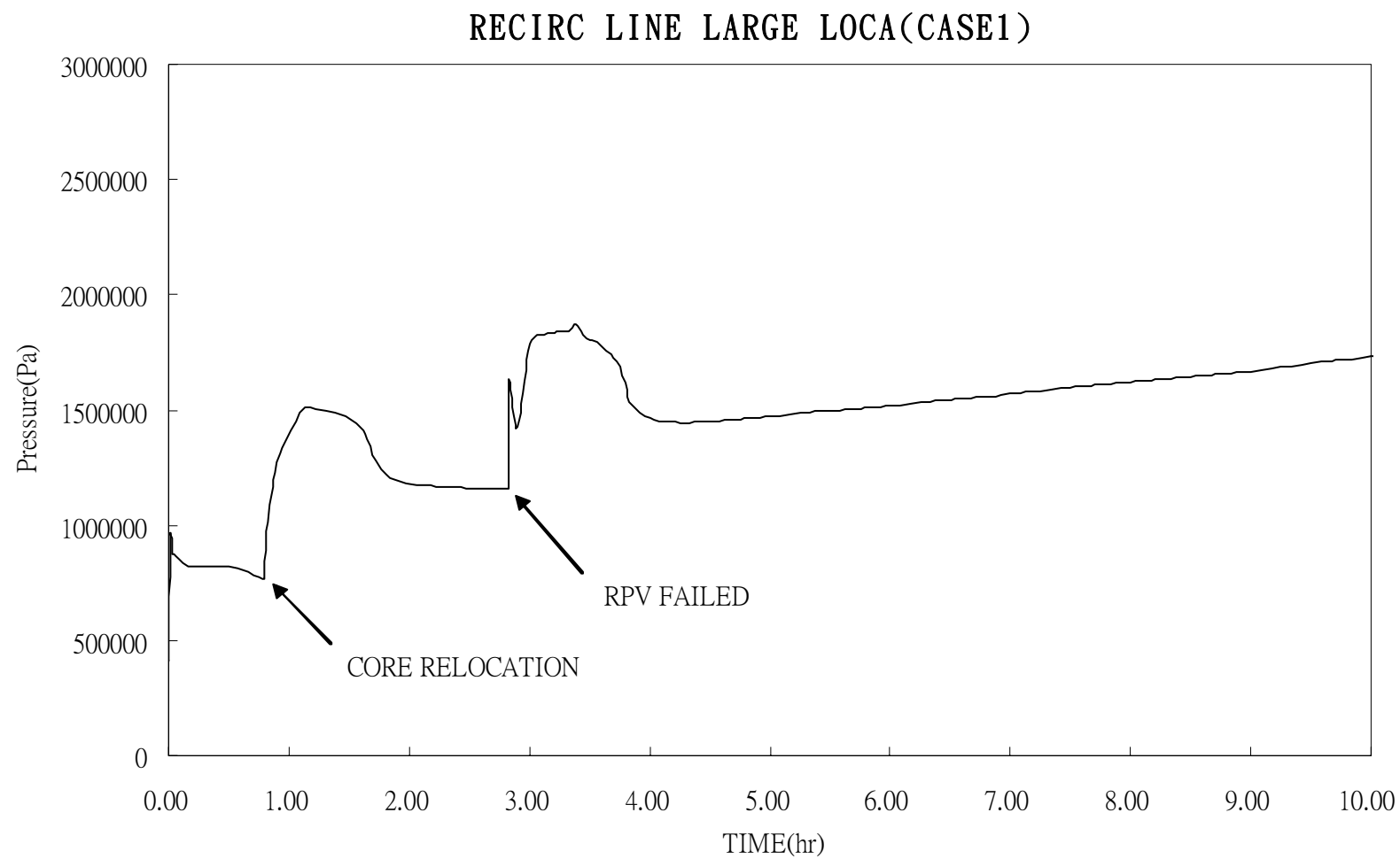
圖B.3.2.1-4 破口水蒸汽流率



圖B. 3. 2. 1-5 爐心燃料最高溫度



圖B. 3. 2. 1-6 爐心燃料棒護套氧化比例



圖B. 3. 2. 1-7 圍阻體壓力

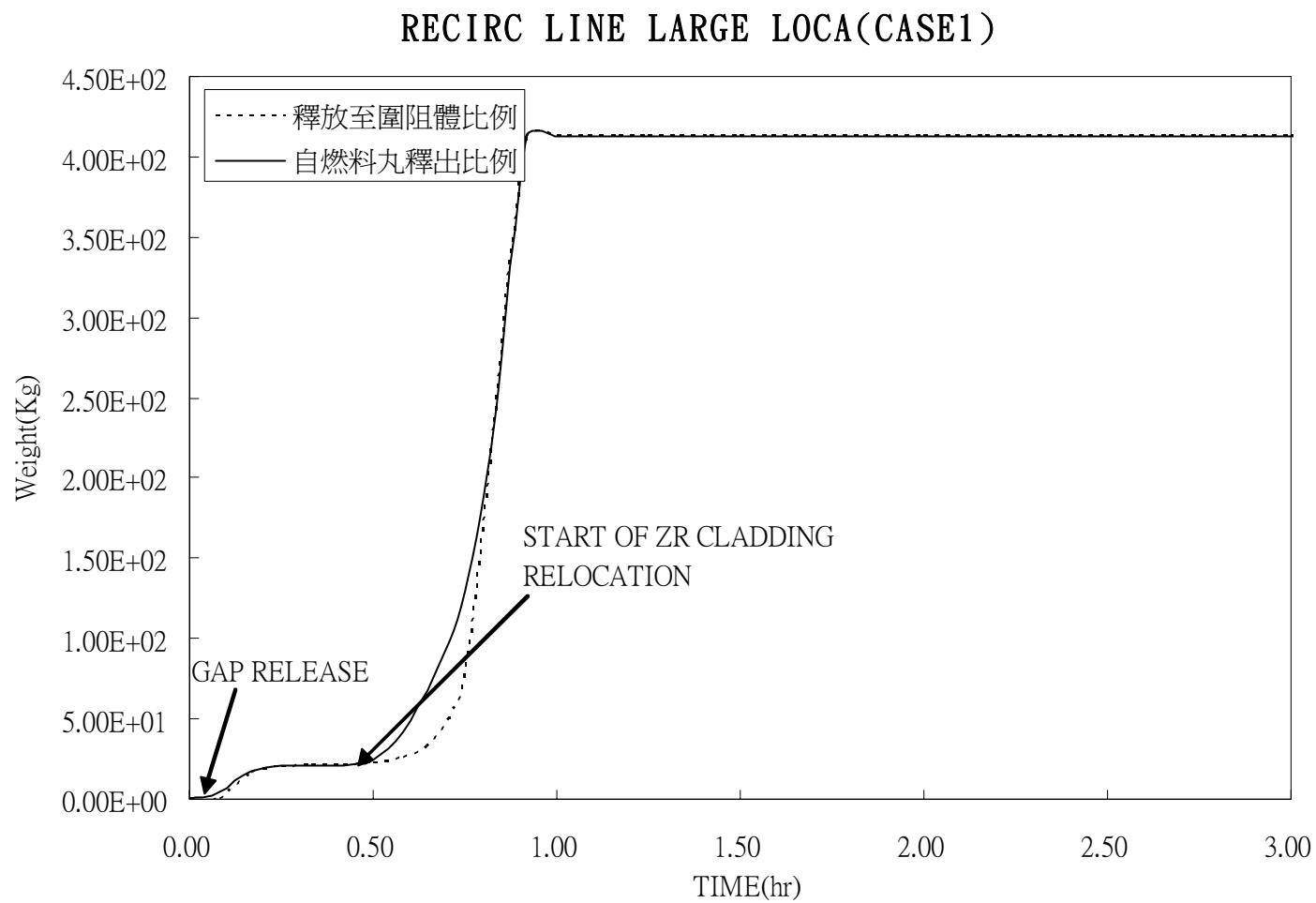
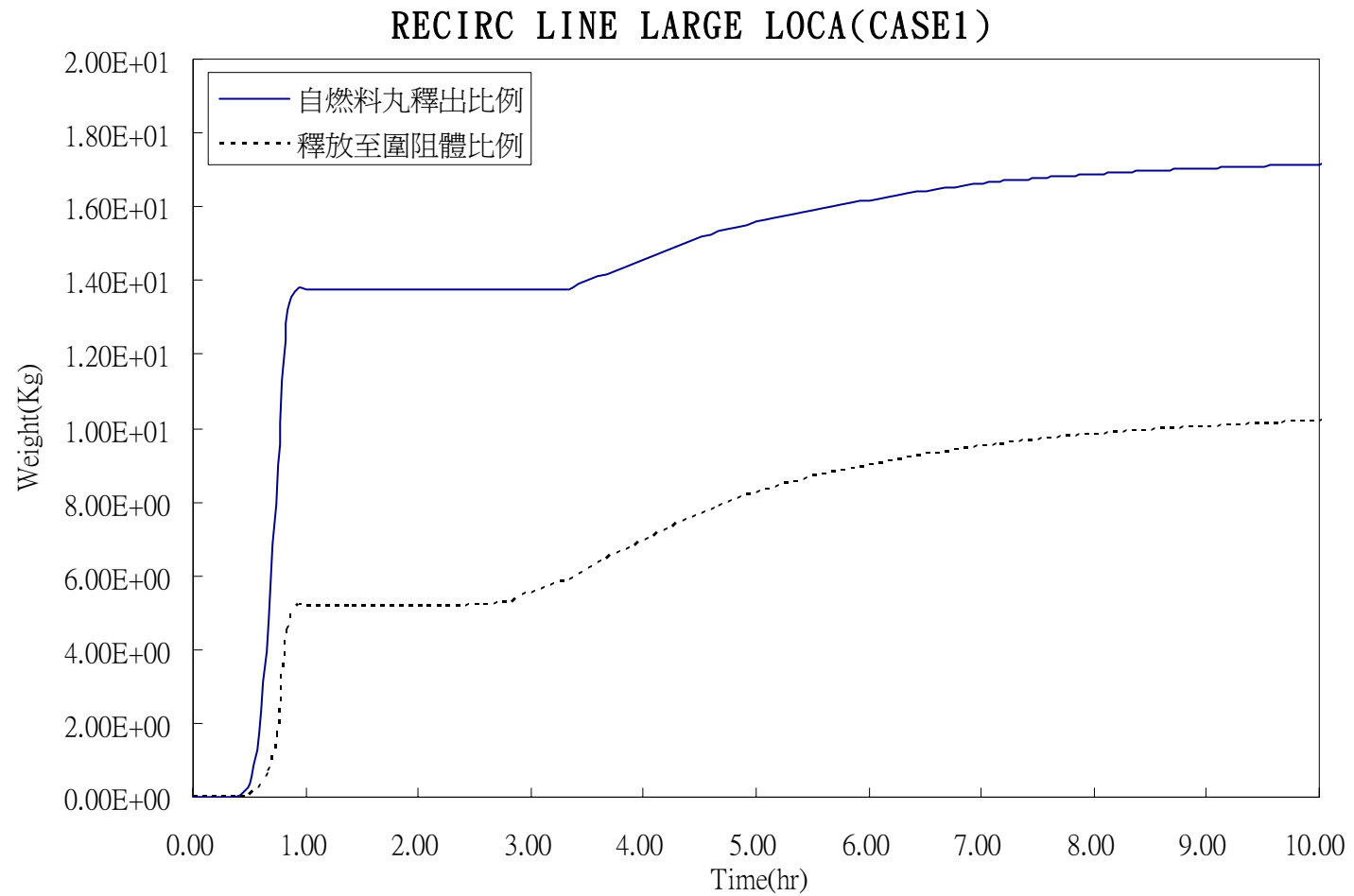


圖 B. 3. 2. 1-8 惰性氣體外釋狀況



圖B. 3. 2. 1-9 CSI外釋狀況

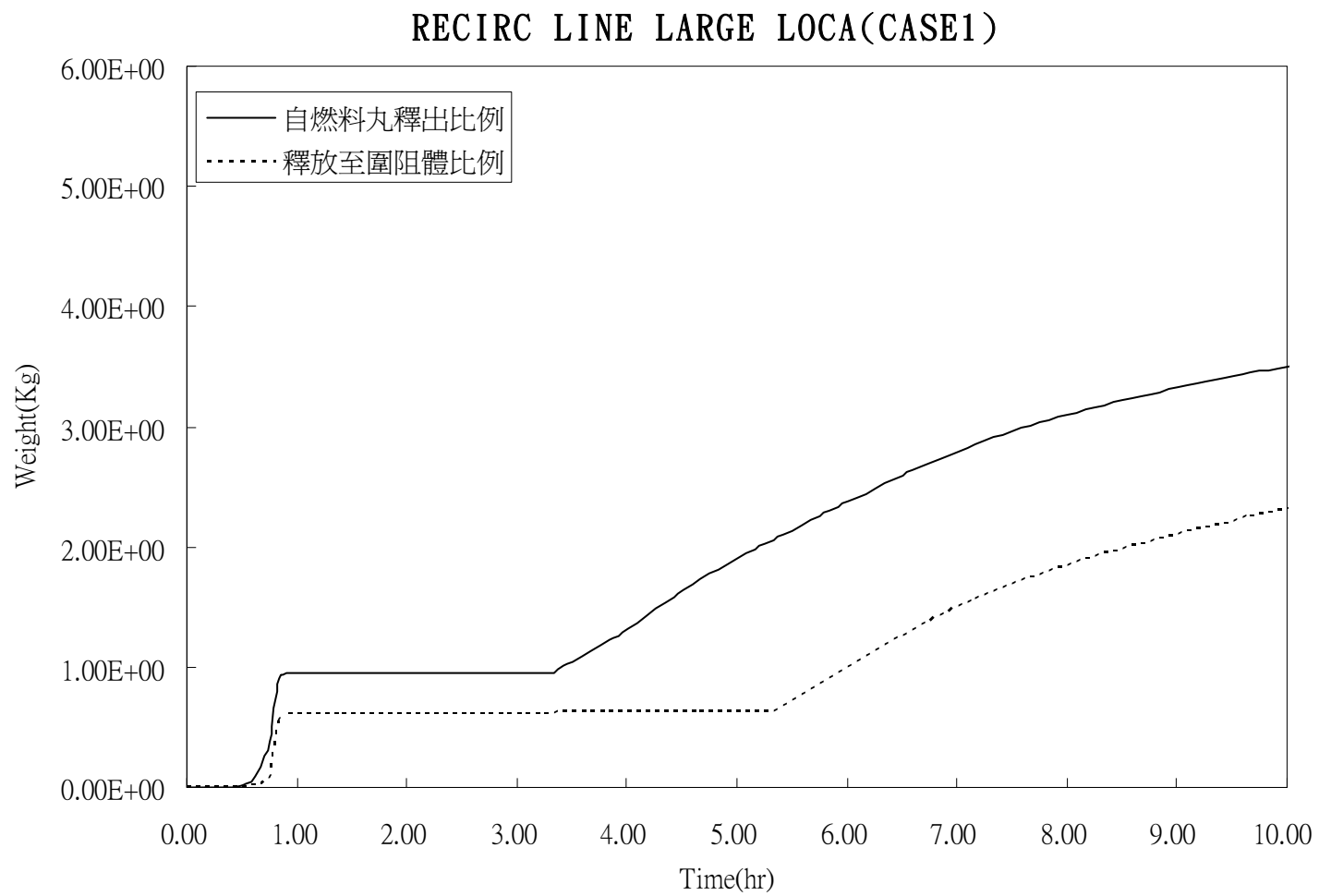
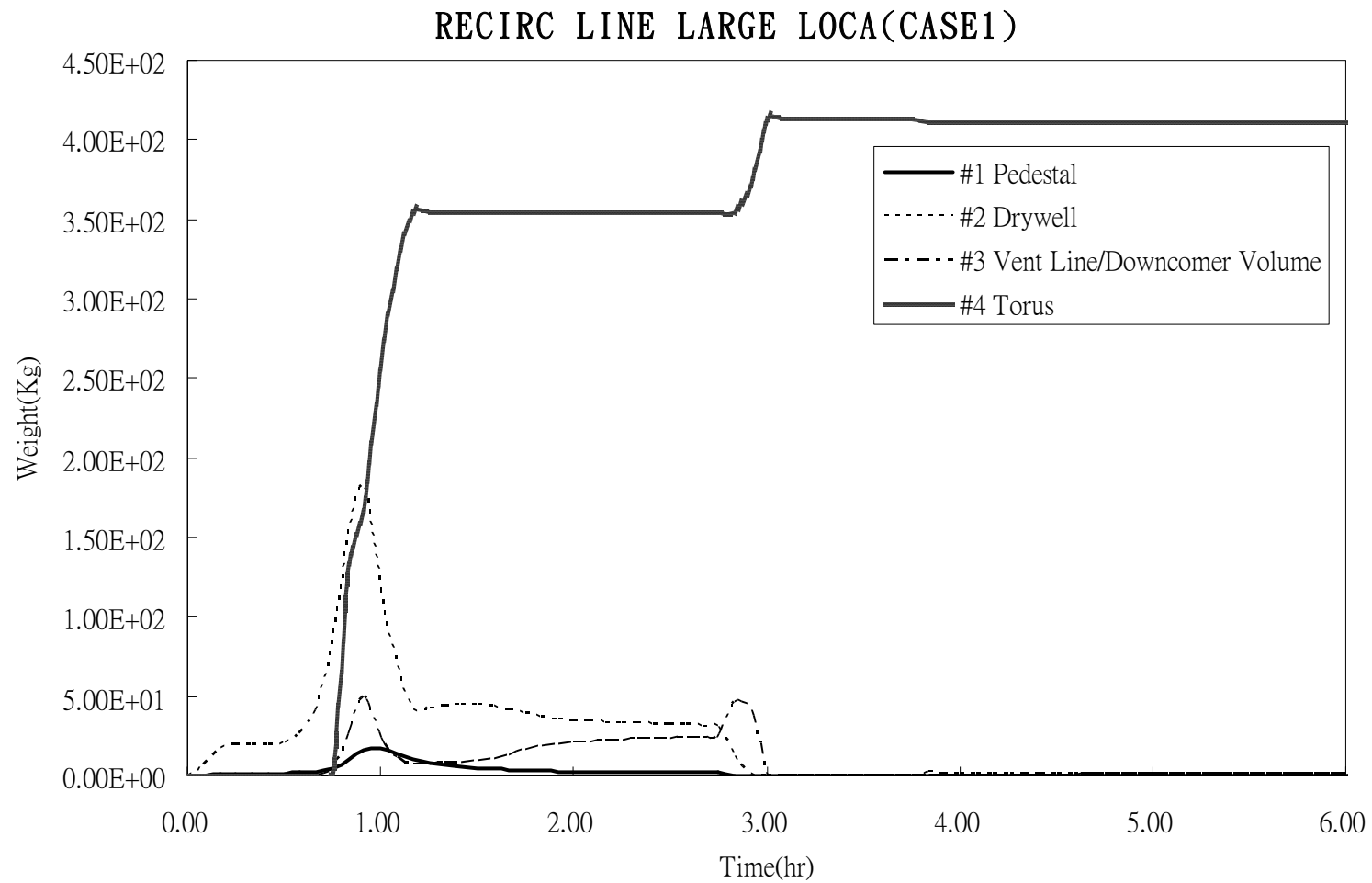
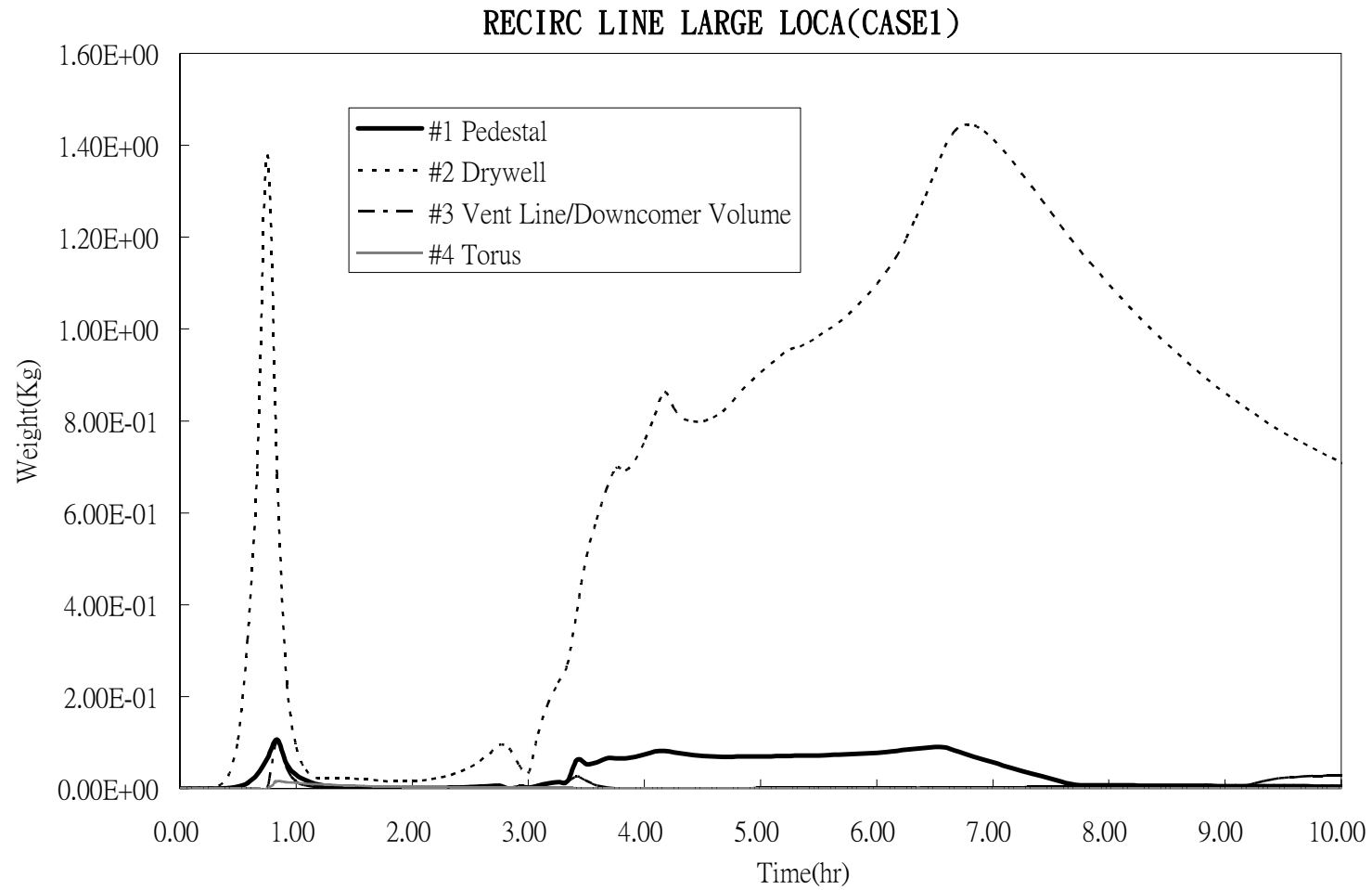


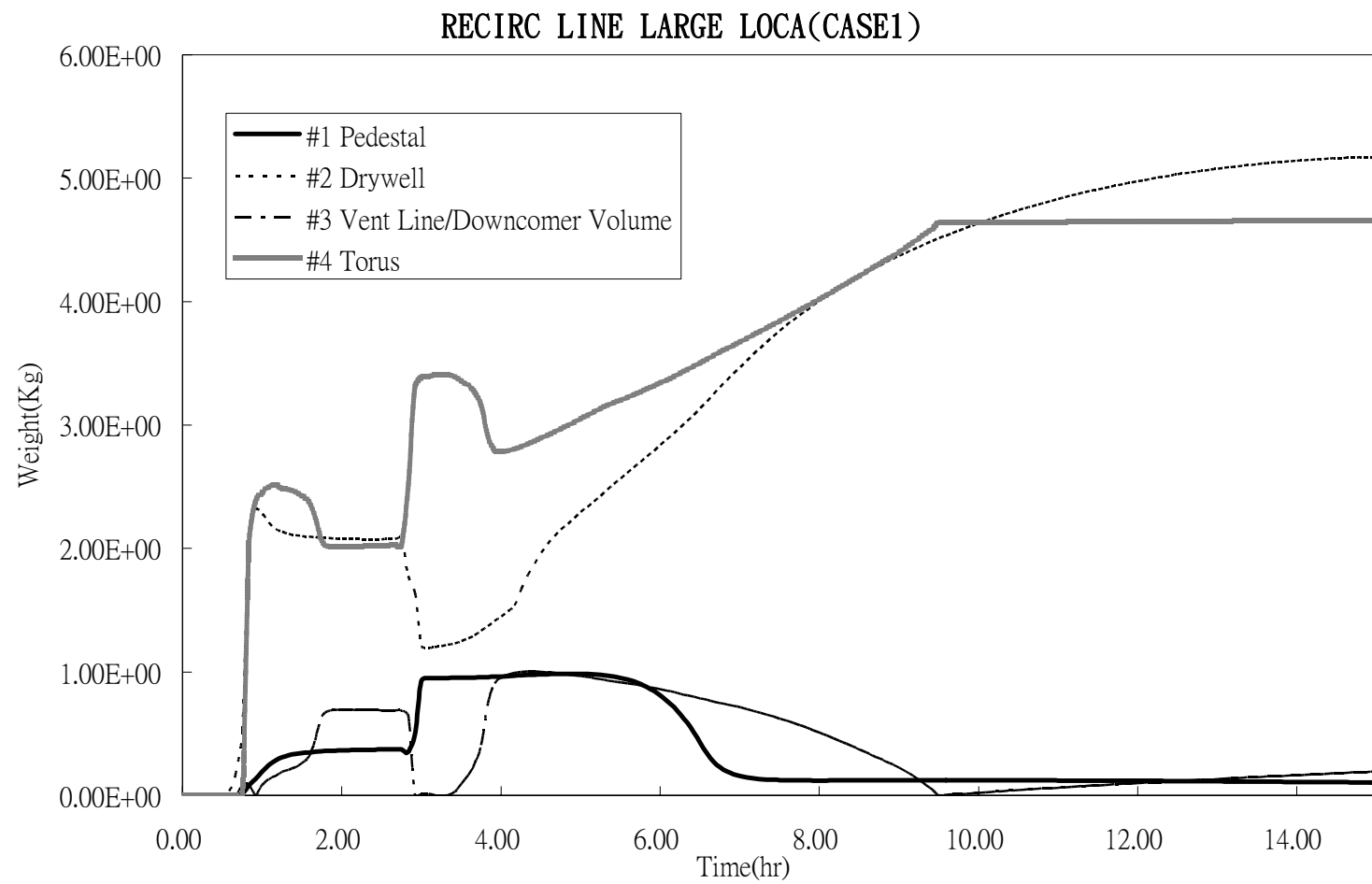
圖 B. 3. 2. 1-10 TeO₂外釋狀況



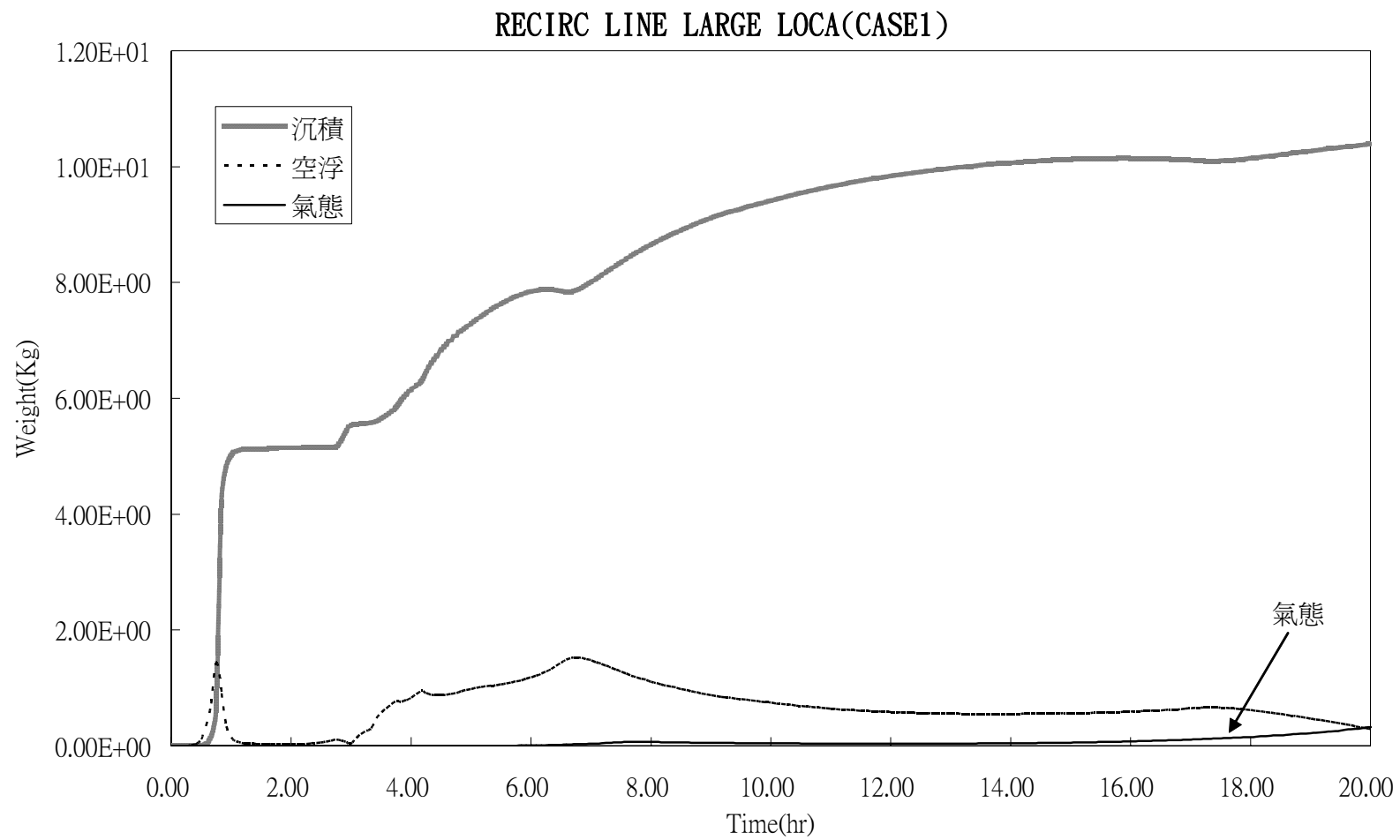
圖B. 3. 2. 1-11 惰性氣體於圍阻體內之分佈



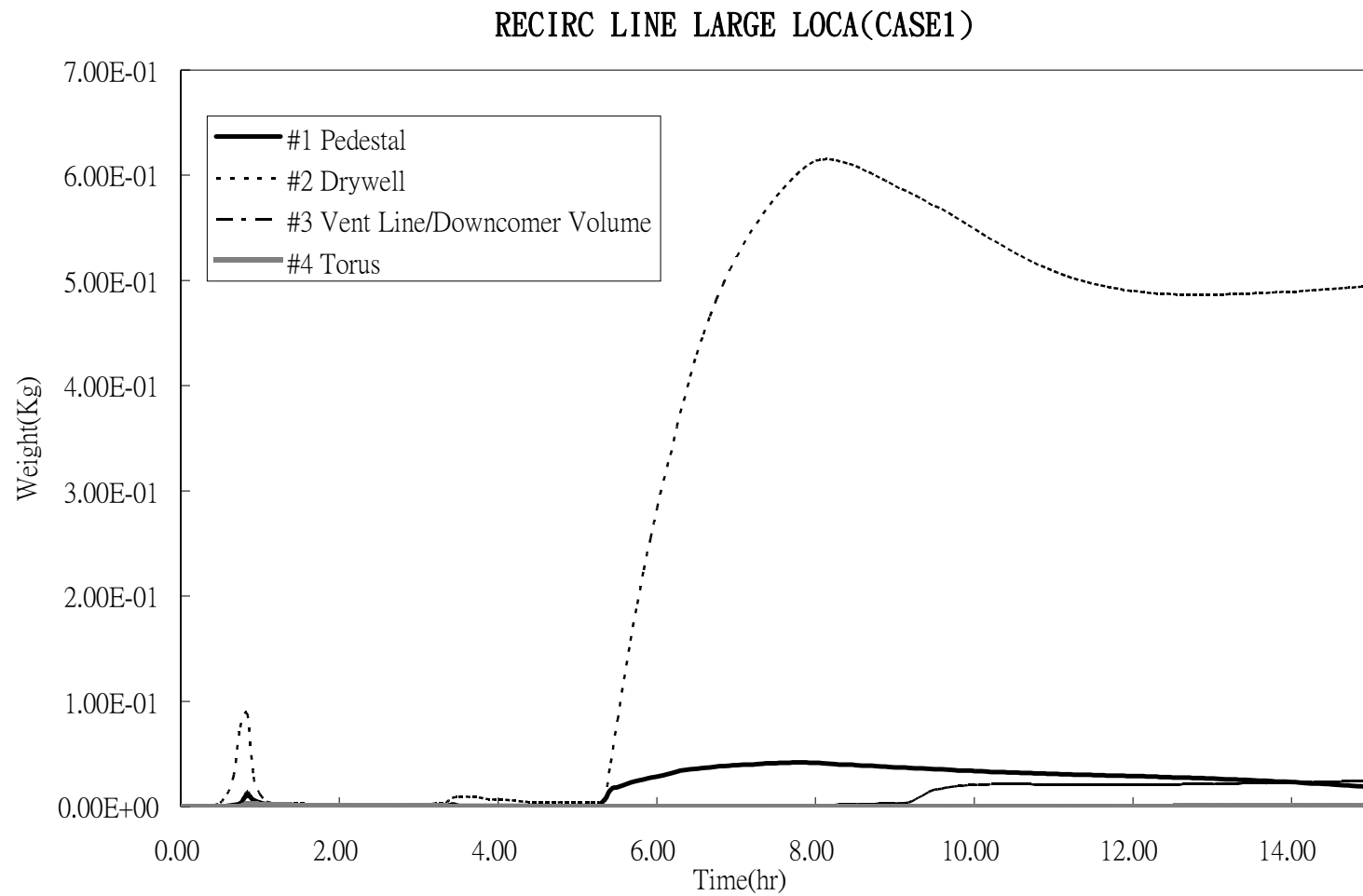
圖B. 3. 2. 1-12 圍阻體內CSI空浮分佈



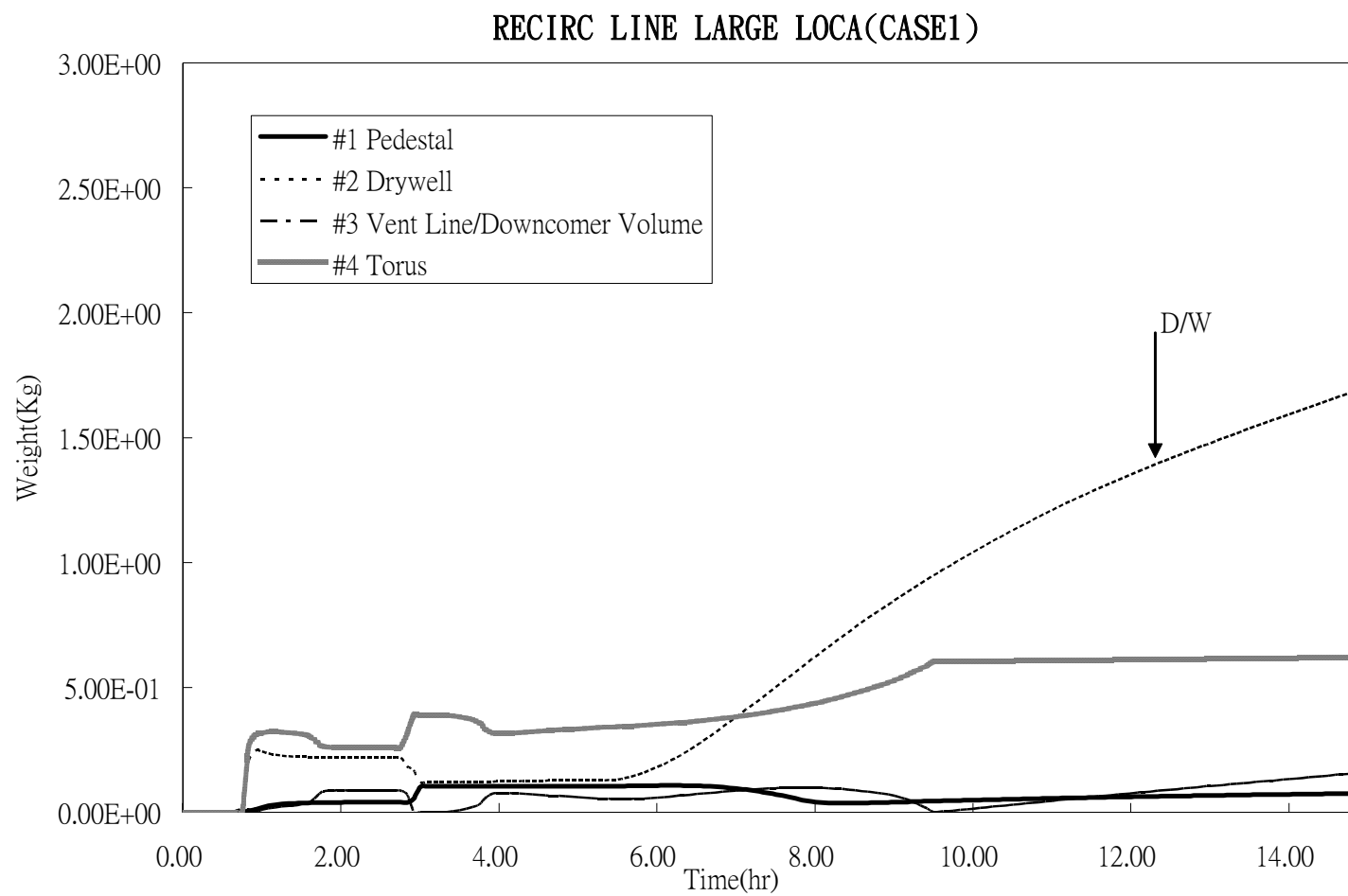
圖B. 3. 2. 1-13 圍阻體內CSI沉積分佈



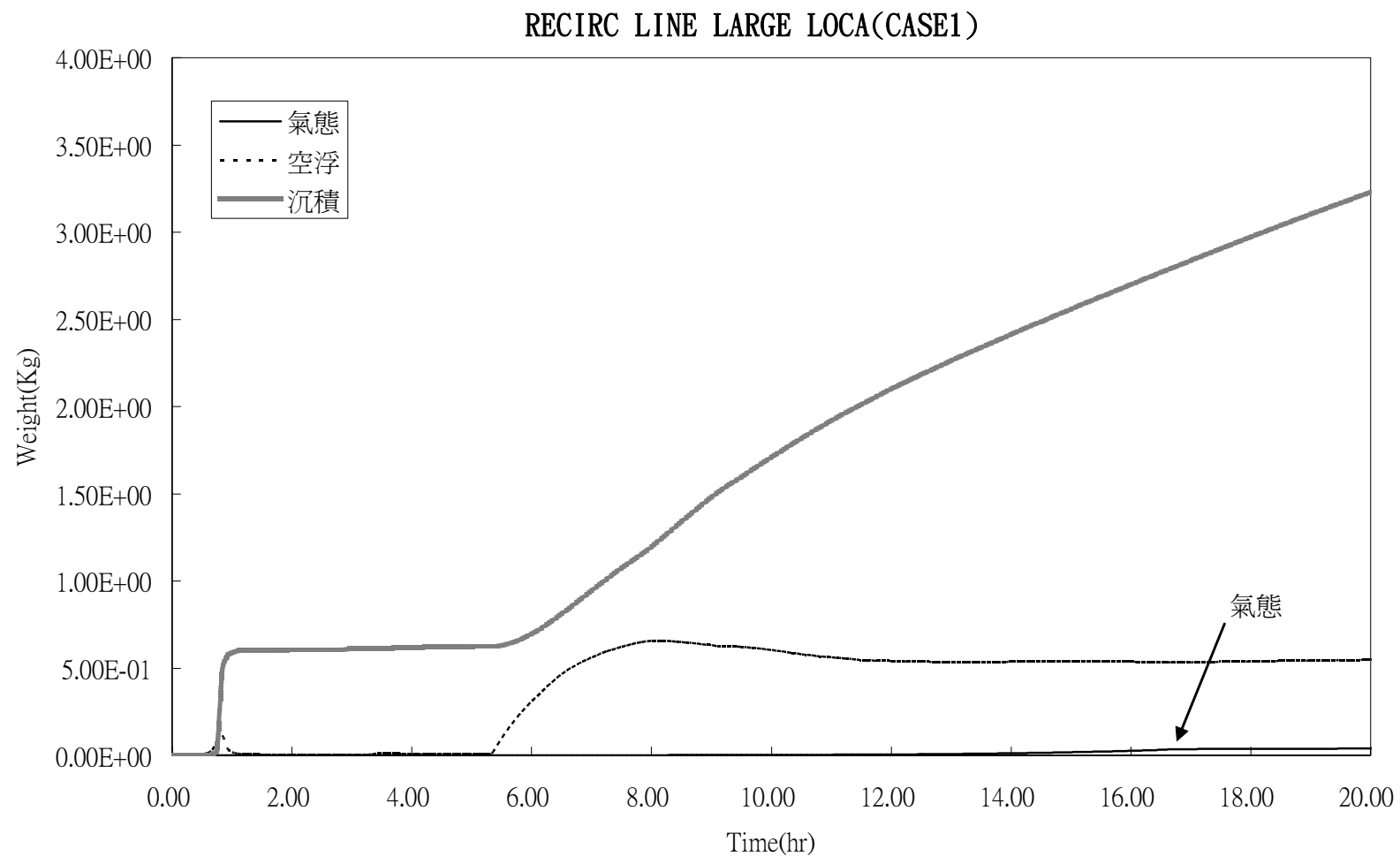
圖B. 3. 2. 1-14 圍阻體內CSI存在的狀態



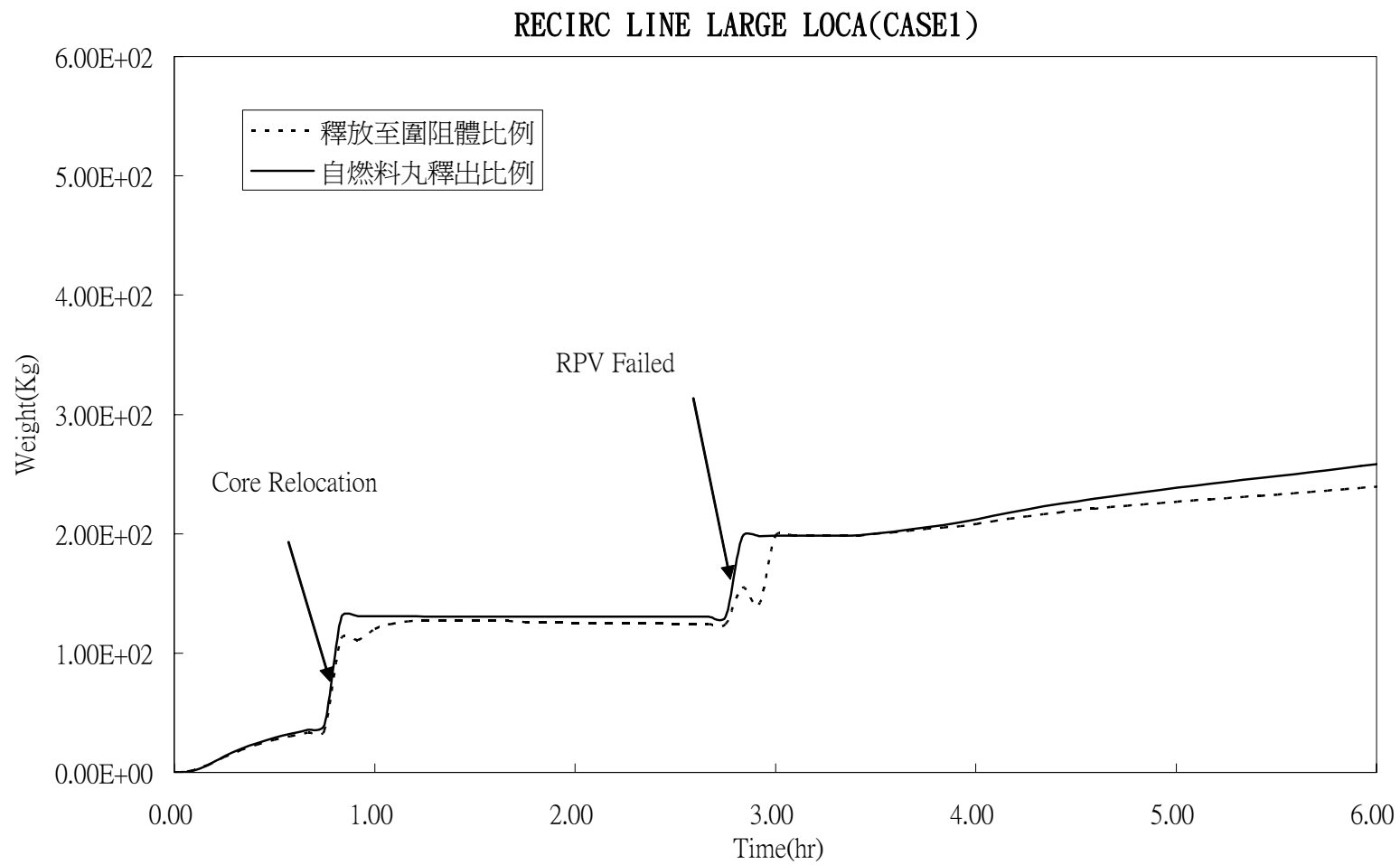
圖B. 3. 2. 1-15 圍阻體內TeO₂空浮分佈



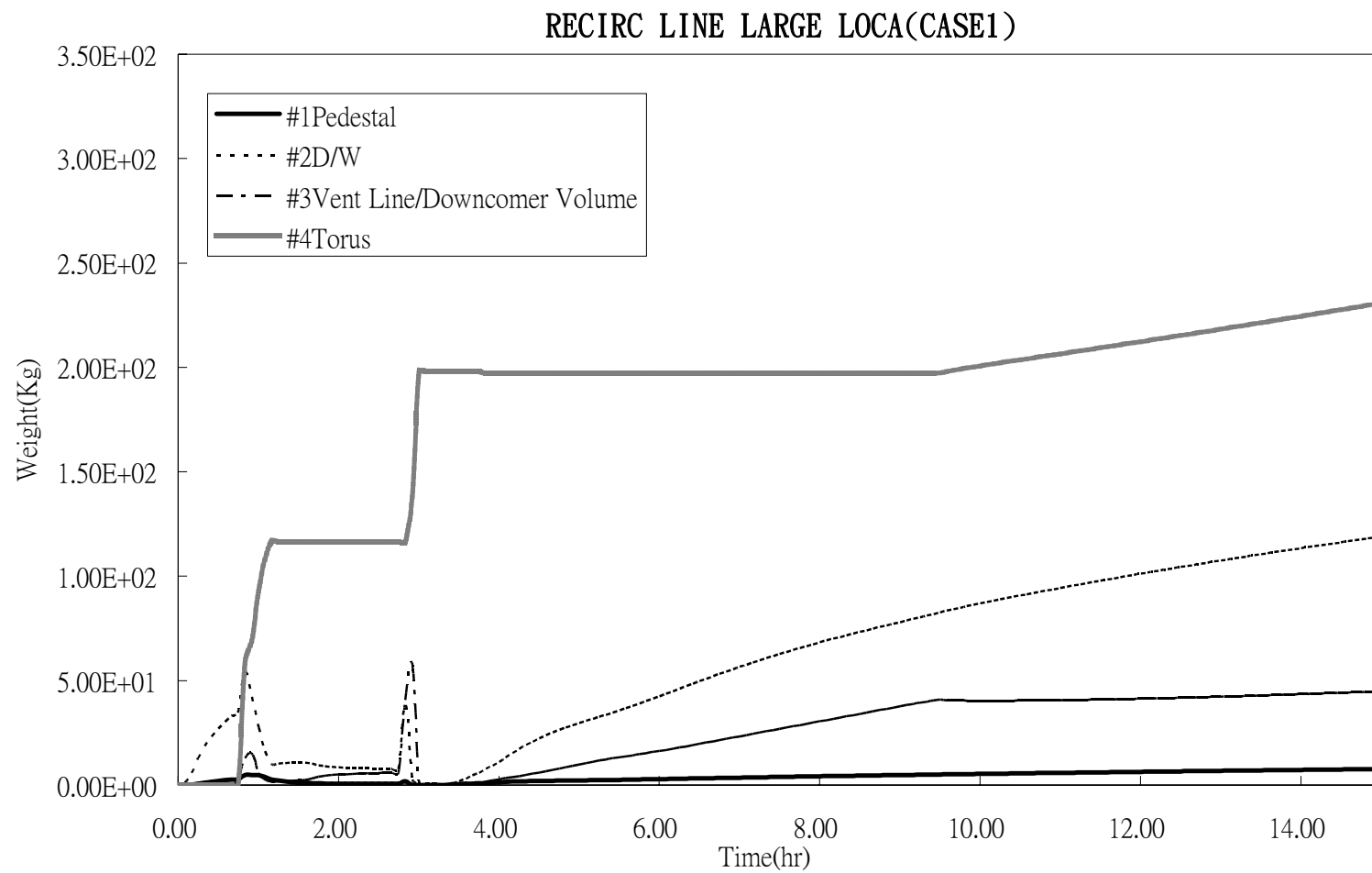
圖B. 3. 2. 1-16 圍阻體內TeO₂沉積分佈



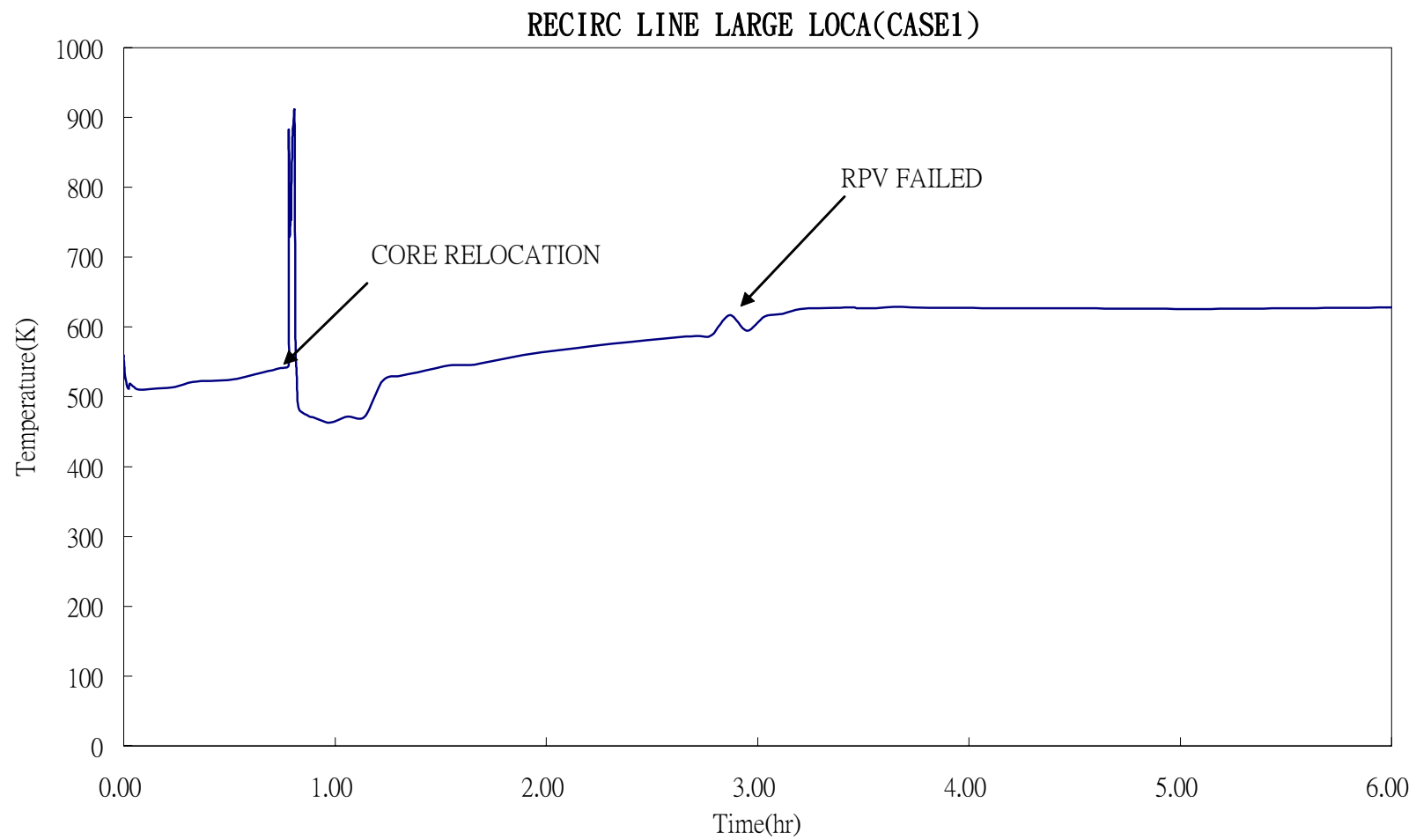
圖B. 3. 2. 1-17 圍阻體內TeO2存在的狀態



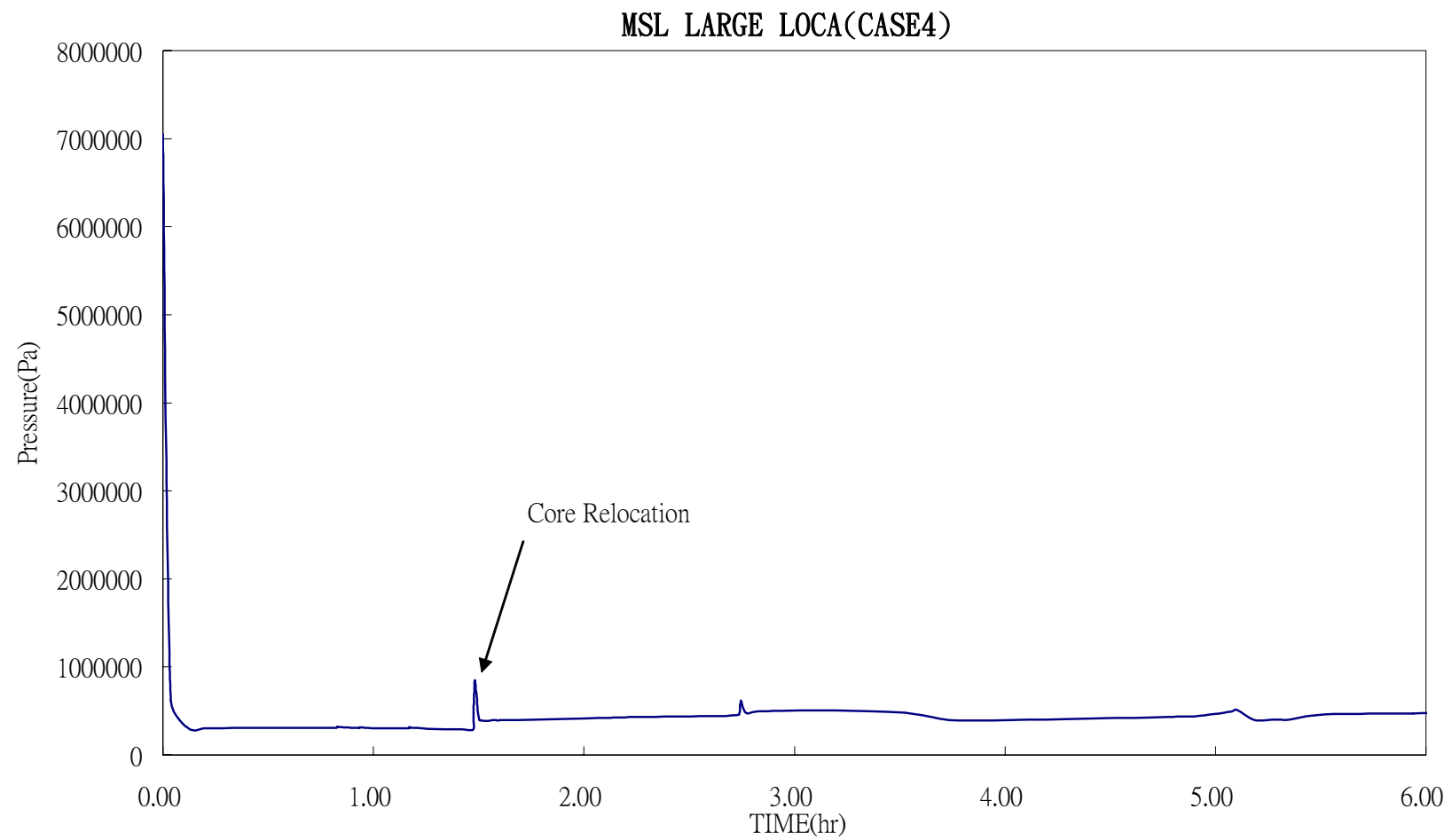
圖B. 3. 2. 1-18 氬氣產生量及分佈



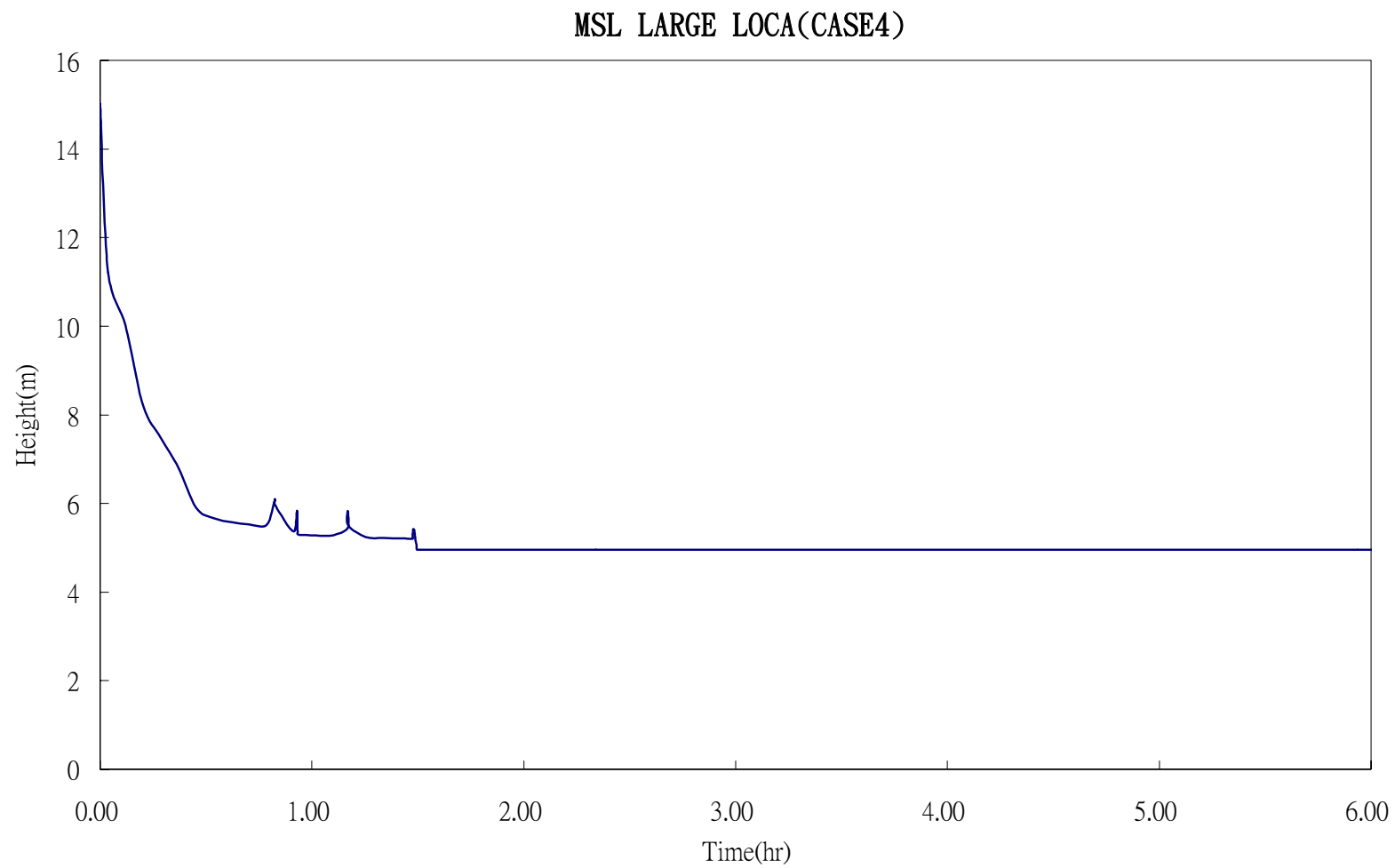
圖B.3.2.1-19 圍阻體內氫氣分佈



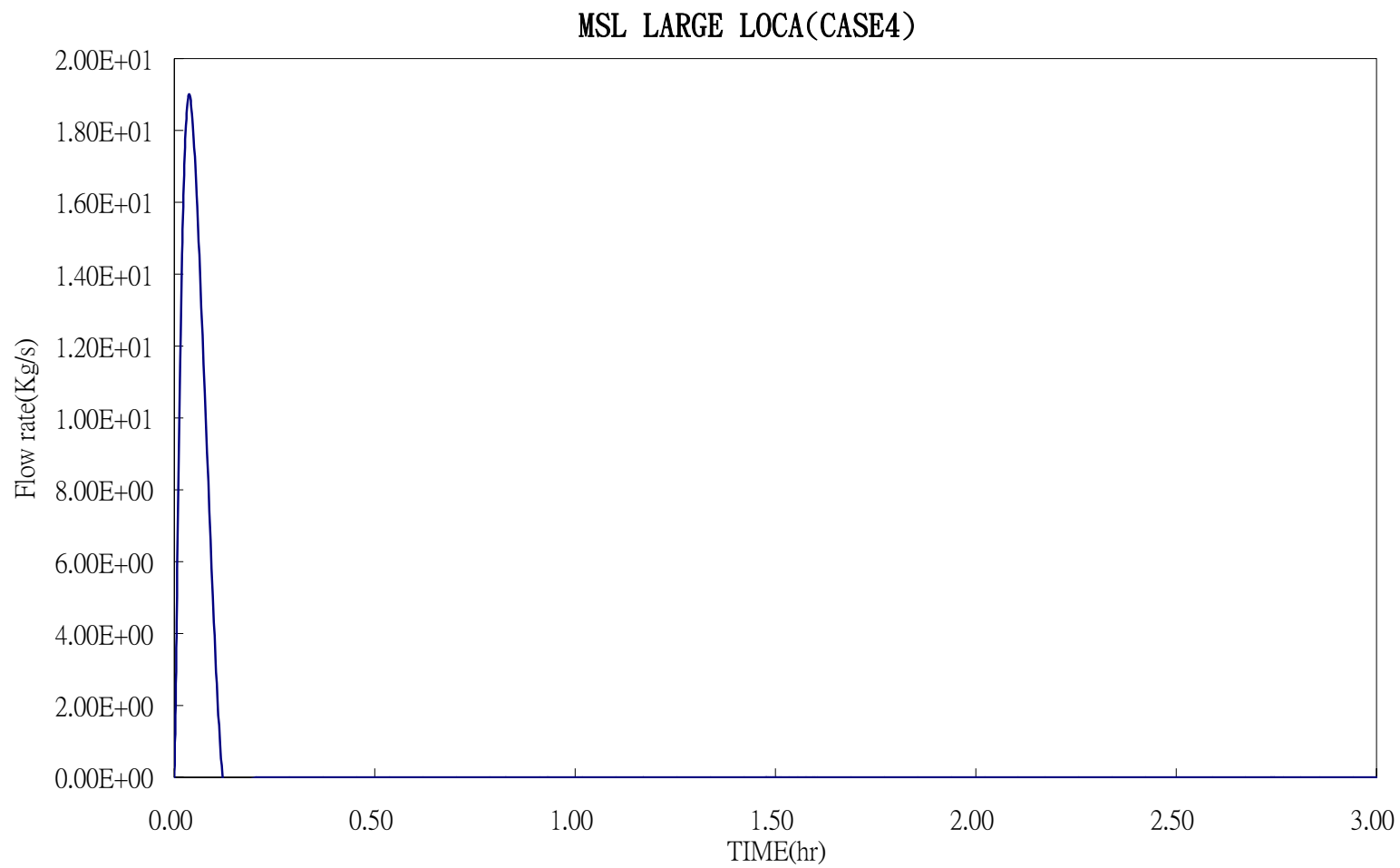
圖B. 3. 2. 1-20 一次系統內氣體溫度



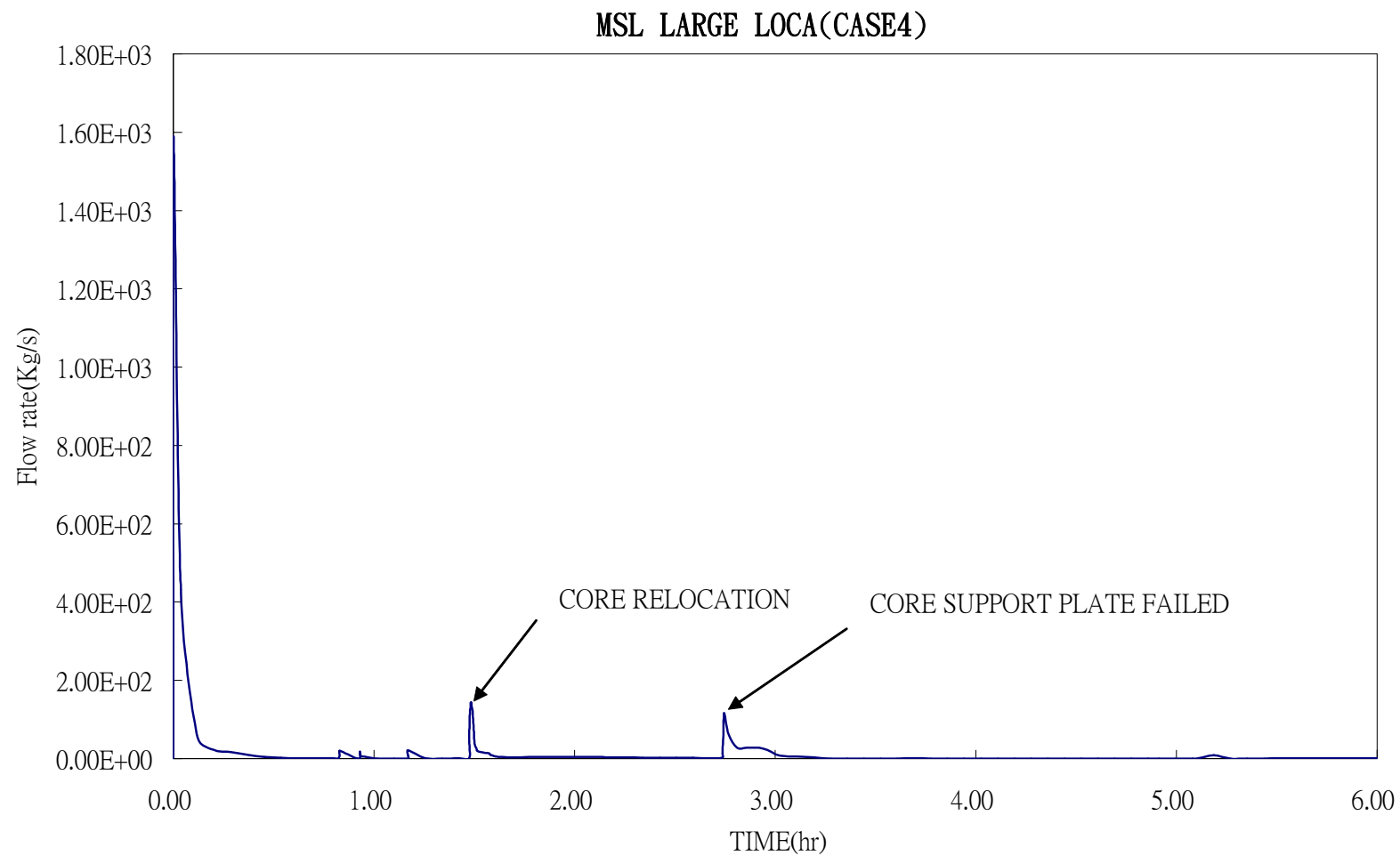
圖B. 3. 2. 1-21 一次系統壓力



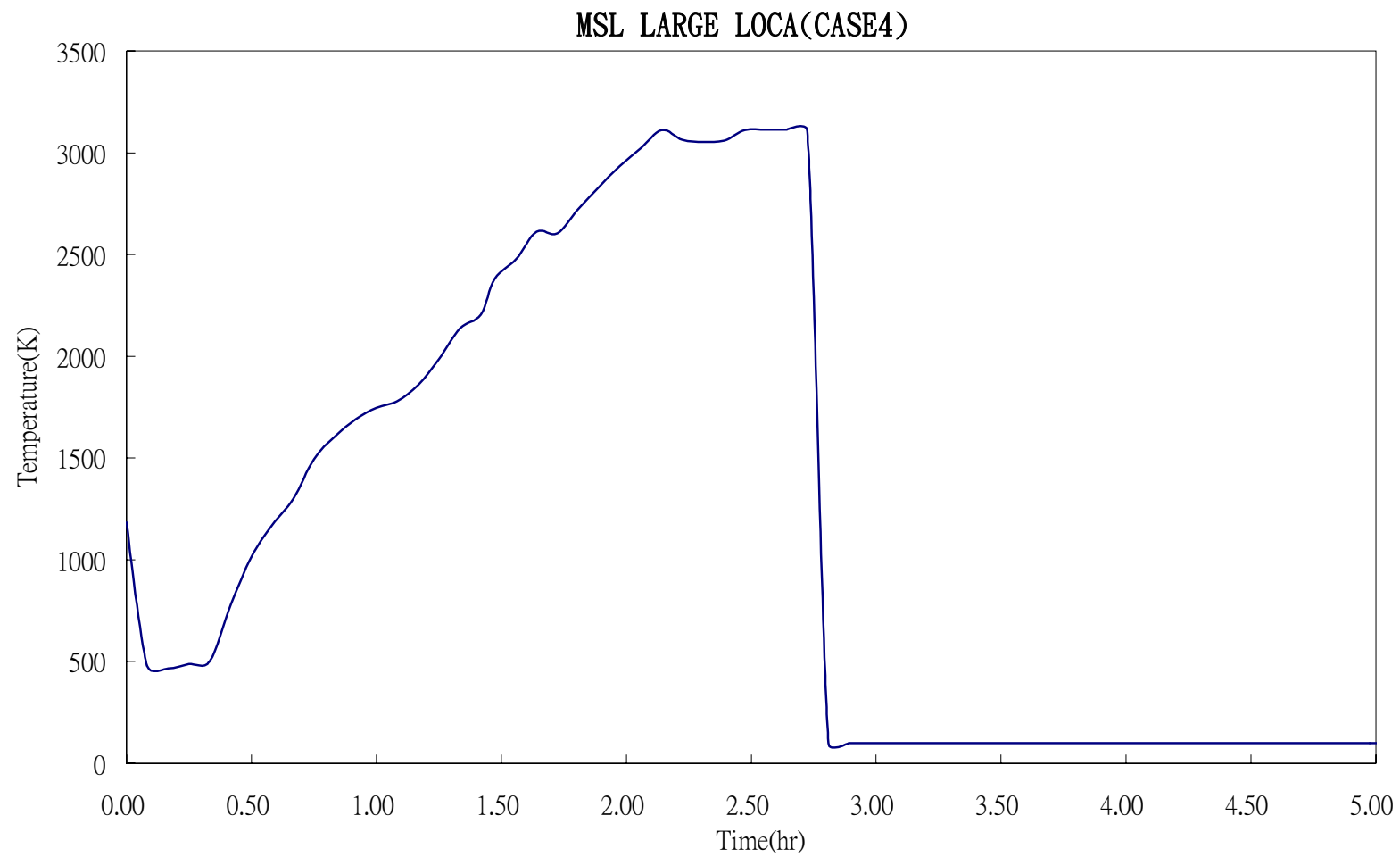
圖B. 3. 2. 1-22 爐心水位



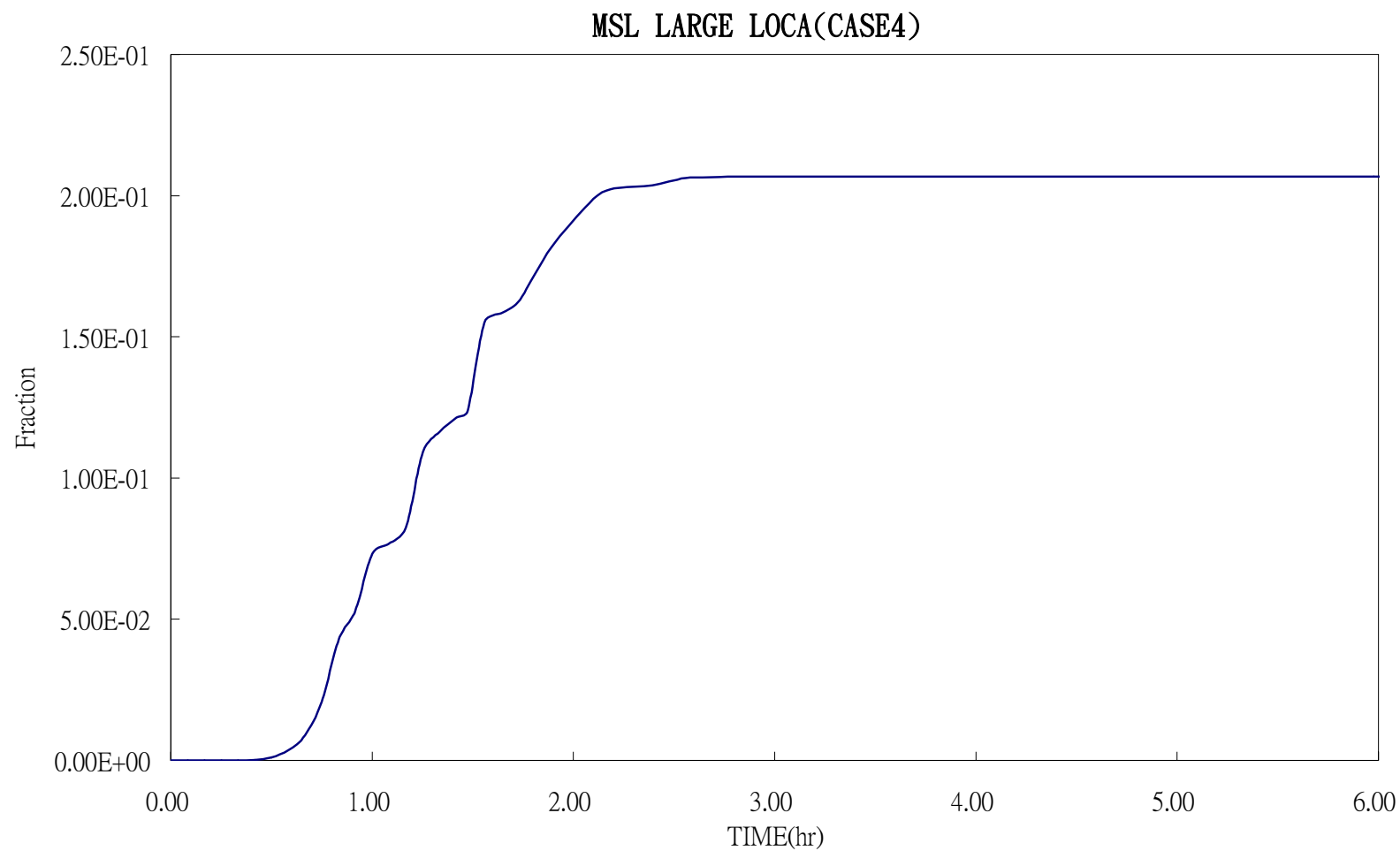
圖B. 3. 2. 1-23 破口冷卻水流率



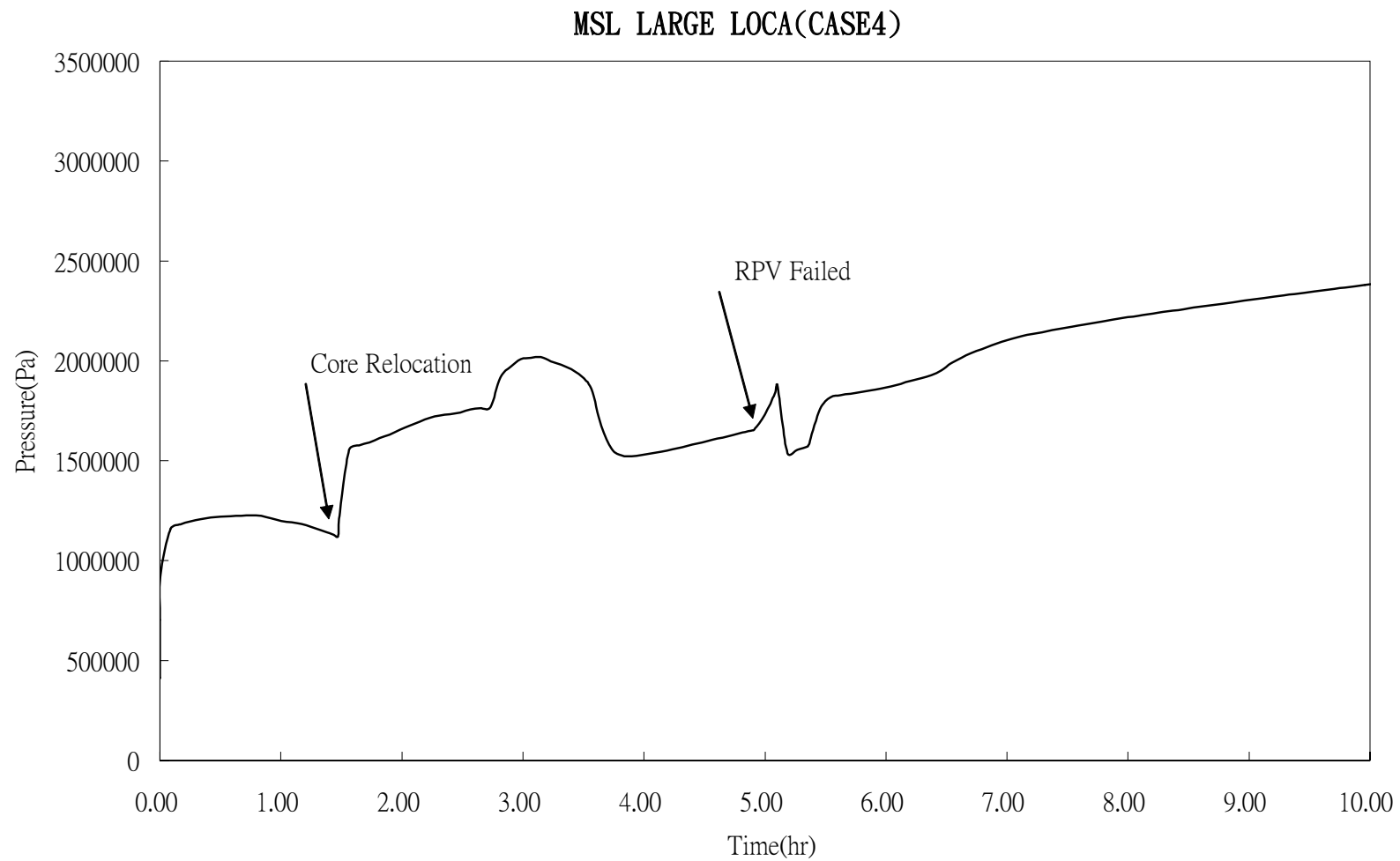
圖B. 3. 2. 1-24 破口水蒸汽流率



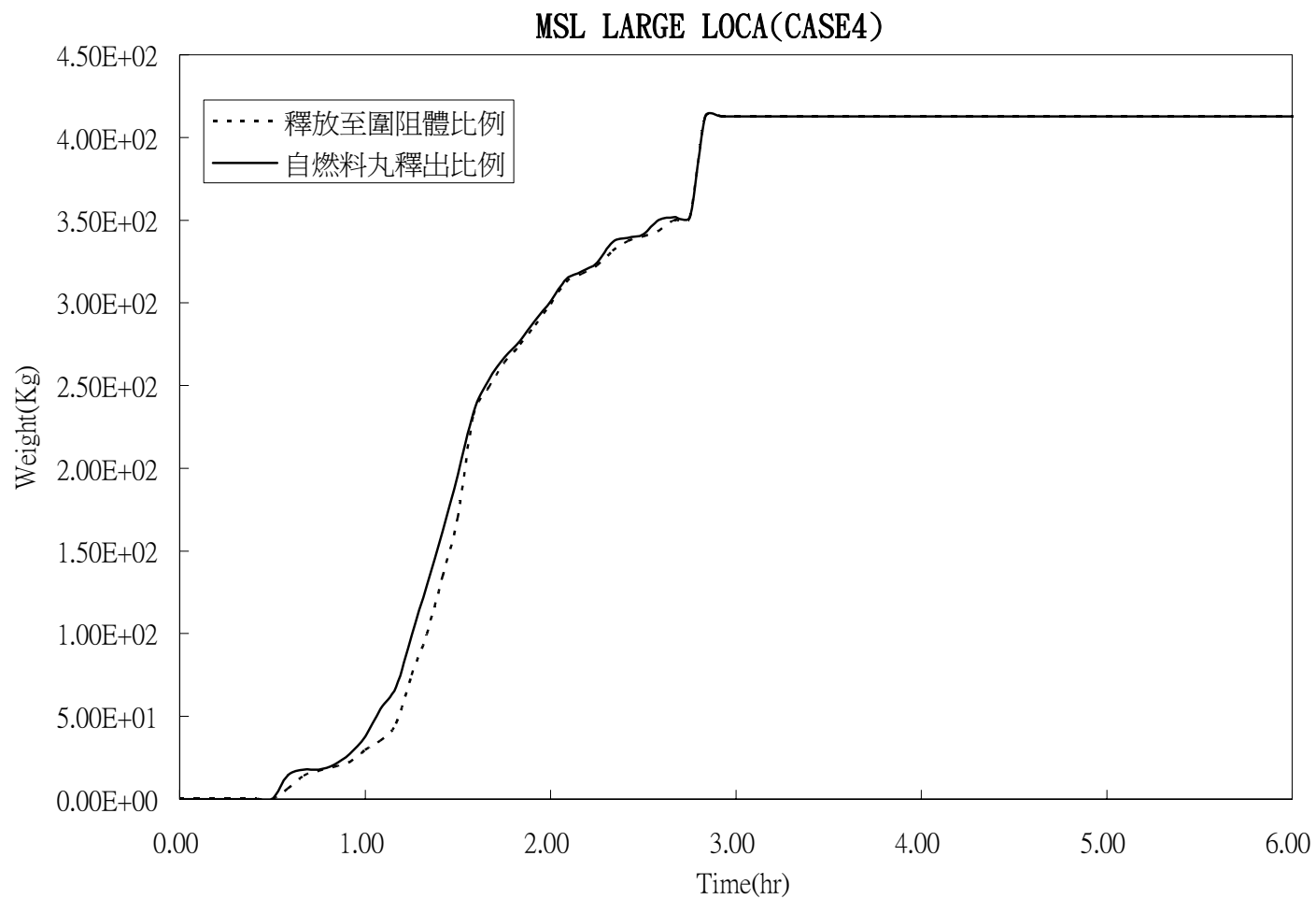
圖B. 3. 2. 1-25 爐心燃料最高溫度



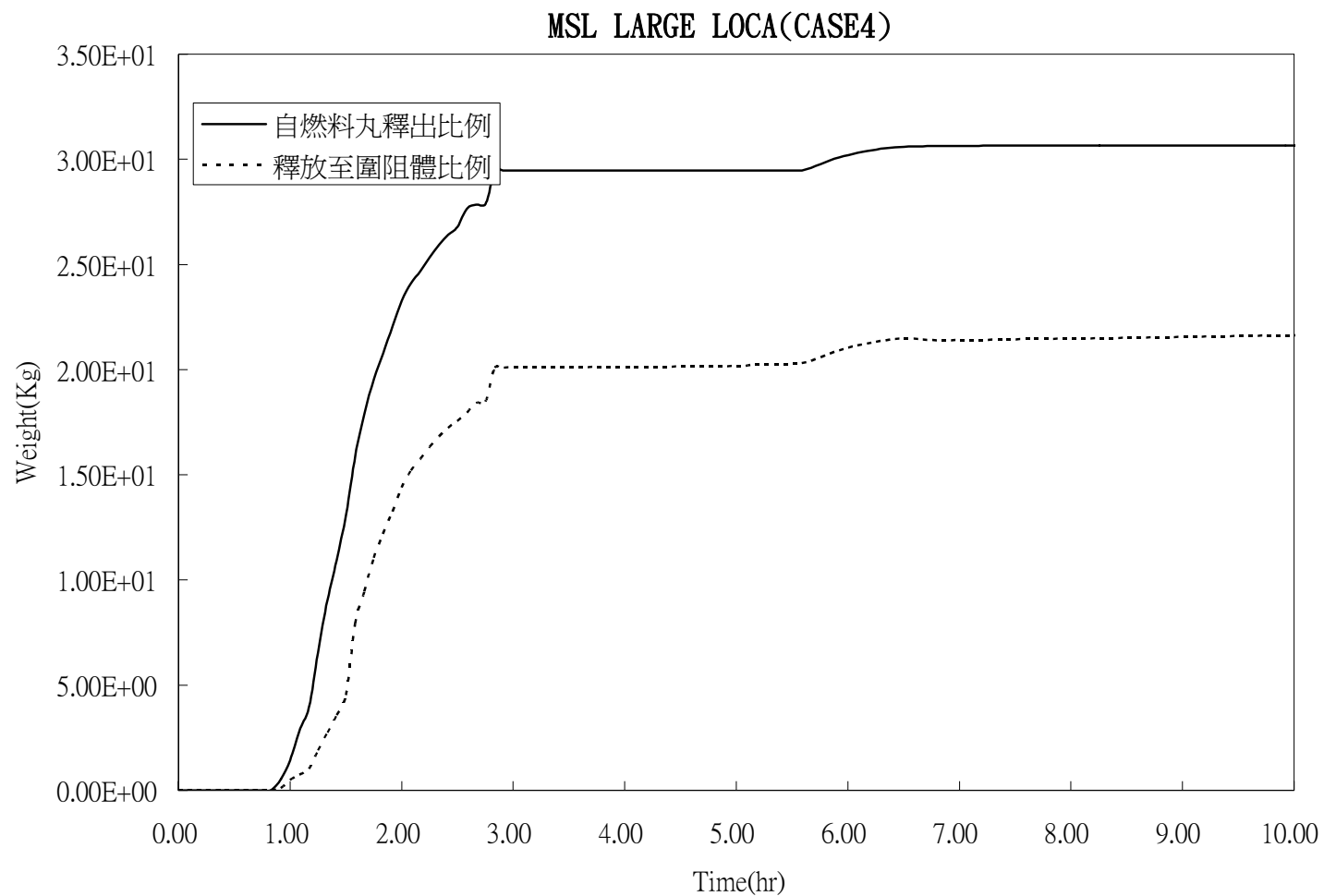
圖B. 3. 2. 1-26 爐心燃料棒護套氧化比例



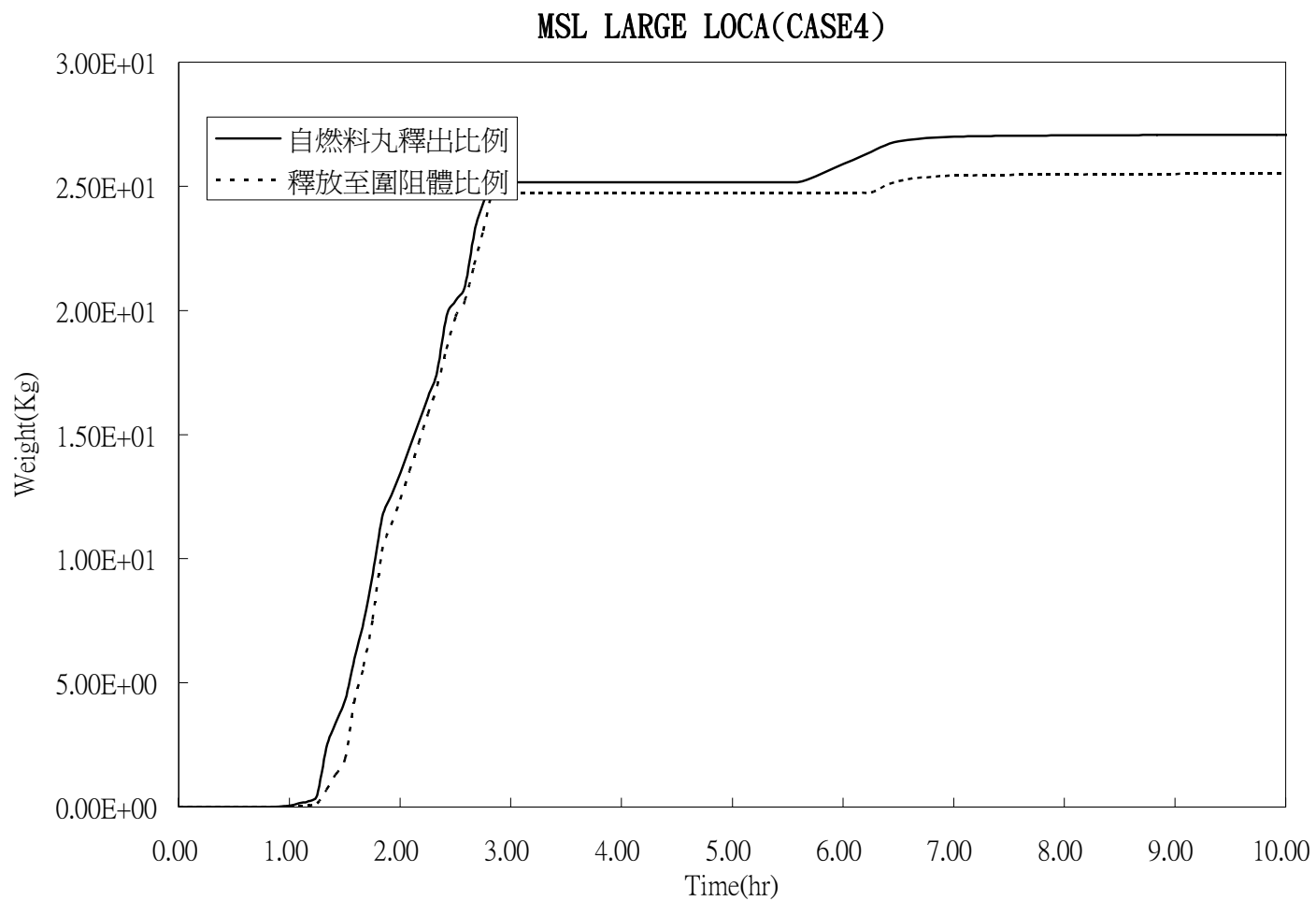
圖B. 3. 2. 1-27 圍阻體壓力



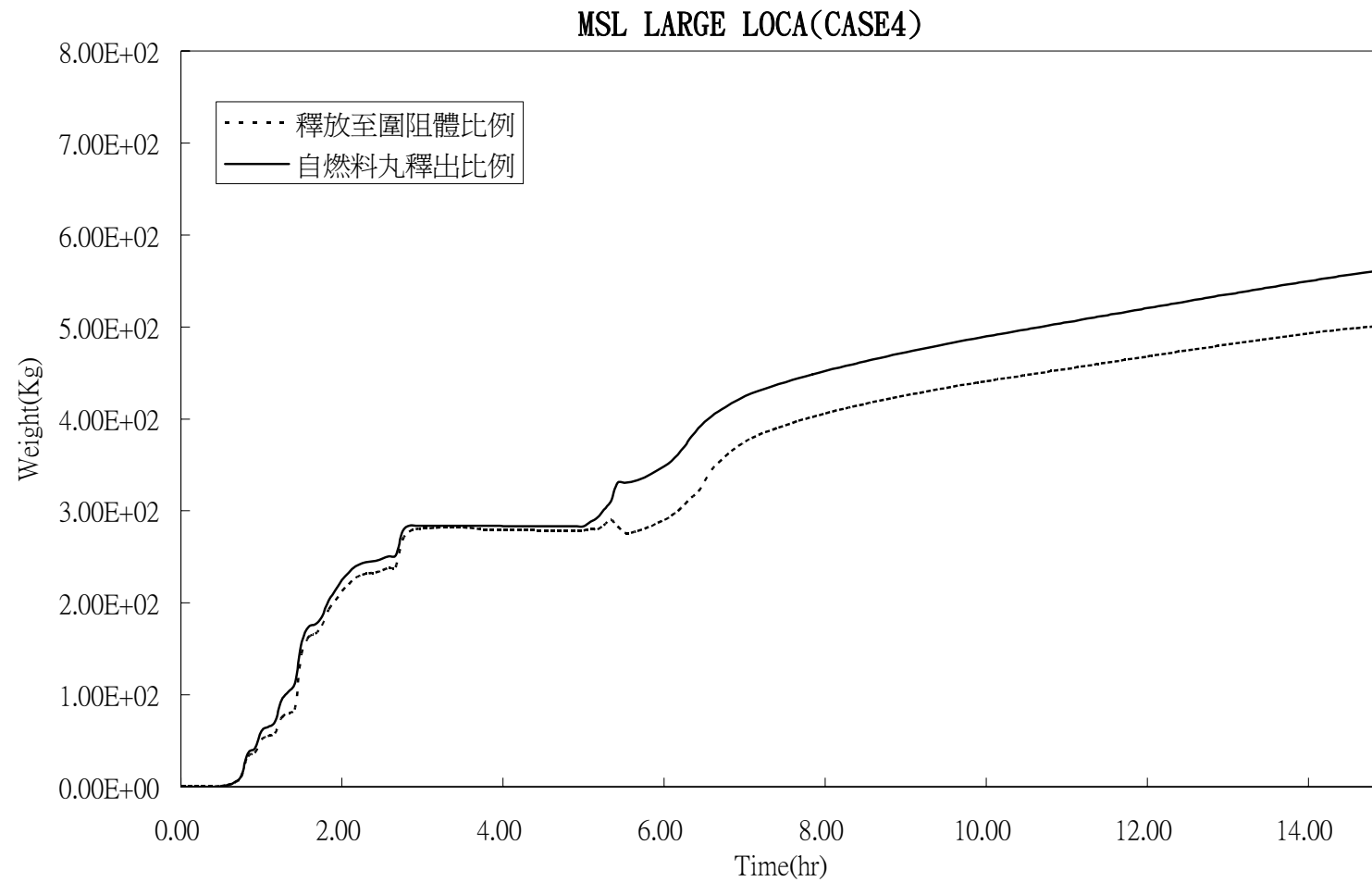
圖B. 3. 2. 1-28 惰性氣體外釋狀況



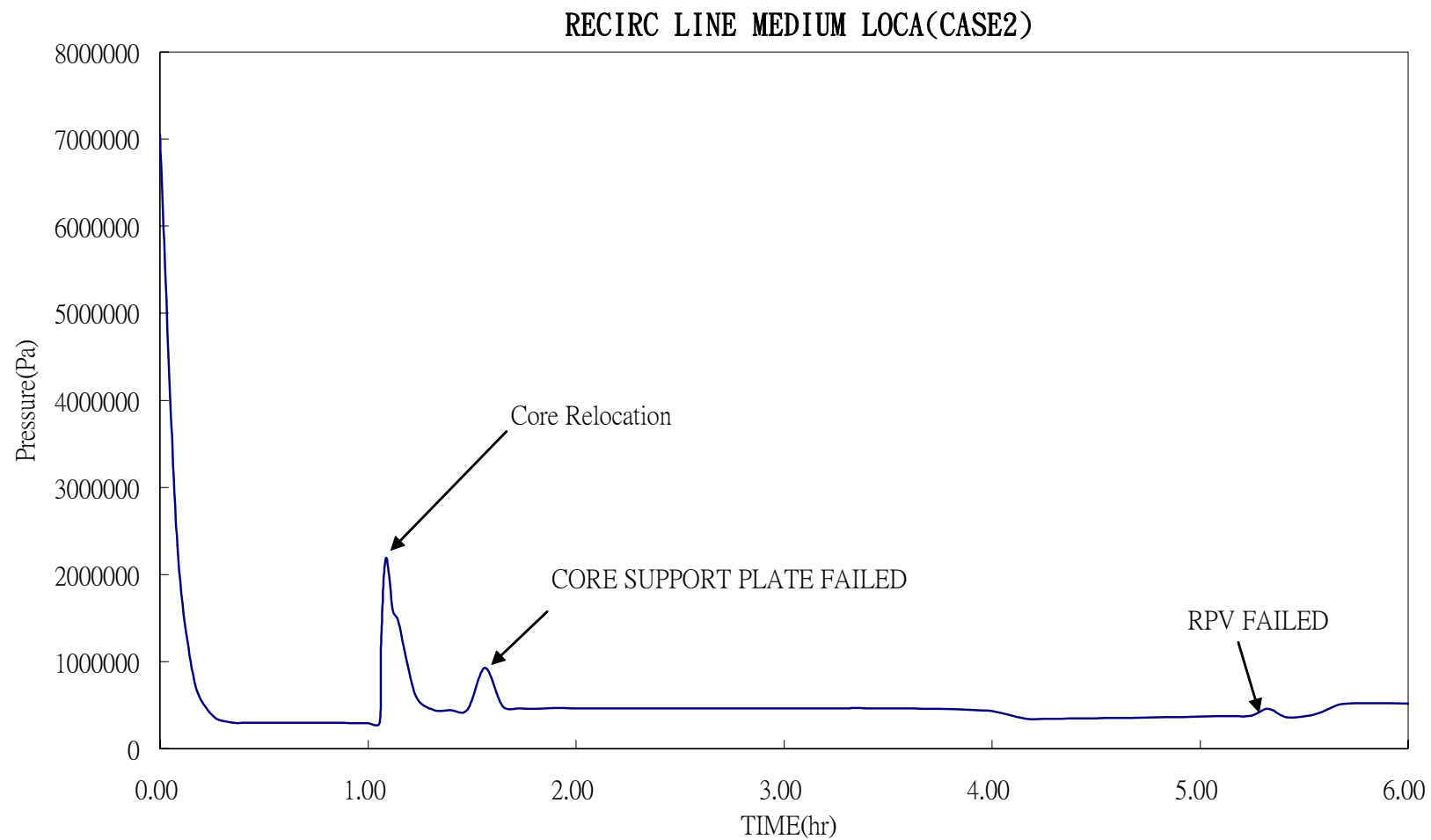
圖B. 3. 2. 1-29 CSI外釋狀況



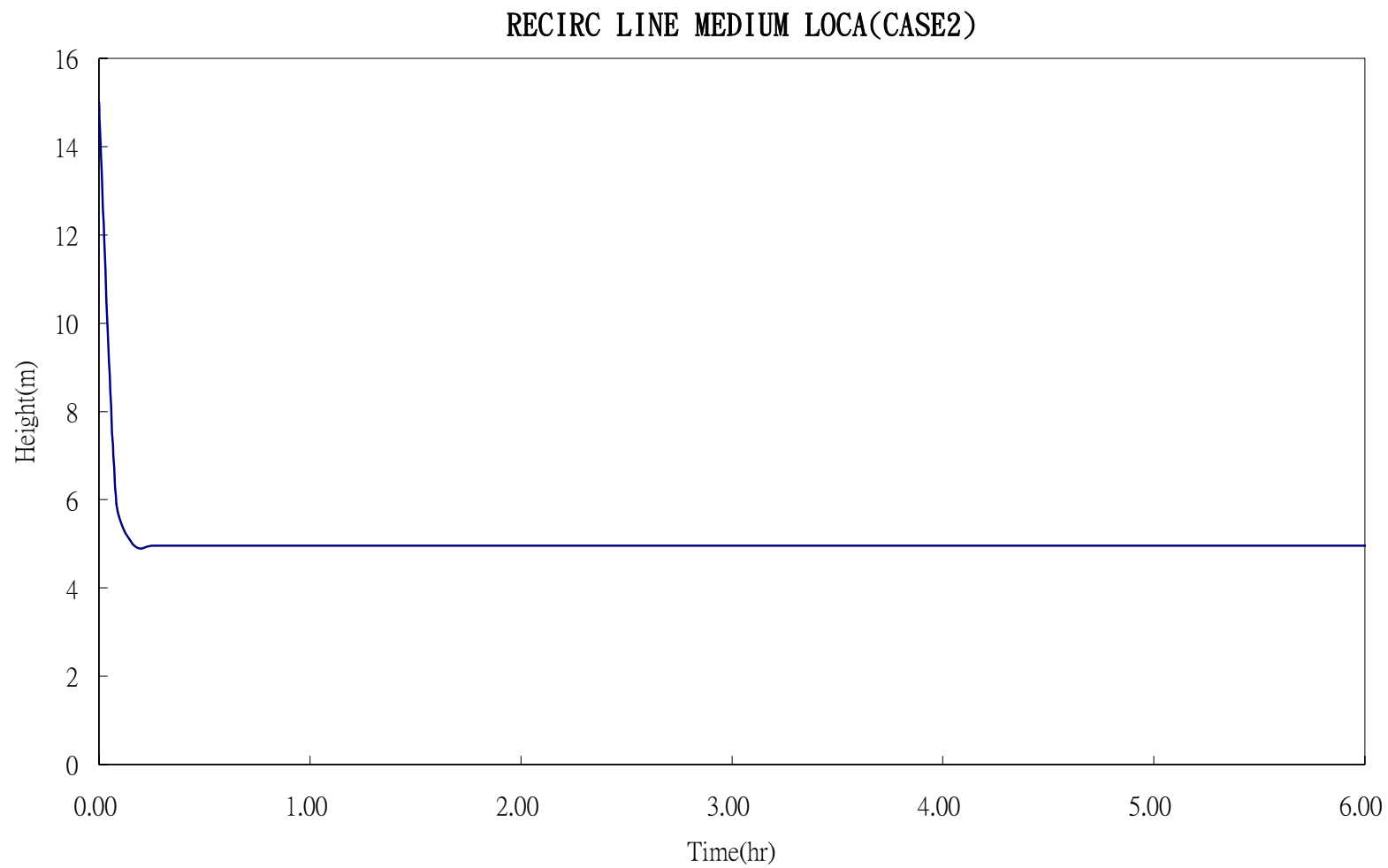
圖B. 3. 2. 1-30 TeO2外釋狀況



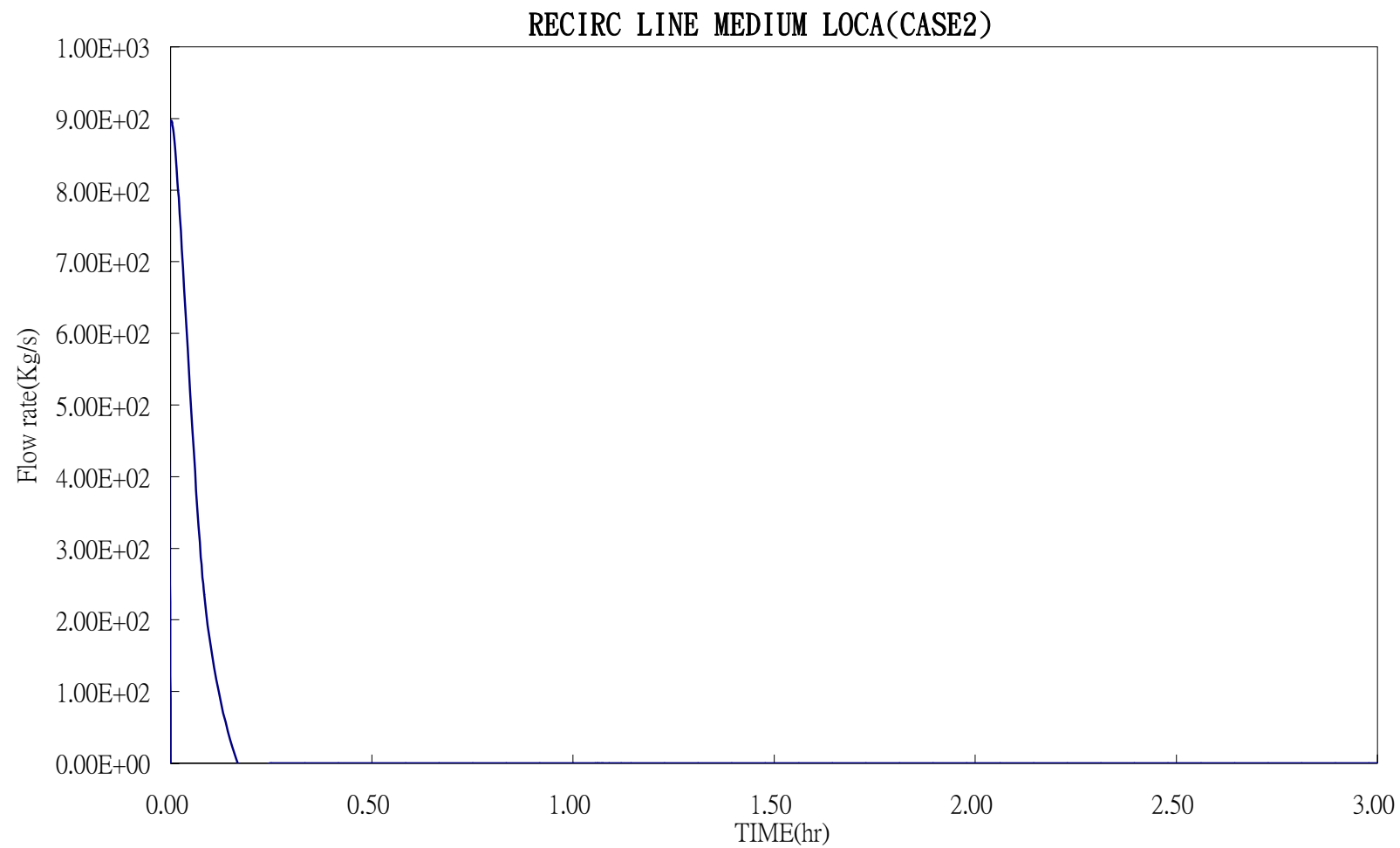
圖B. 3. 2. 1-31 氫氣產生量及分佈



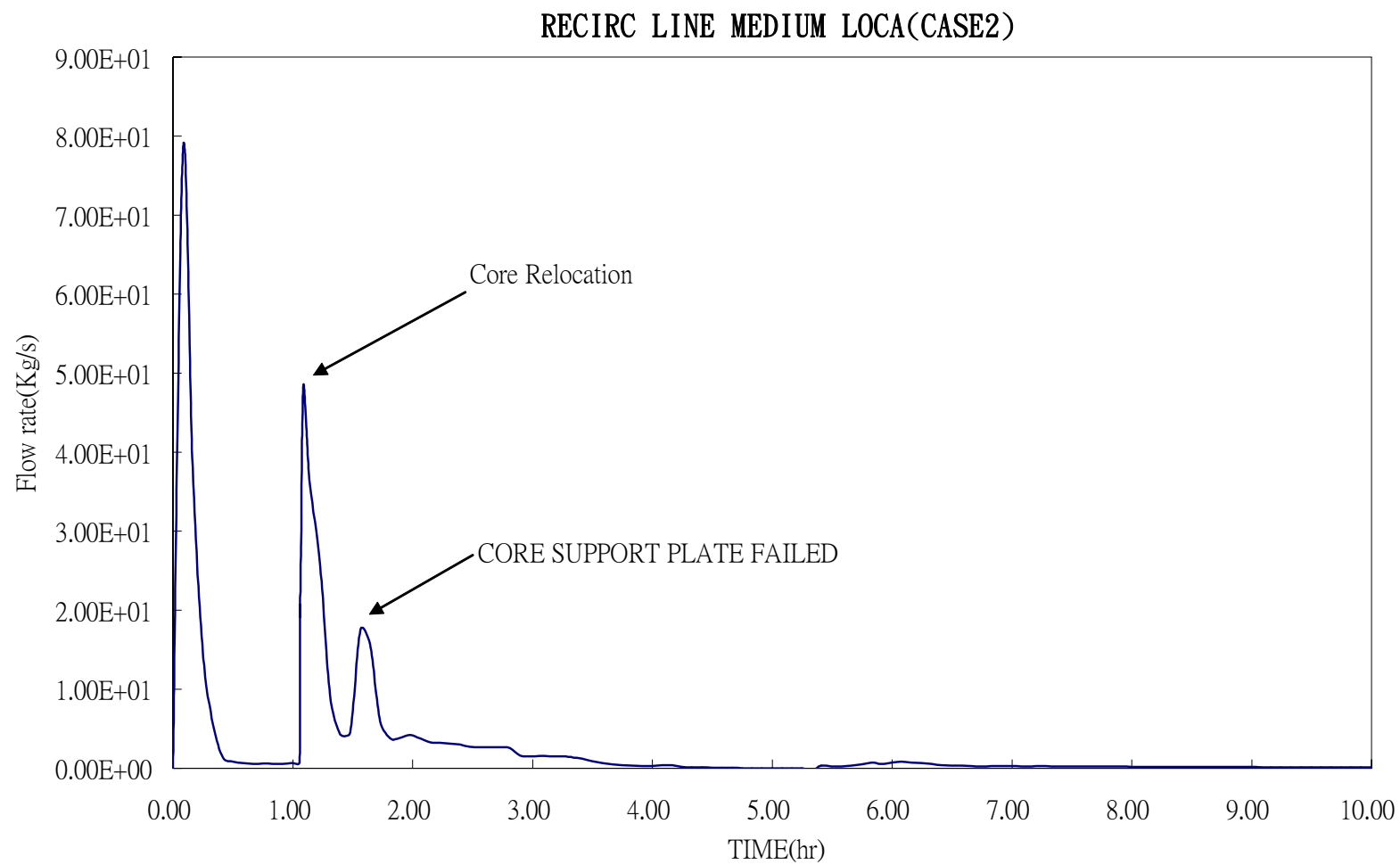
圖B. 3. 2. 2-1 一次系統壓力



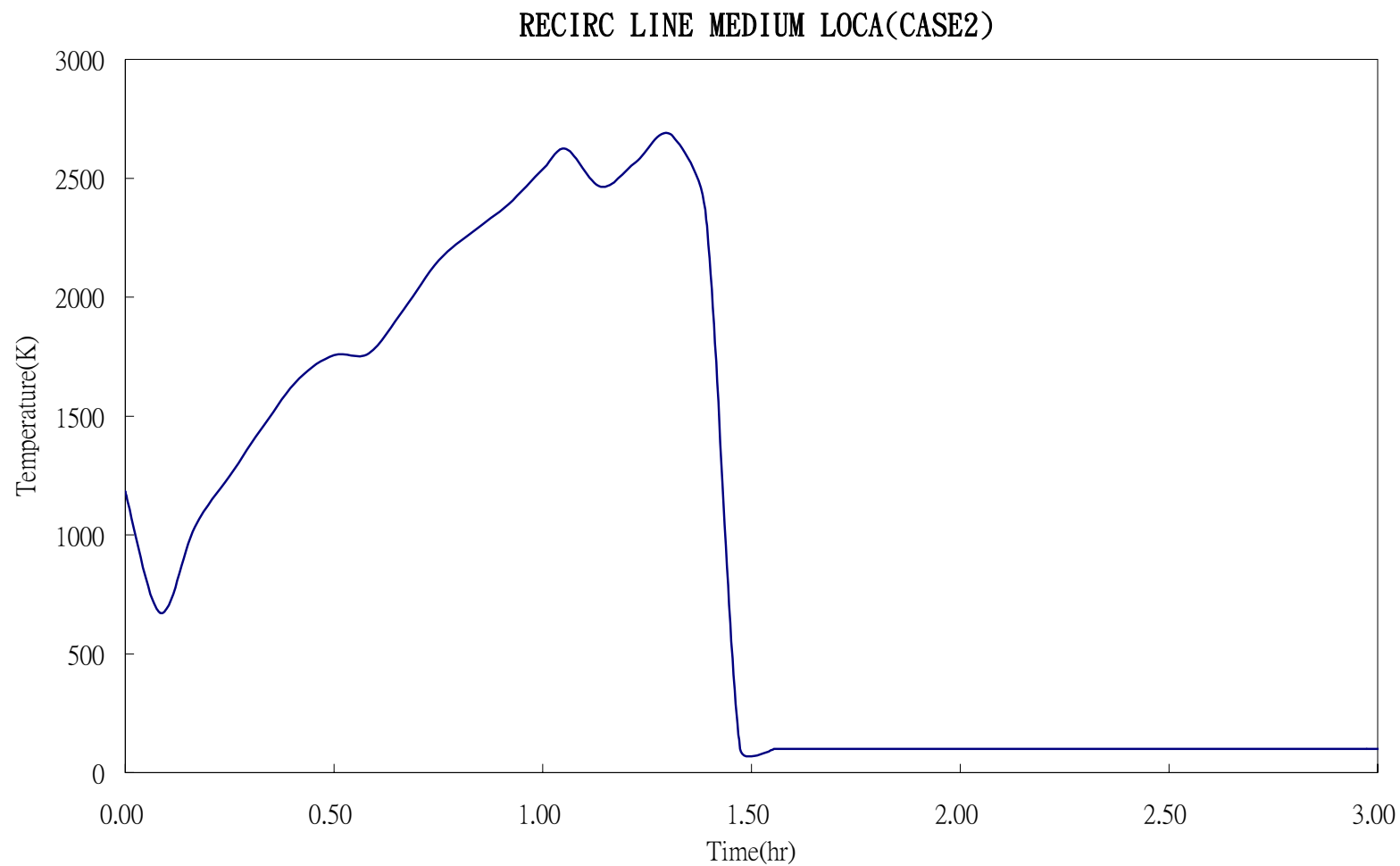
圖B. 3. 2. 2-2 爐心水位



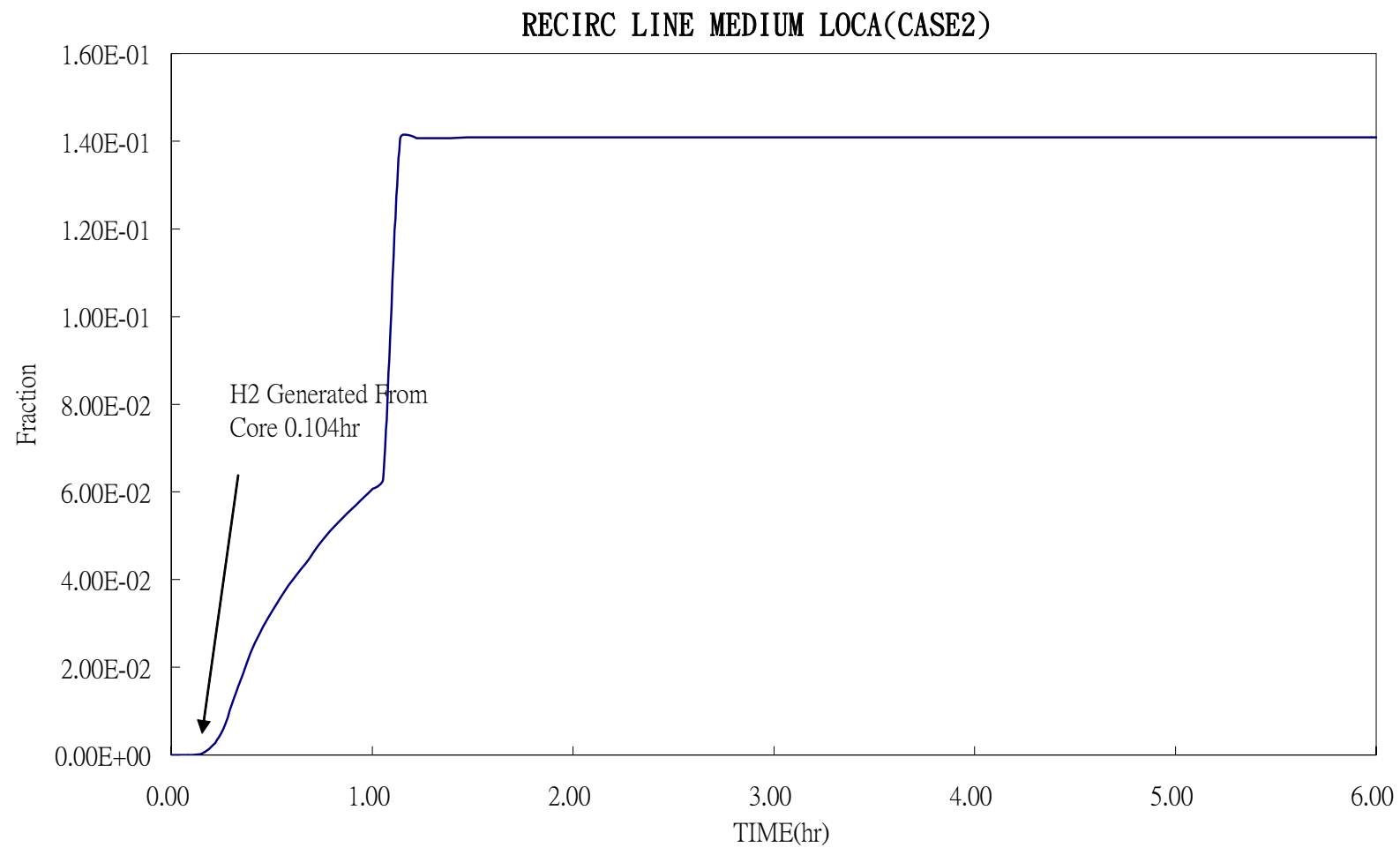
圖B.3.2.2-3 破口冷卻水流率



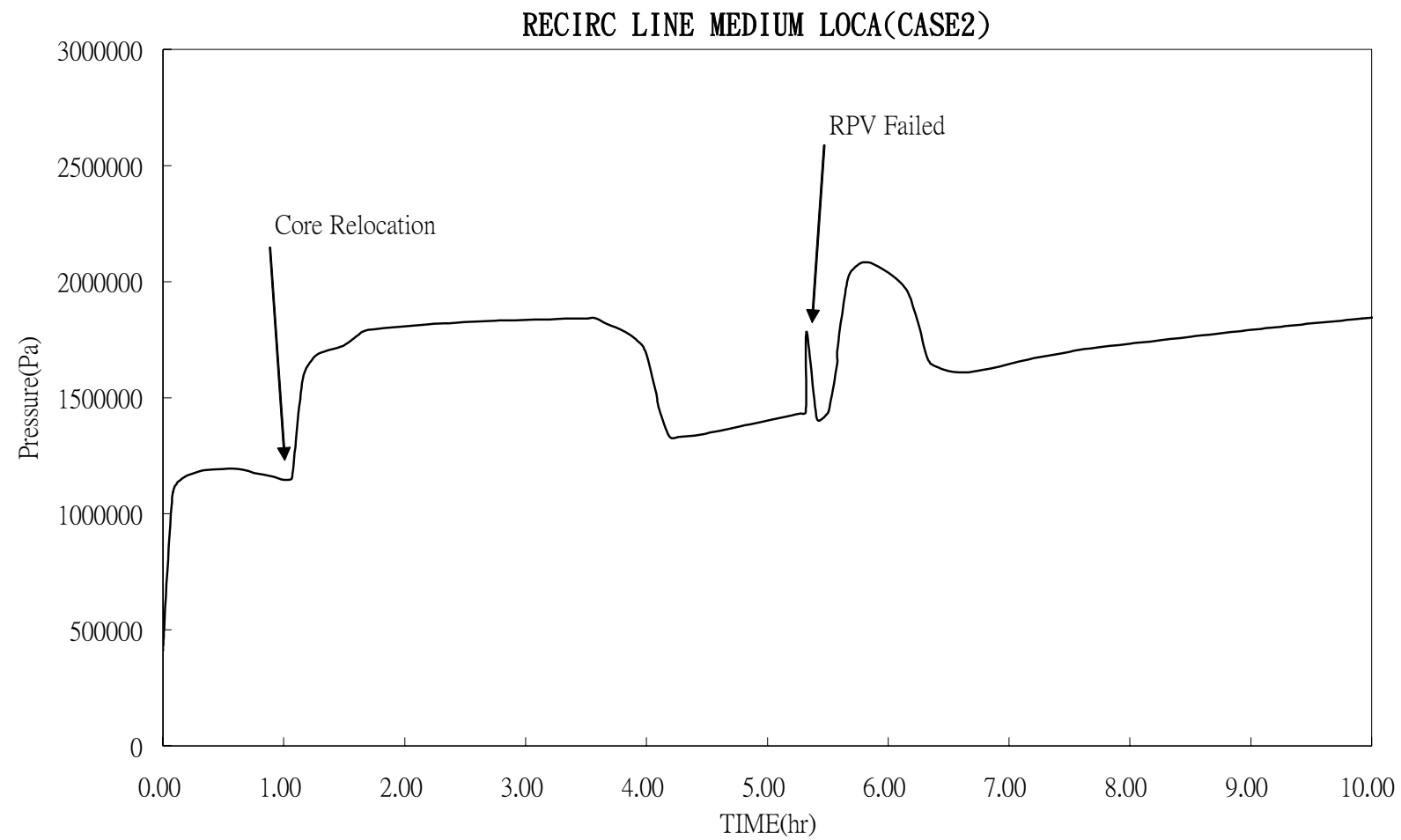
圖B. 3. 2. 2-4 破口水蒸汽流率



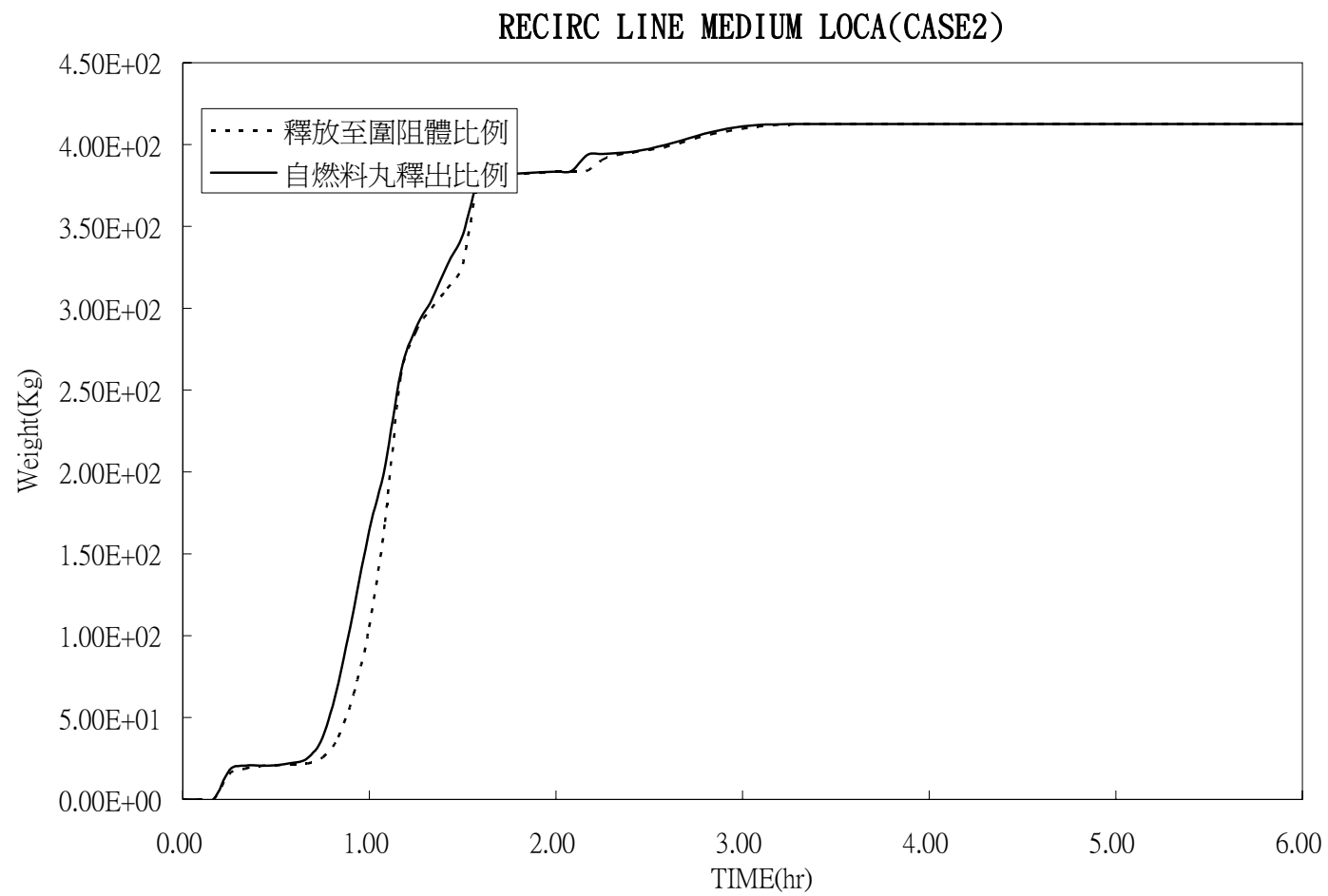
圖B. 3. 2. 2-5 爐心燃料最高溫度



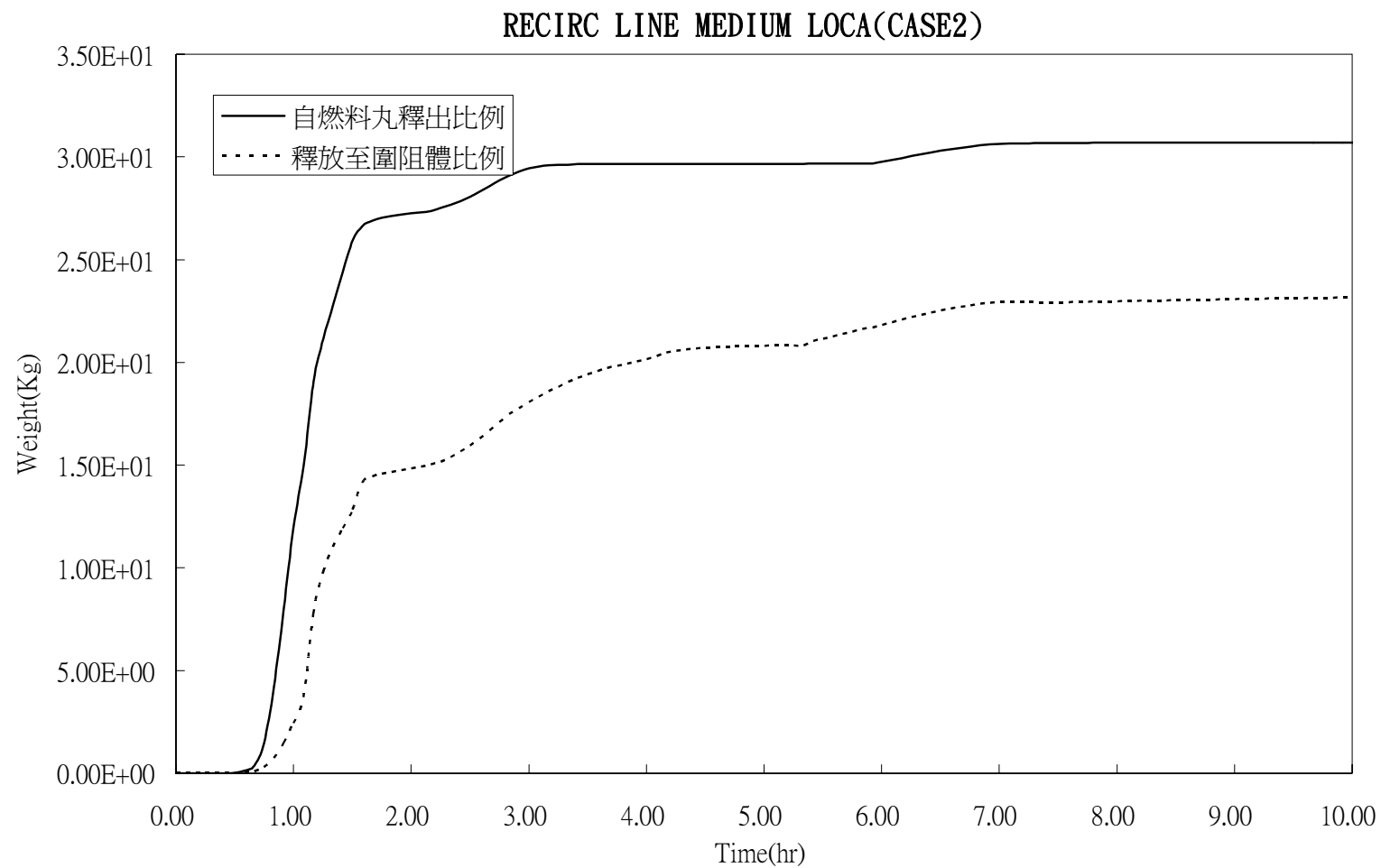
圖B. 3. 2. 2-6 爐心燃料棒護套氧化比例



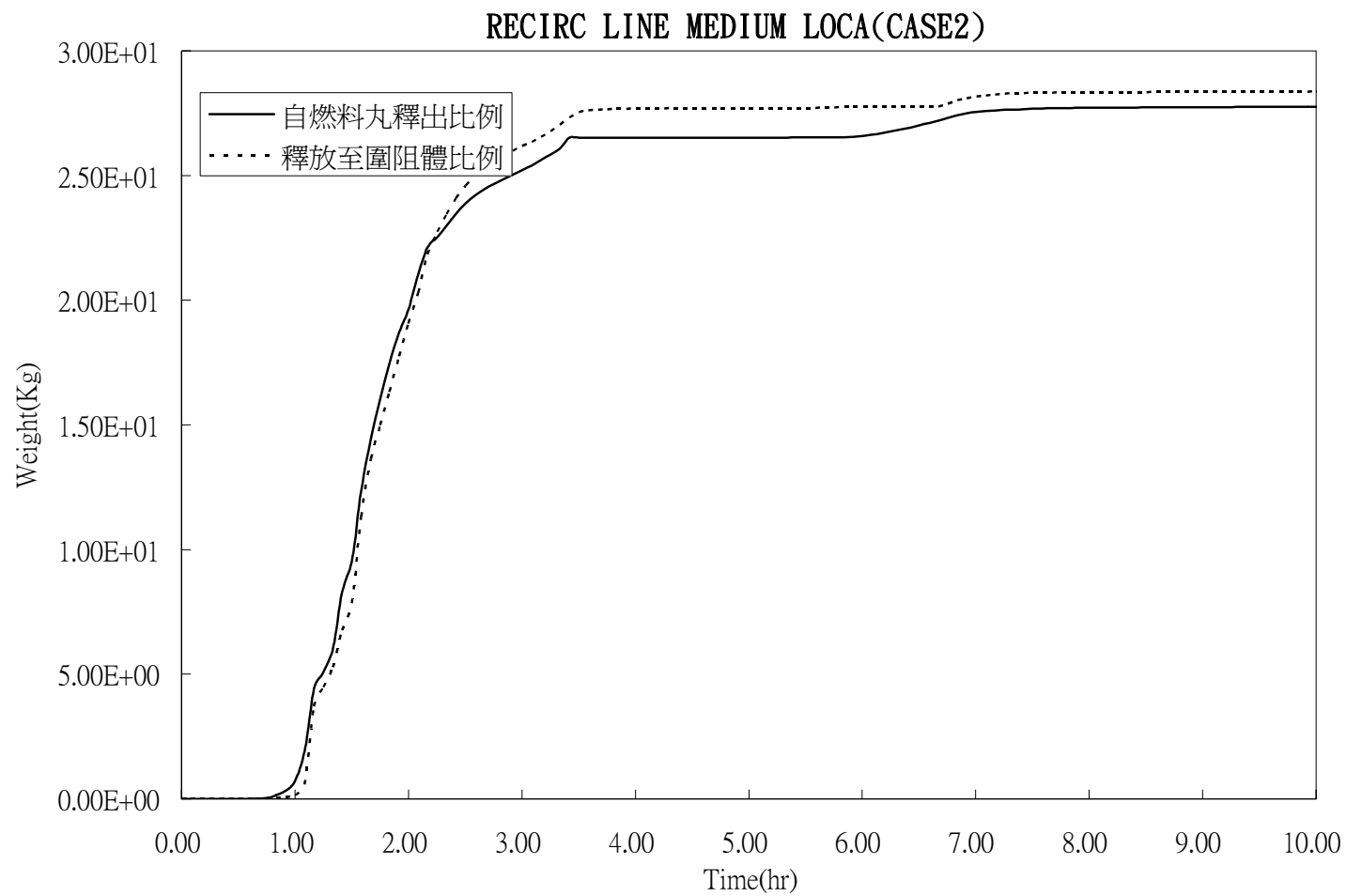
圖B. 3. 2. 2-7 圍阻體壓力



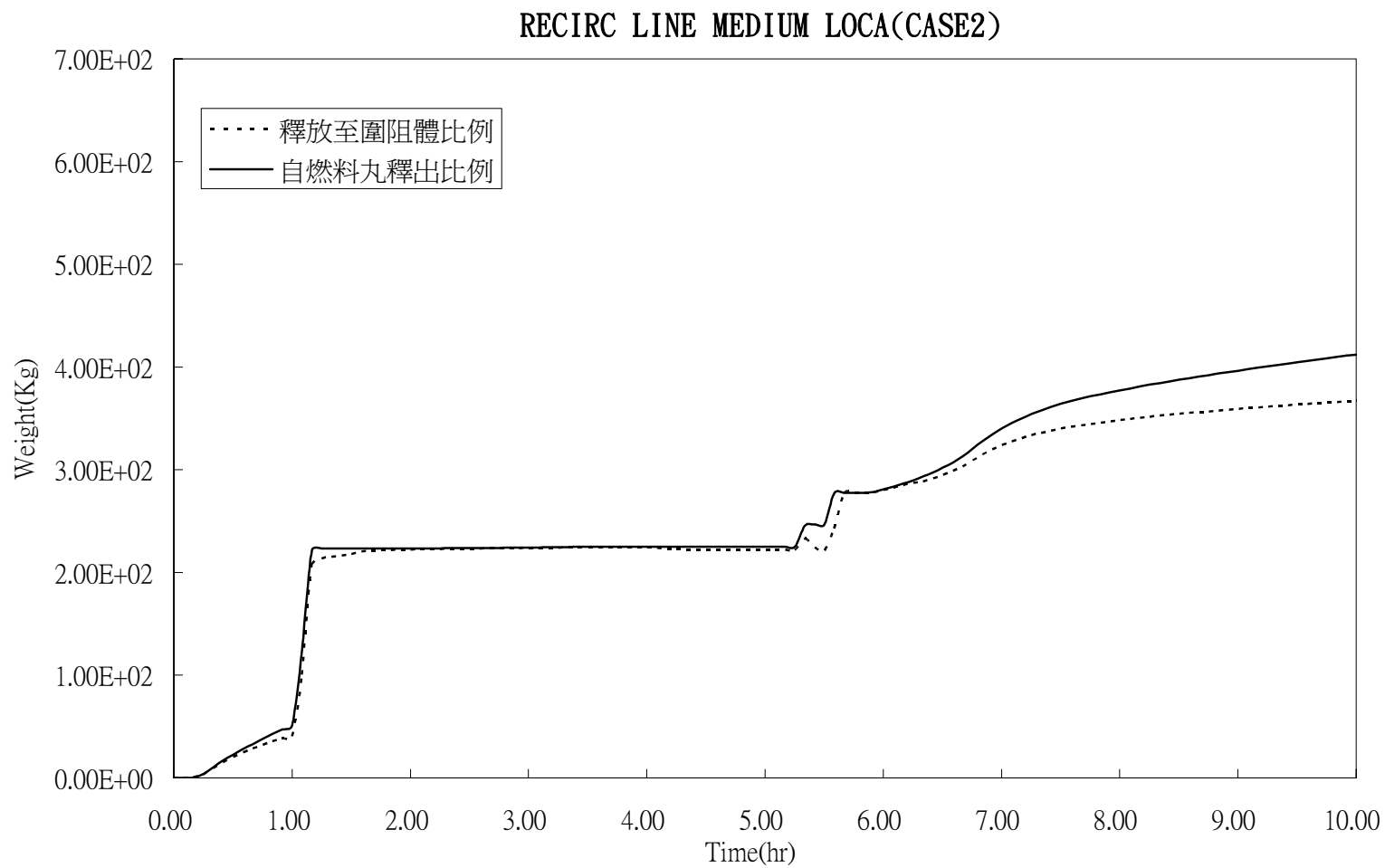
圖B. 3. 2. 2-8 惰性氣體外釋狀況



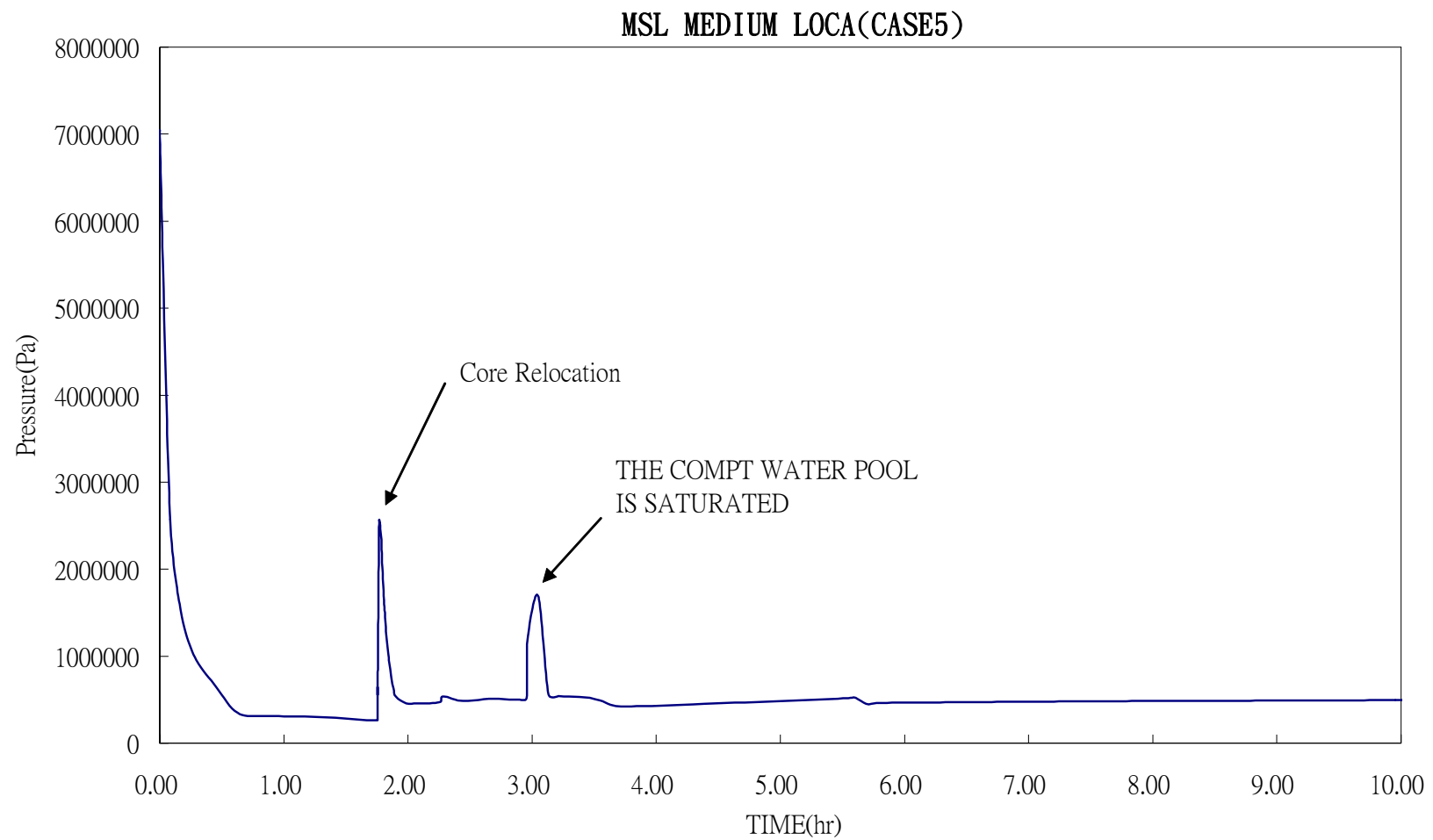
圖B. 3. 2. 2-9 CSI外釋狀況



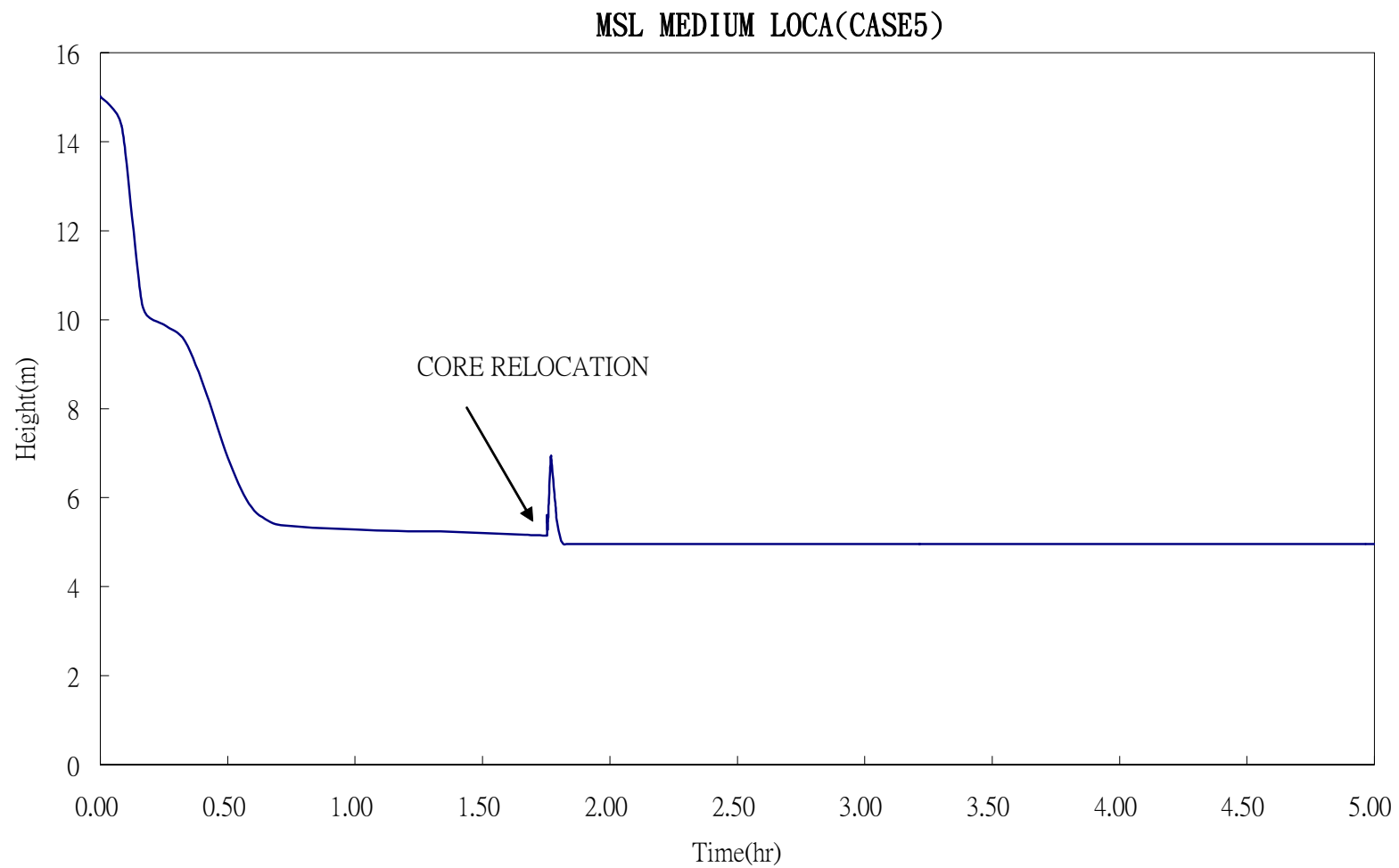
圖B. 3. 2. 2-10 TeO₂外釋狀況



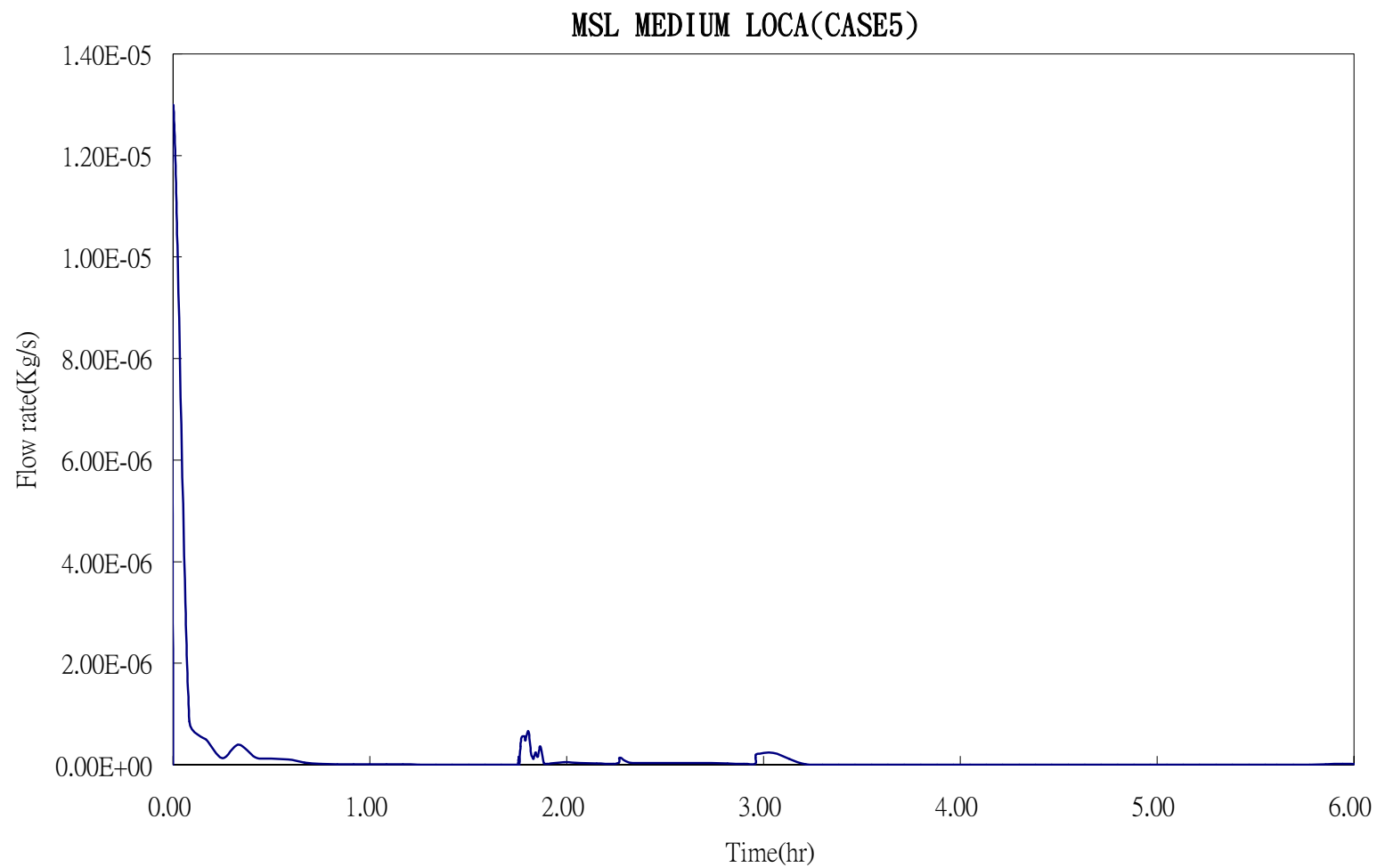
圖B.3.2.2-11 氫氣產生量及分佈



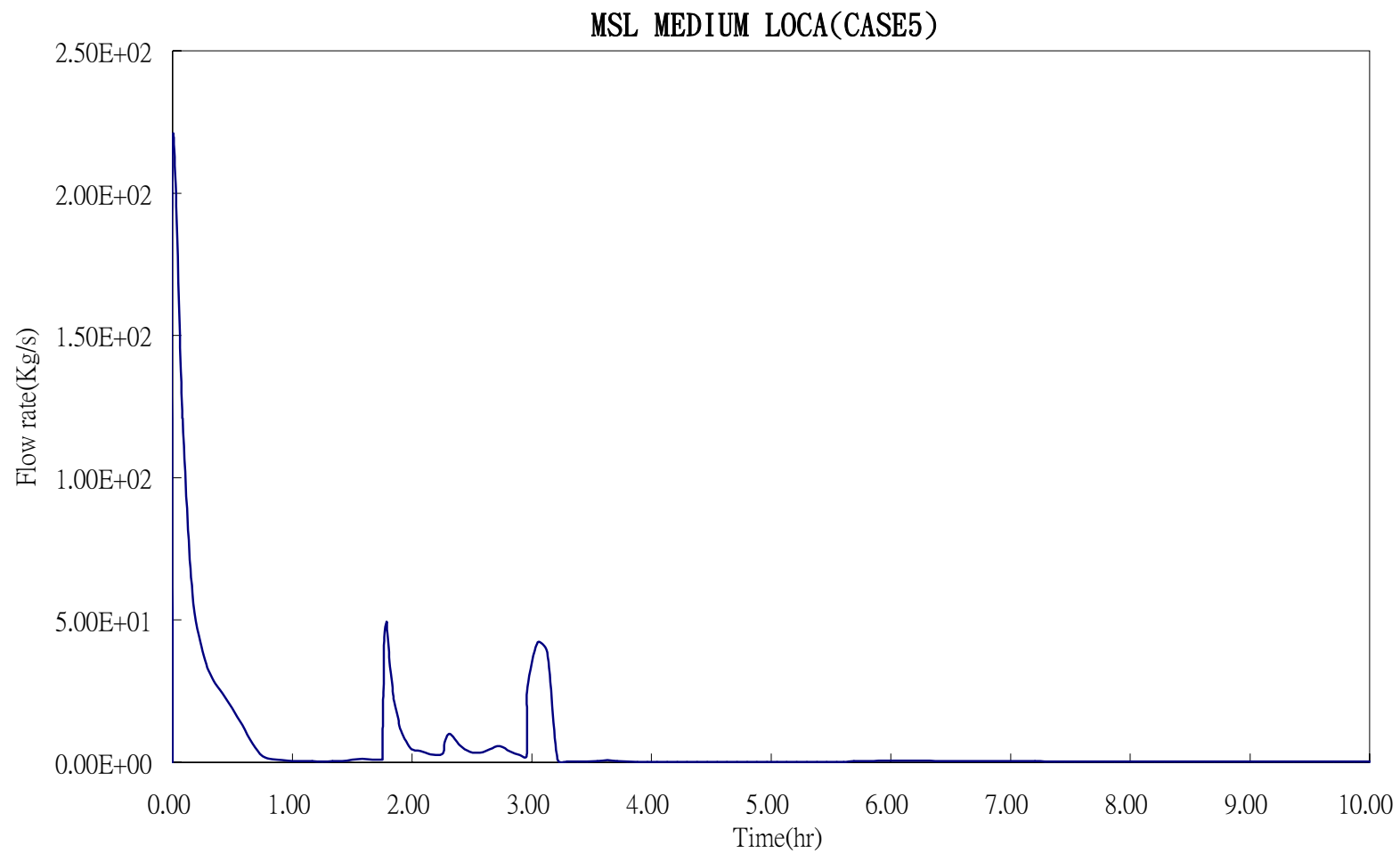
圖B. 3. 2. 2-12 一次系統壓力



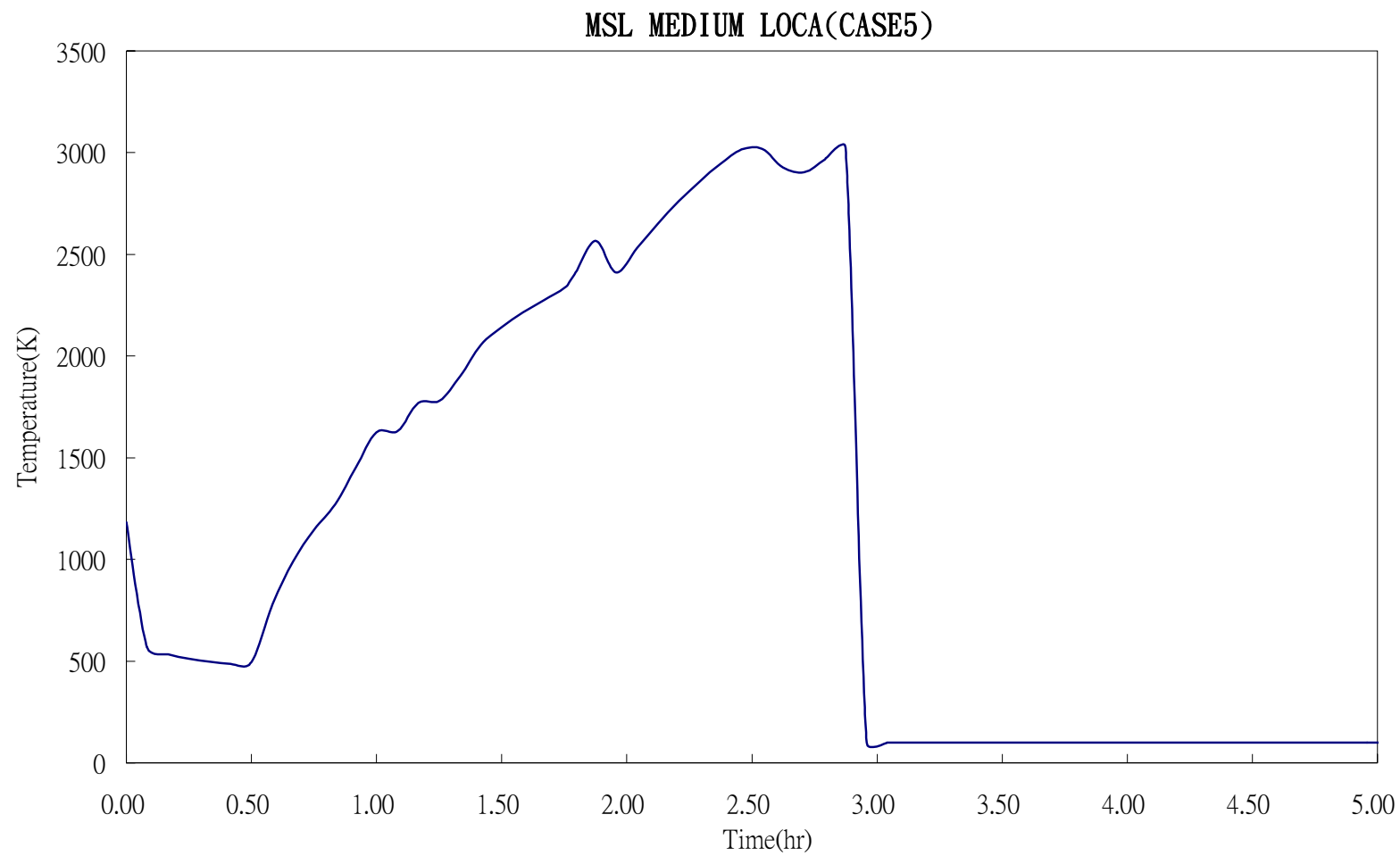
圖B. 3. 2. 2-13 爐心水位



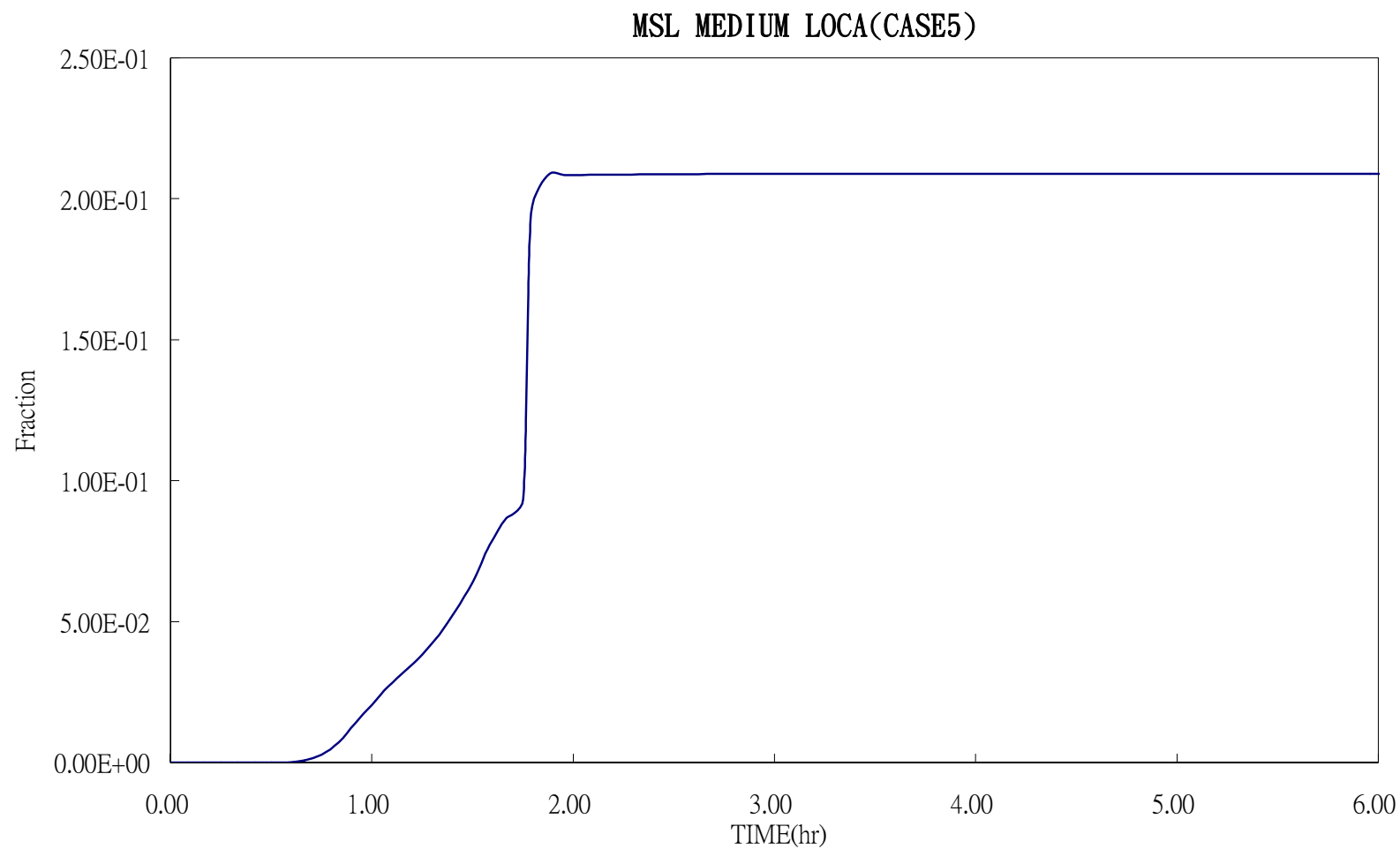
圖B.3.2.2-14 破口冷卻水流率



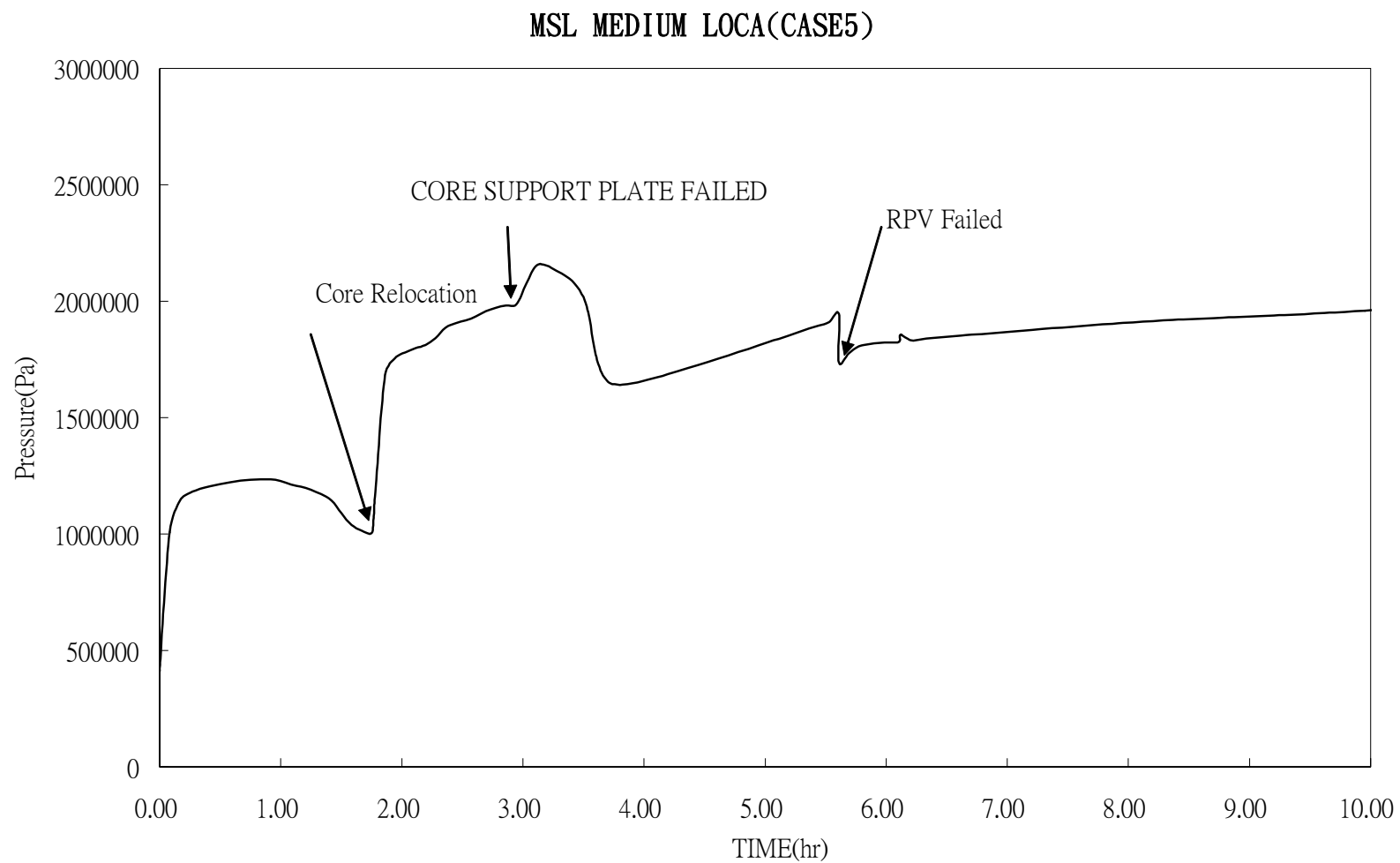
圖B. 3. 2. 2-15 破口水蒸汽流率



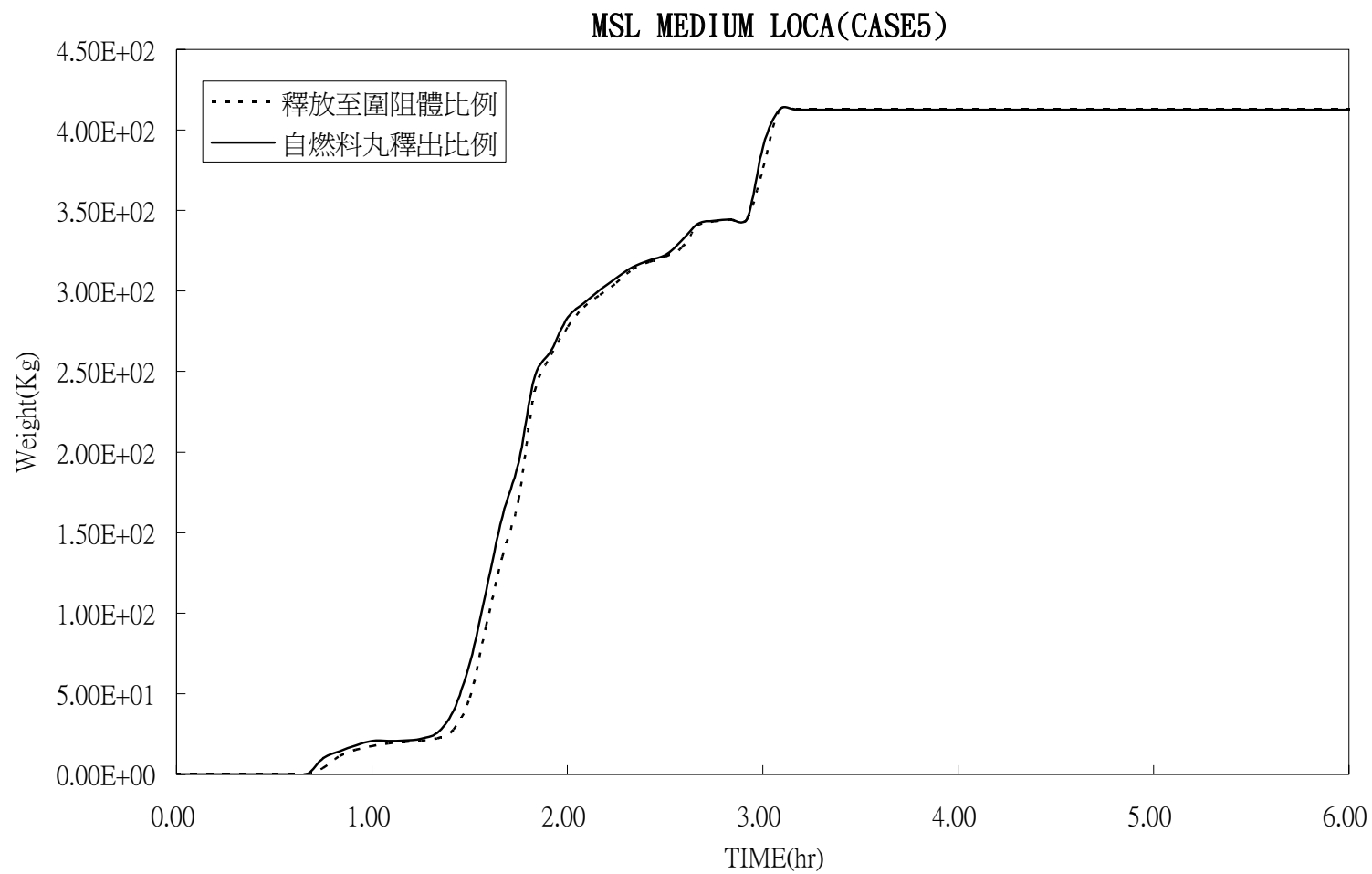
圖B. 3. 2. 2-16 爐心燃料最高溫度



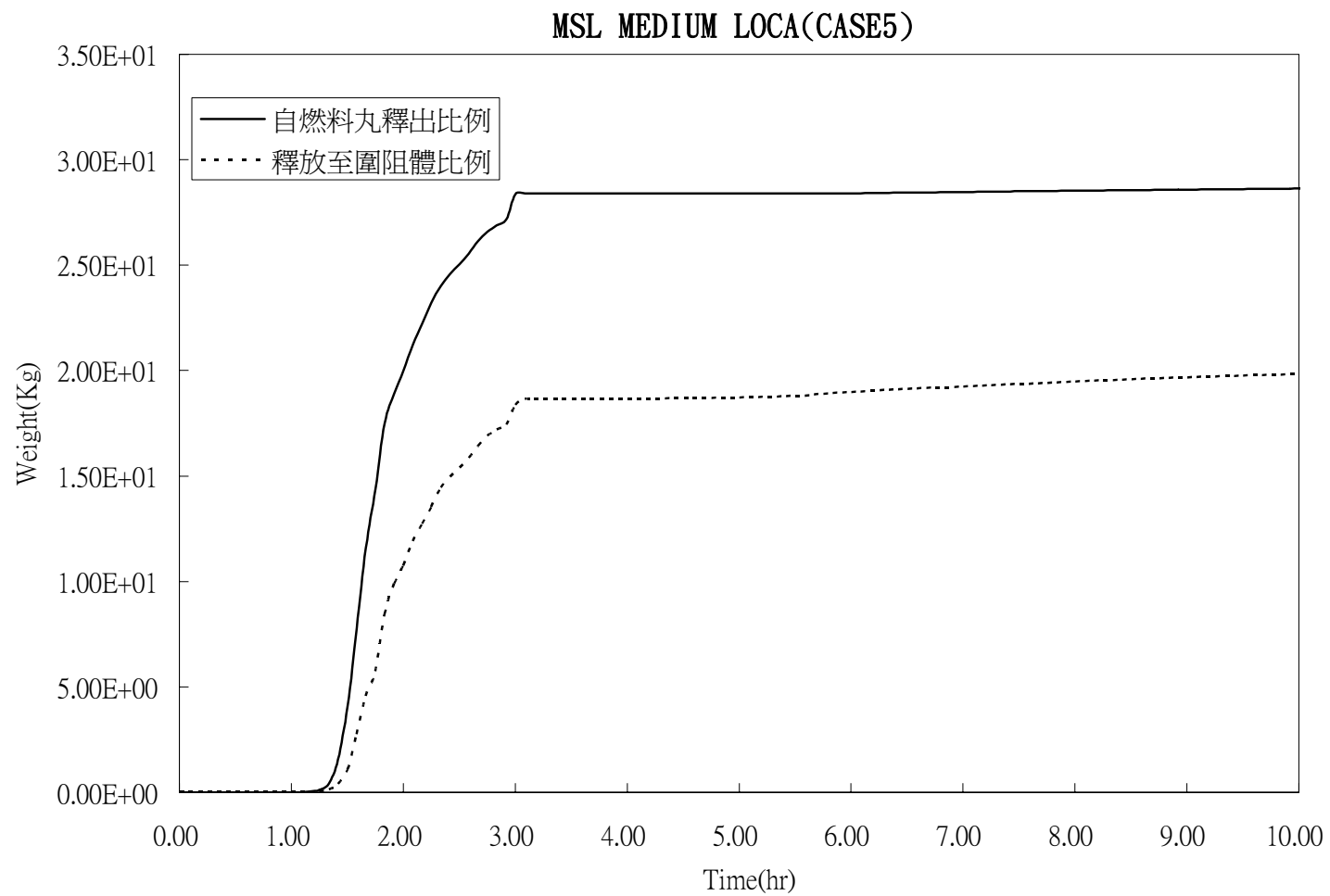
圖B. 3. 2. 2-17 爐心燃料棒護套氧化比例



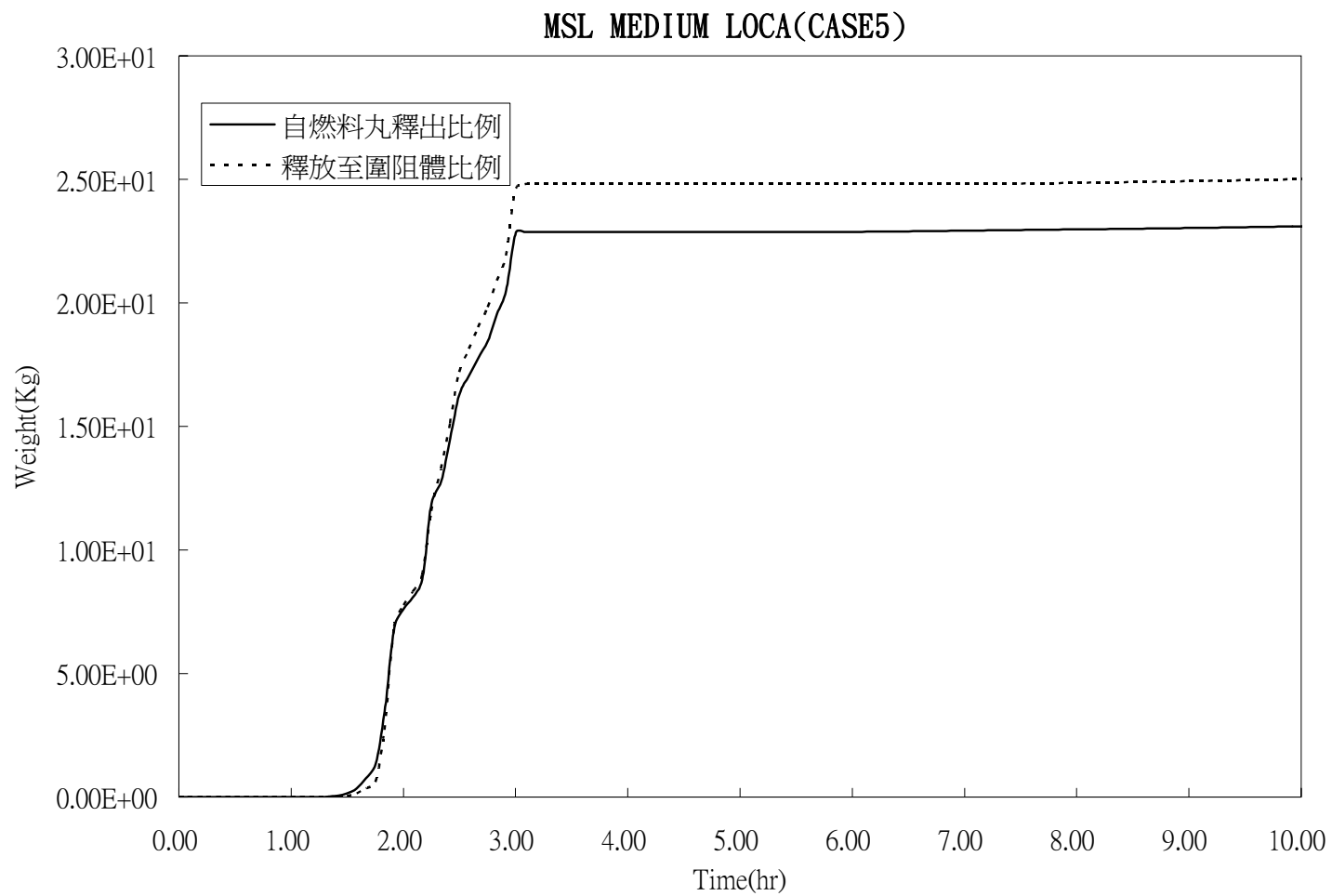
圖B. 3. 2. 2-18 圍阻體壓力



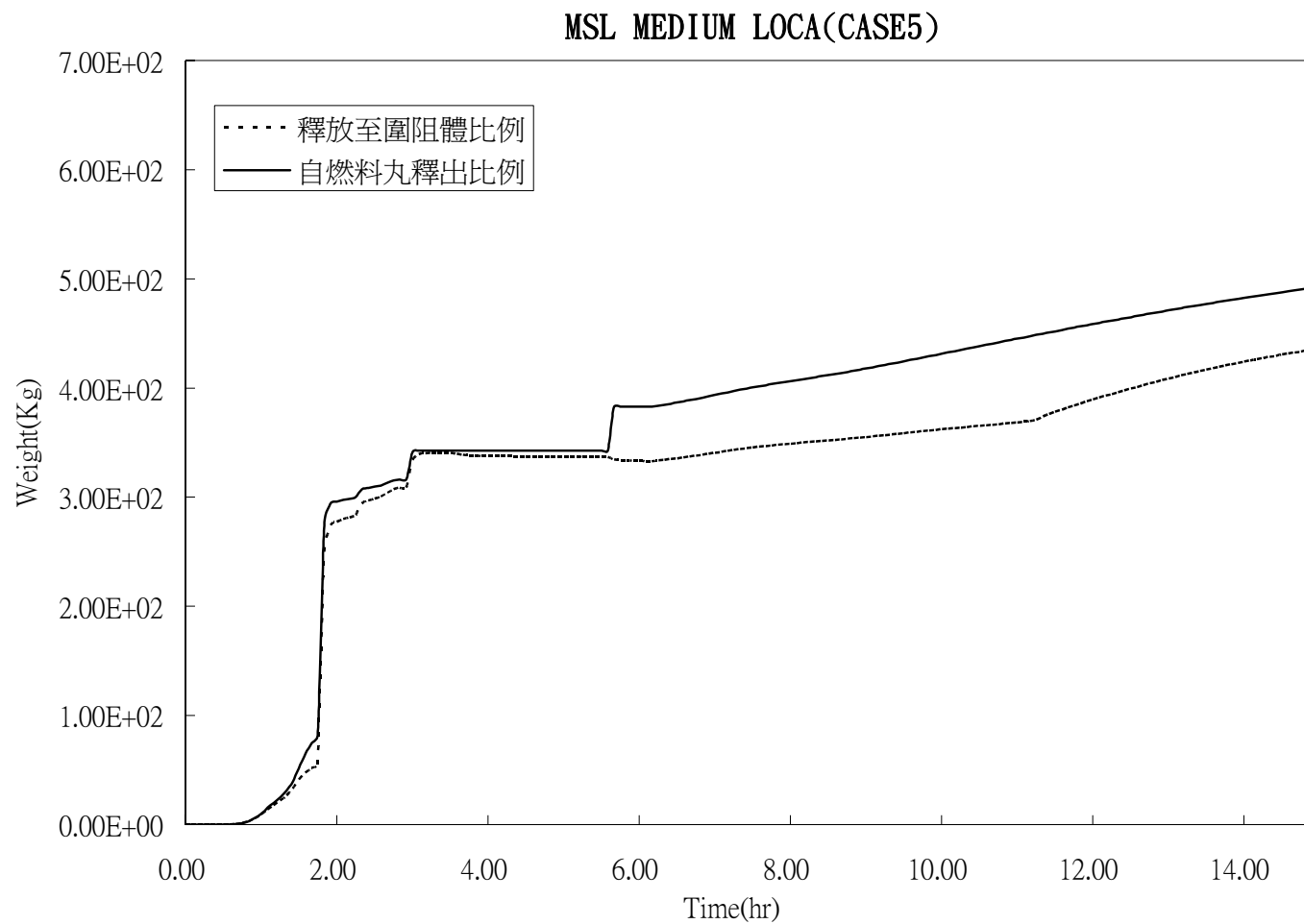
圖B.3.2.2-19 惰性氣體外釋狀況



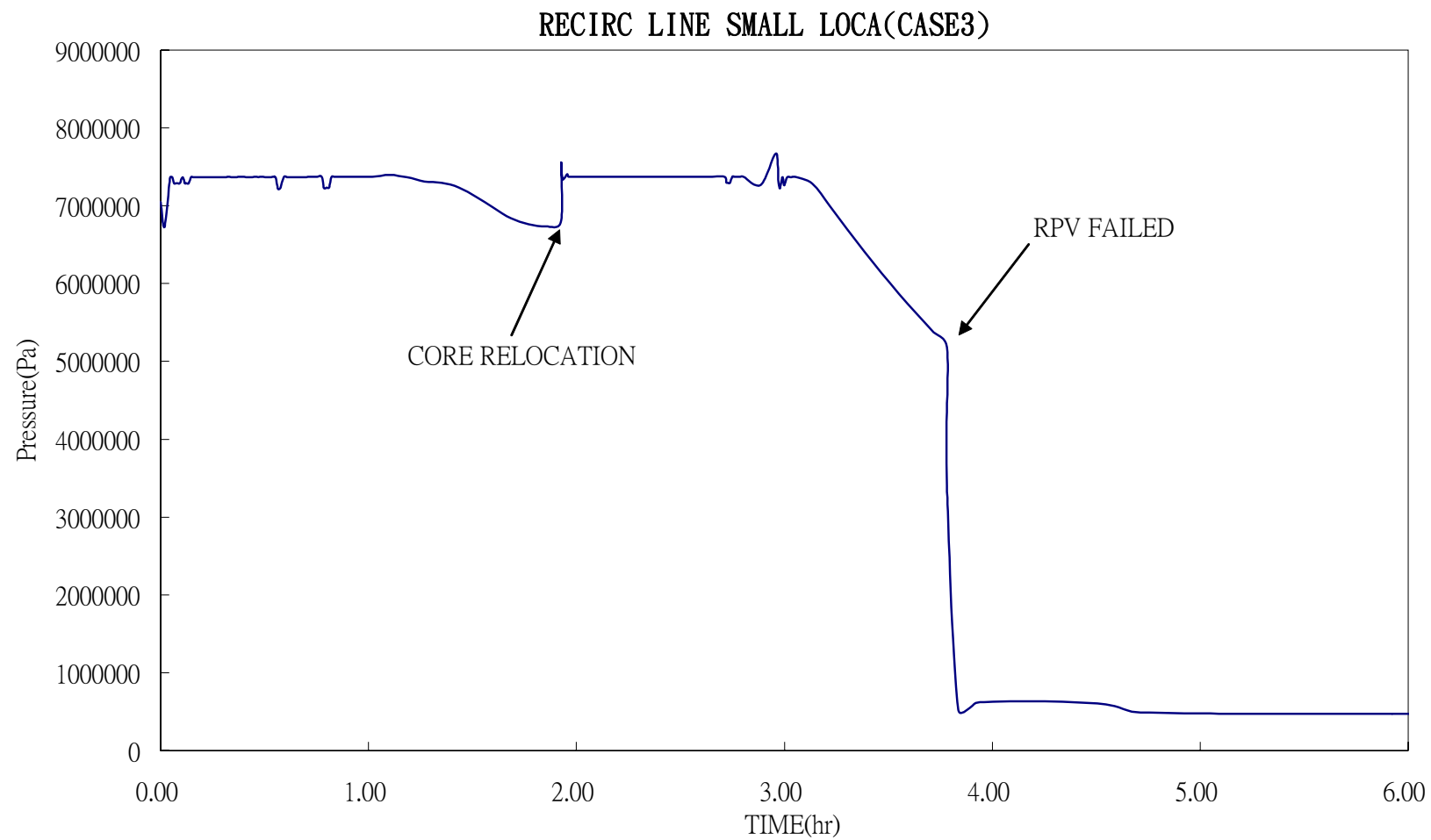
圖B. 3. 2. 2-20 CSI外釋狀況



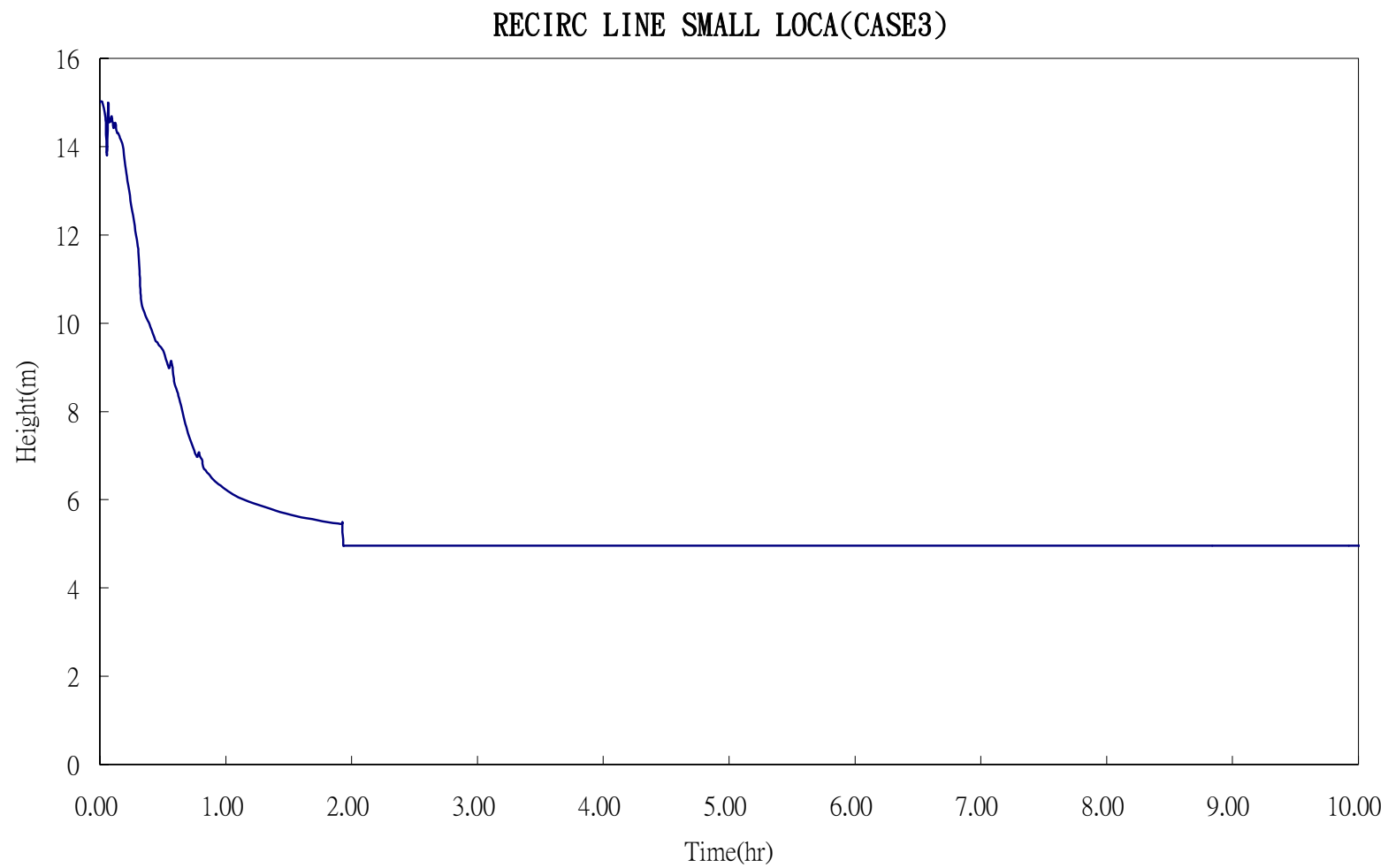
圖B. 3. 2. 2-21 TeO₂外釋狀況



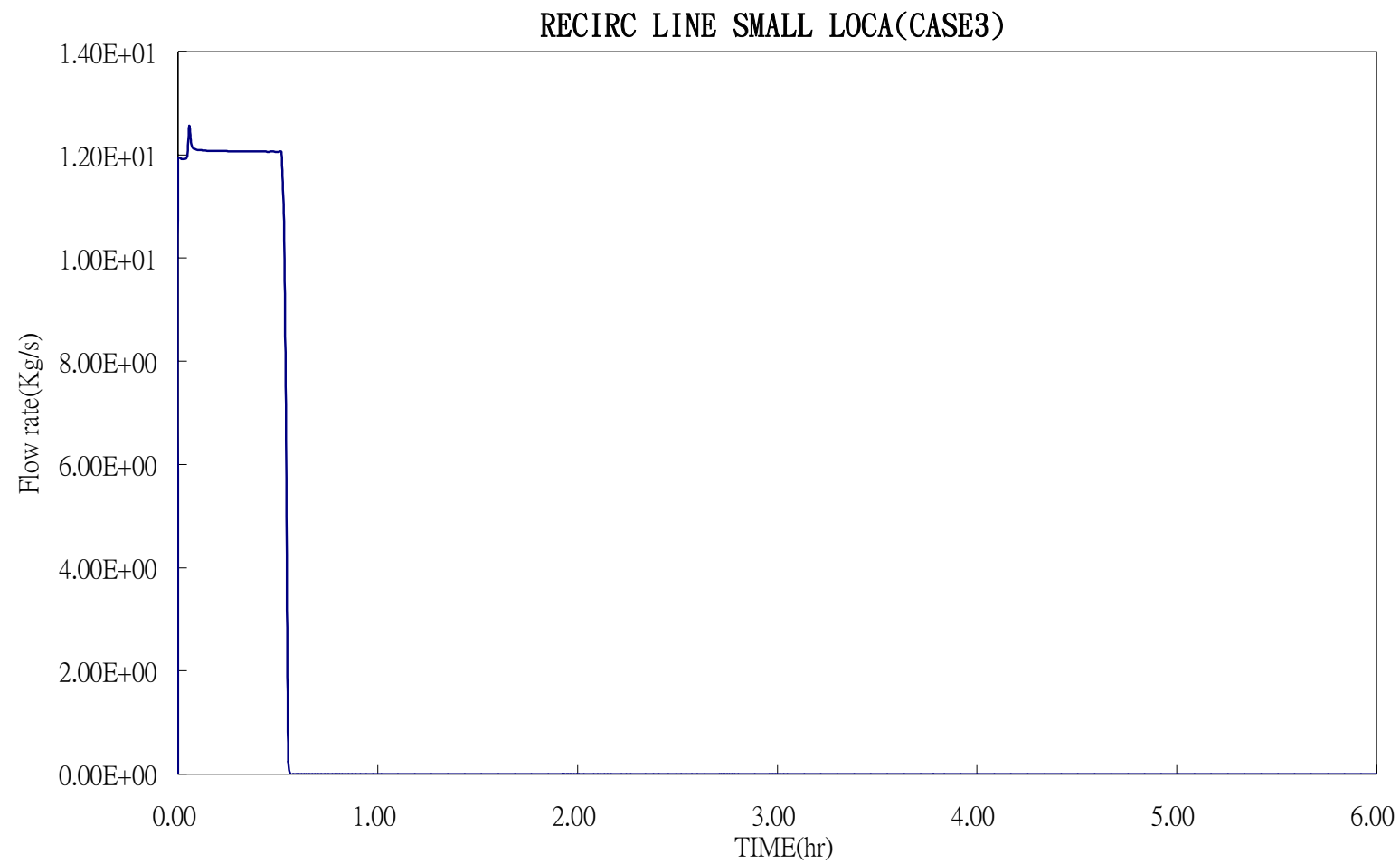
圖B. 3. 2. 2-22 氫氣產生量及分佈



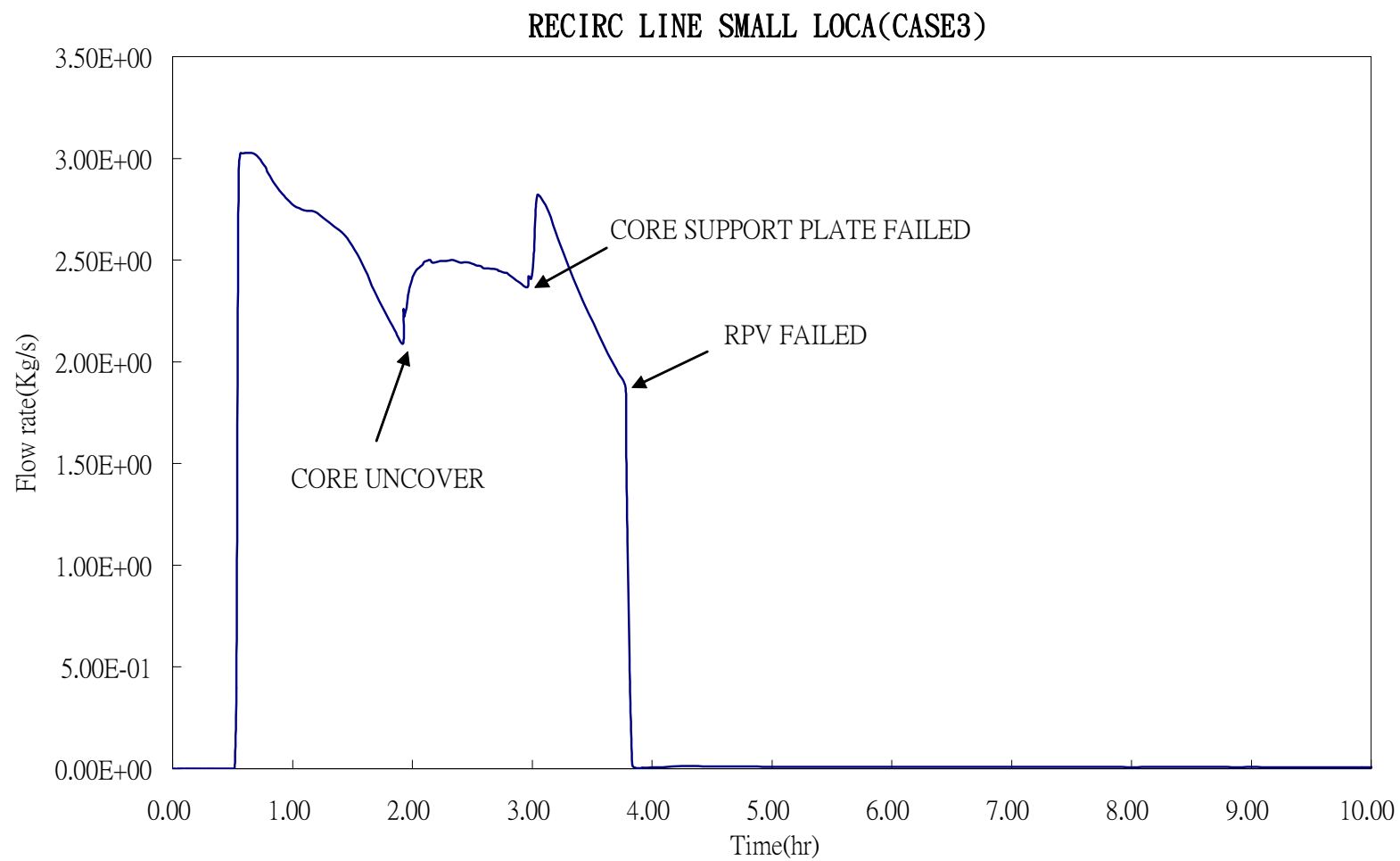
圖B.3.2.2-23 一次系統壓力



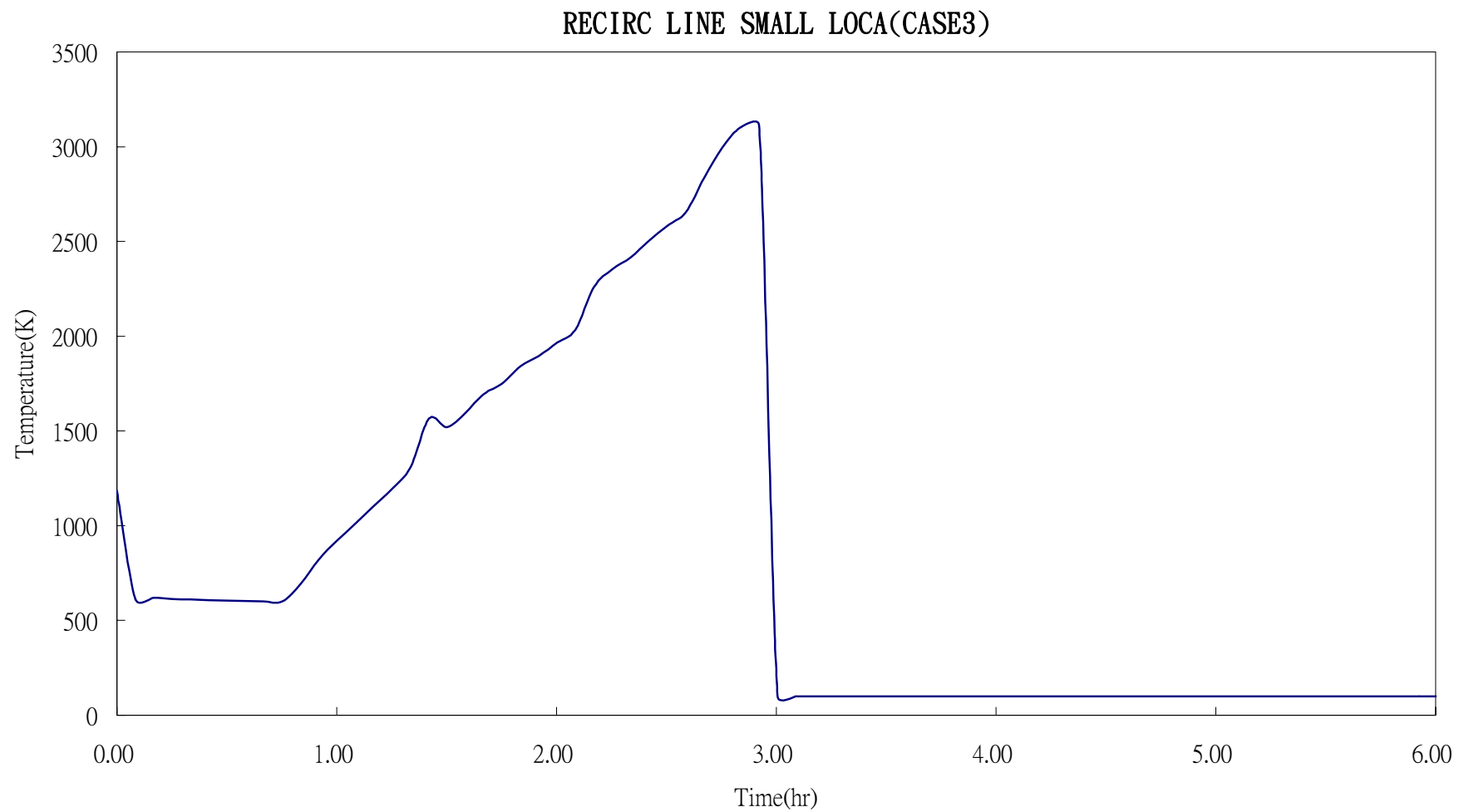
圖B. 3. 2. 2-24 爐心水位



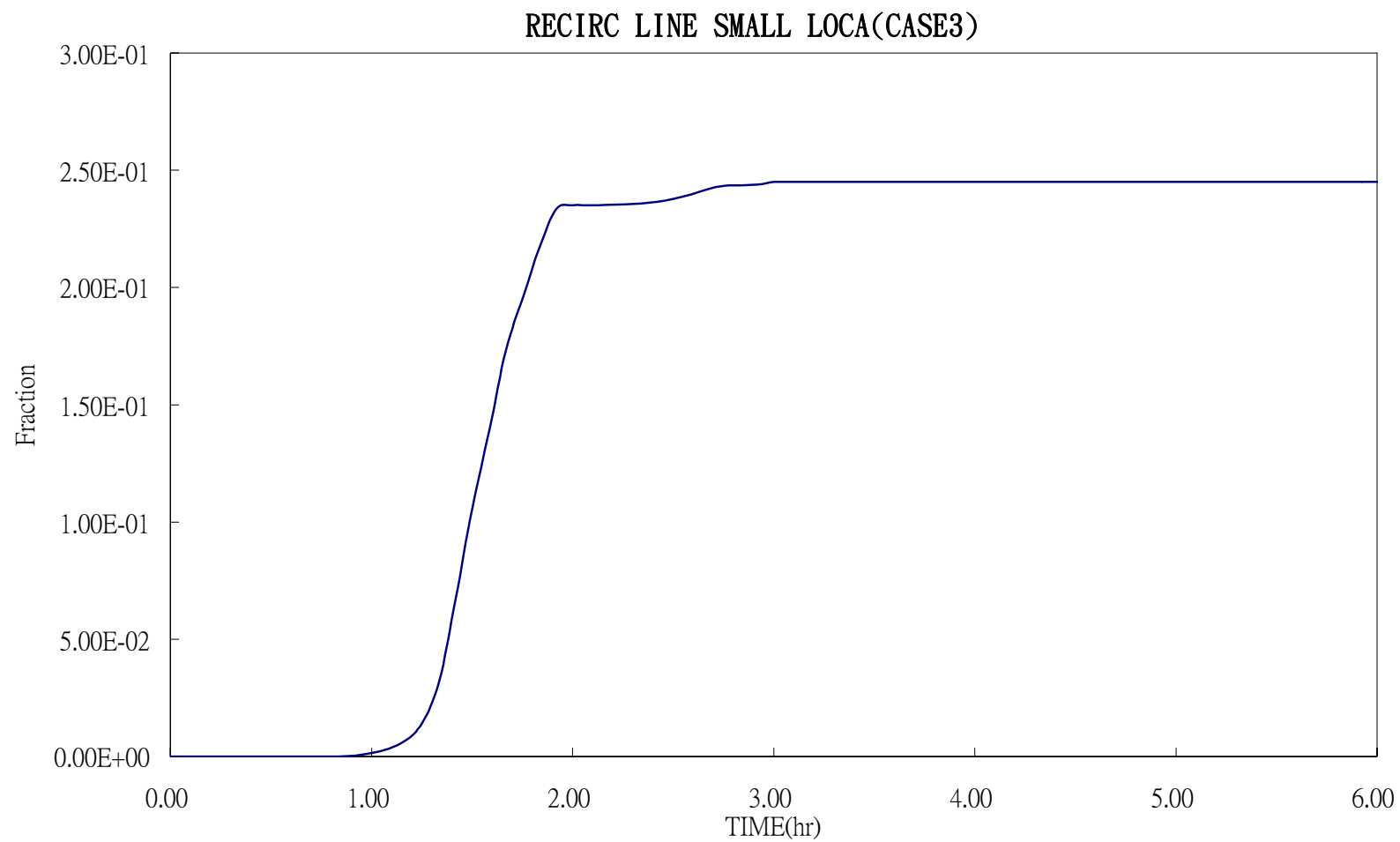
圖B.3.2.2-25 破口冷卻水流率



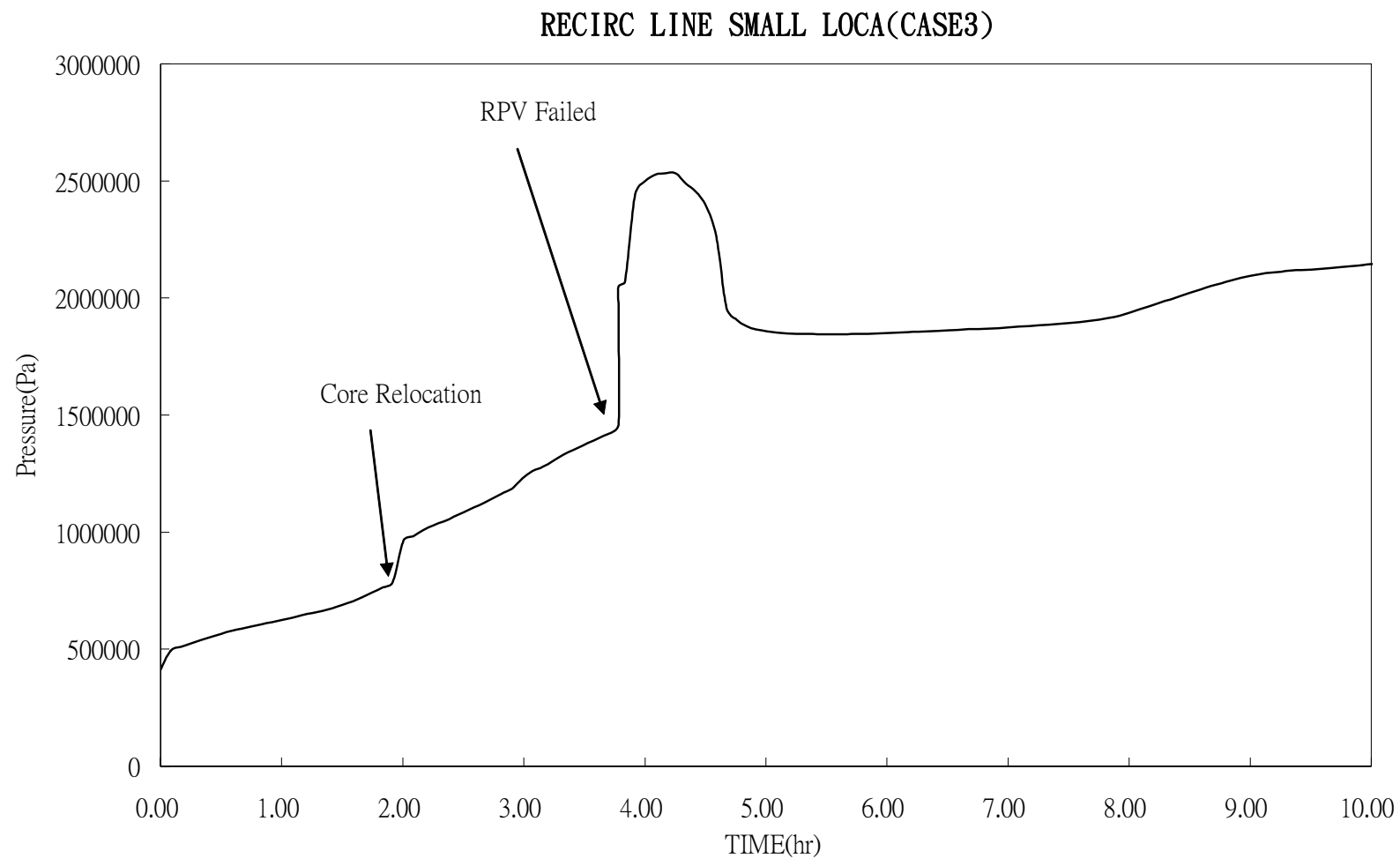
圖B. 3. 2. 2-26 破口水蒸汽流率



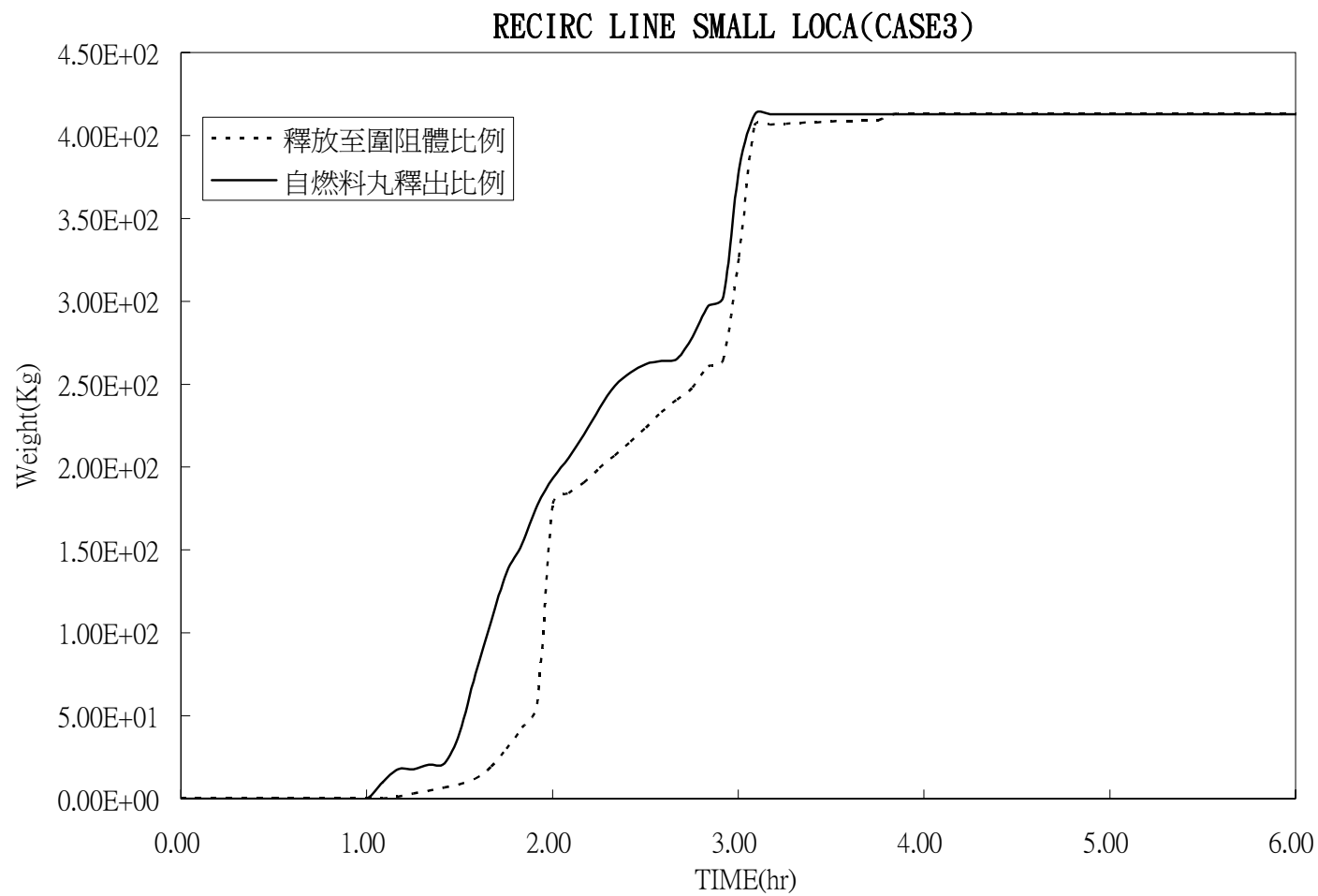
圖B. 3. 2. 2-27 爐心燃料最高溫度



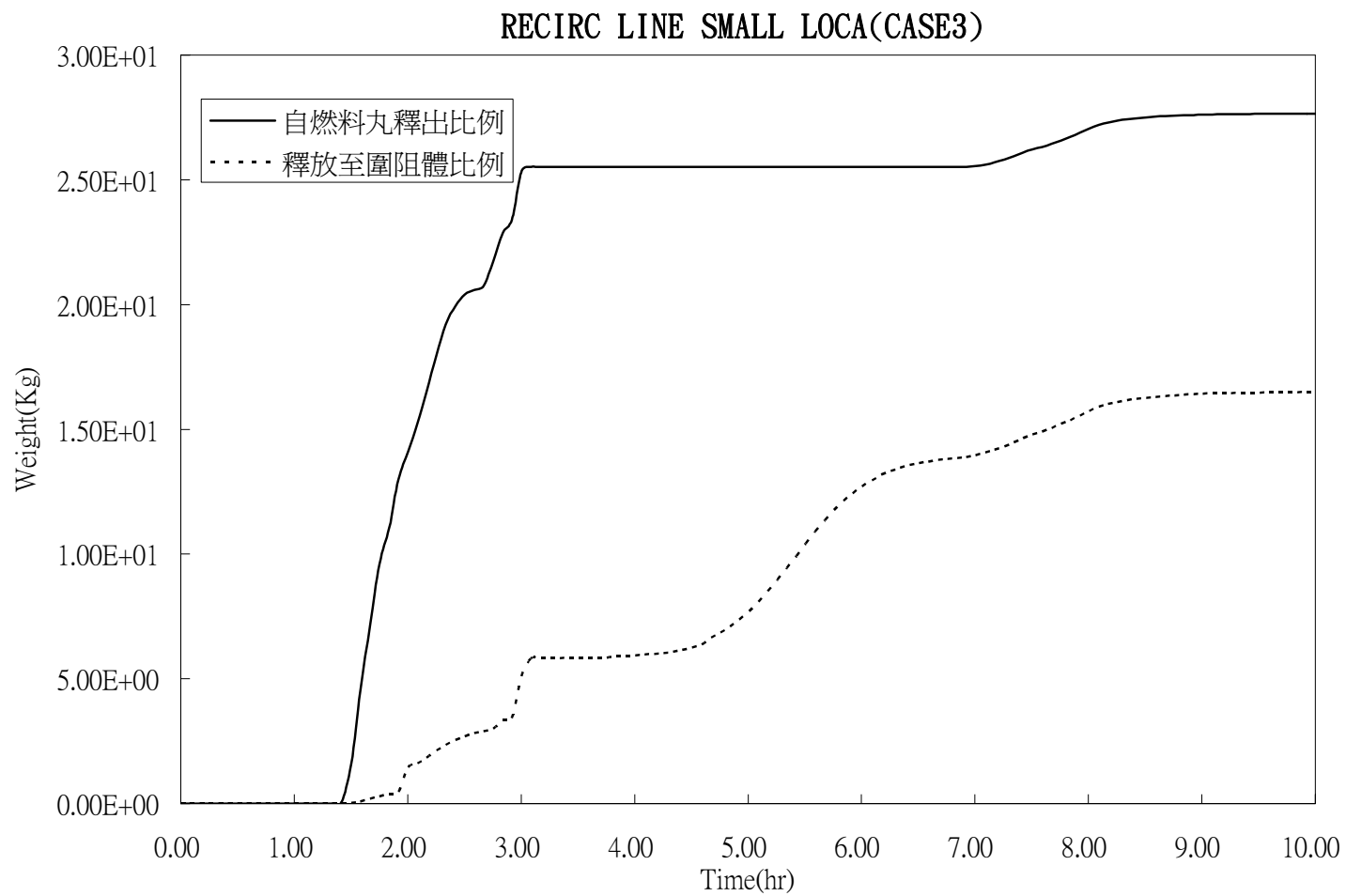
圖B. 3. 2. 2-28 爐心燃料棒護套氧化比例



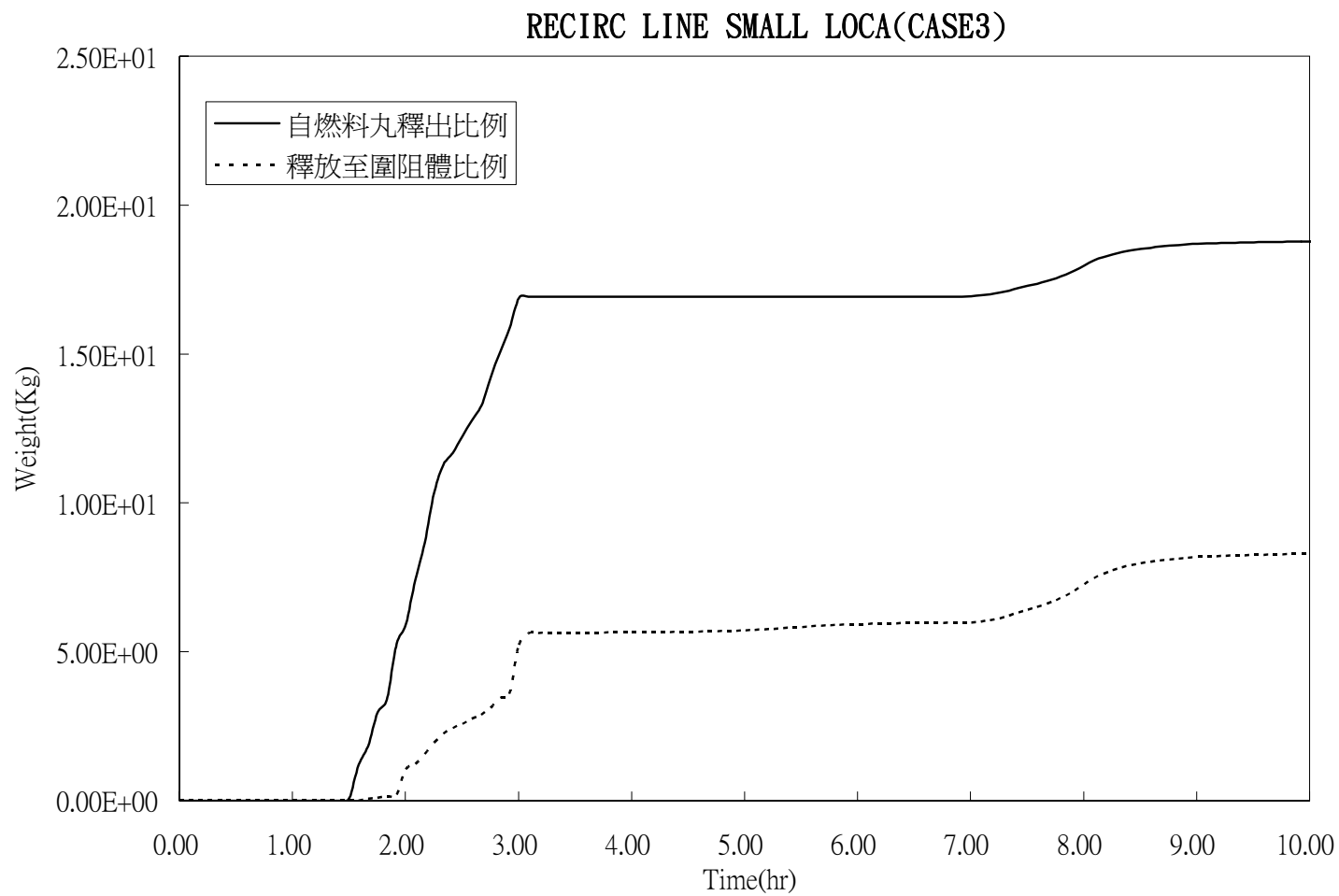
圖B. 3. 2. 2-29 圍阻體壓力



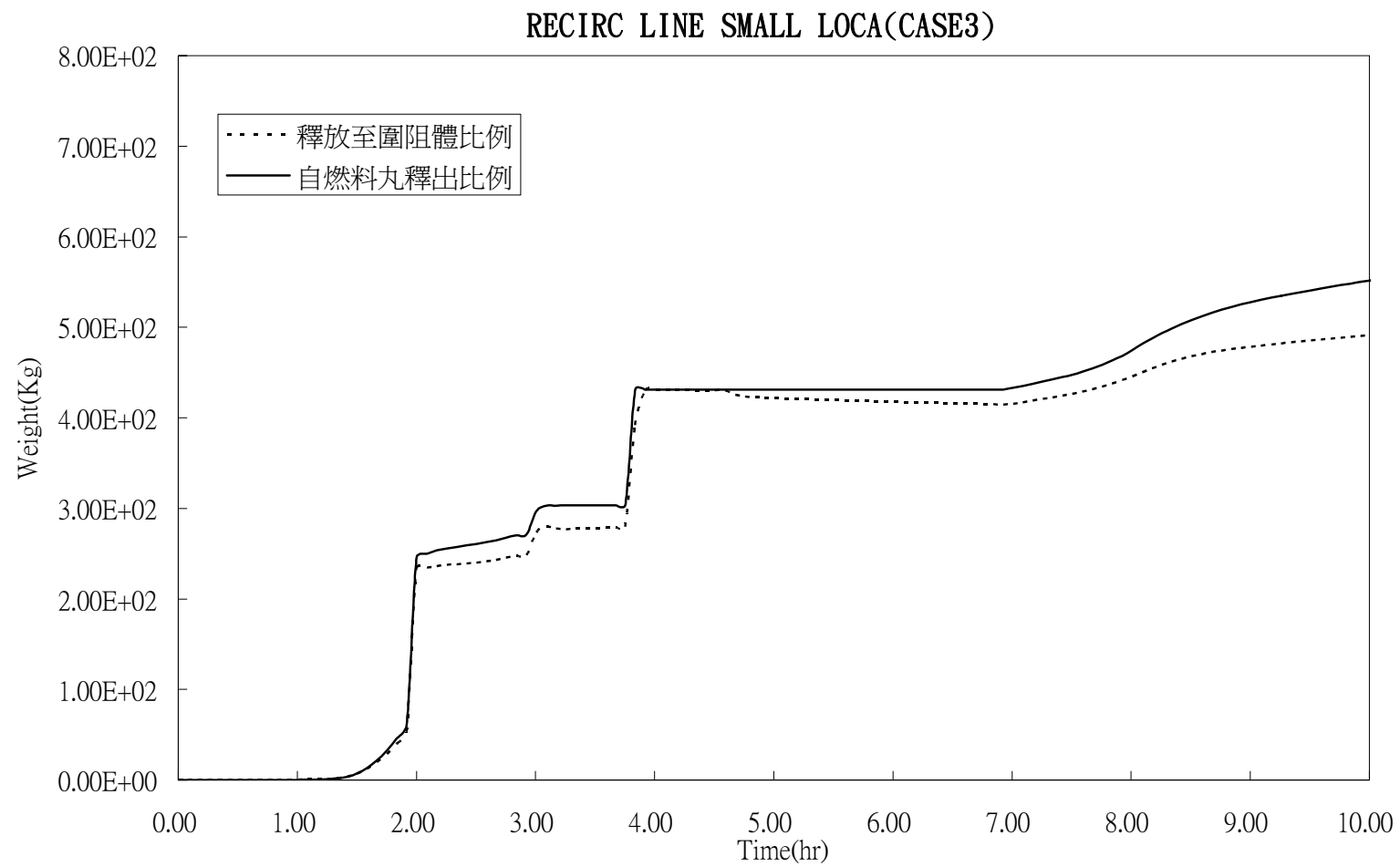
圖B. 3. 2. 2-30 惰性氣體外釋狀況



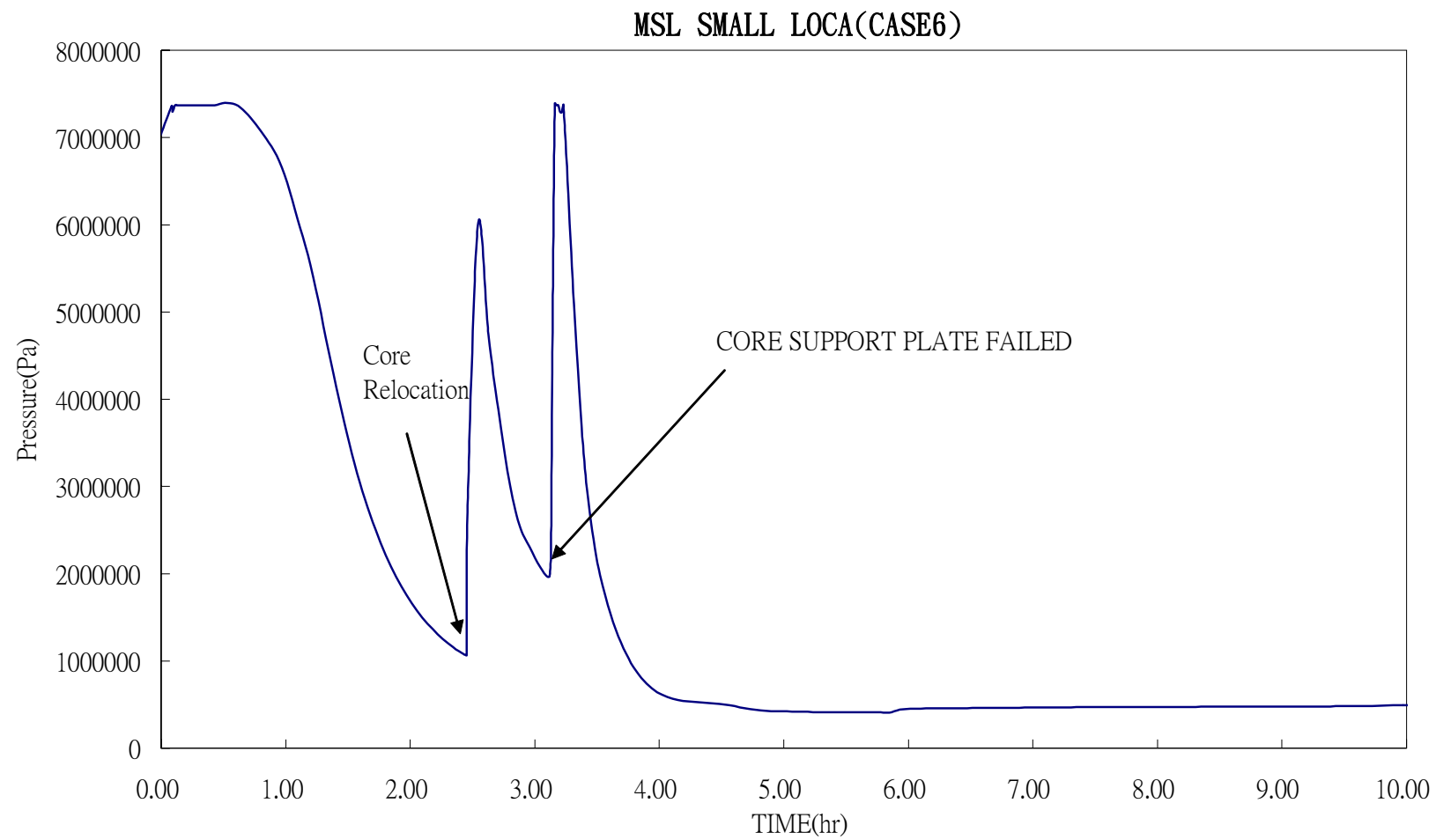
圖B. 3. 2. 2-31 CSI外釋狀況



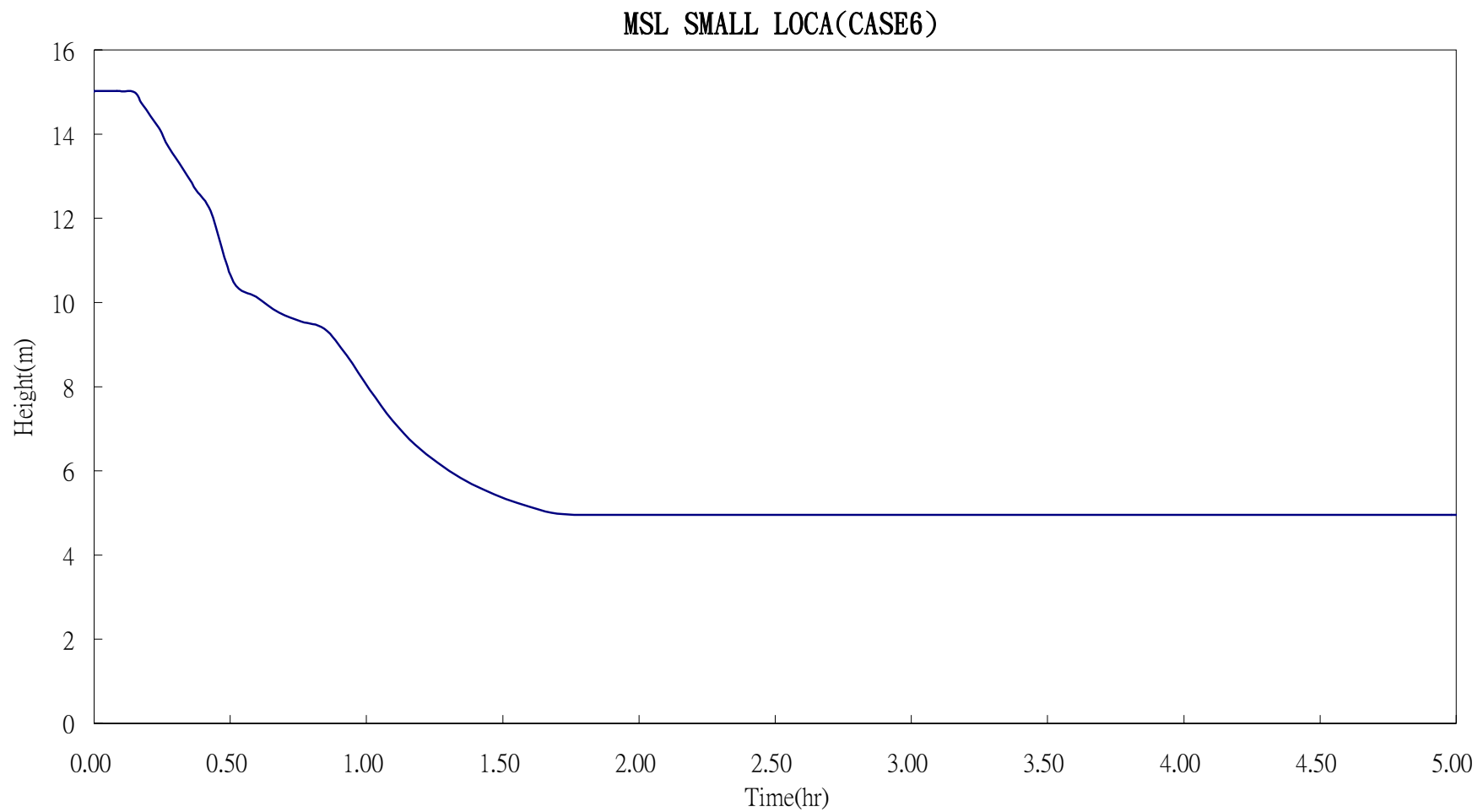
圖B. 3. 2. 2-32 TeO₂外釋狀況



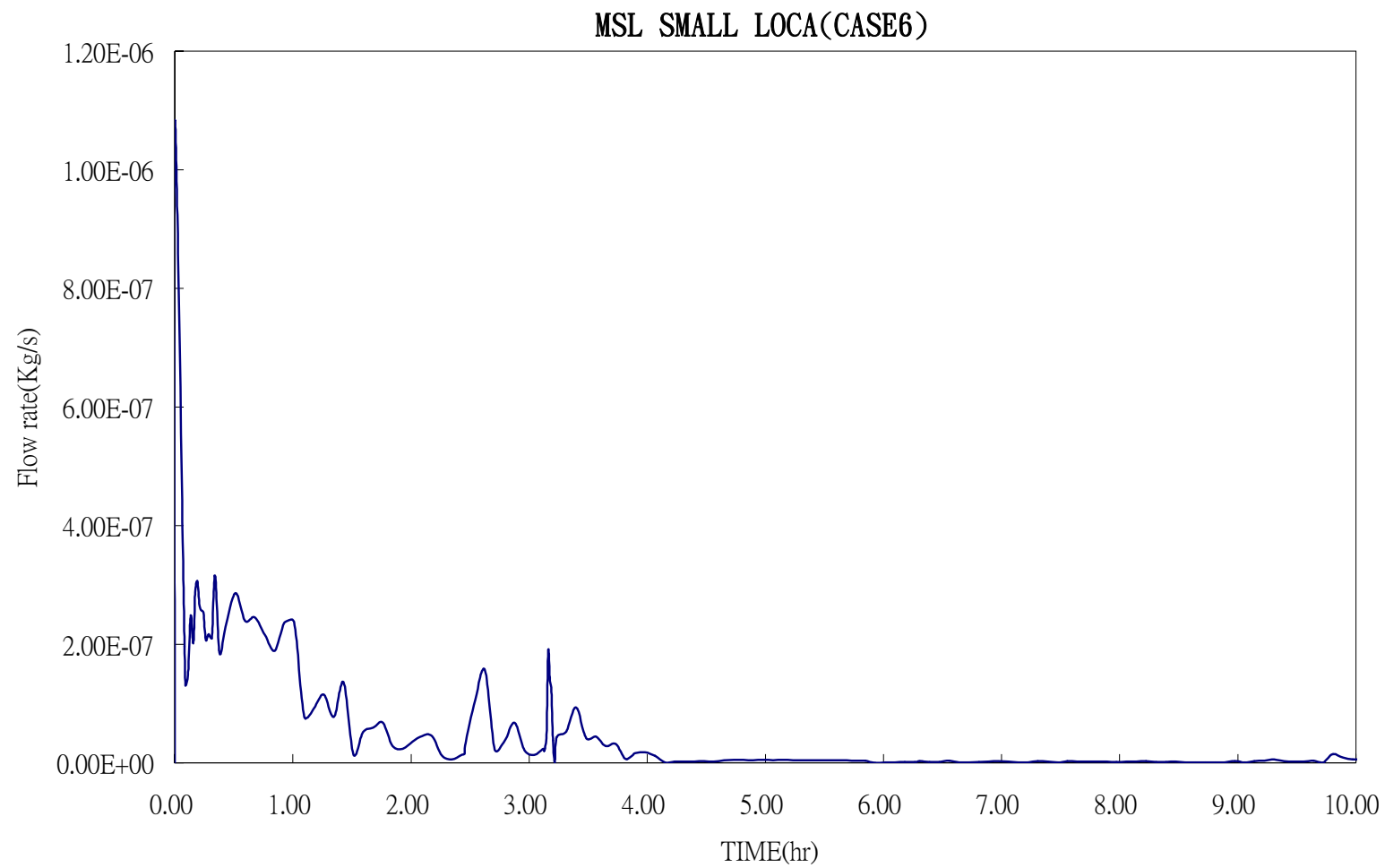
圖B. 3. 2. 2-33 氫氣產生量及分佈



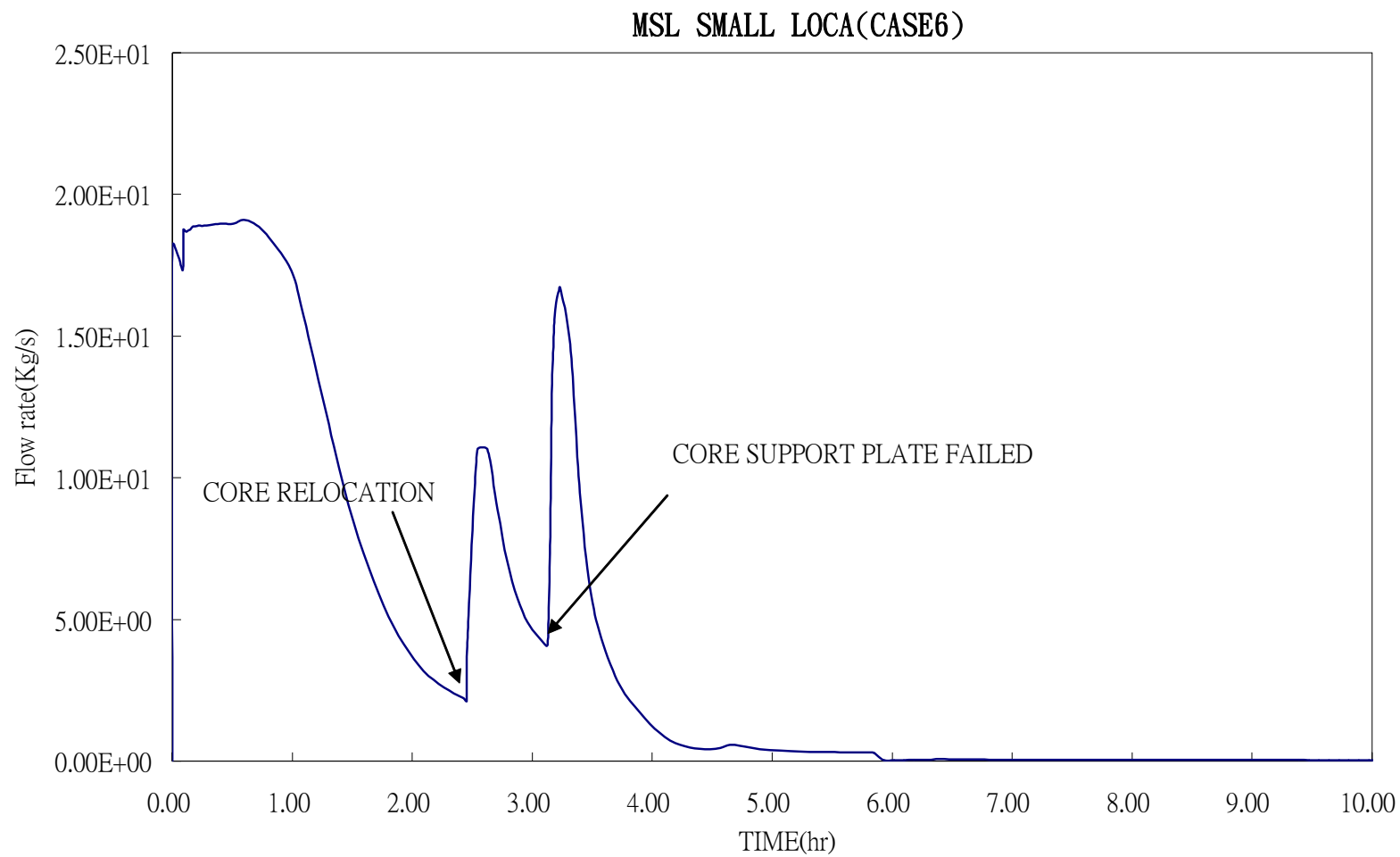
圖B. 3. 2. 2-34 一次系統壓力



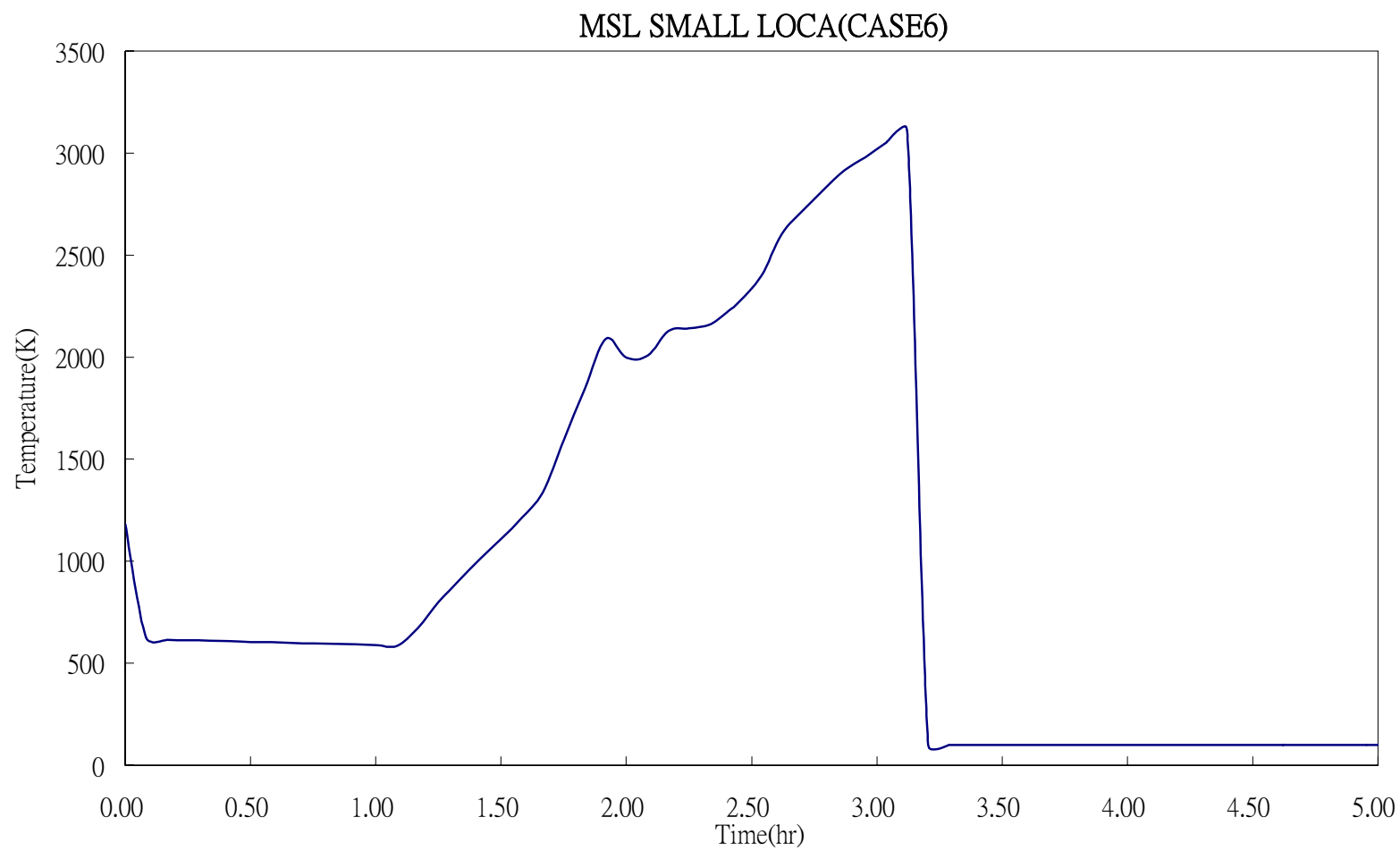
圖B. 3. 2. 2-35 爐心水位



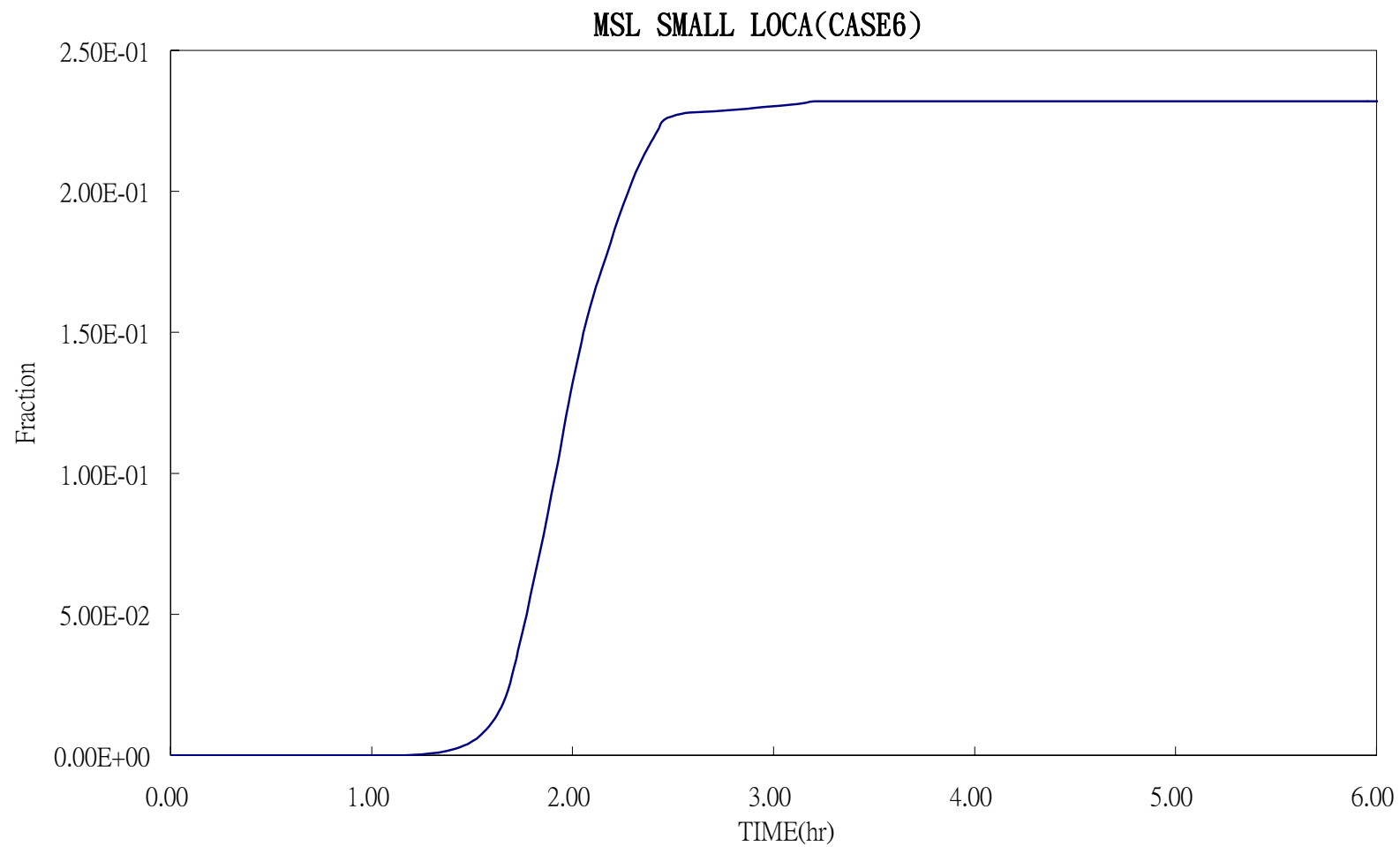
圖B. 3. 2. 2-36 破口冷卻水流率



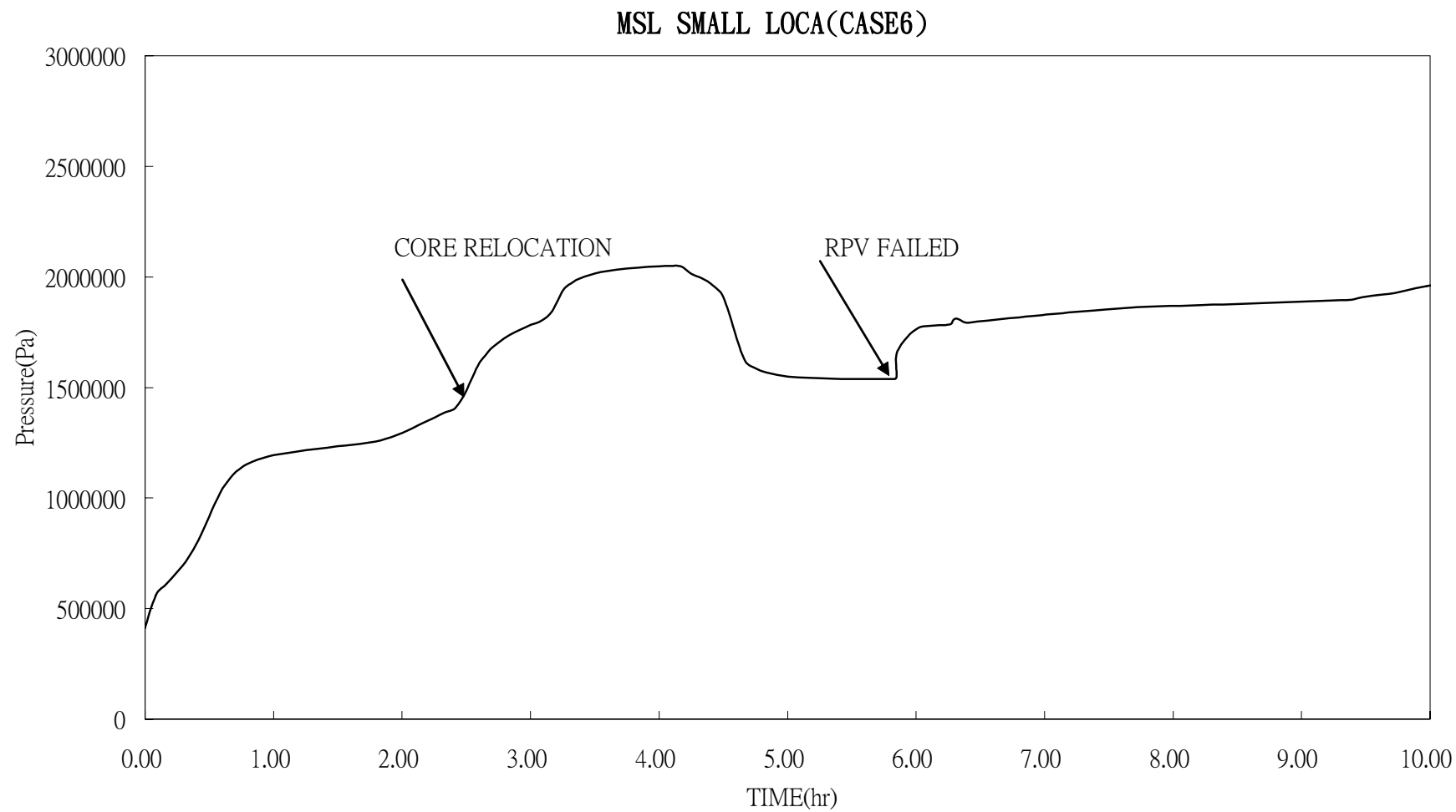
圖B. 3. 2. 2-37 破口水蒸汽流率



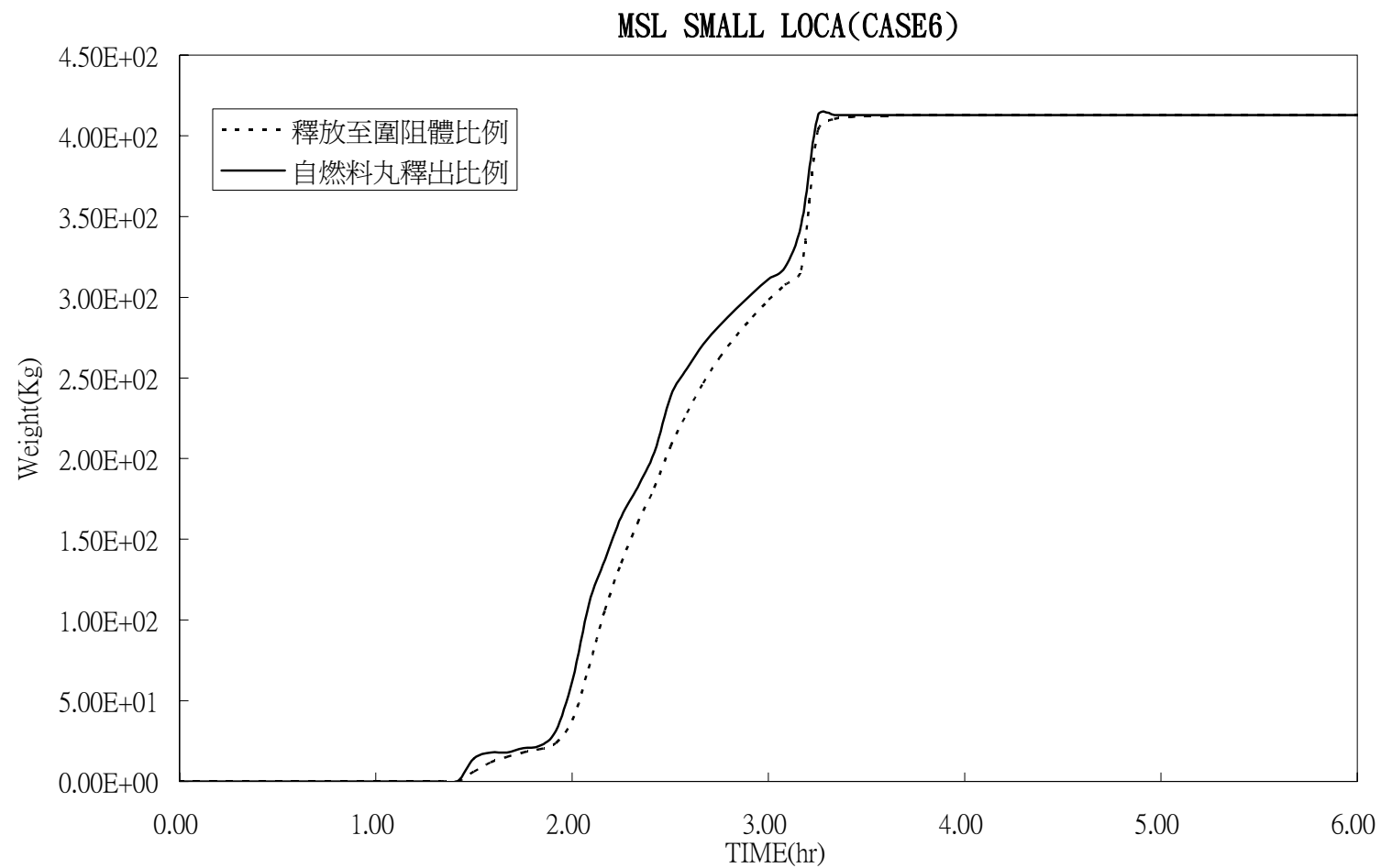
圖B. 3. 2. 2-38 爐心燃料最高溫度



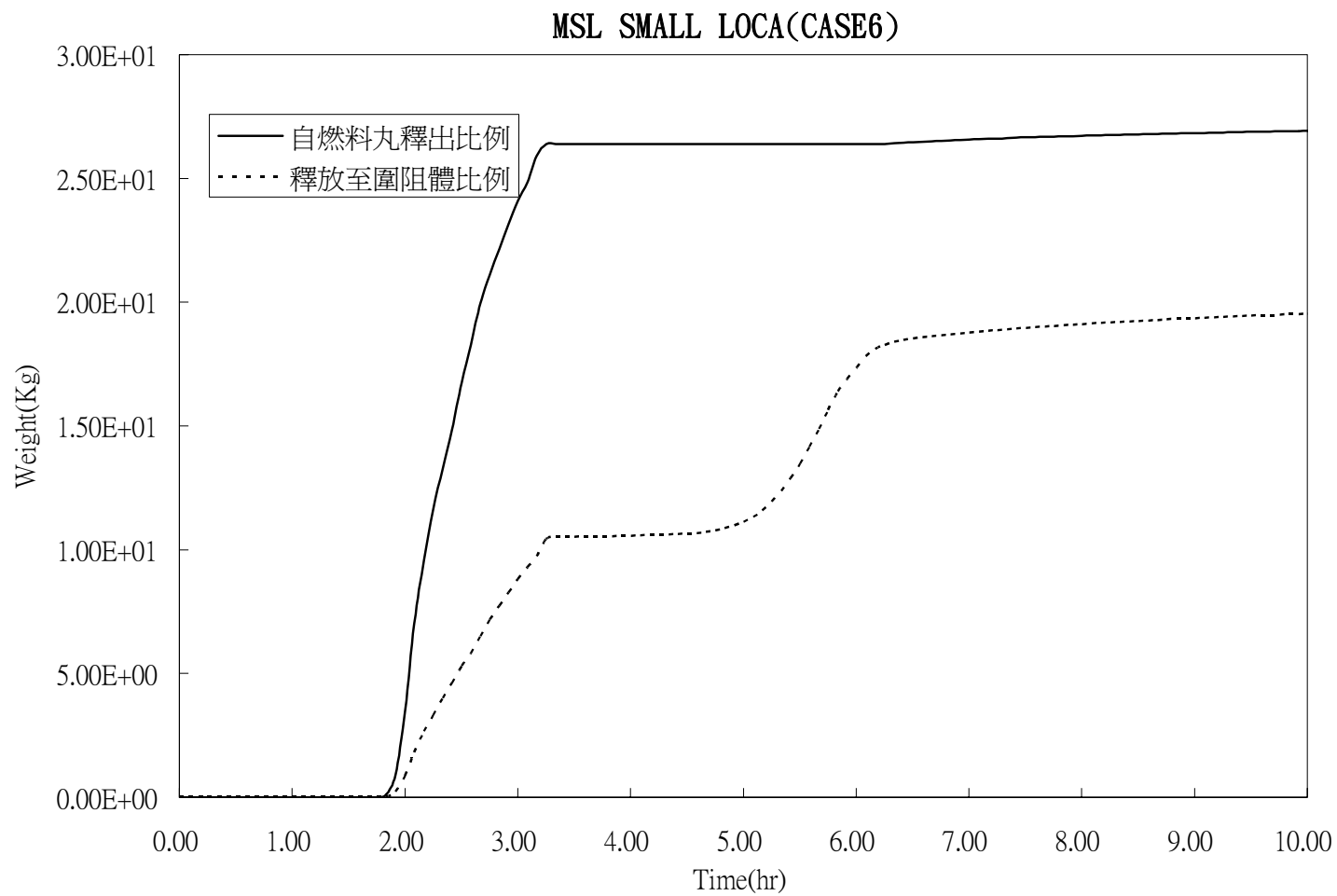
圖B. 3. 2. 2-39 爐心燃料棒護套氧化比例



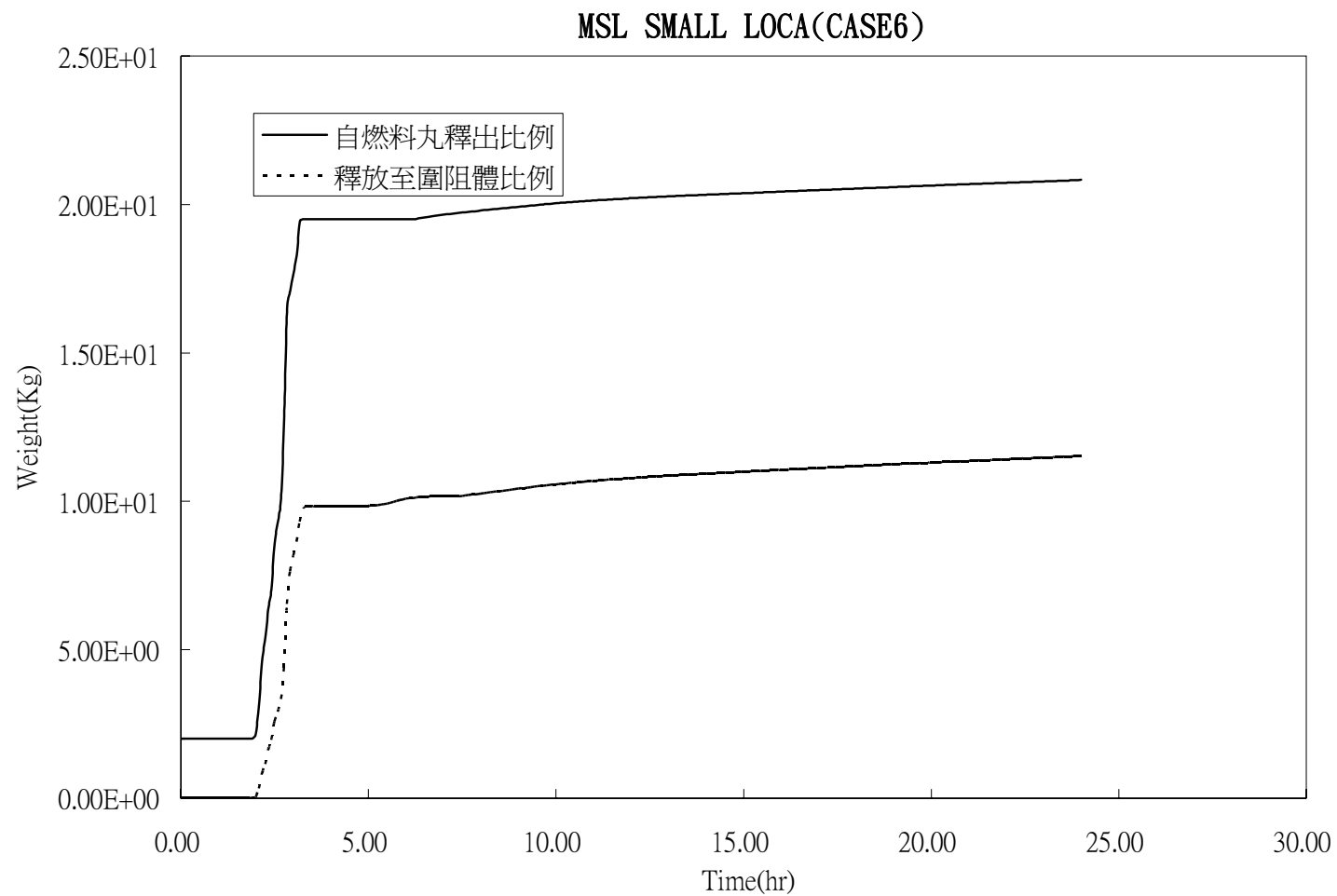
圖B. 3. 2. 2-40 圍阻體壓力



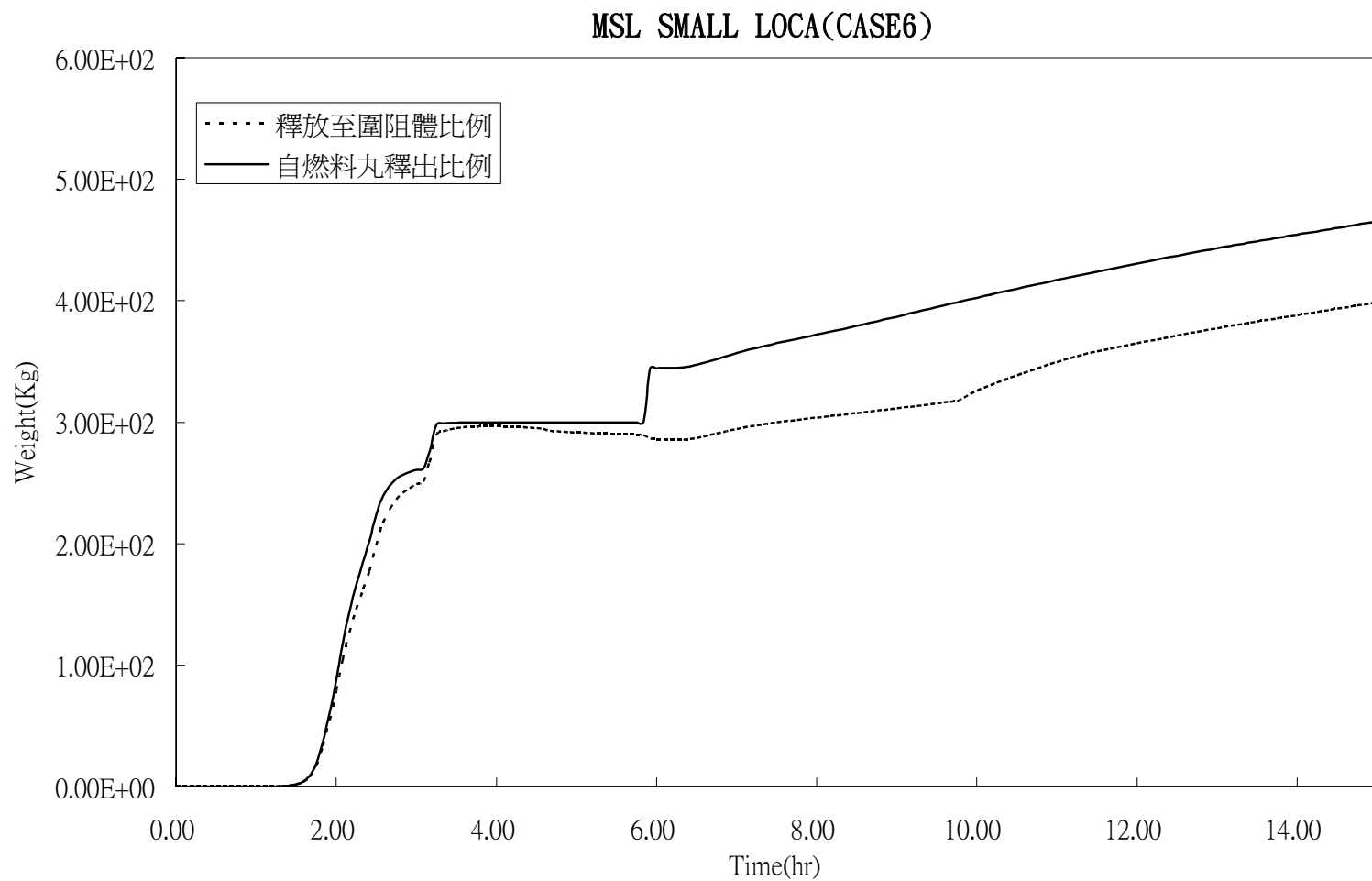
圖B. 3. 2. 2-41 惰性氣體外釋狀況



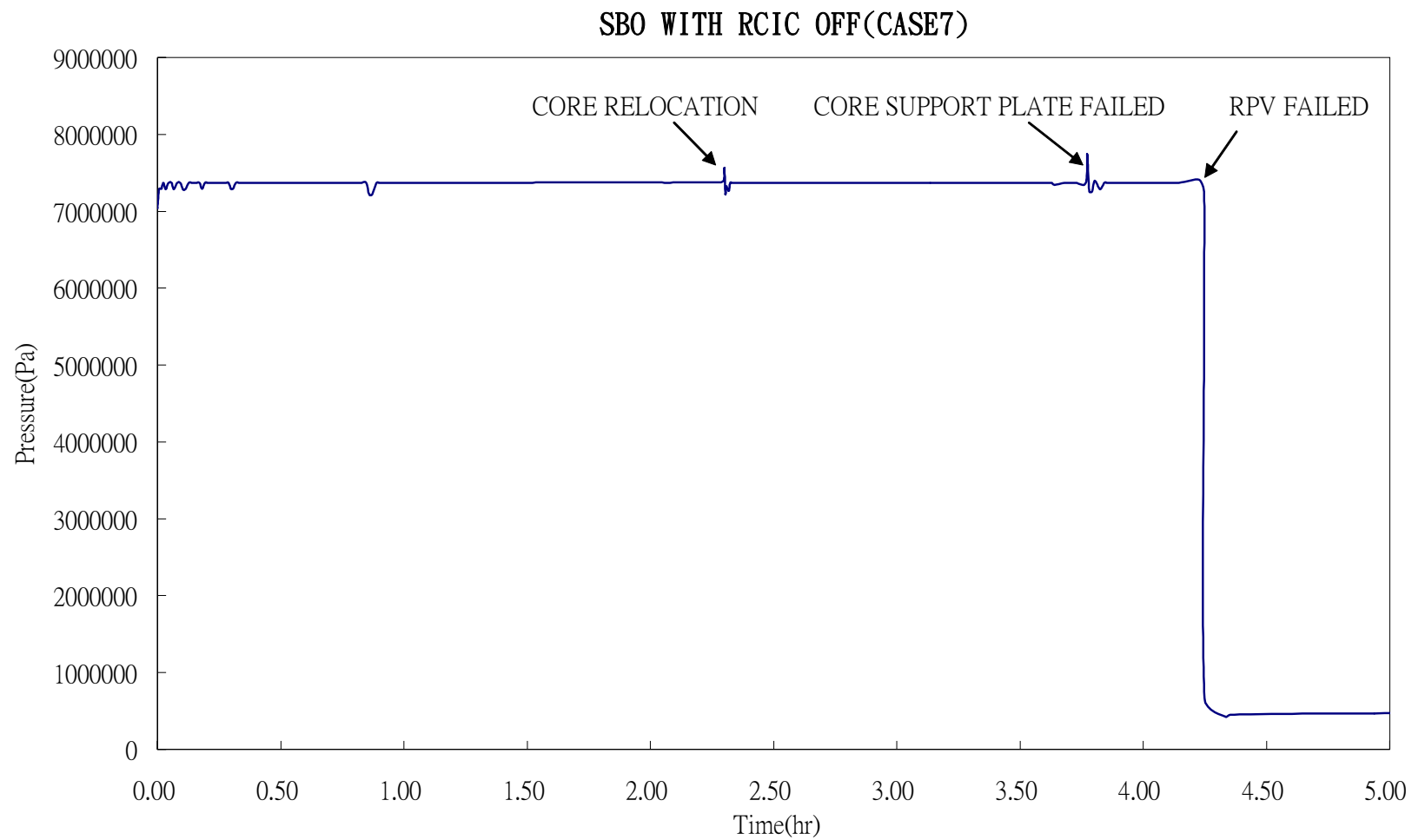
圖B. 3. 2. 2-42 CSI外釋狀況



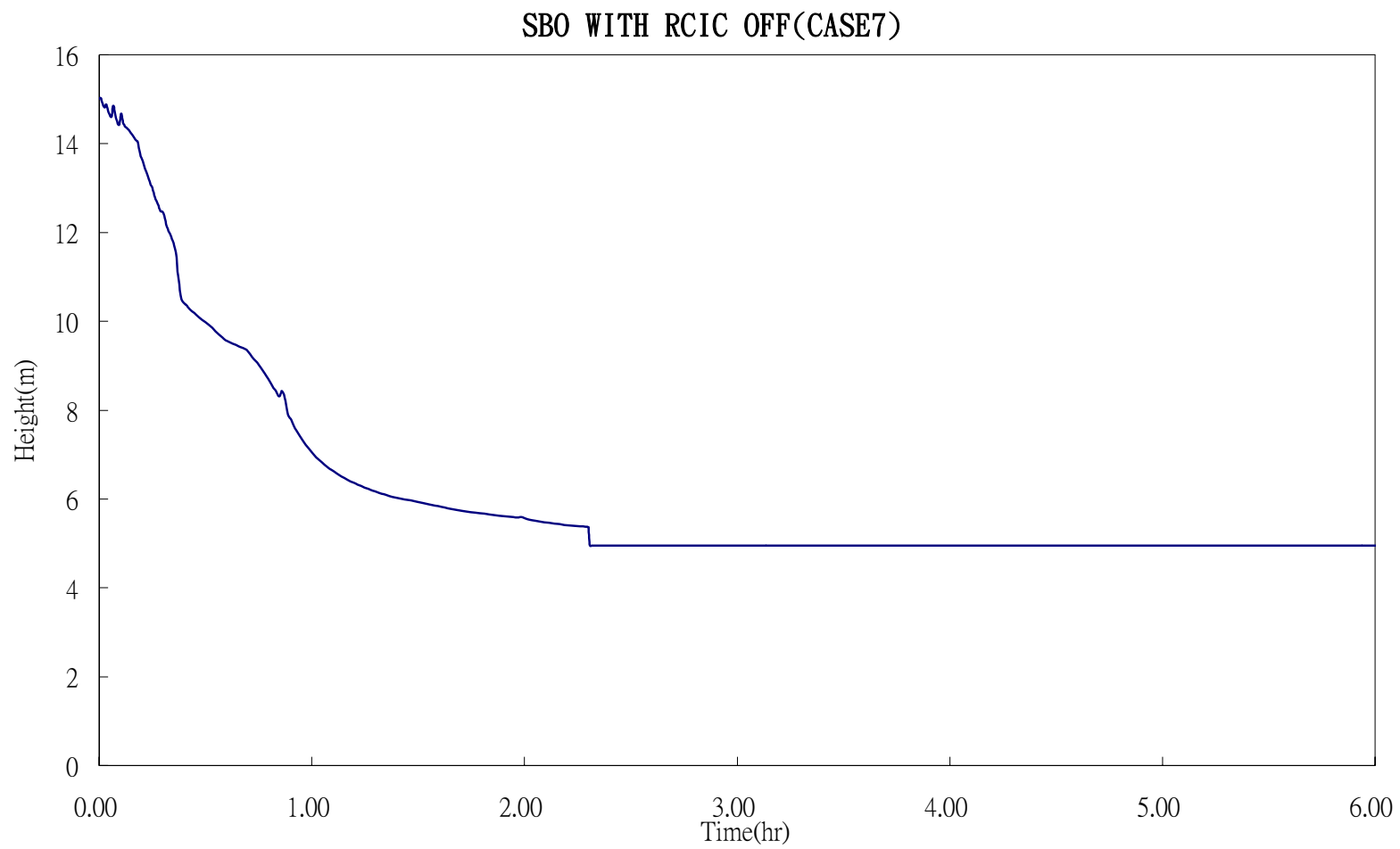
圖B. 3. 2. 2-43 TeO2外釋狀況



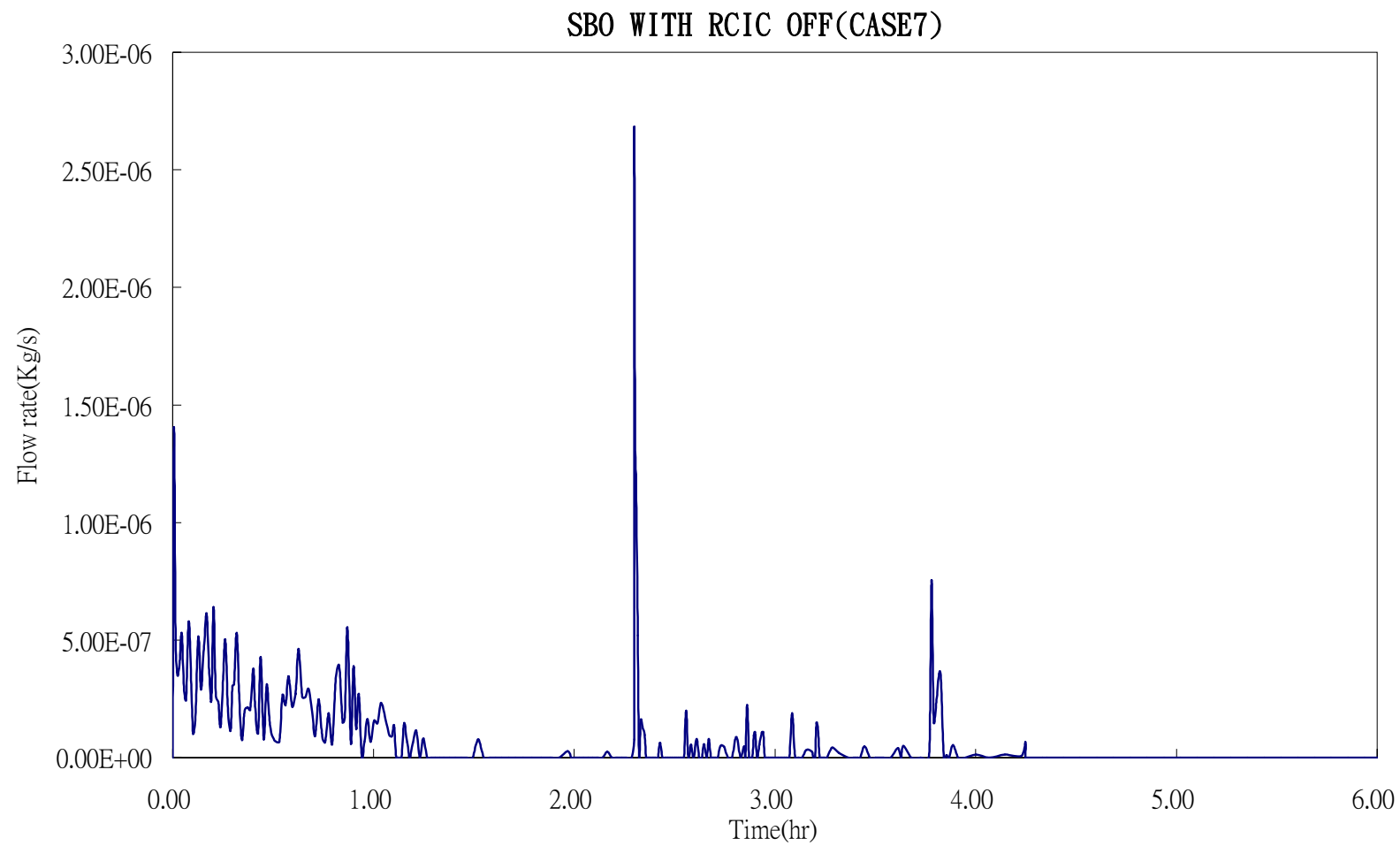
圖B. 3. 2. 2-44 氫氣產生量及分佈



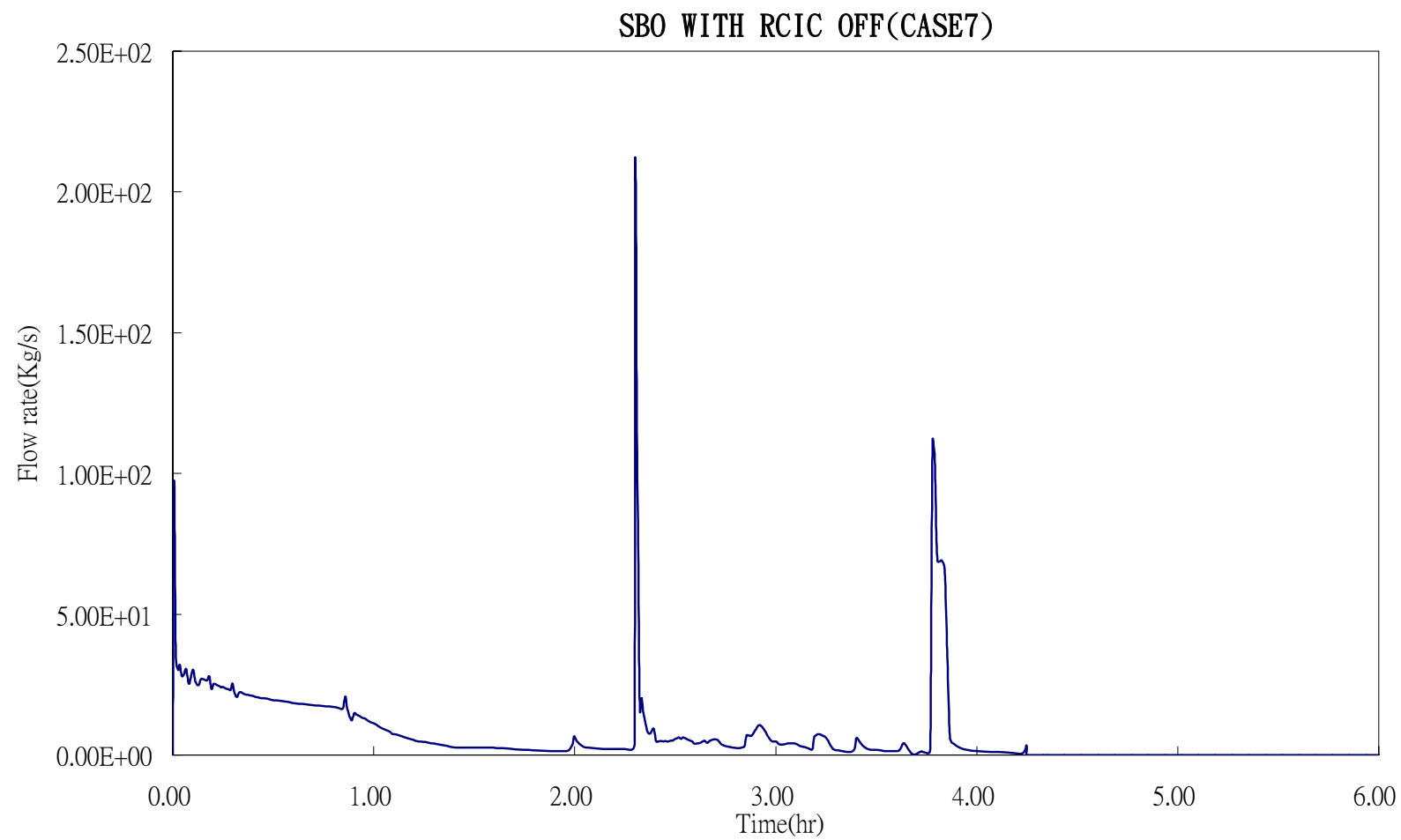
圖B. 3. 2. 3-1 一次系統壓力



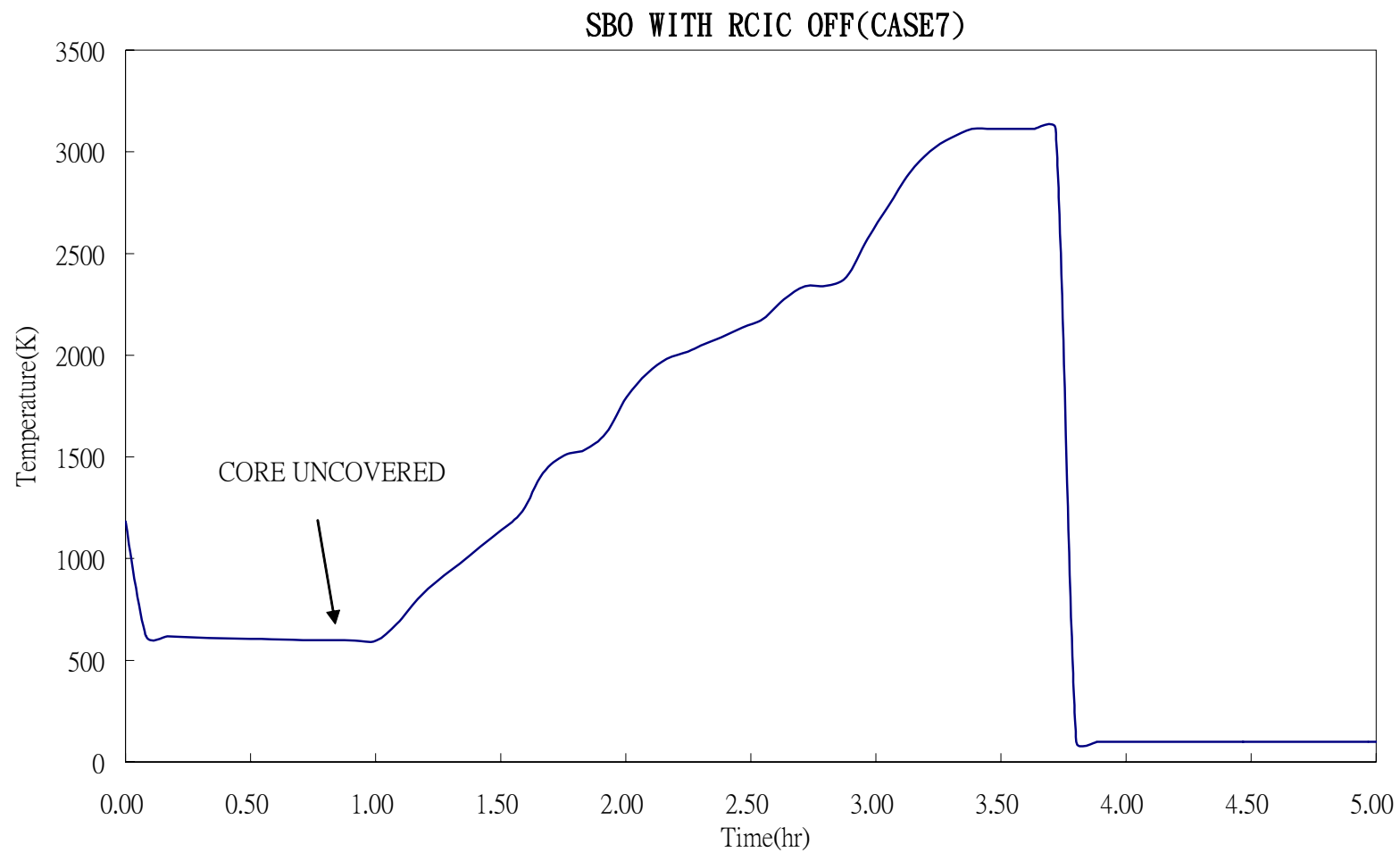
圖B. 3. 2. 3-2 爐心水位



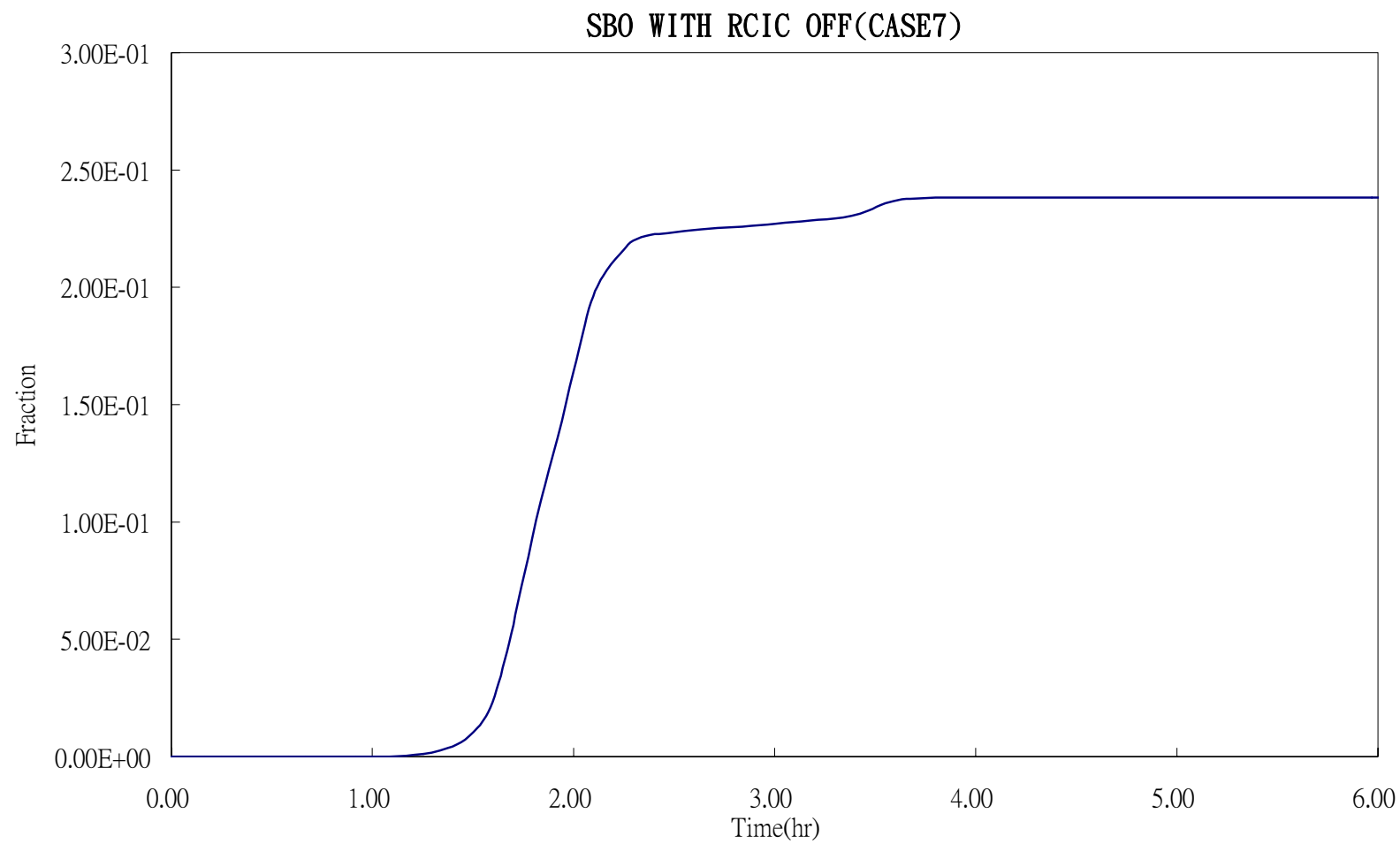
圖B. 3. 2. 3-3 釋放閥冷卻水流率



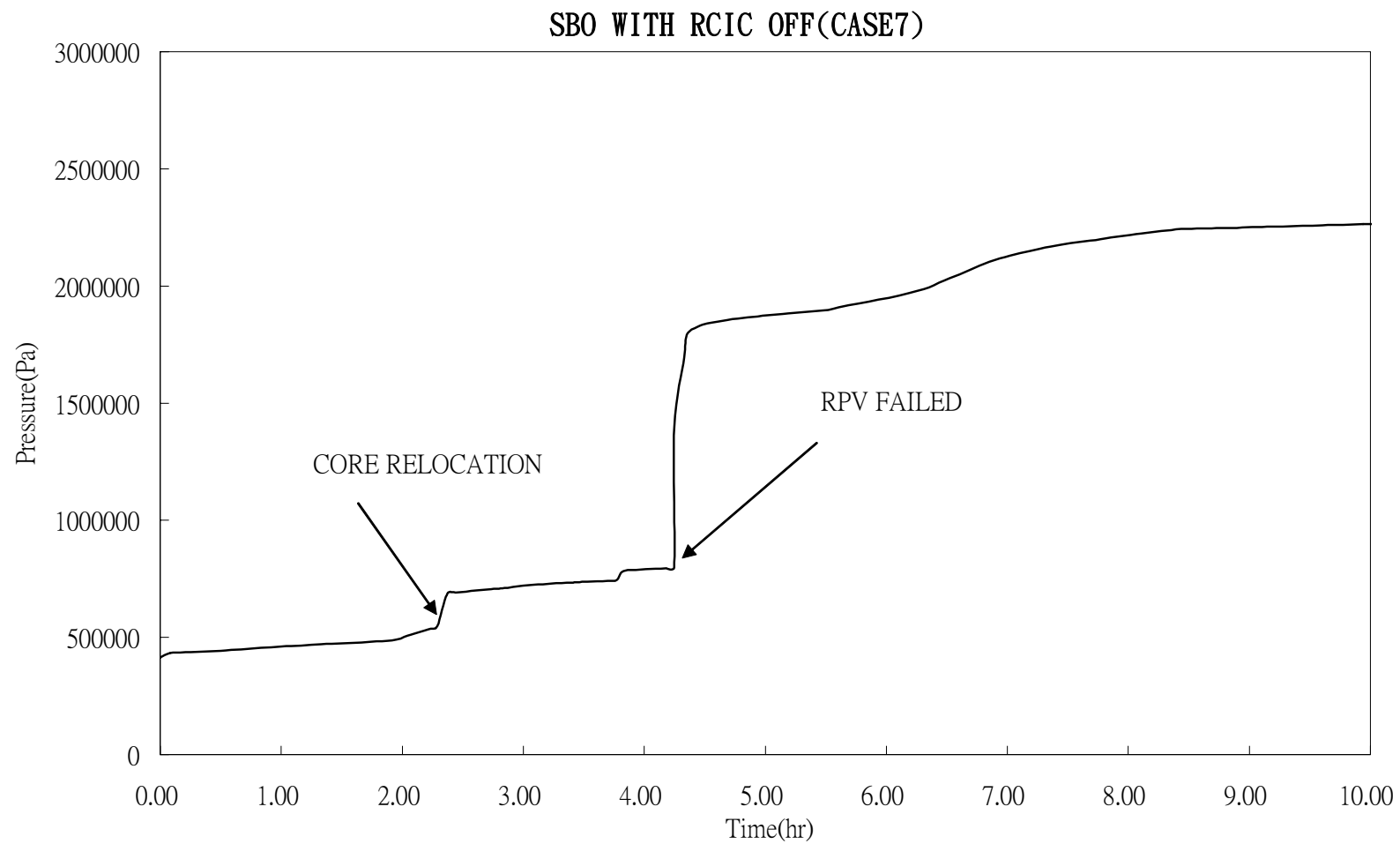
圖B. 3. 2. 3-4 釋放閥水蒸汽流率



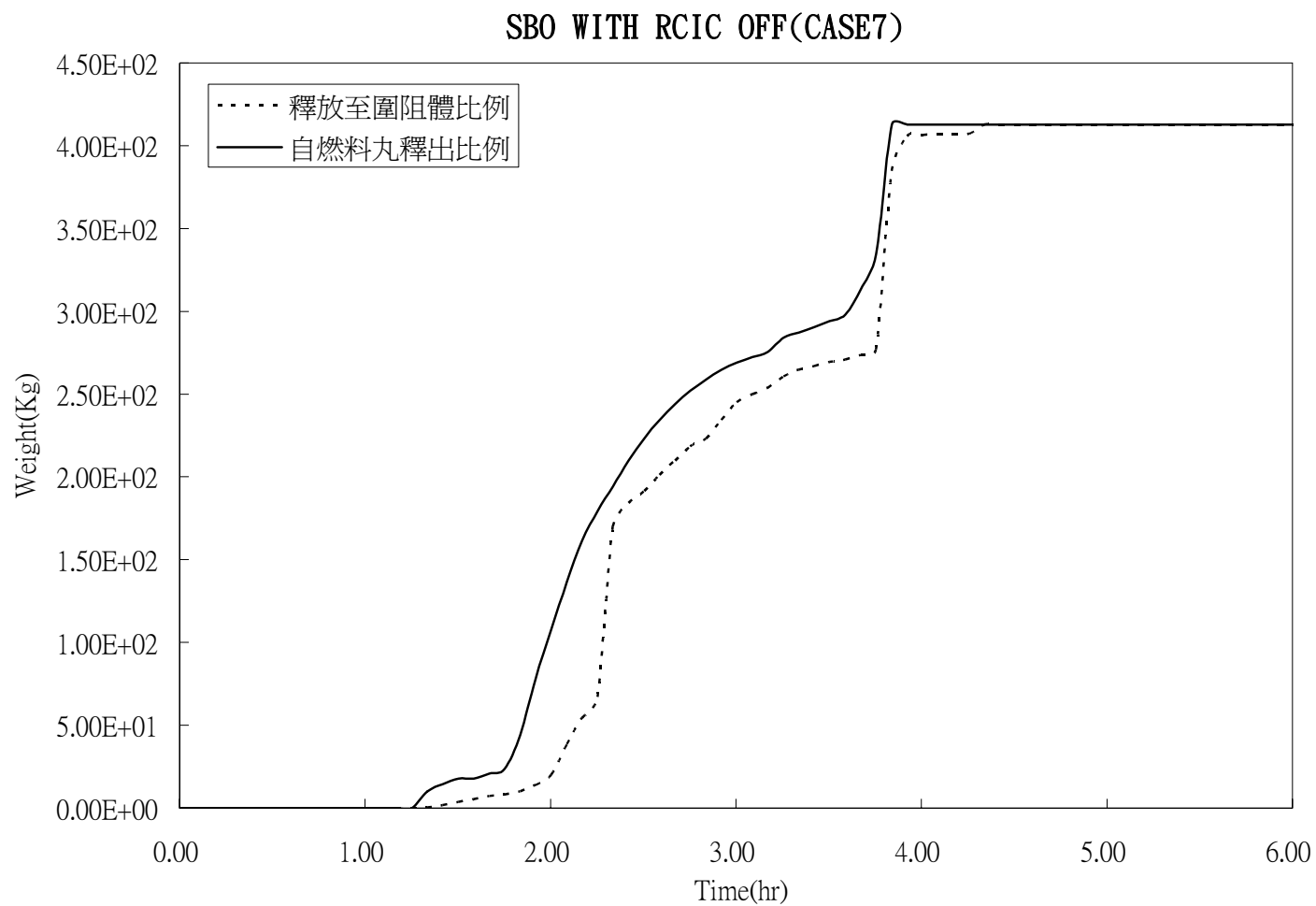
圖B. 3. 2. 3-5 爐心燃料最高溫度



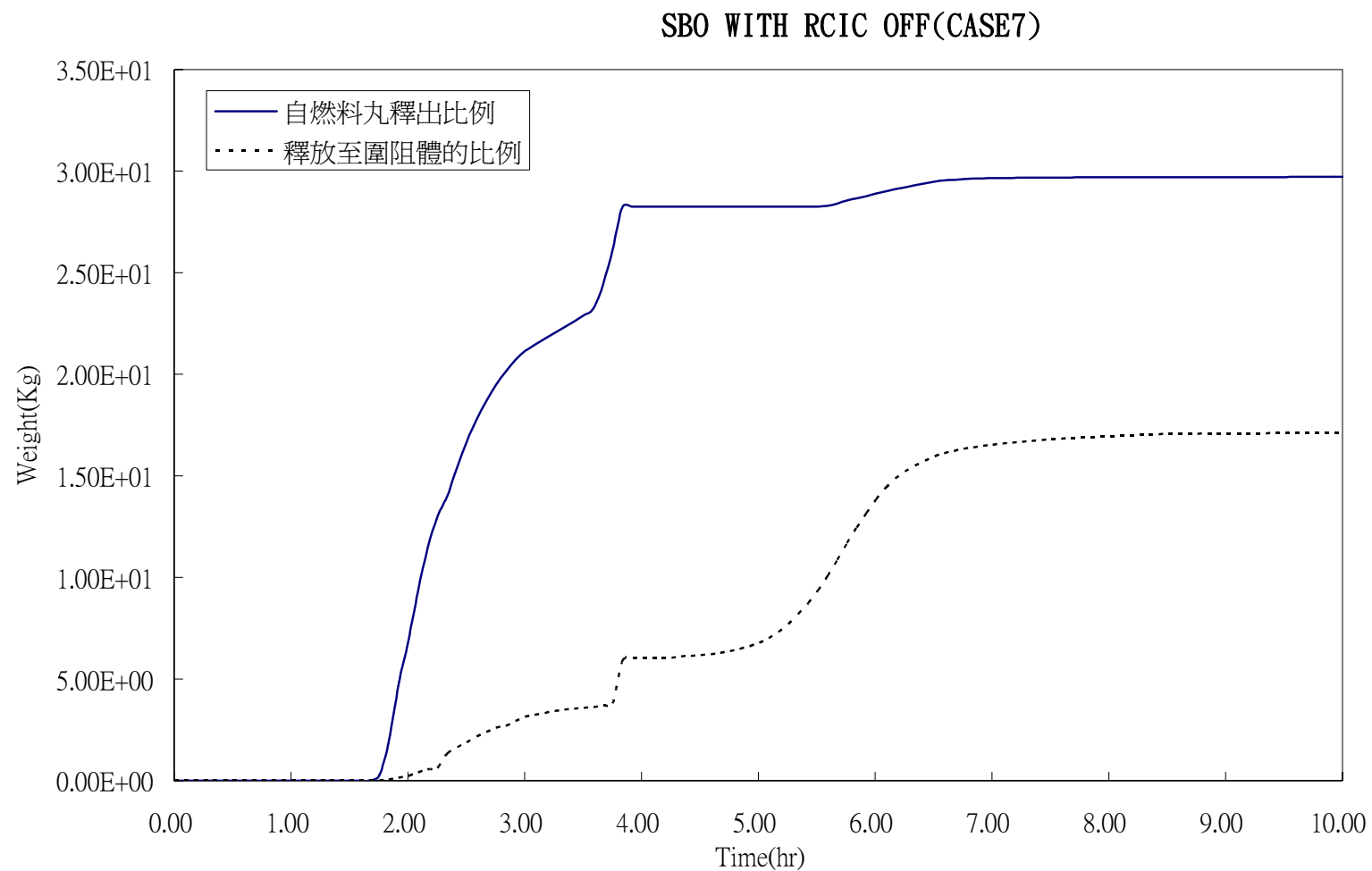
圖B. 3. 2. 3-6 爐心燃料棒護套氧化比例



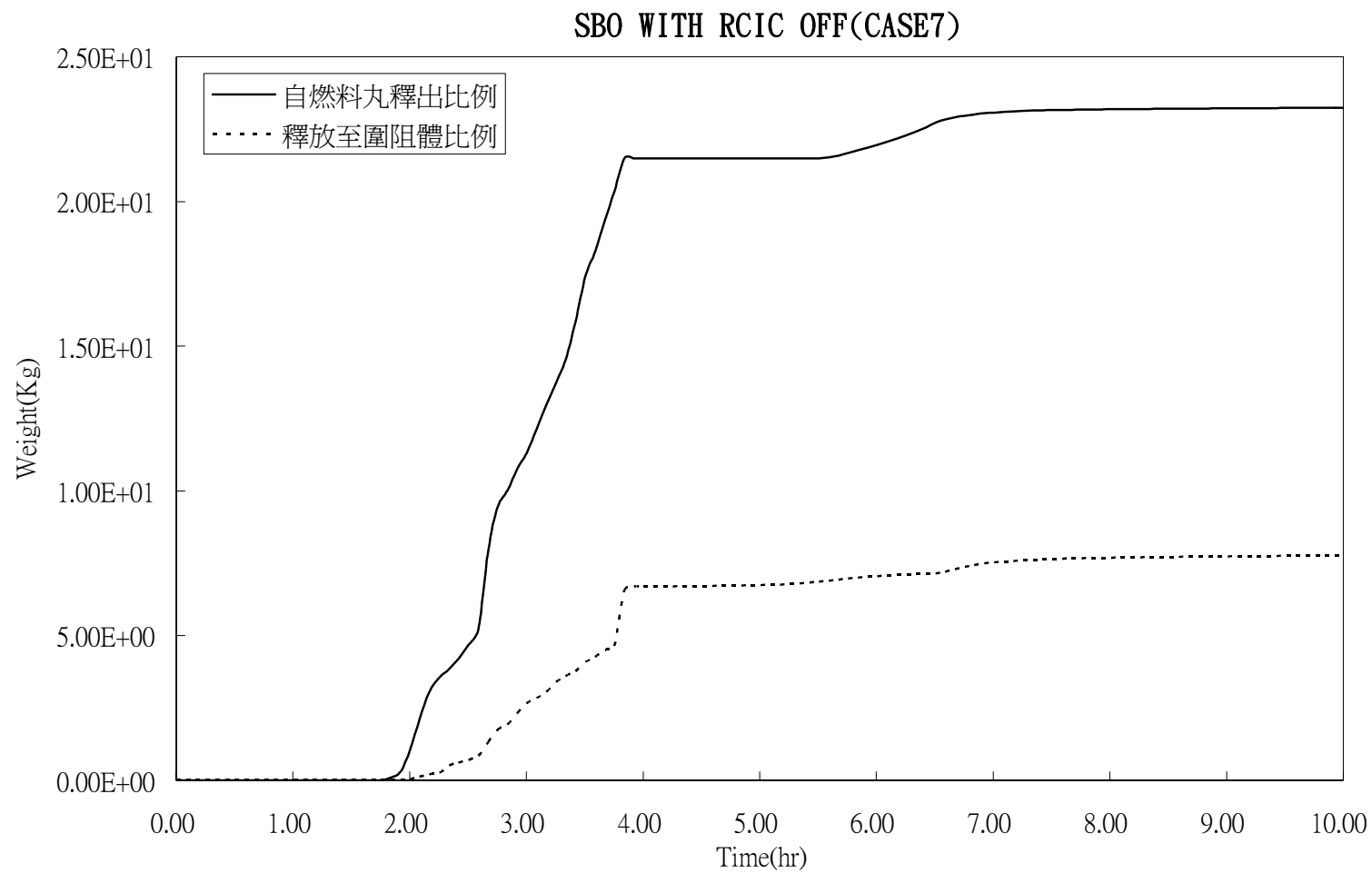
圖B. 3. 2. 3-7 圍阻體壓力



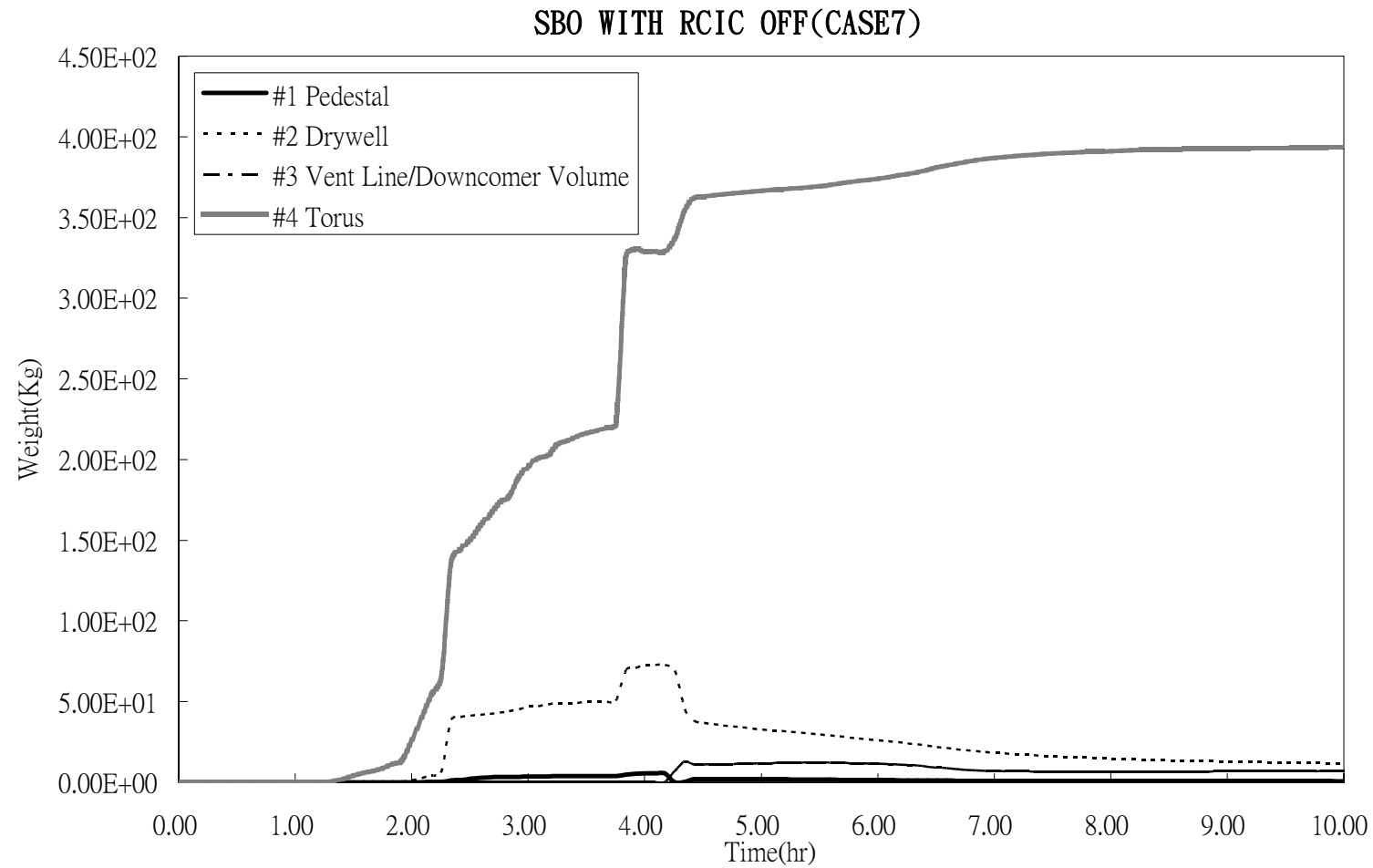
圖B. 3. 2. 3-8 惰性氣體外釋狀況



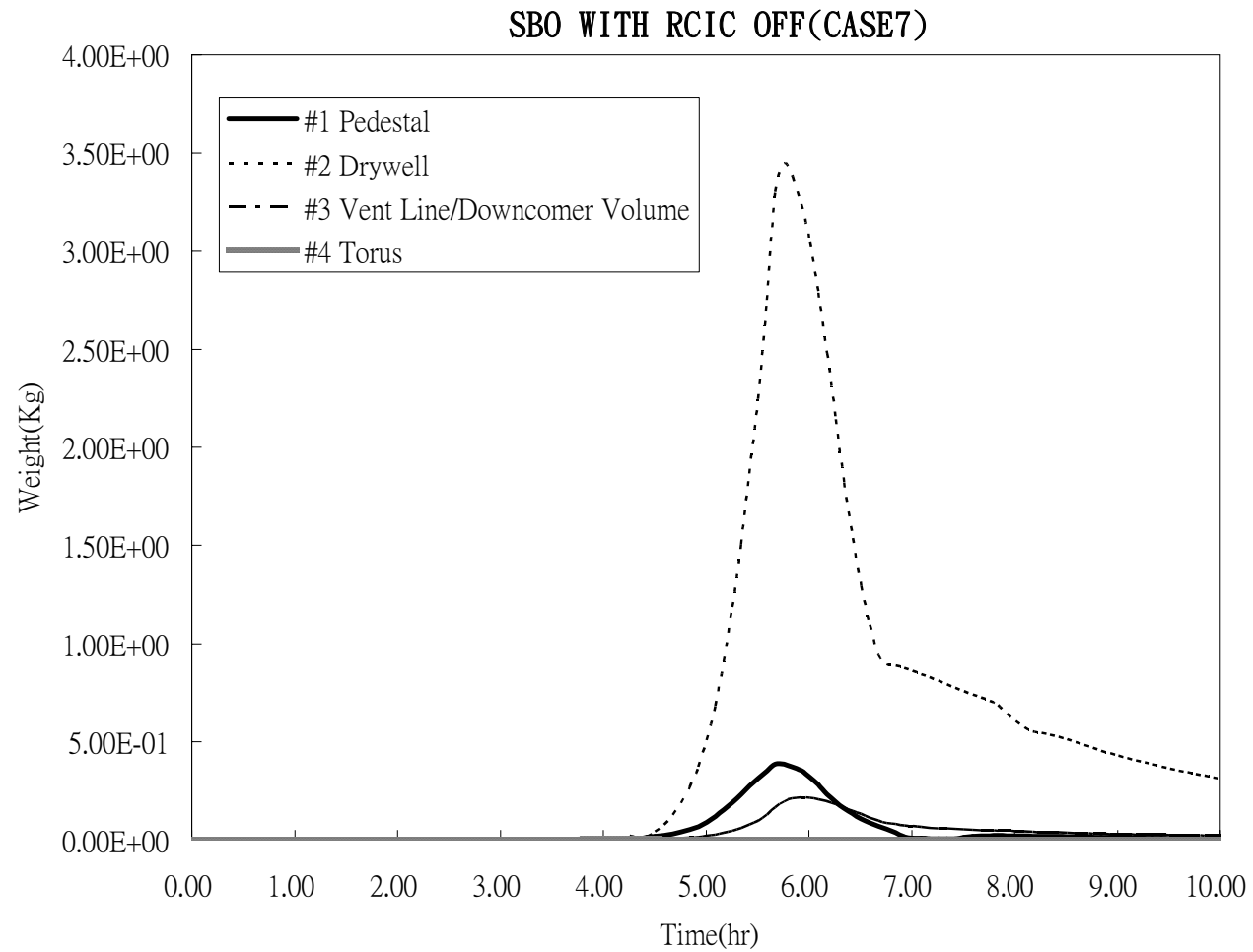
圖B.3.2.3-9 CSI外釋狀況



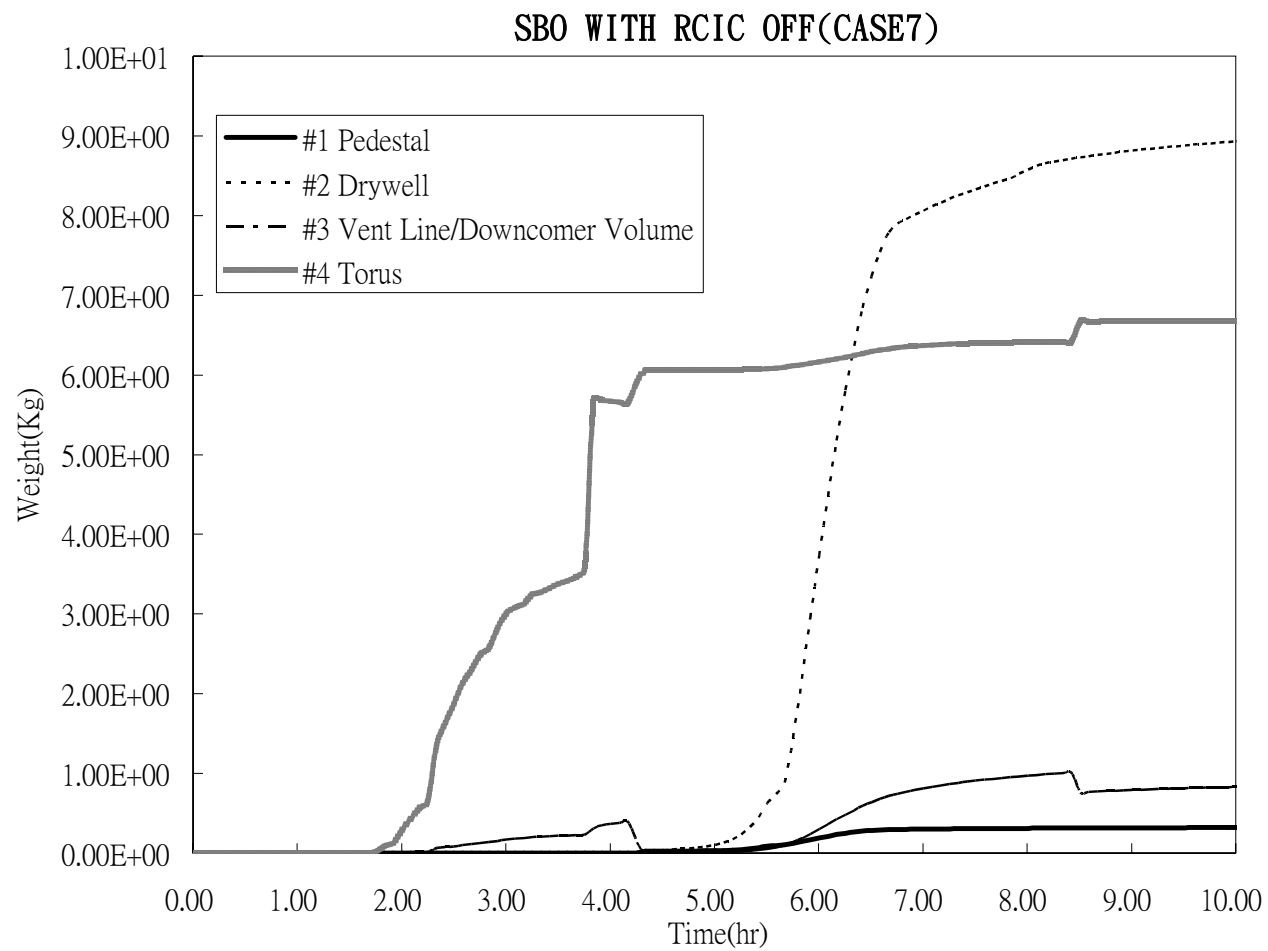
圖B. 3. 2. 3-10 TeO₂外釋狀況



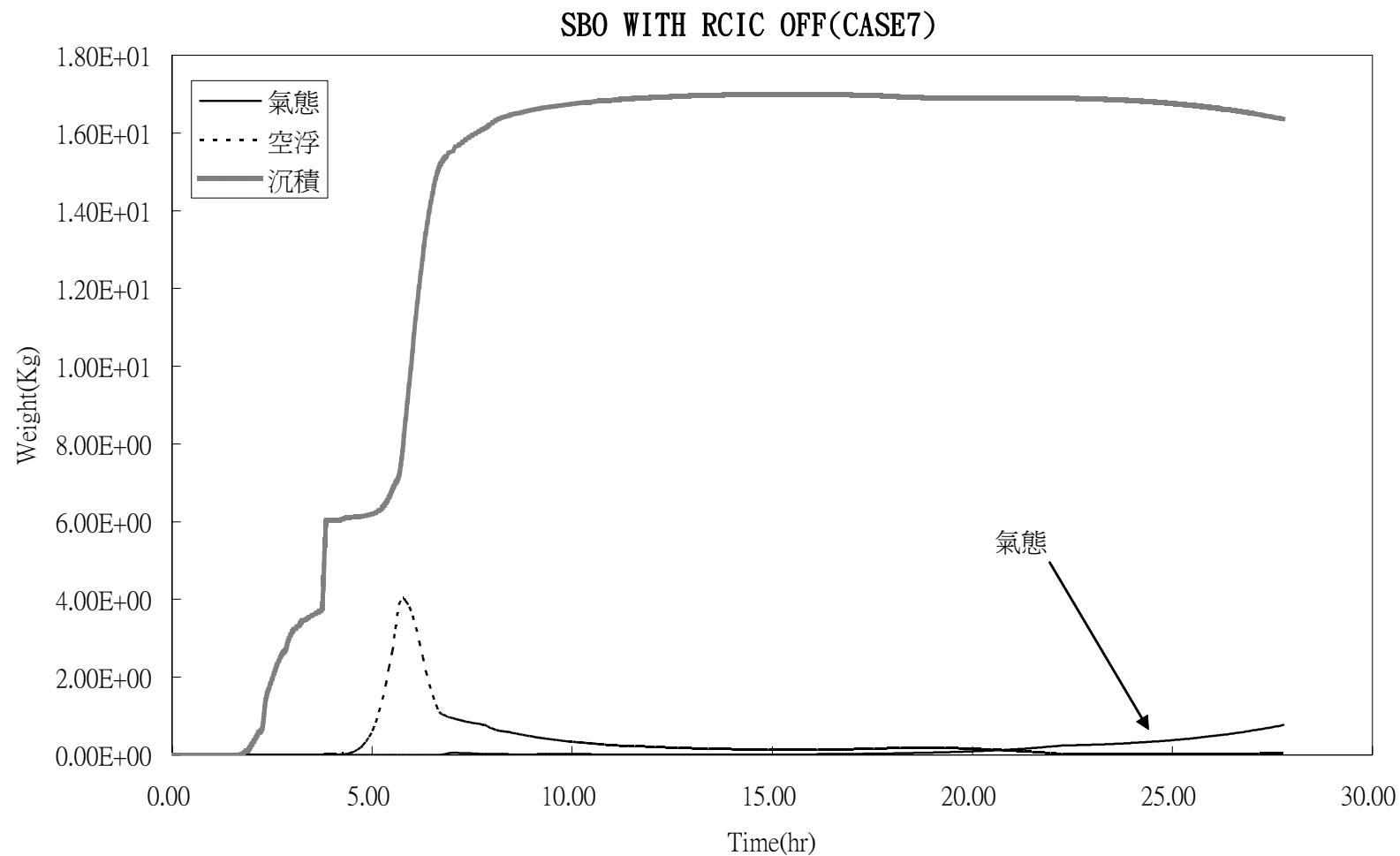
圖B. 3. 2. 3-11 惰性氣體於圍阻體內之分佈



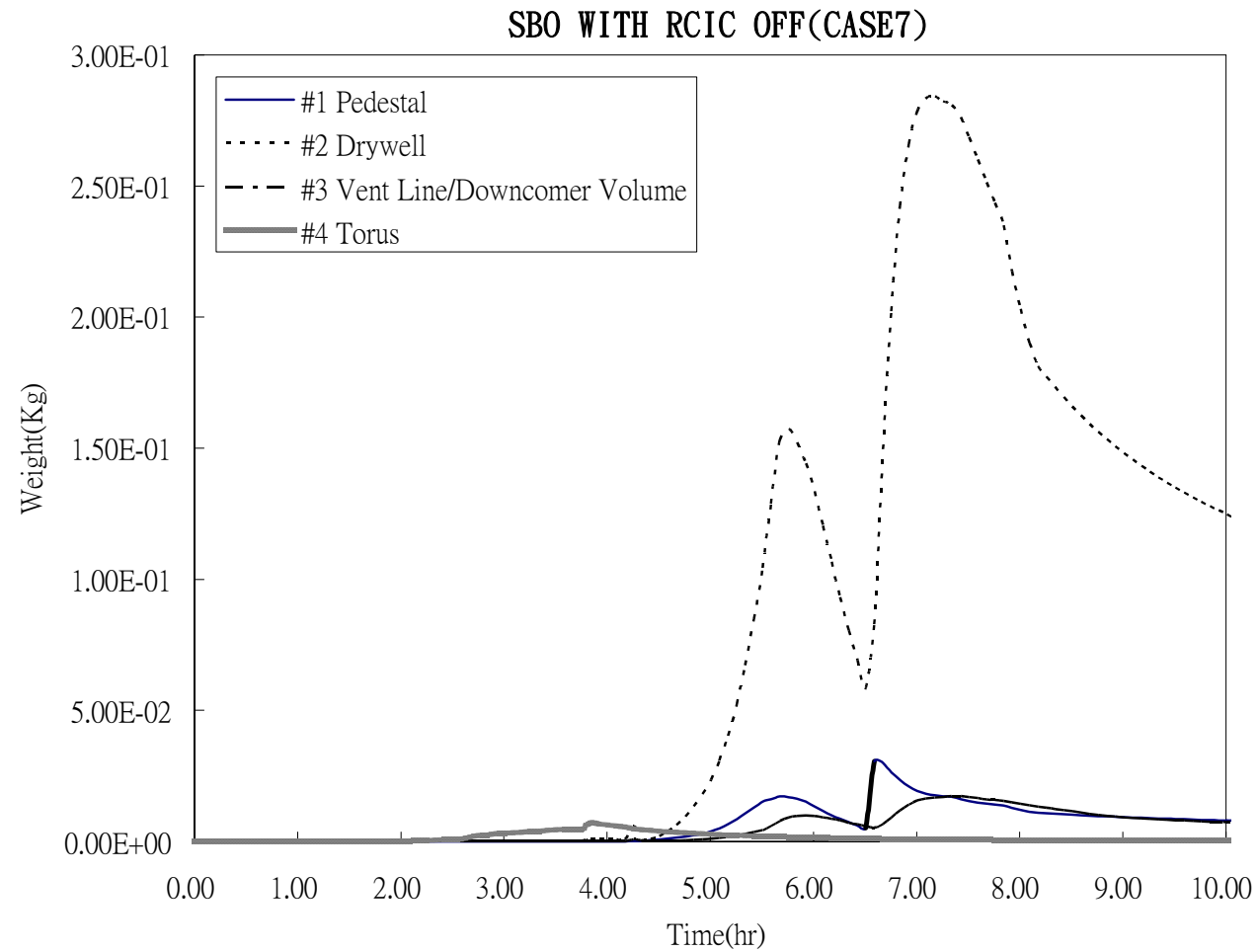
圖B. 3. 2. 3-12 圍阻體內CSI空浮分佈



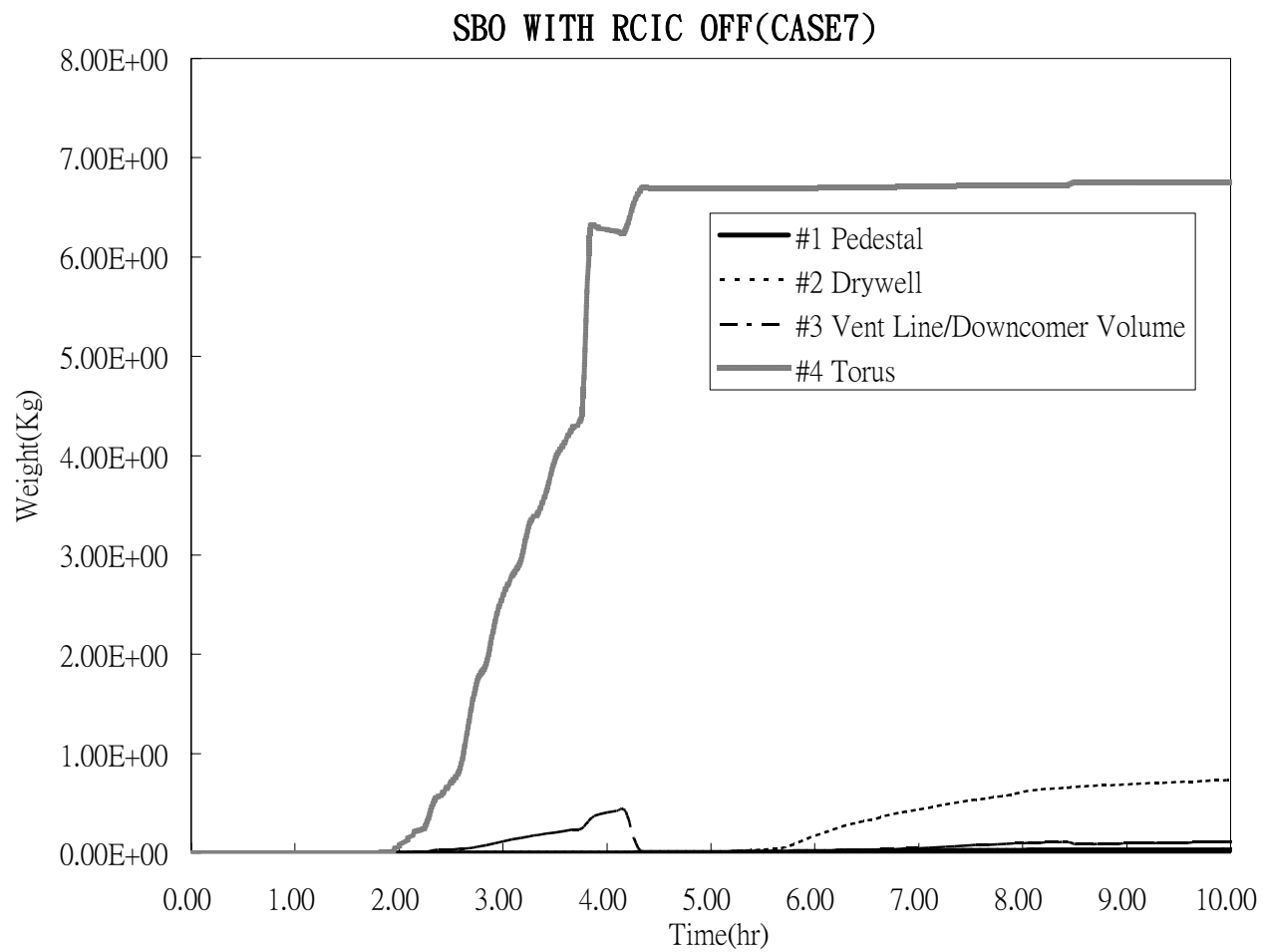
圖B. 3. 2. 3-13 圍阻體內CSI沉積分佈



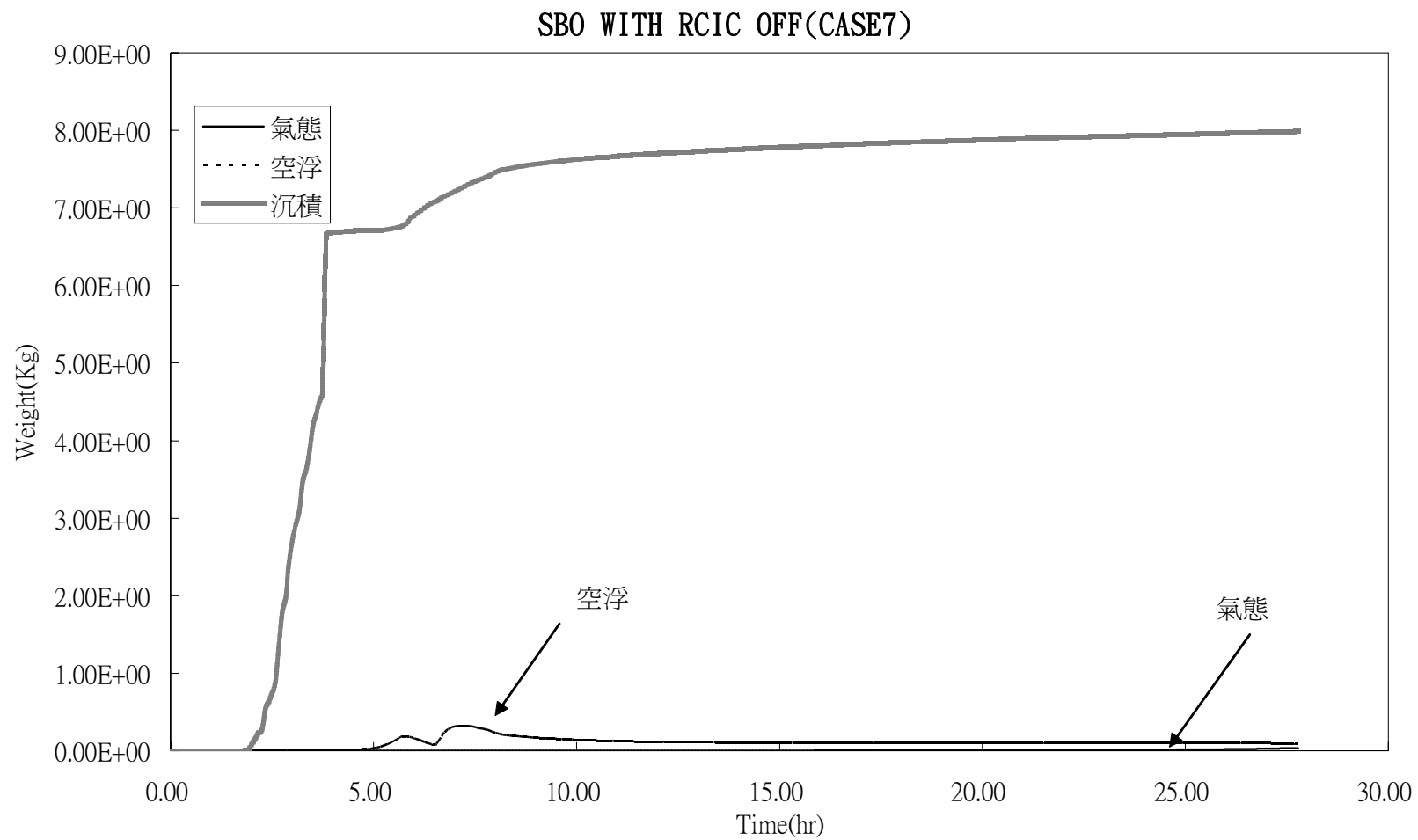
圖B. 3. 2. 3-14 圍阻體內 CSI 存在的狀態



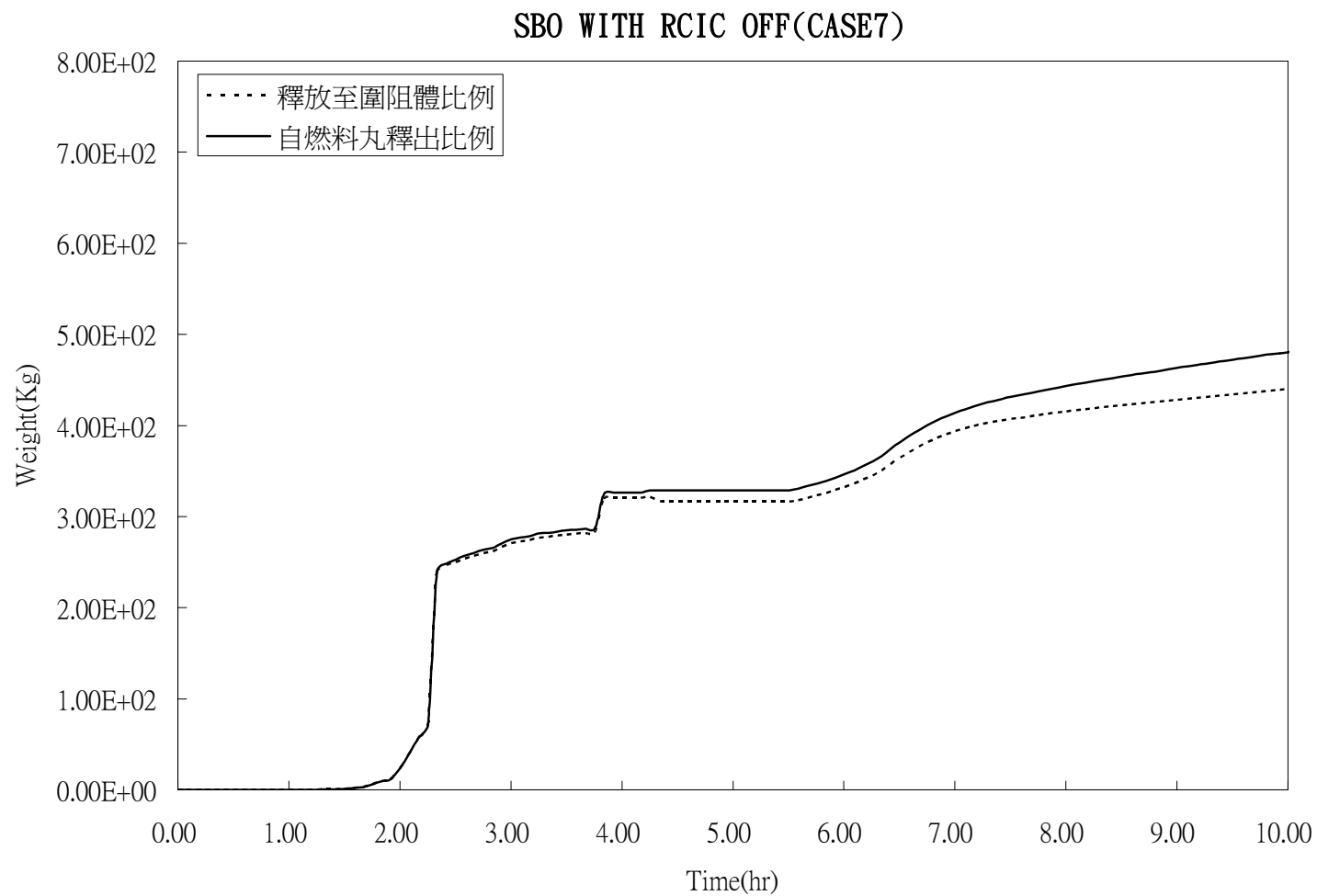
圖B. 3. 2. 3-15 圍阻體內 TeO₂ 空浮分佈



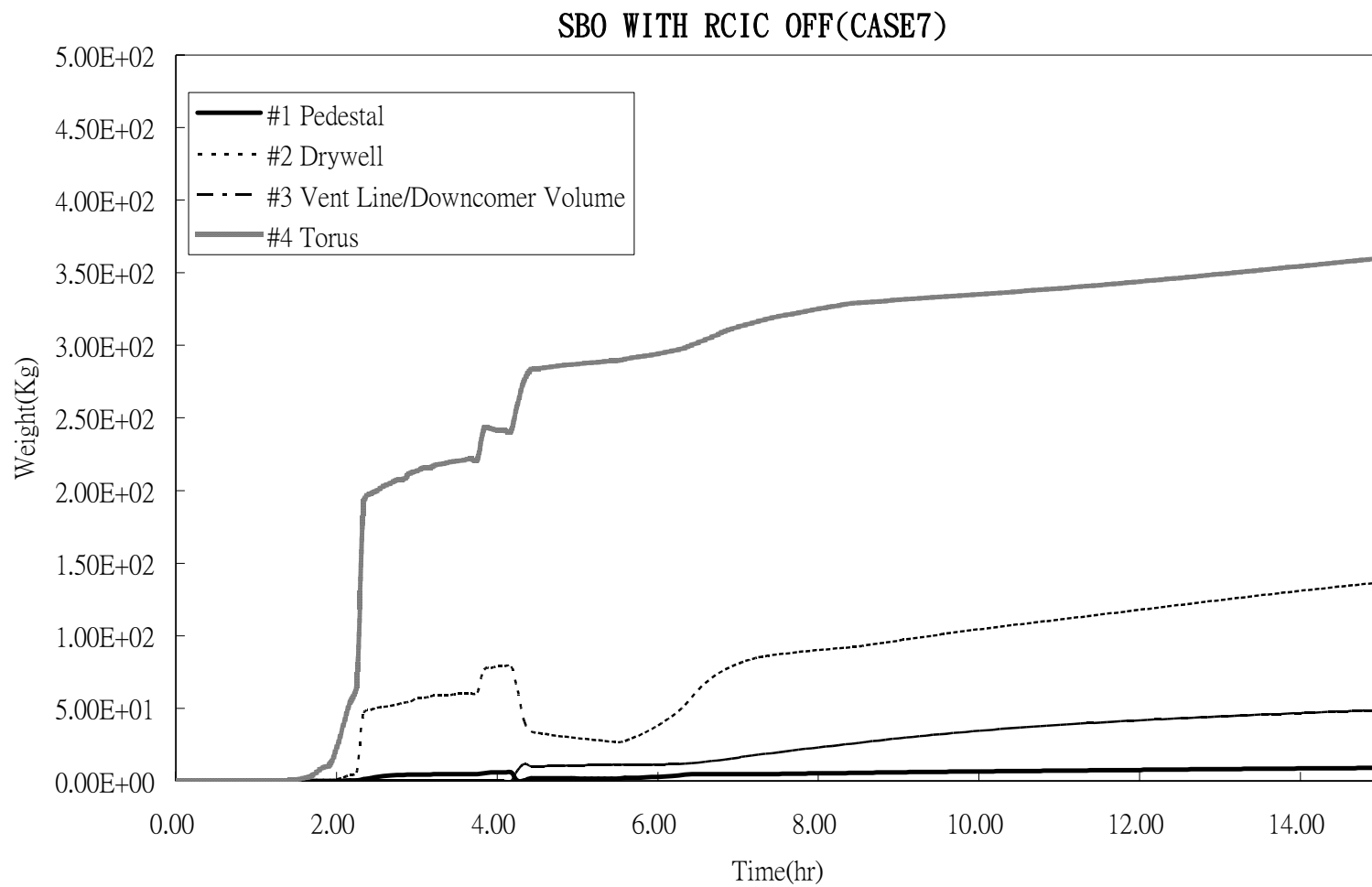
圖B. 3. 2. 3-16 圍阻體內 TeO₂ 沉積分佈



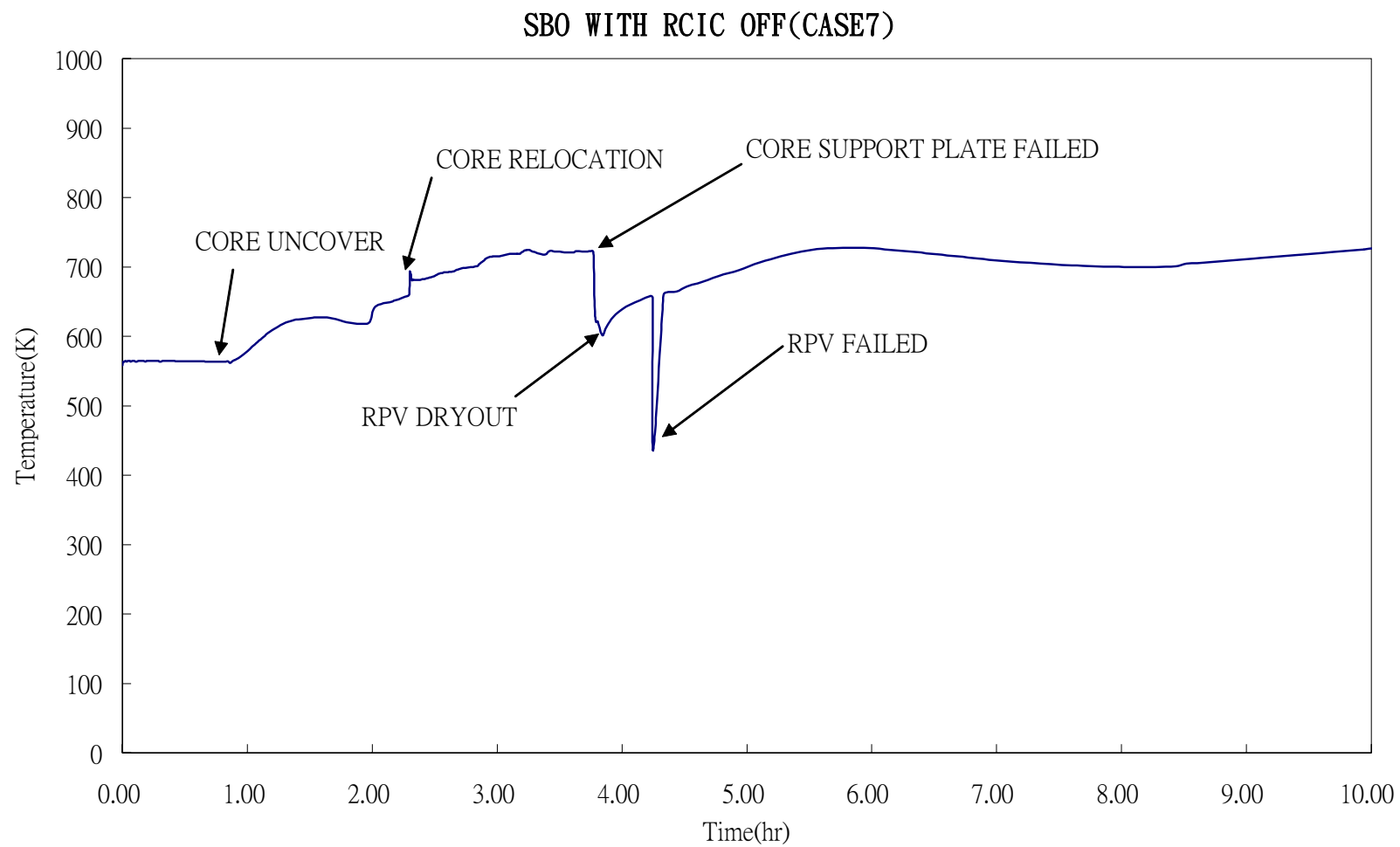
圖B. 3. 2. 3-17 圍阻體內 TeO₂ 存在的狀態



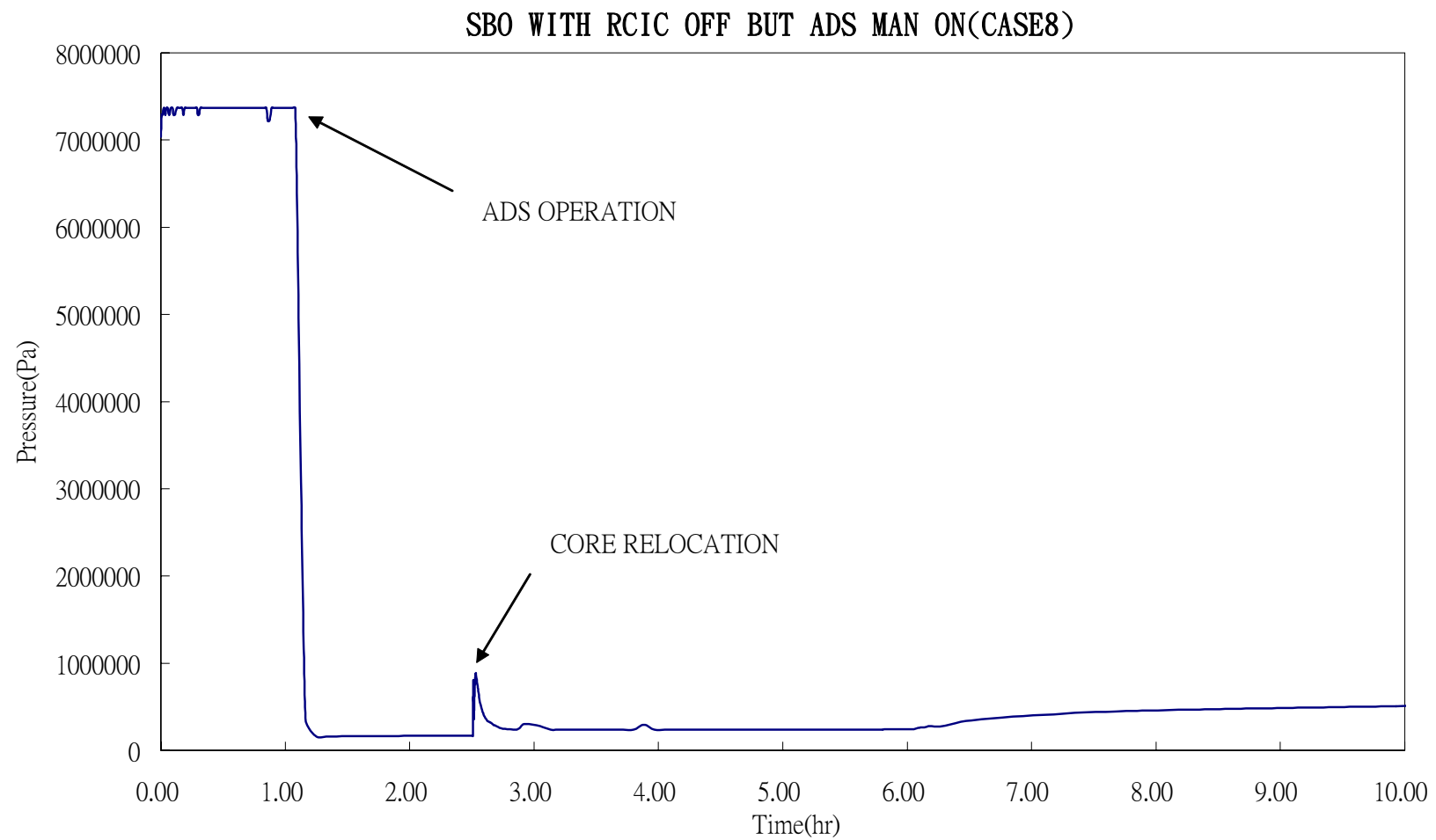
圖B. 3. 2. 3-18 氫氣產生量及分佈



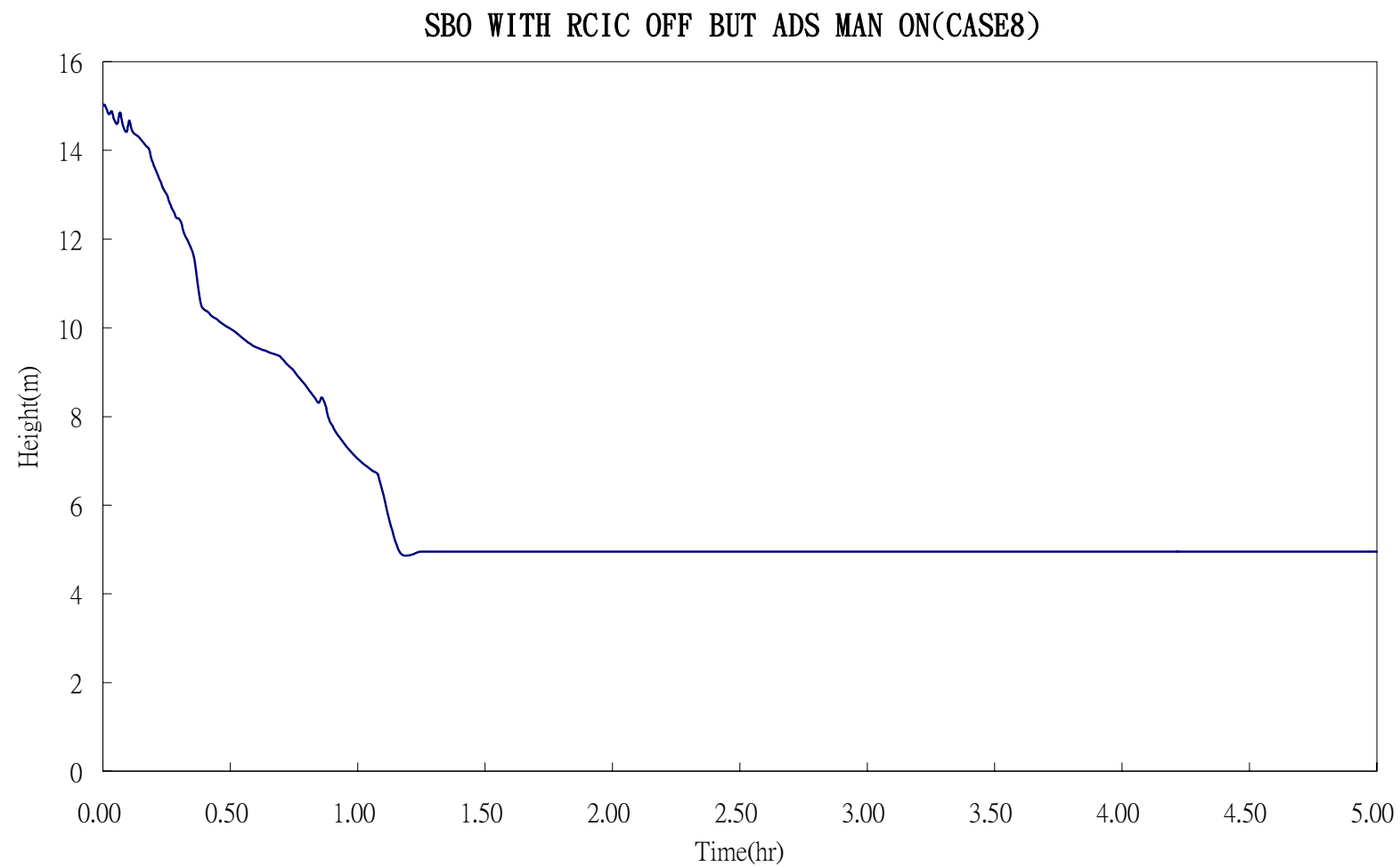
圖B.3.2.3-19 圍阻體內氫氣分佈



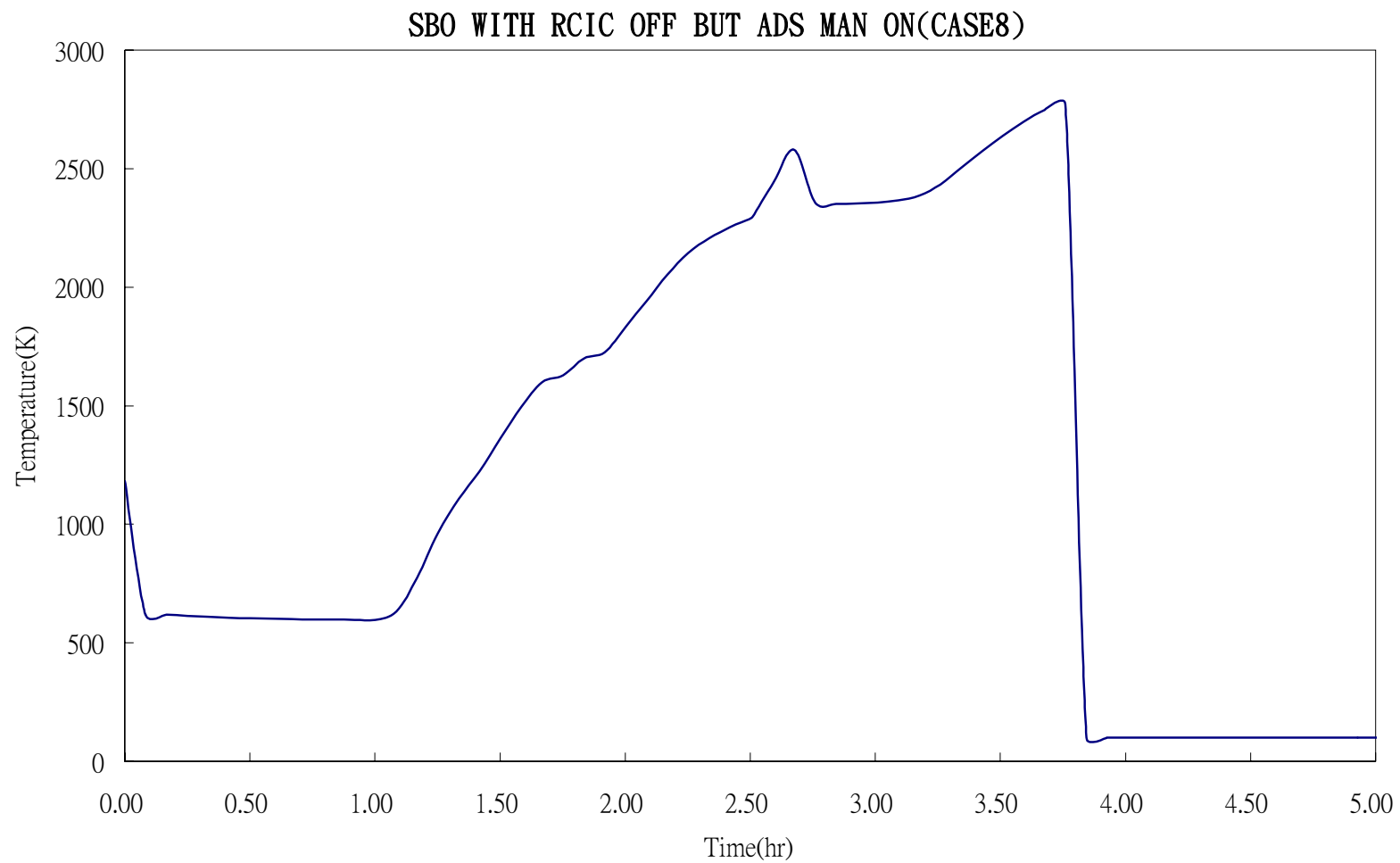
圖B. 3. 2. 3-20 一次系統內氣體溫度



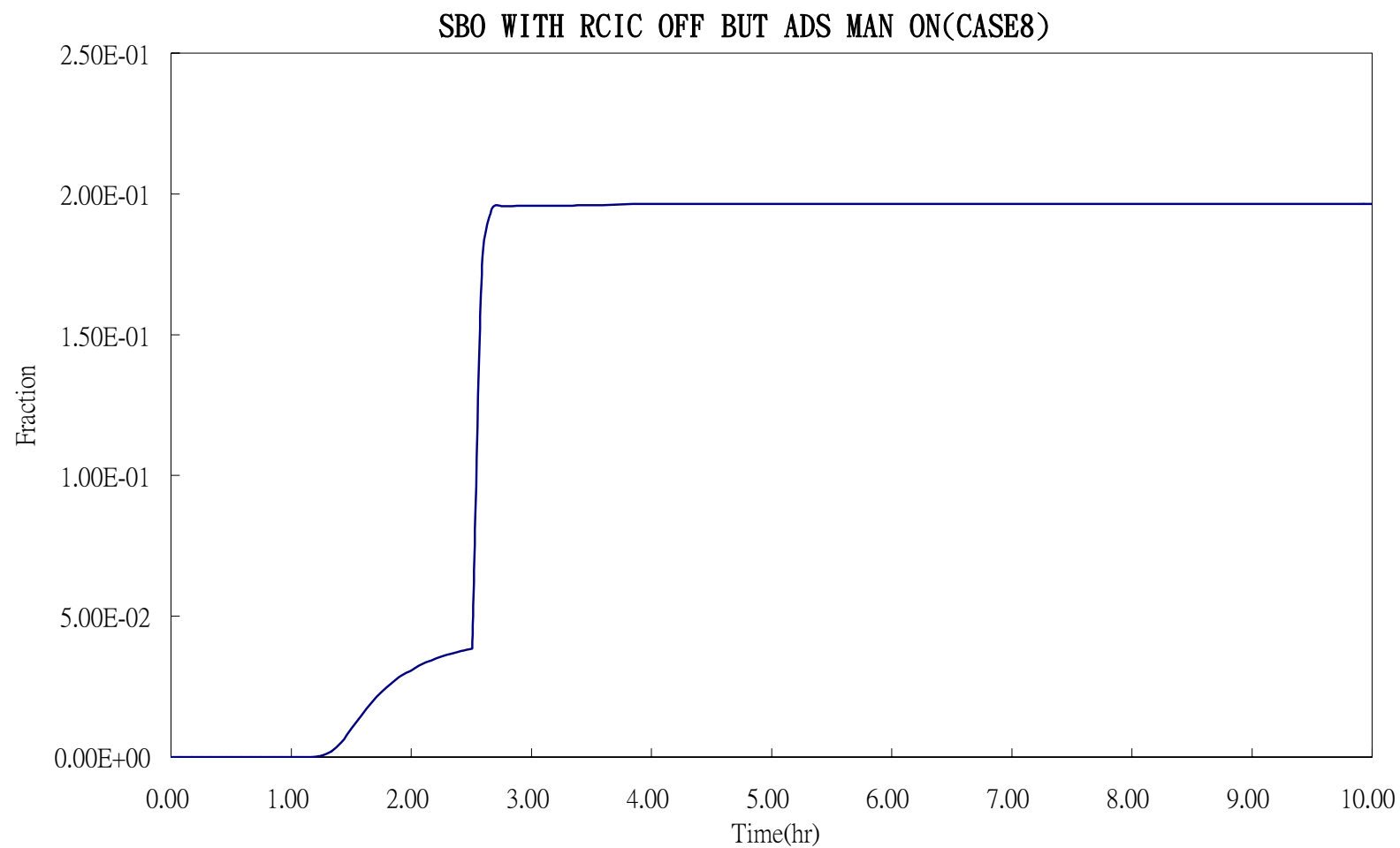
圖B. 3. 2. 3-21 一次系統壓力



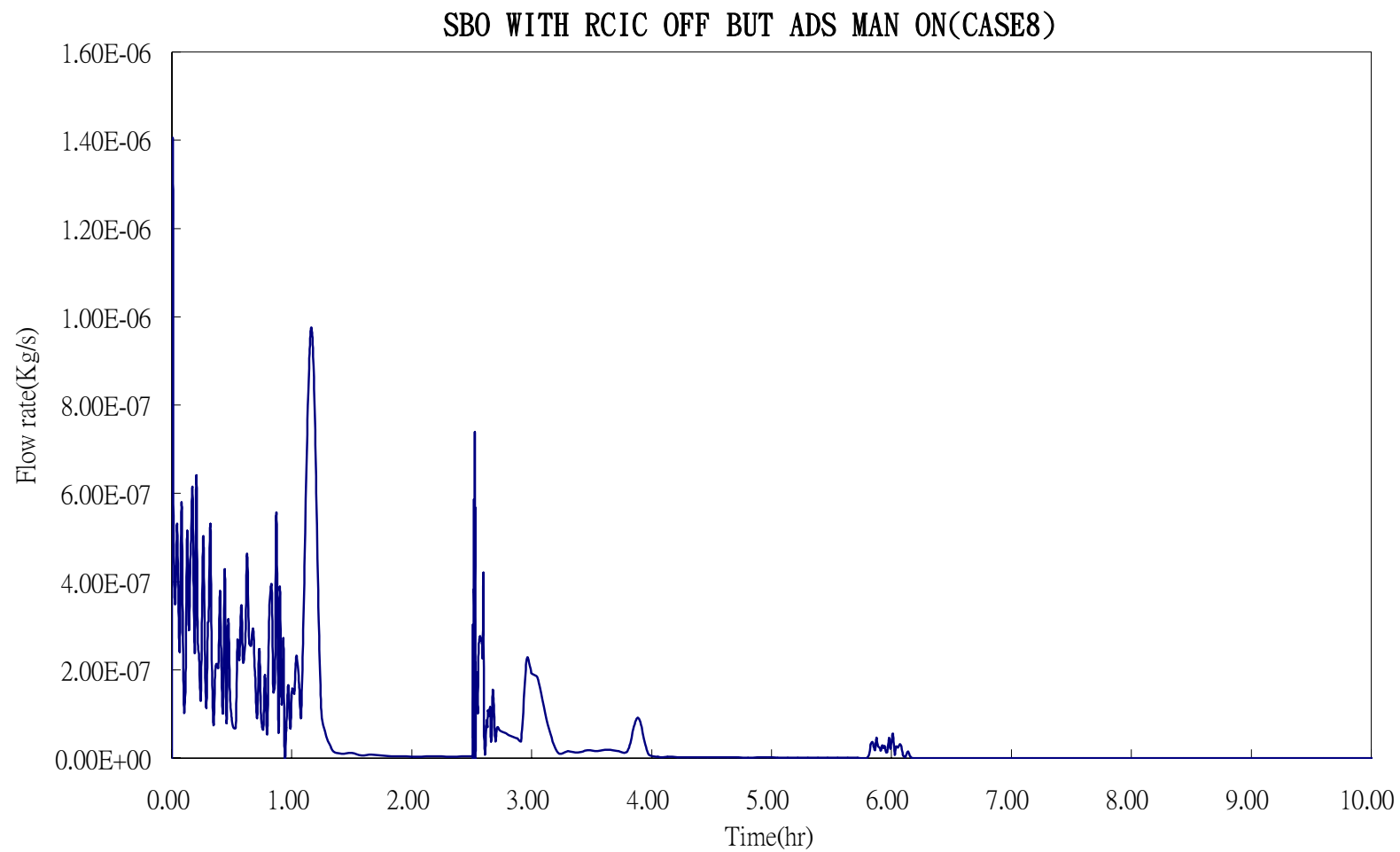
圖B. 3. 2. 3-22 爐心水位



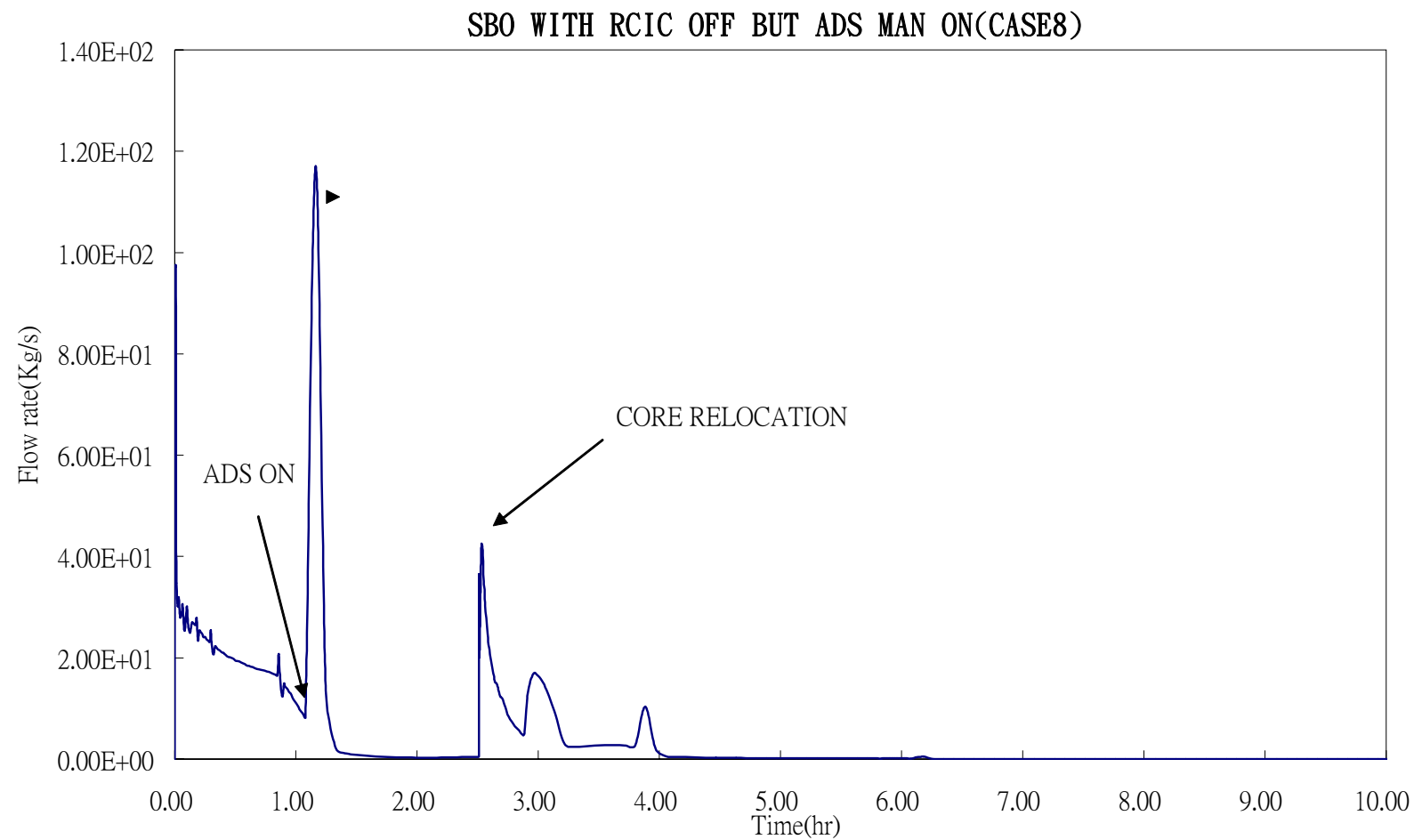
圖B. 3. 2. 3-23 爐心燃料最高溫度



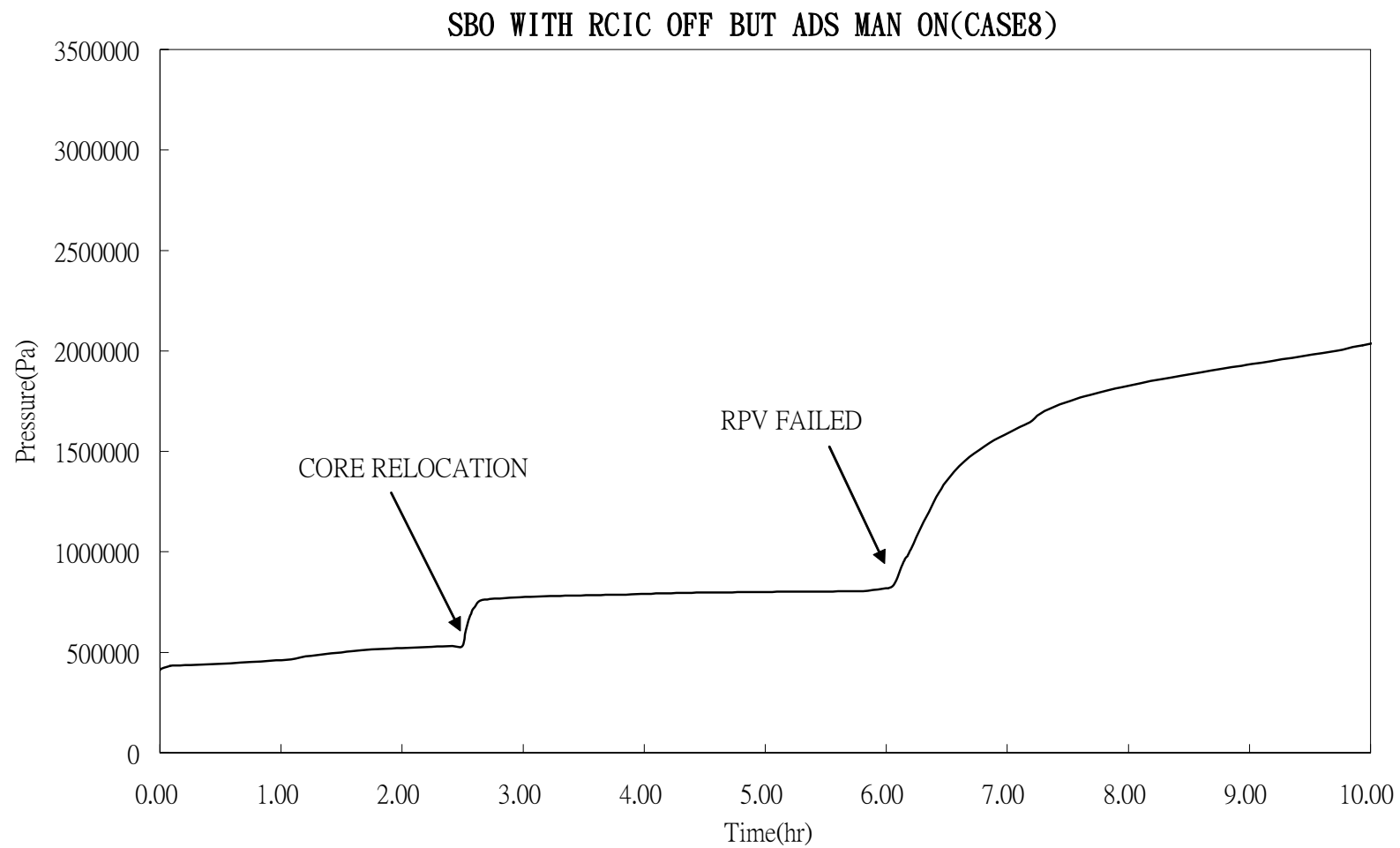
圖B. 3. 2. 3-24 爐心燃料棒護套氧化比例



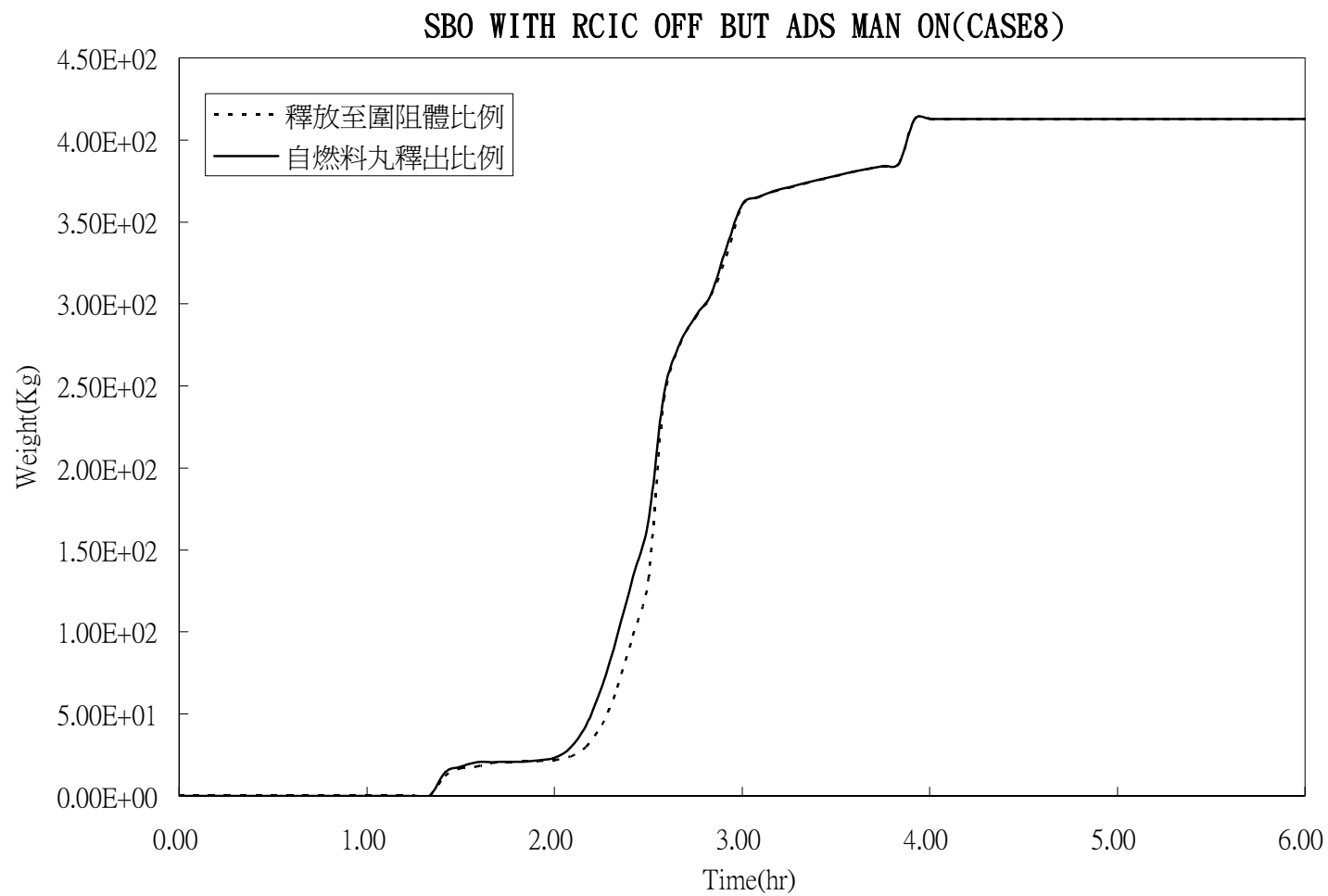
圖B. 3. 2. 3-25 釋放閥冷卻水流率



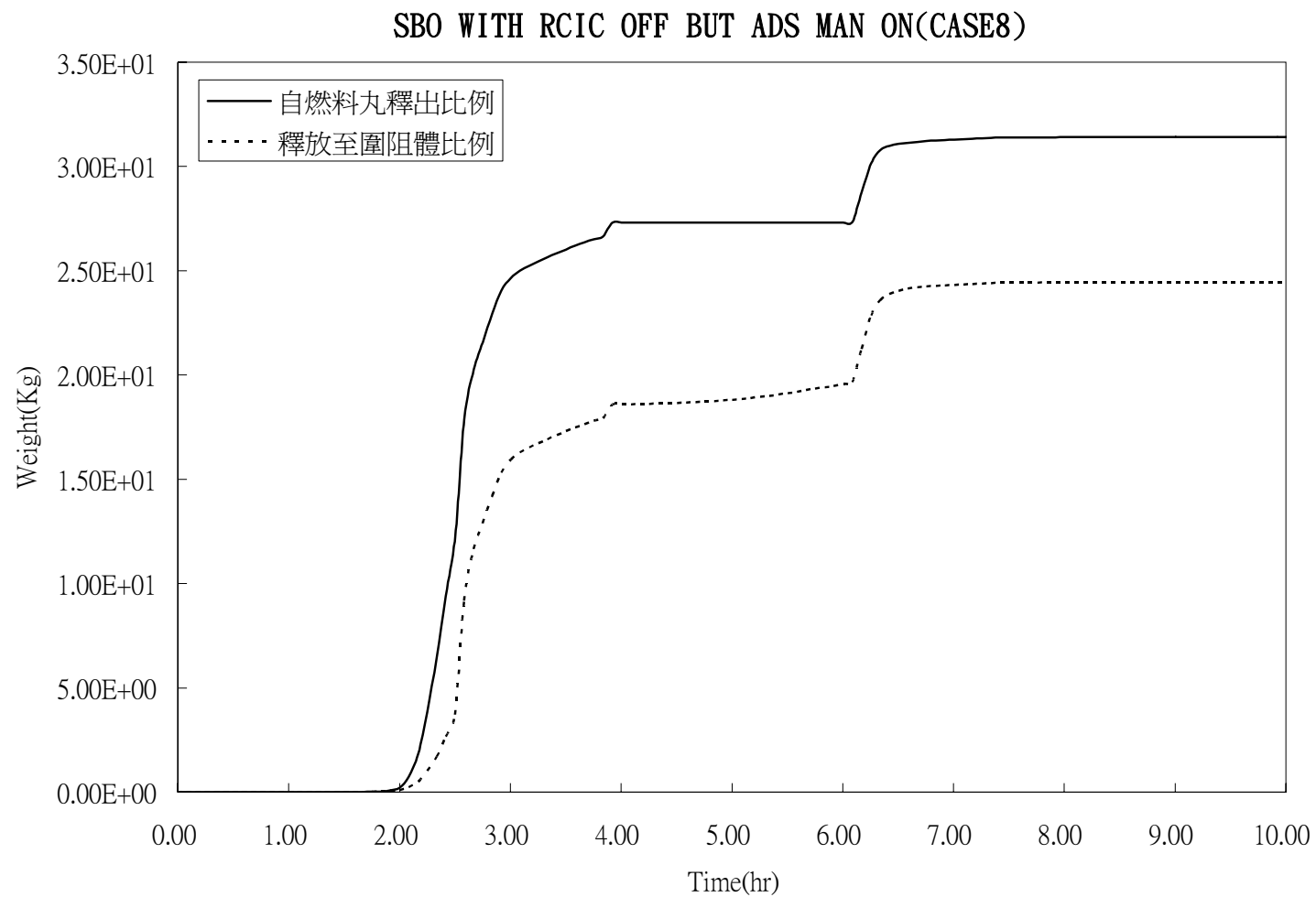
圖B. 3. 2. 3-26 釋放閥水蒸汽流率



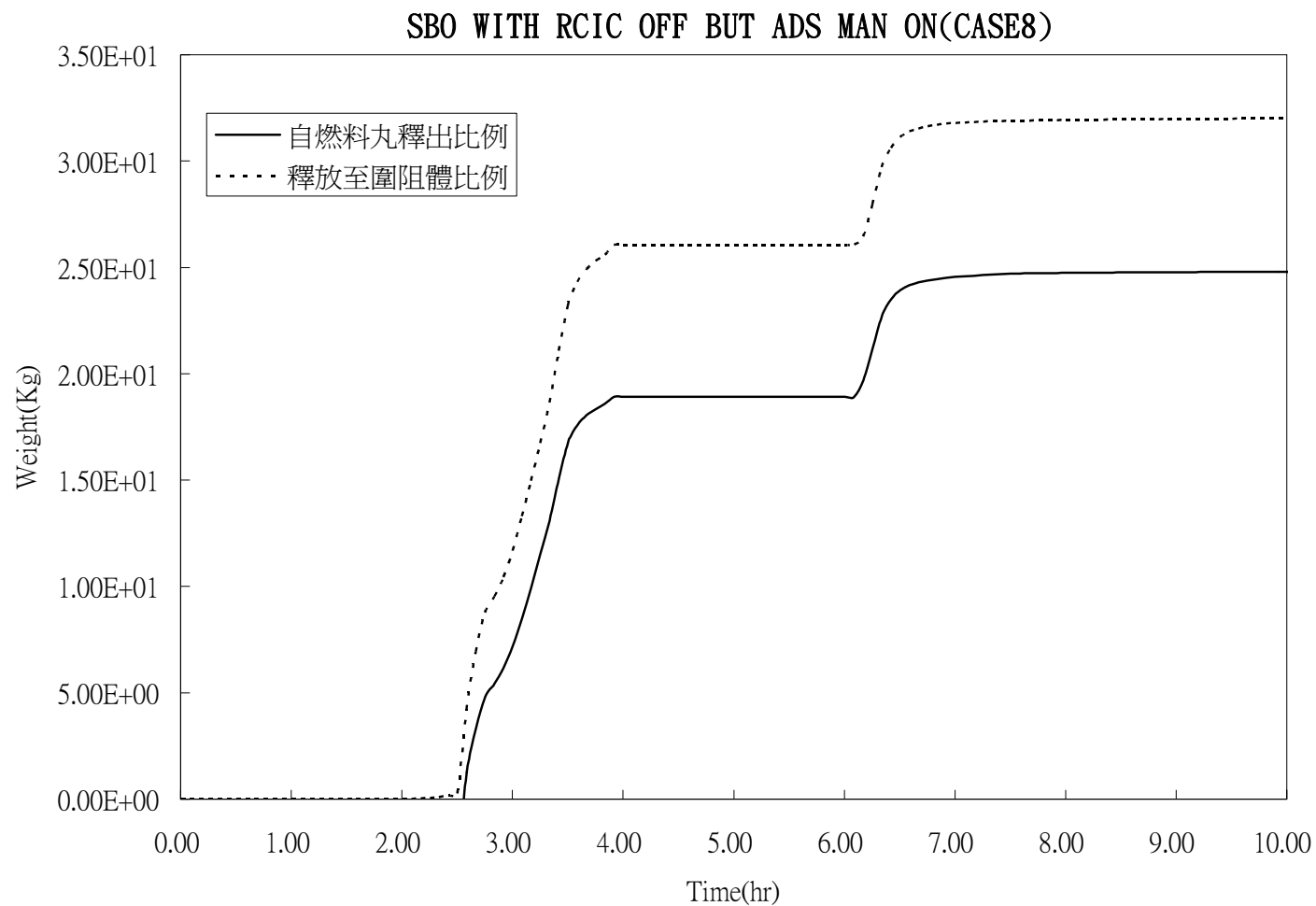
圖B. 3. 2. 3-27 圍阻體壓力



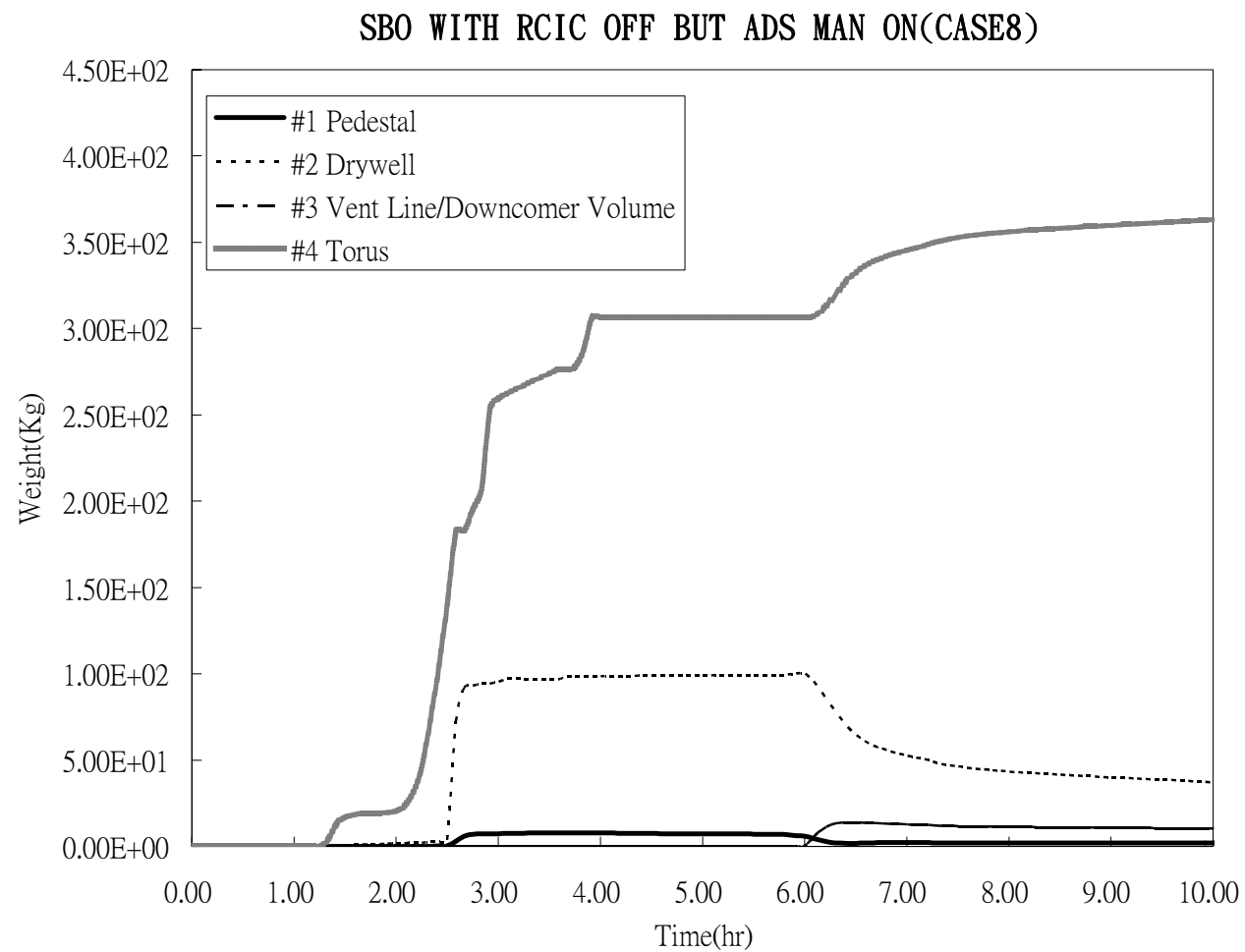
圖B. 3. 2. 3-28 惰性氣體外釋狀況



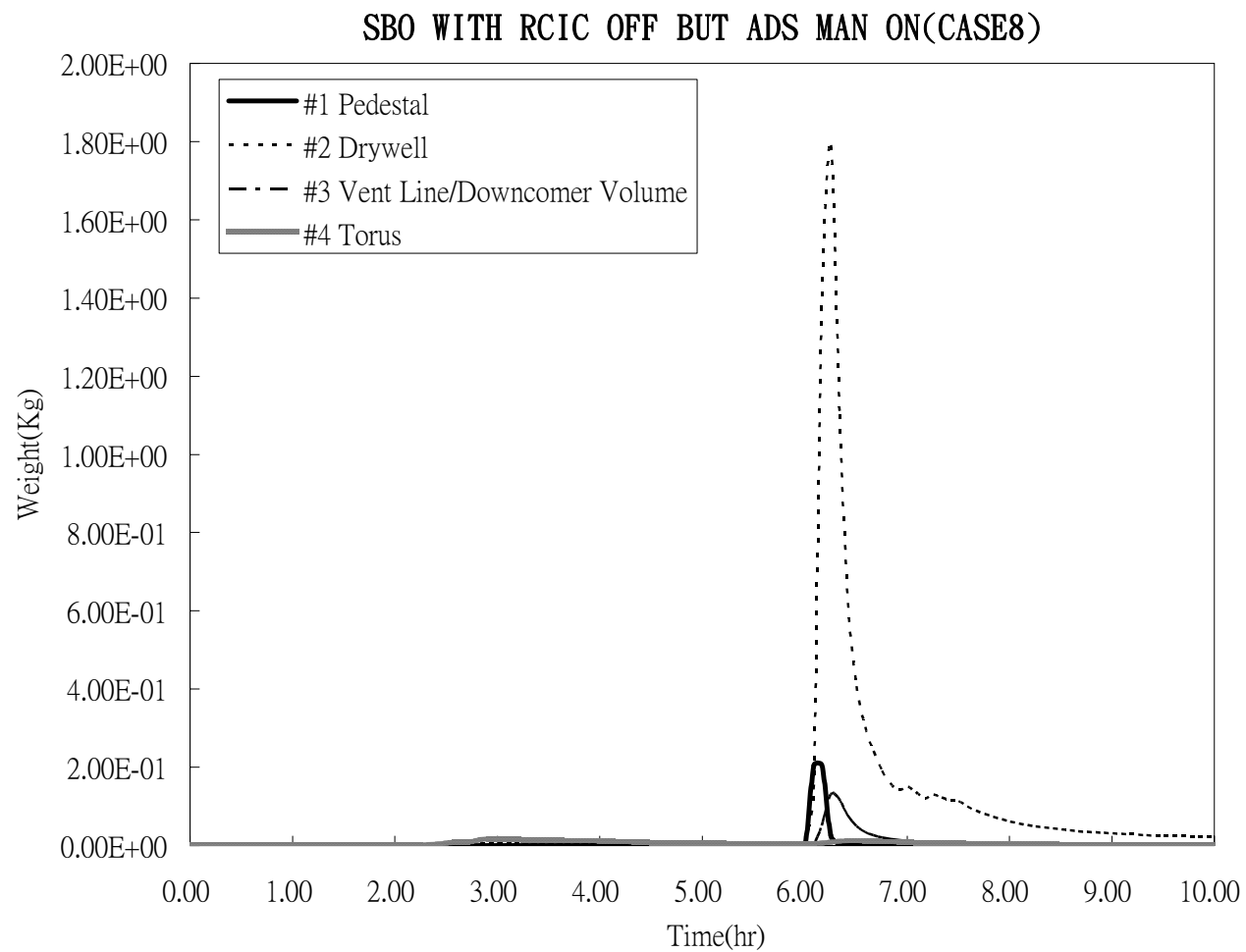
圖B. 3. 2. 3-29 CSI外釋狀況



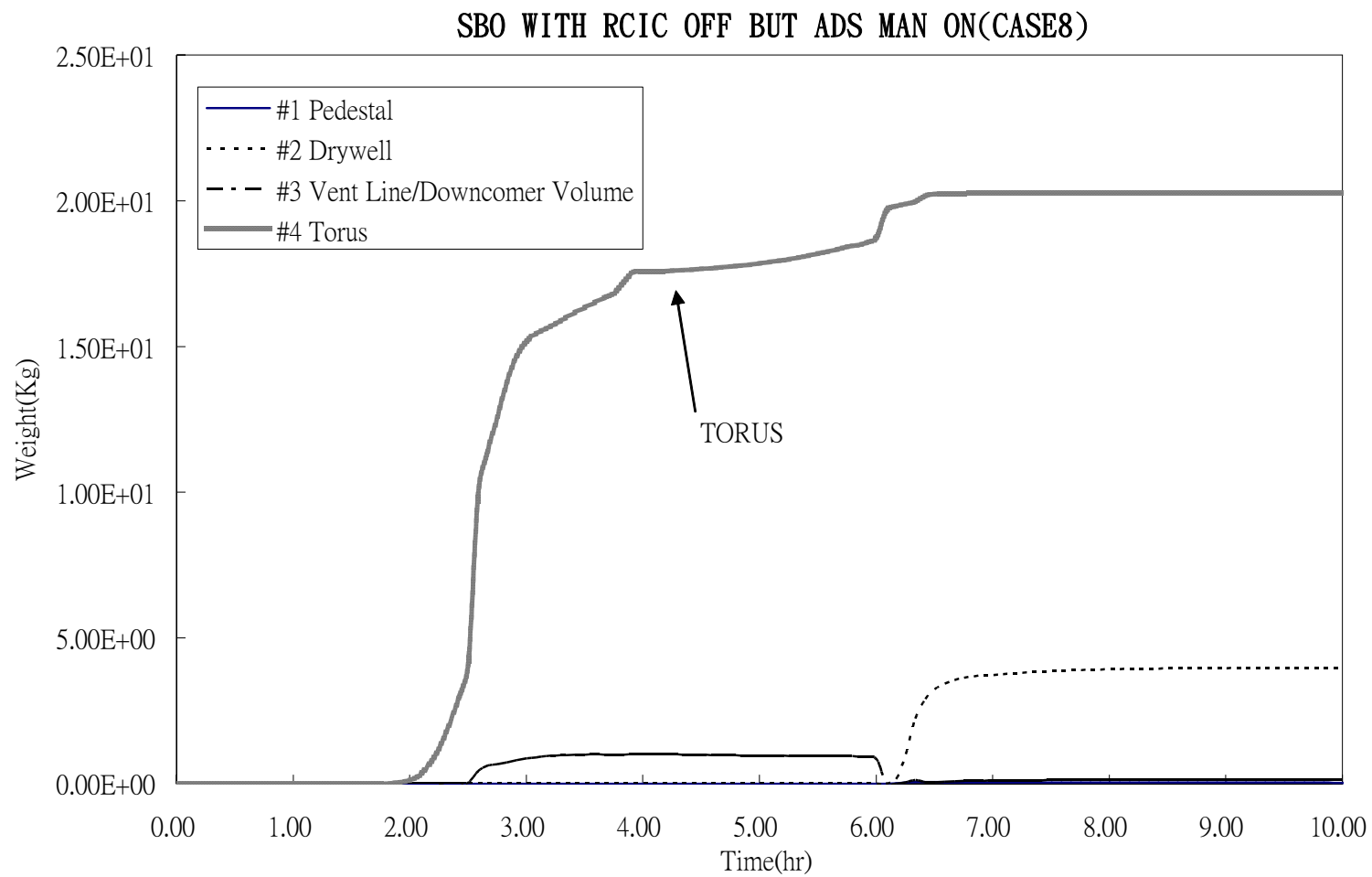
圖B. 3. 2. 3-30 TeO₂外釋狀況



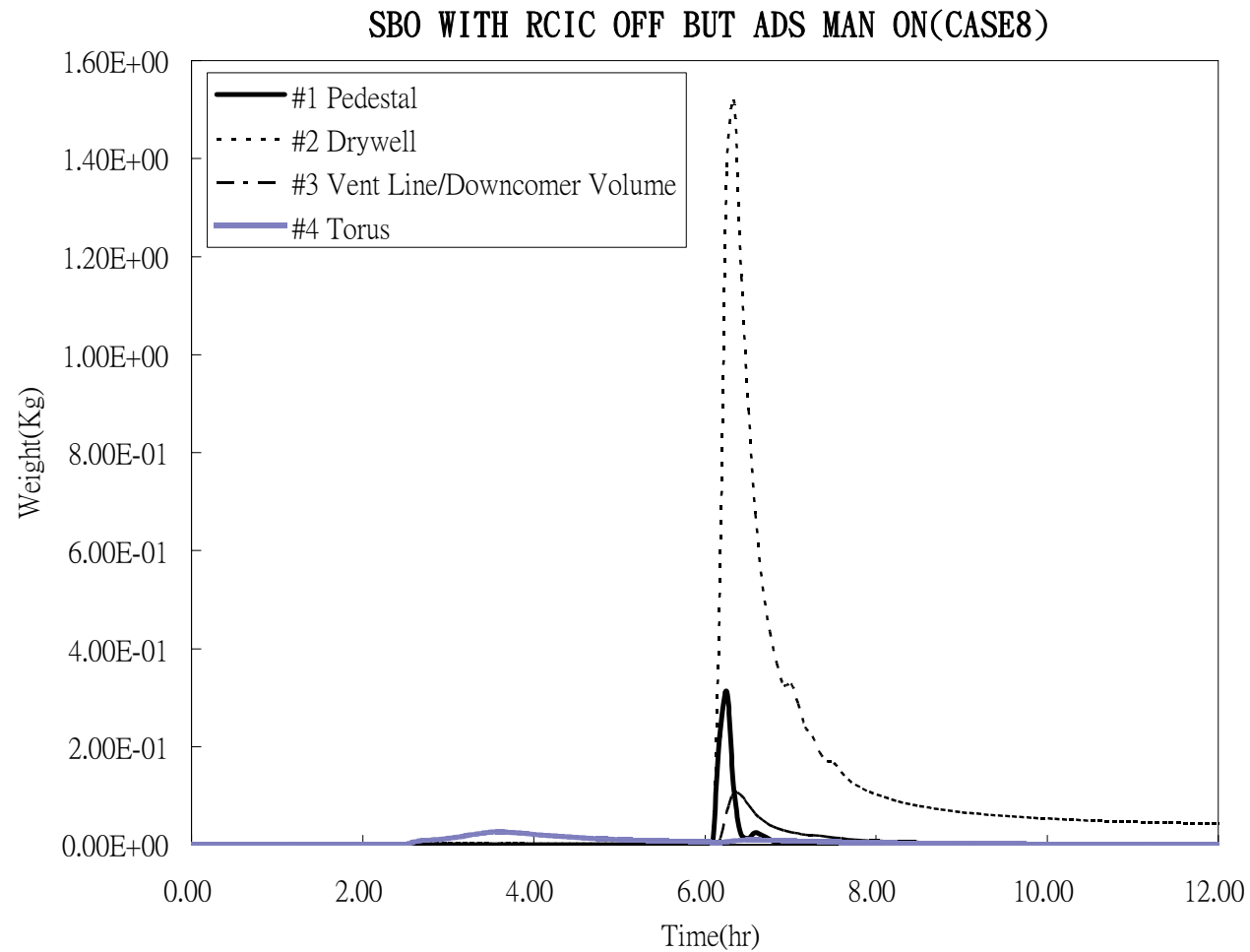
圖B. 3. 2. 3-31 惰性氣體於圍阻體內之分佈



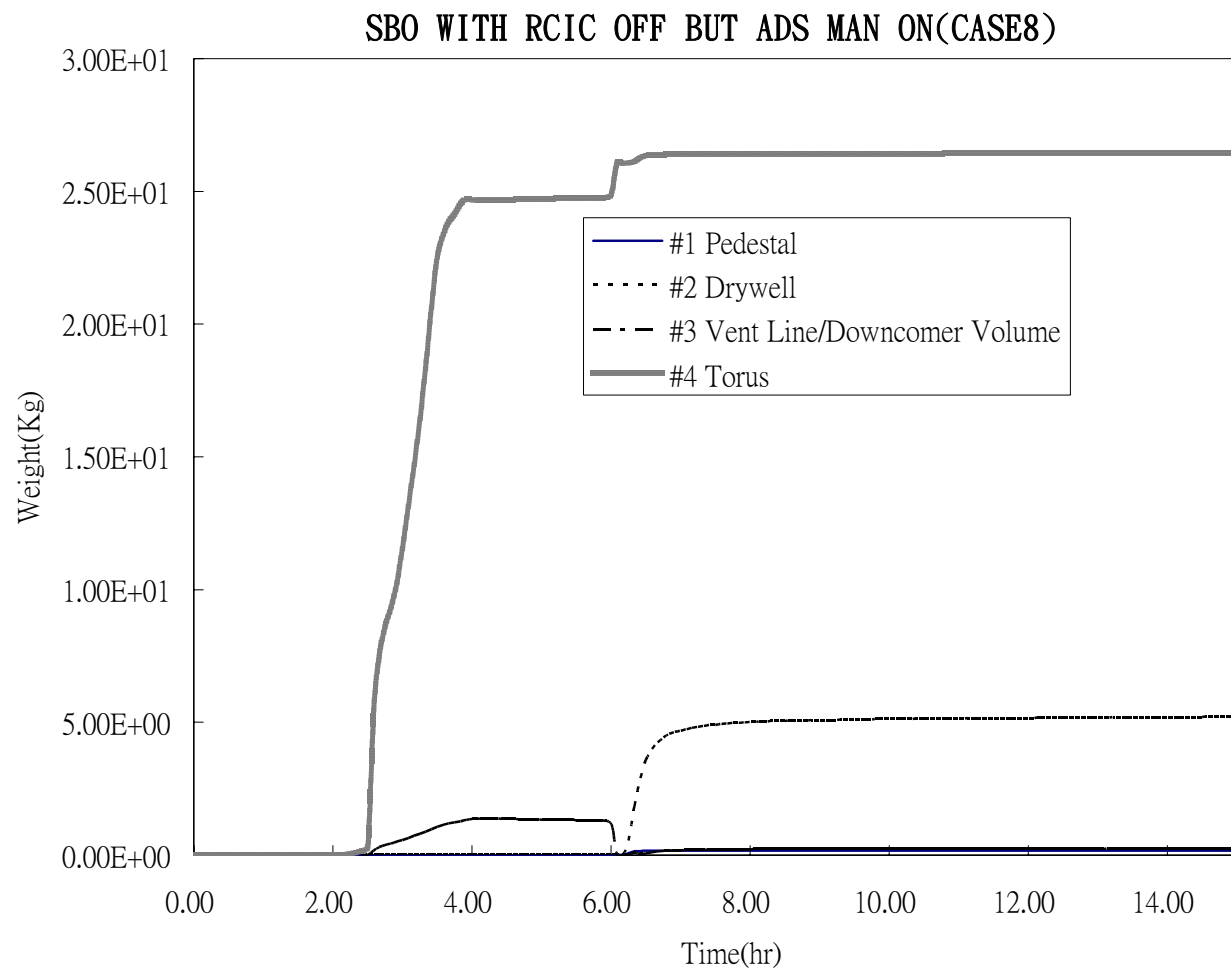
圖B. 3. 2. 3-32 圍阻體內CSI空浮分佈



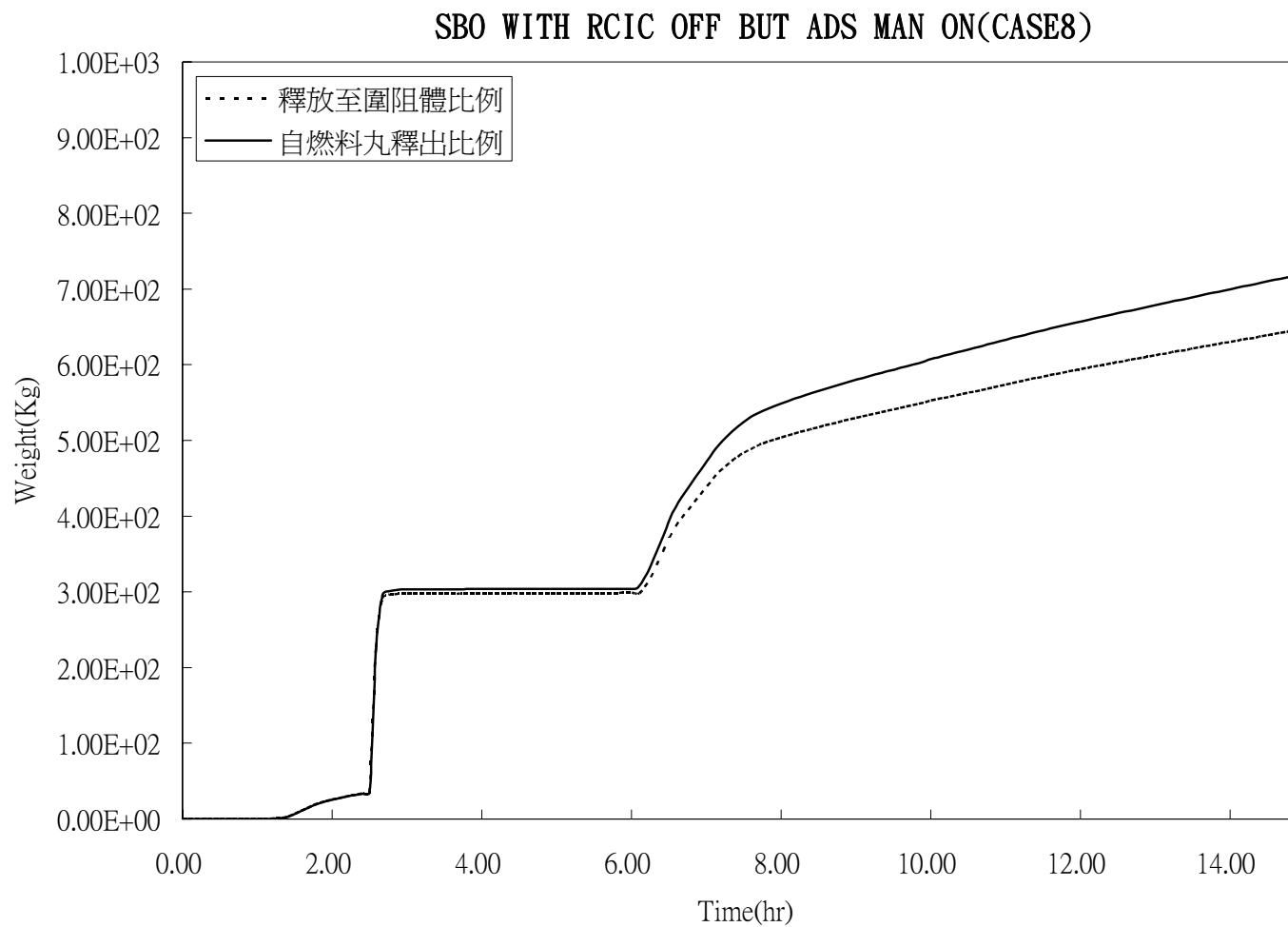
圖B. 3. 2. 3-33 圍阻體內CSI沉積分佈



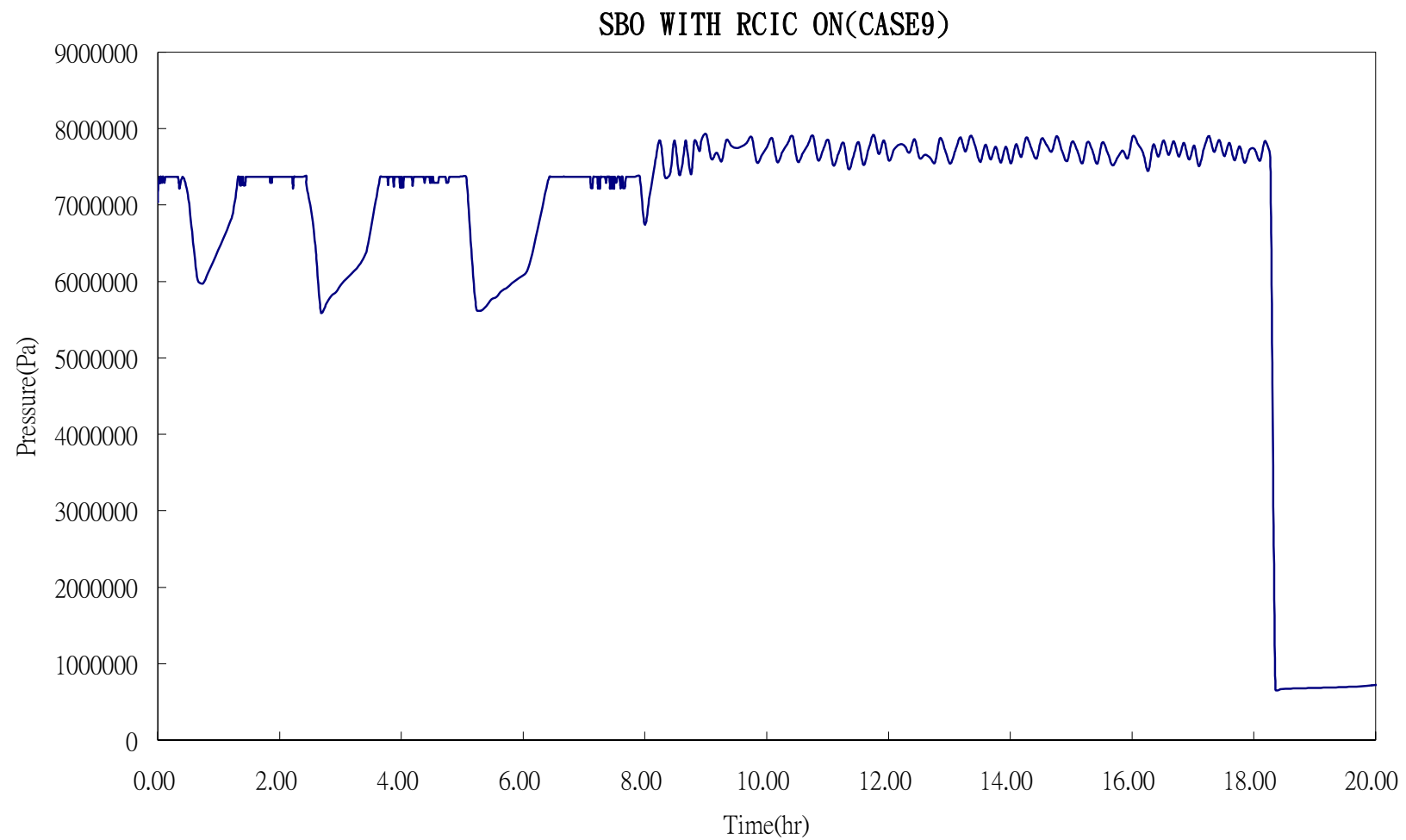
圖B. 3. 2. 3-34 圍阻體內TeO₂空浮分佈



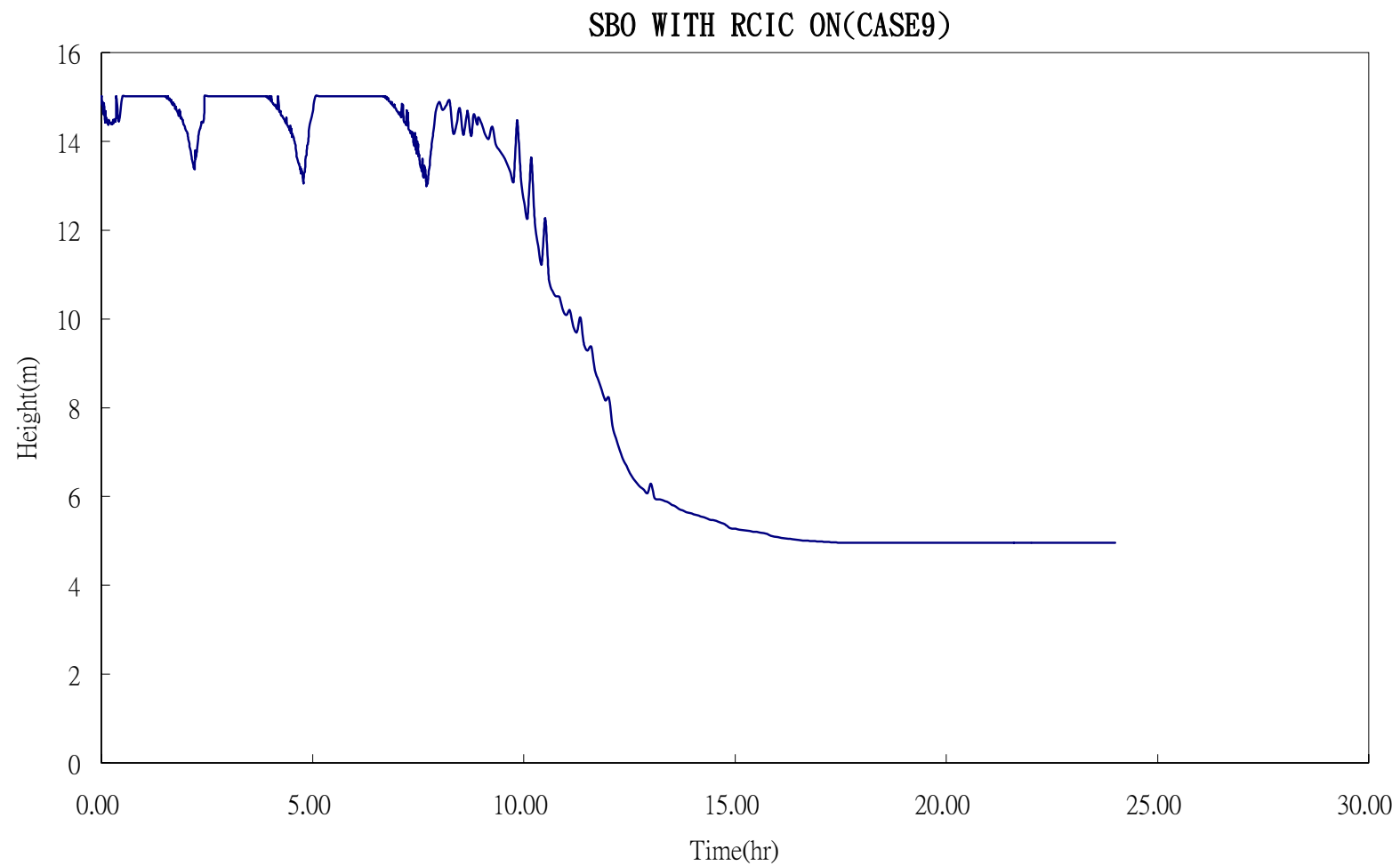
圖B. 3. 2. 3-35 圍阻體內TeO₂沉積分佈



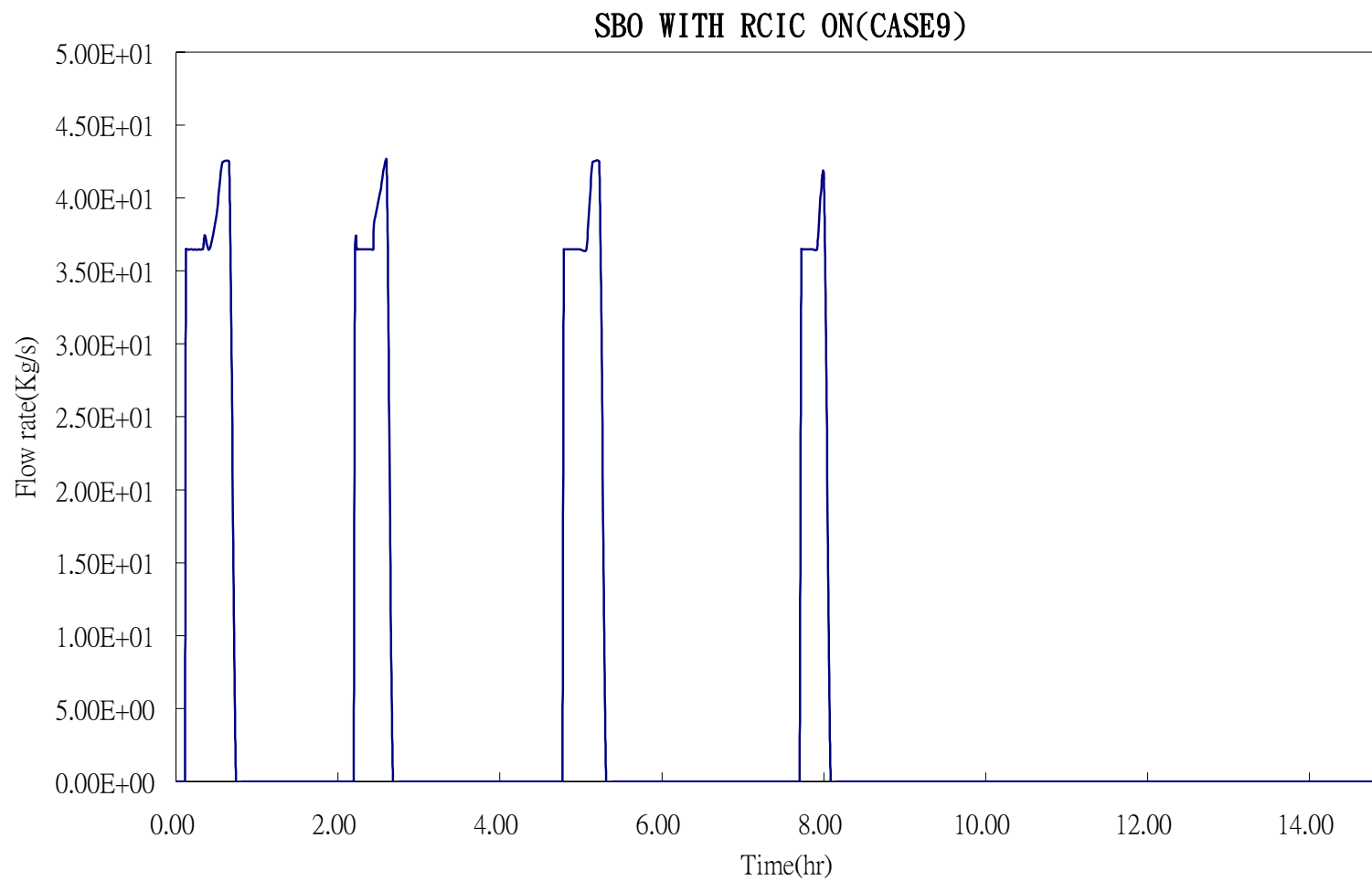
圖B. 3. 2. 3-36 氫氣產生量及分佈



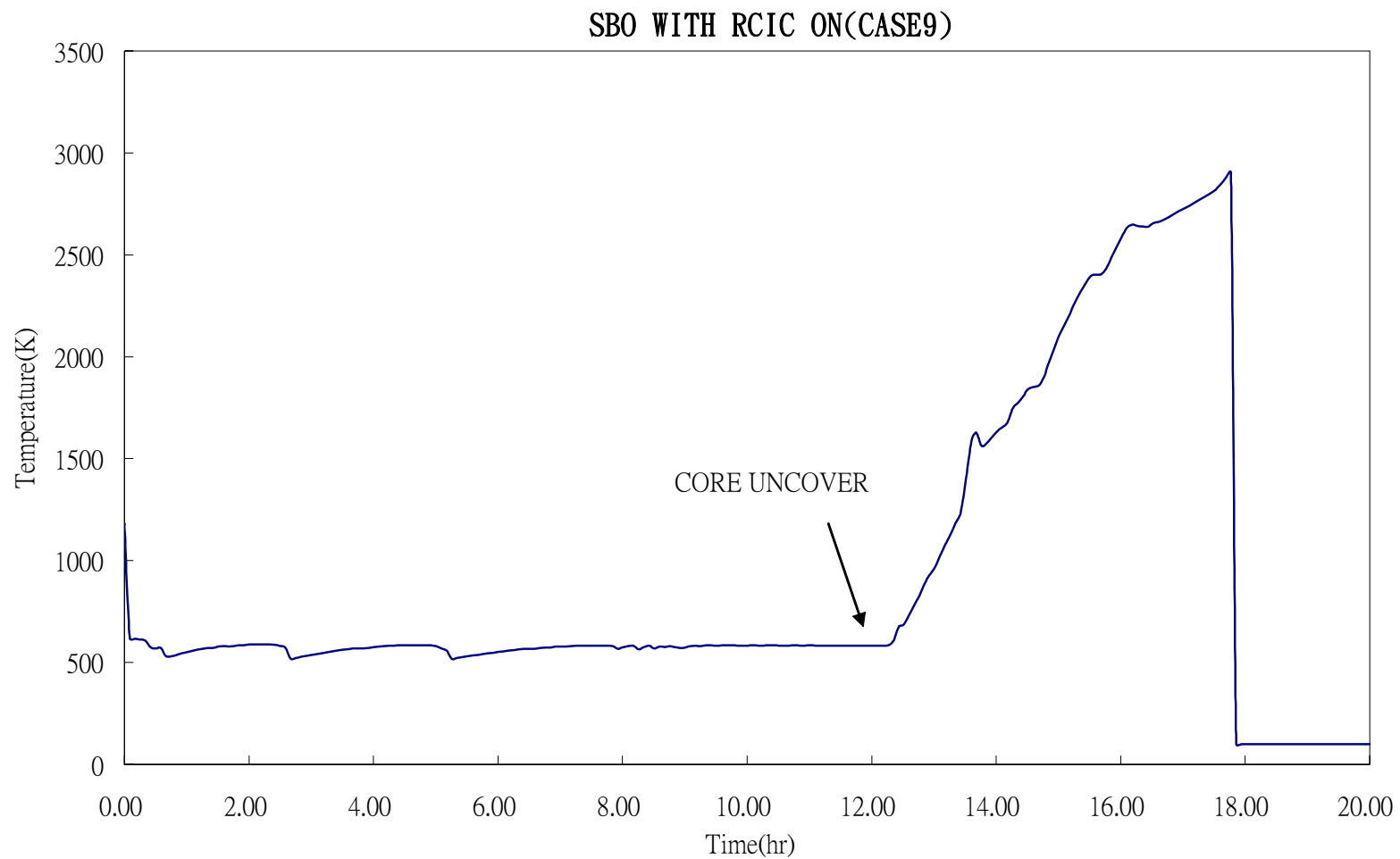
圖B. 3. 2. 3-37 一次系統壓力



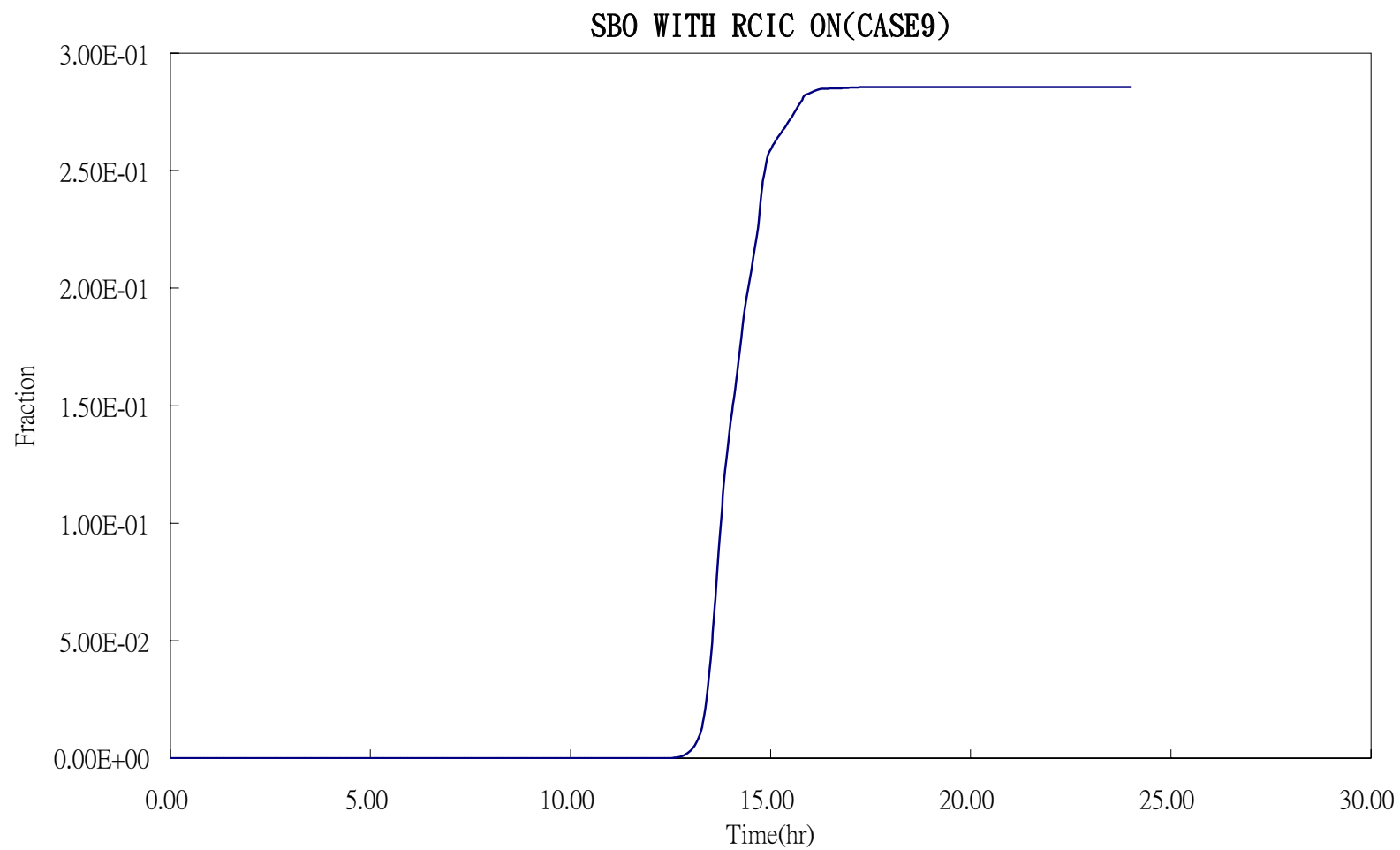
圖B. 3. 2. 3-38 爐心水位



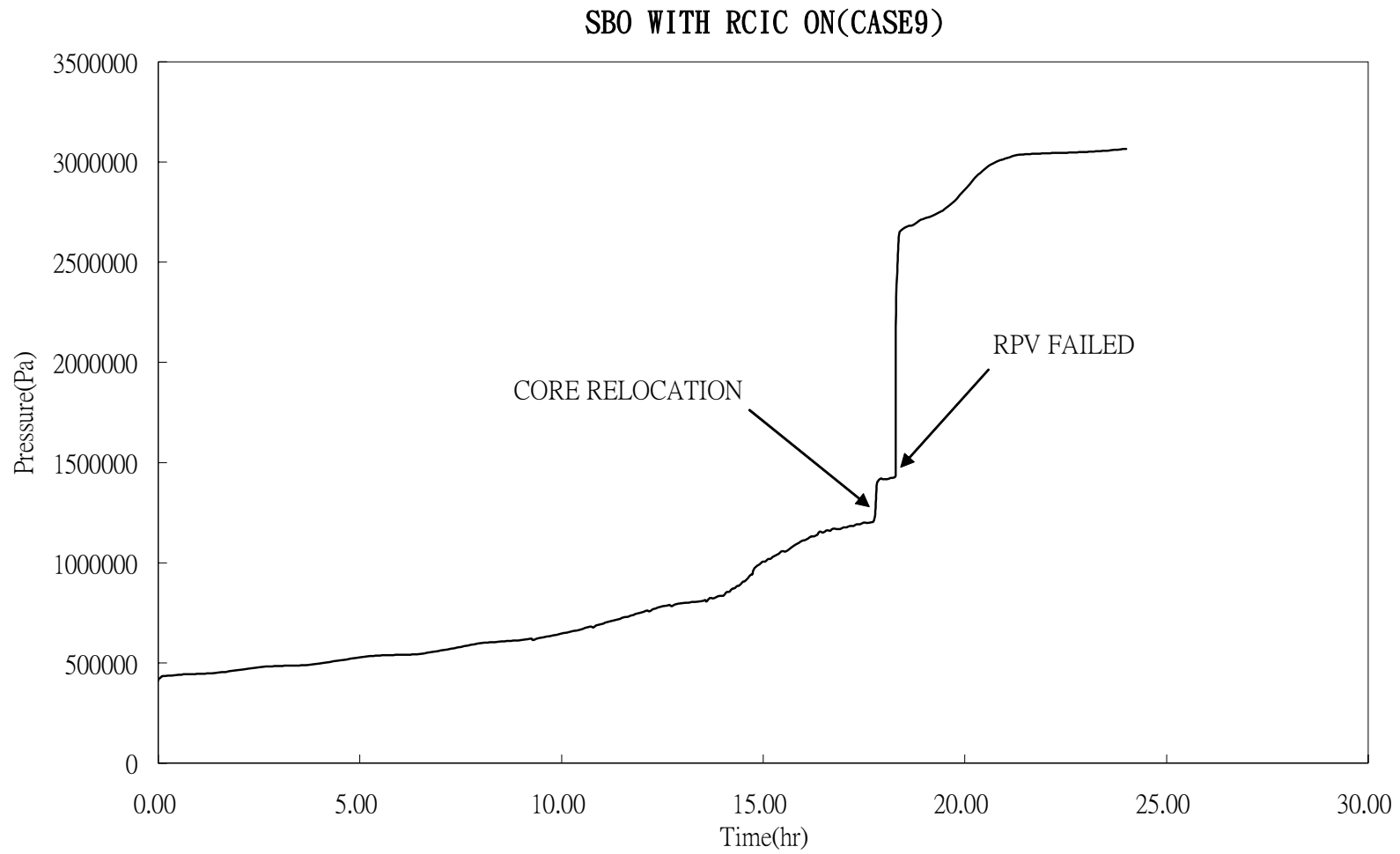
圖B. 3. 2. 3-39 RCIC流量率



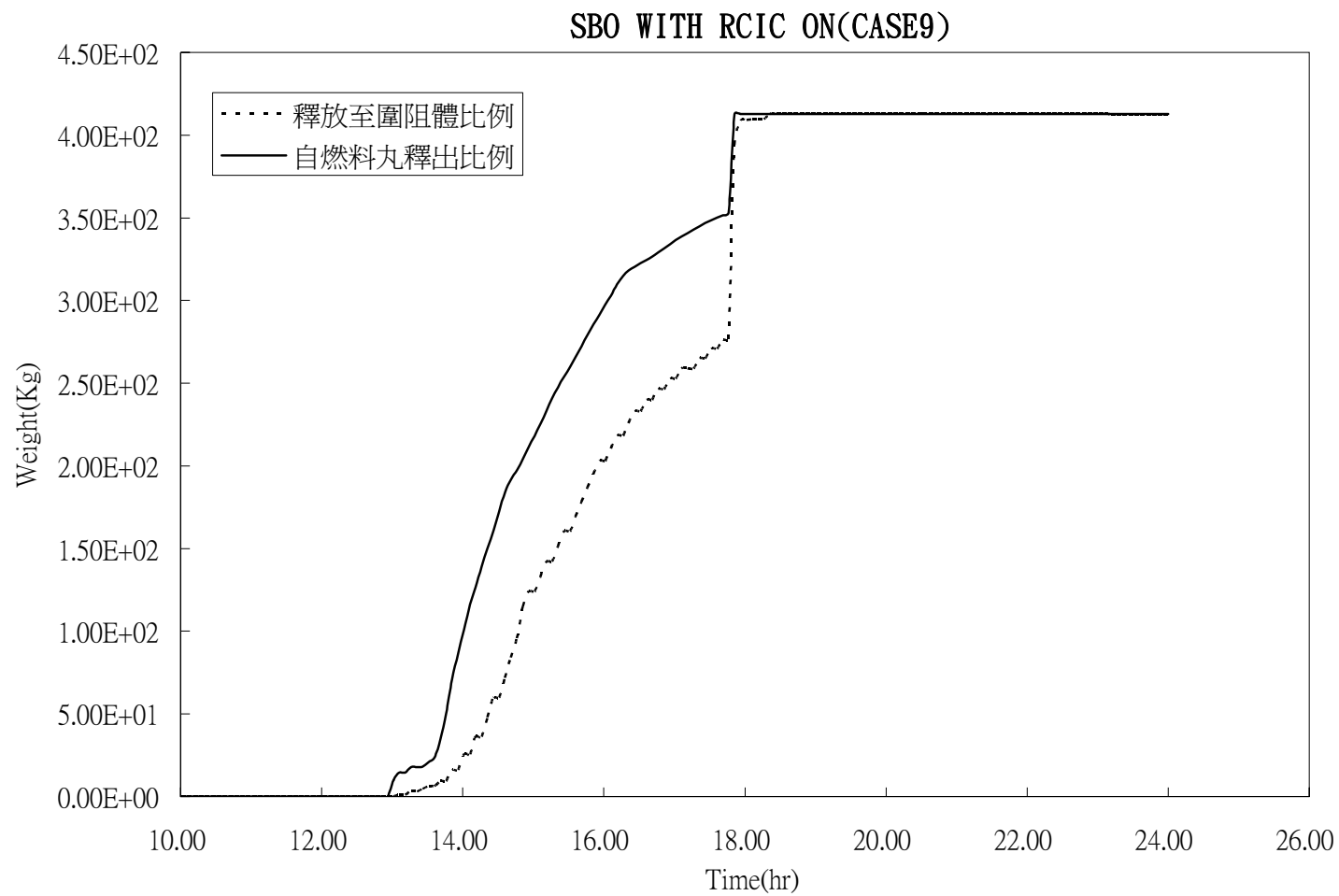
圖B. 3. 2. 3-40 爐心燃料最高溫度



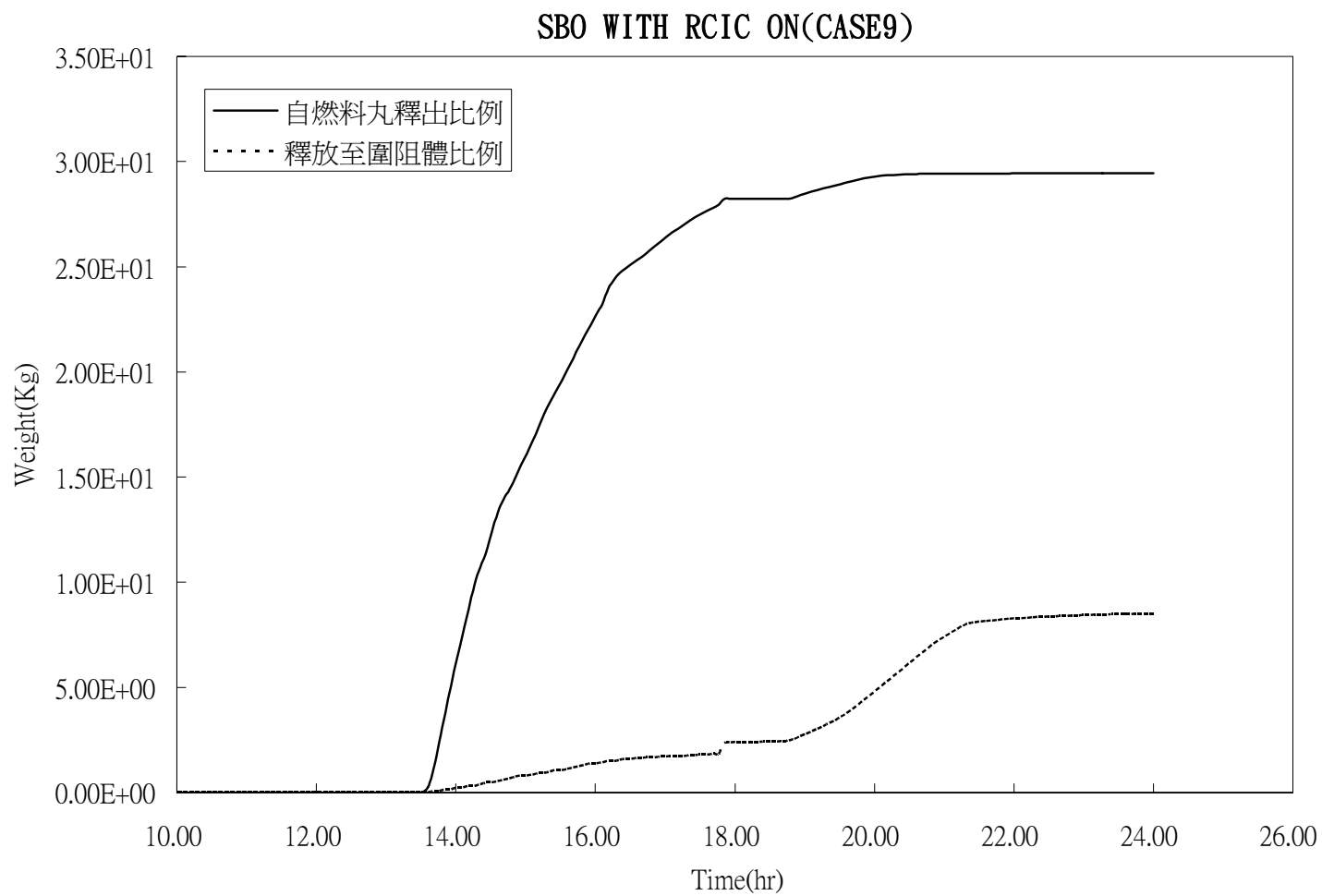
圖B. 3. 2. 3-41 爐心燃料棒護套氧化比例



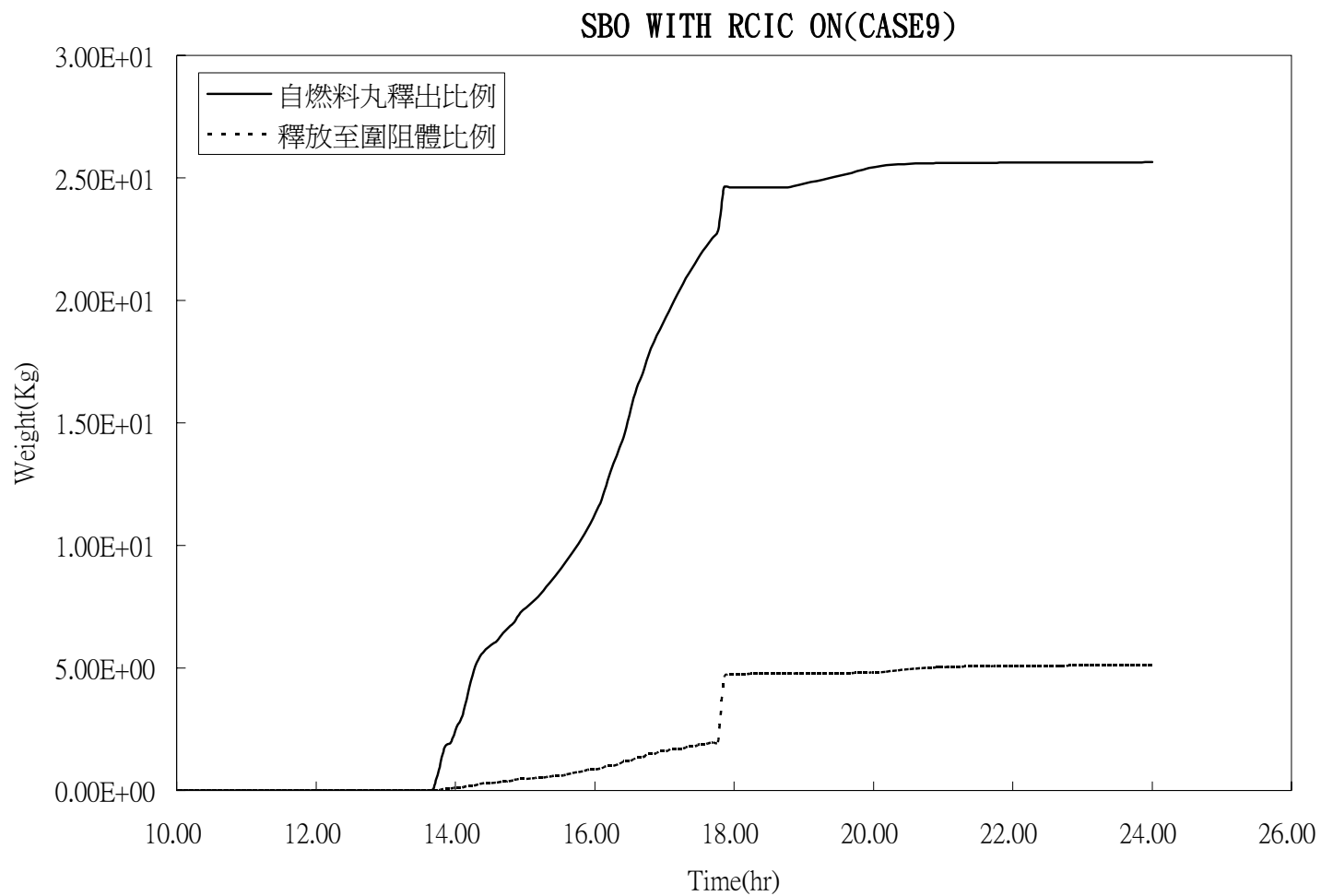
圖B. 3. 2. 3-42 圍阻體壓力



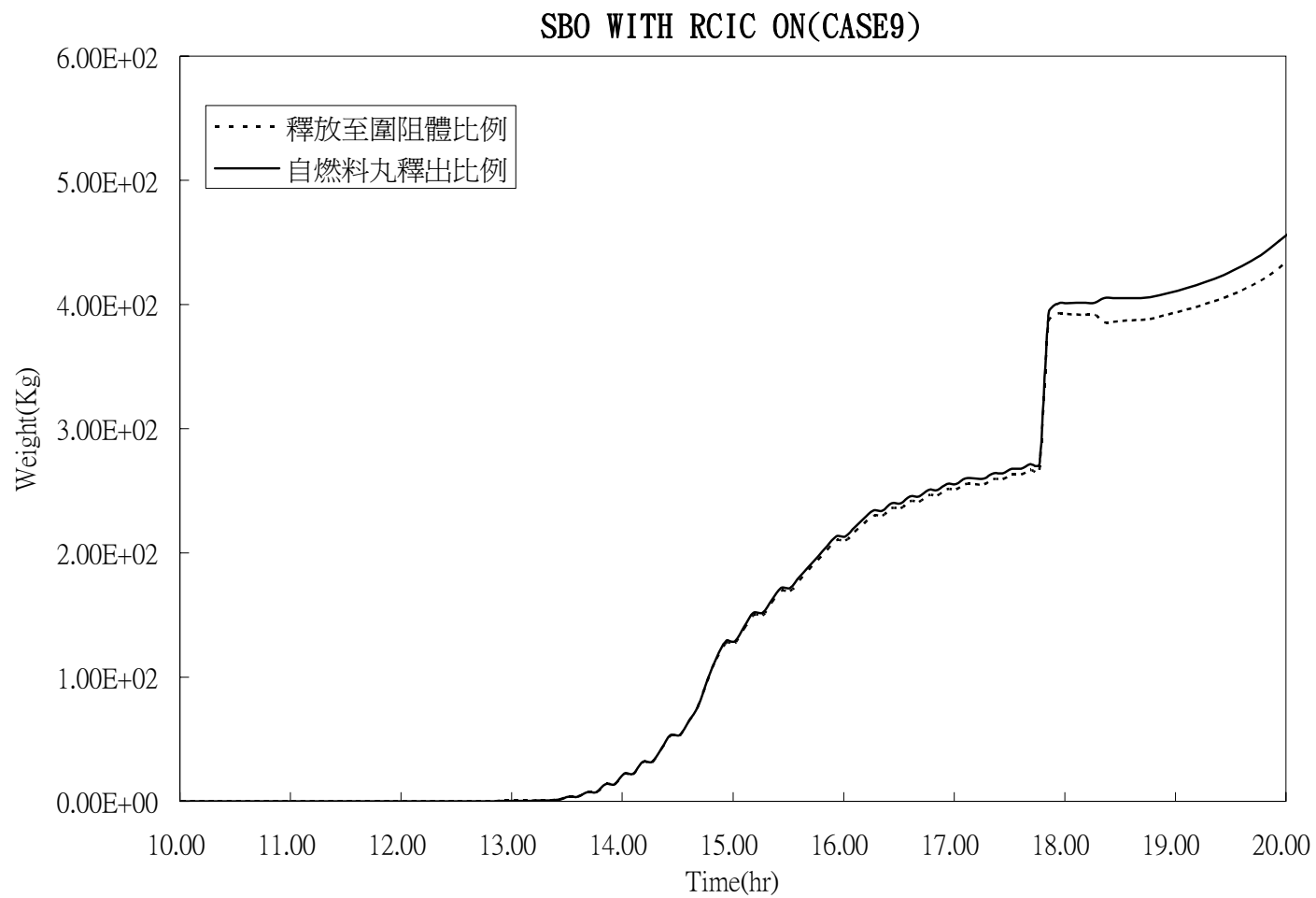
圖B. 3. 2. 3-43 惰性氣體外釋狀況



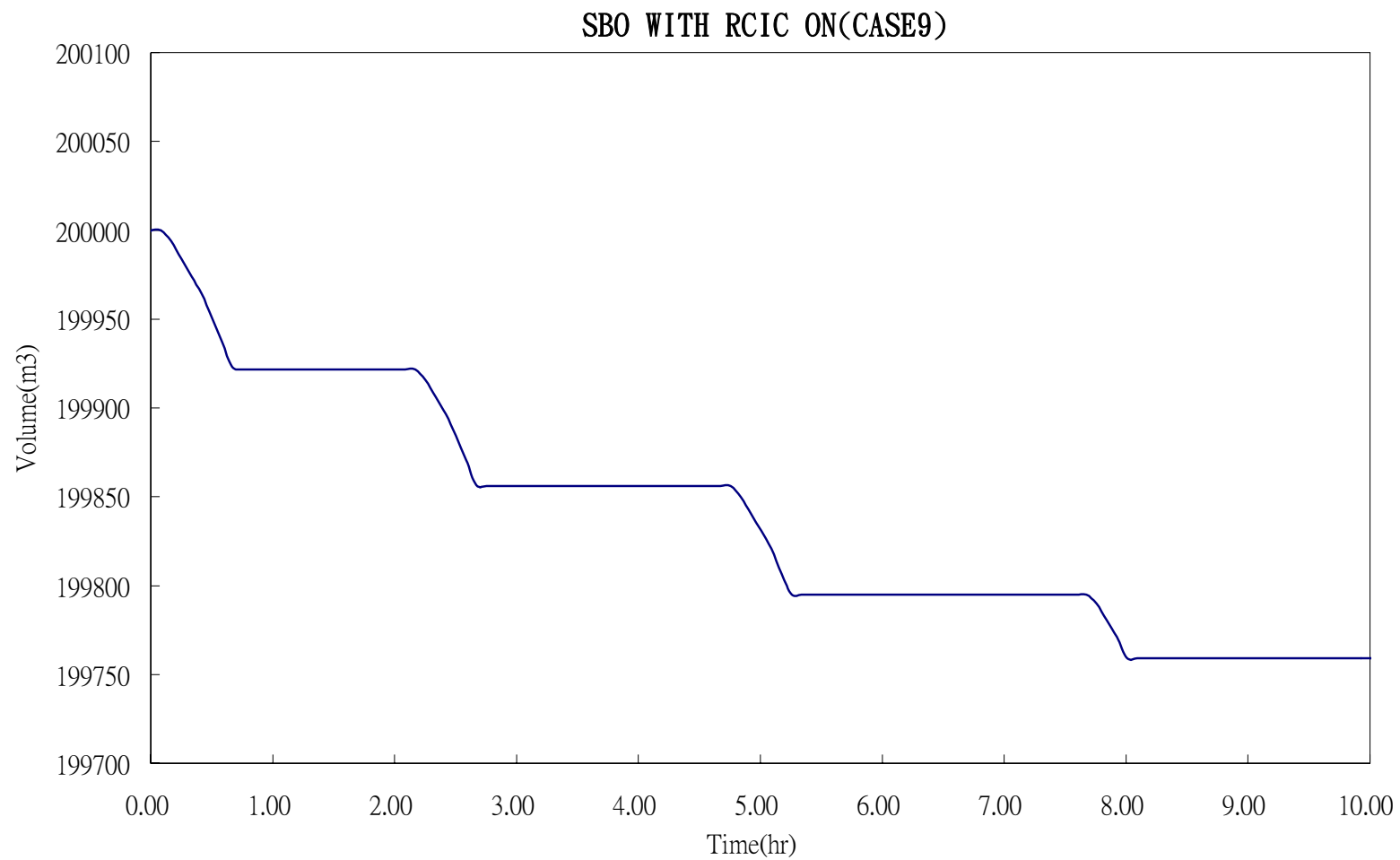
圖B. 3. 2. 3-44 CSI外釋狀況



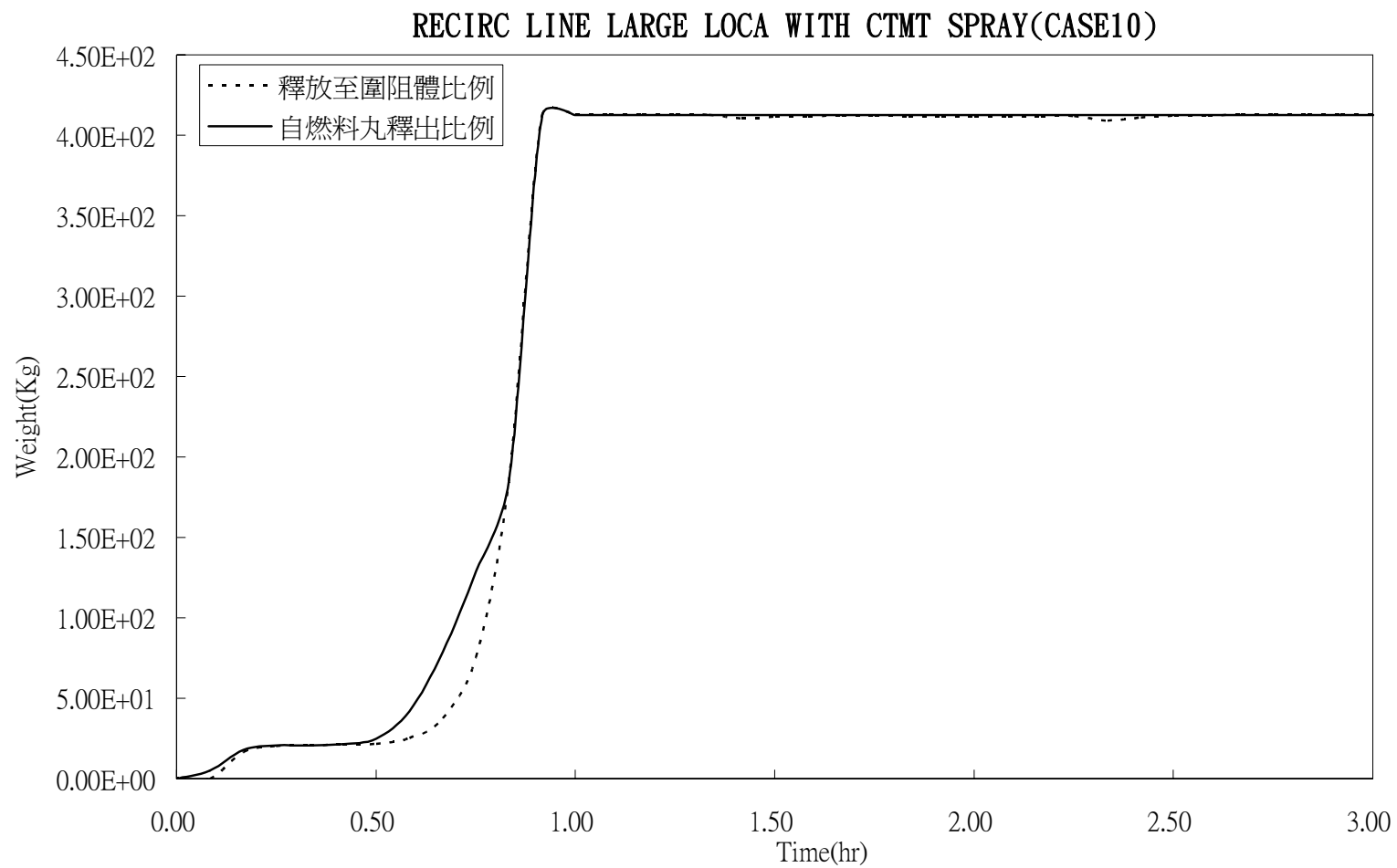
圖B. 3. 2. 3-45 TeO₂外釋狀況



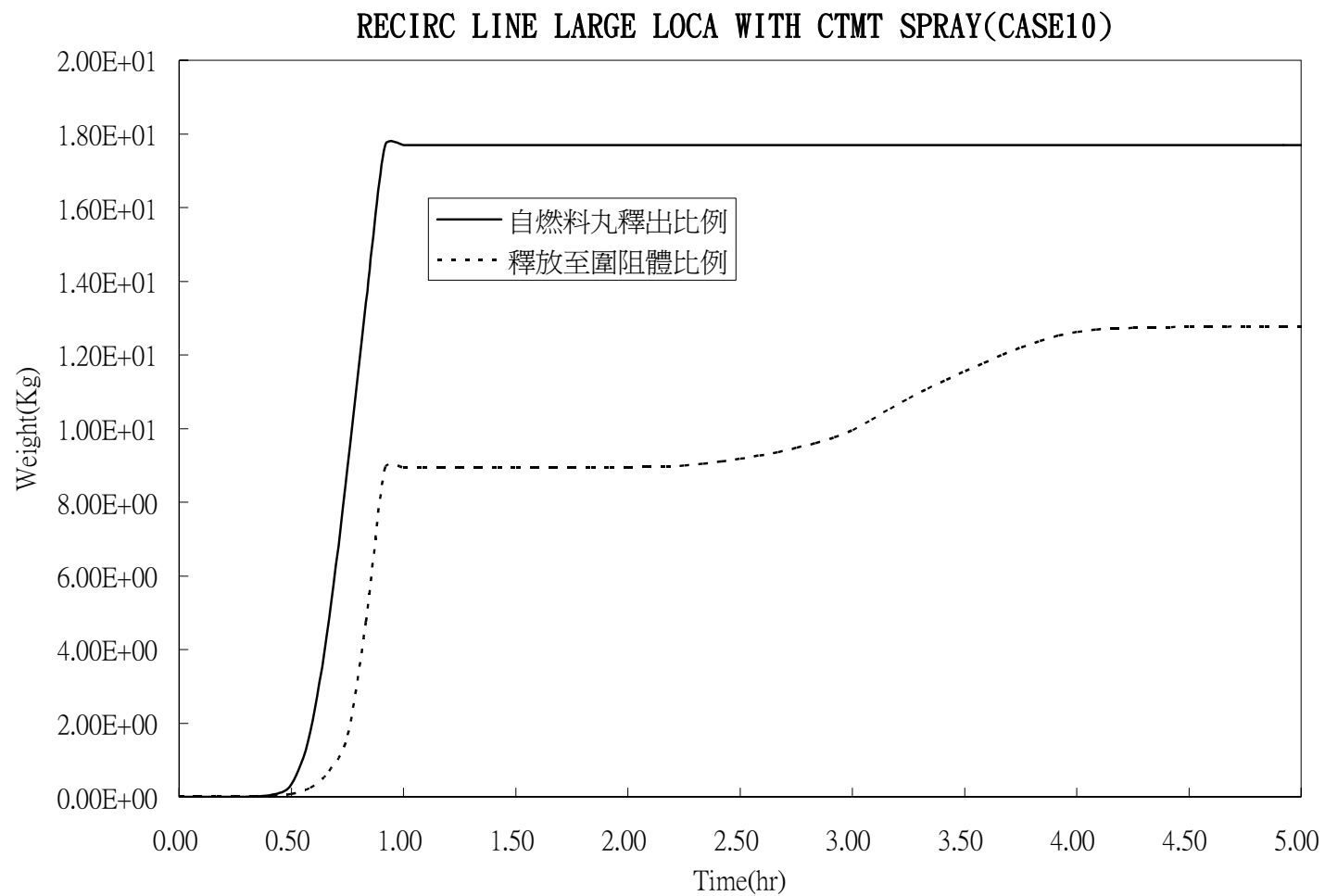
圖B. 3. 2. 3-46 氫氣產生量及分佈



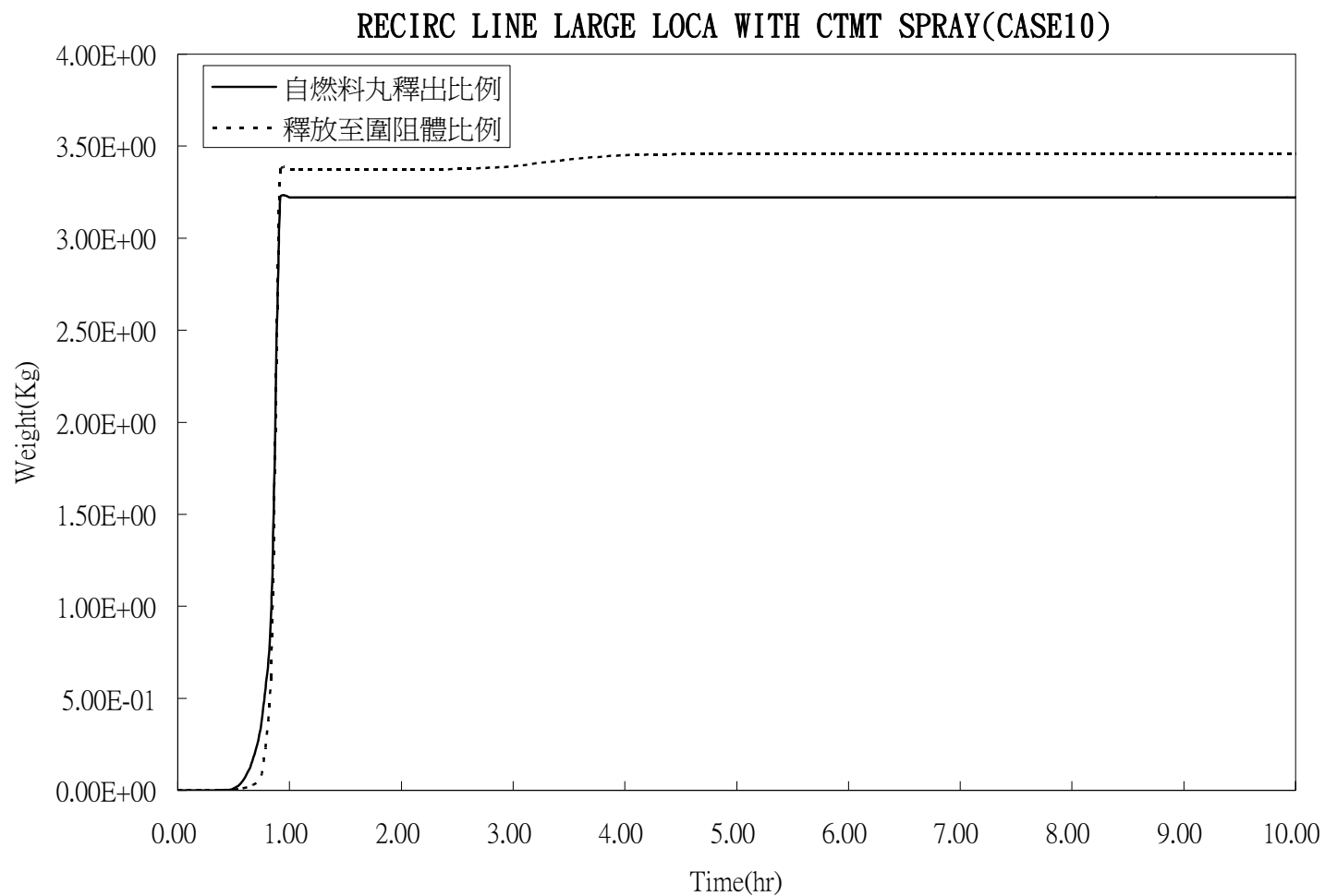
圖B. 3. 2. 3-47 CST水的體積



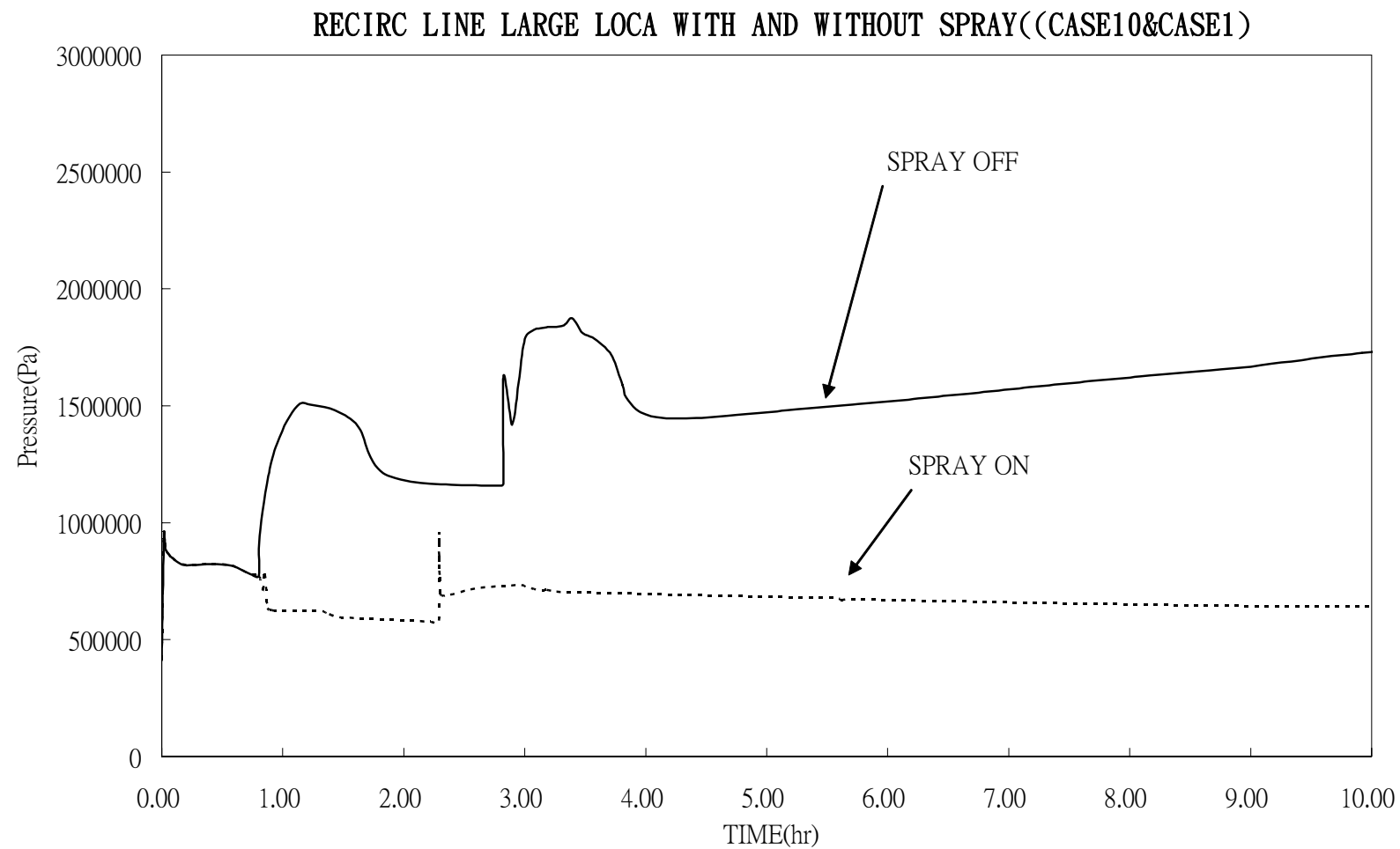
圖B. 3. 2. 4-1 惰性氣體外釋狀況



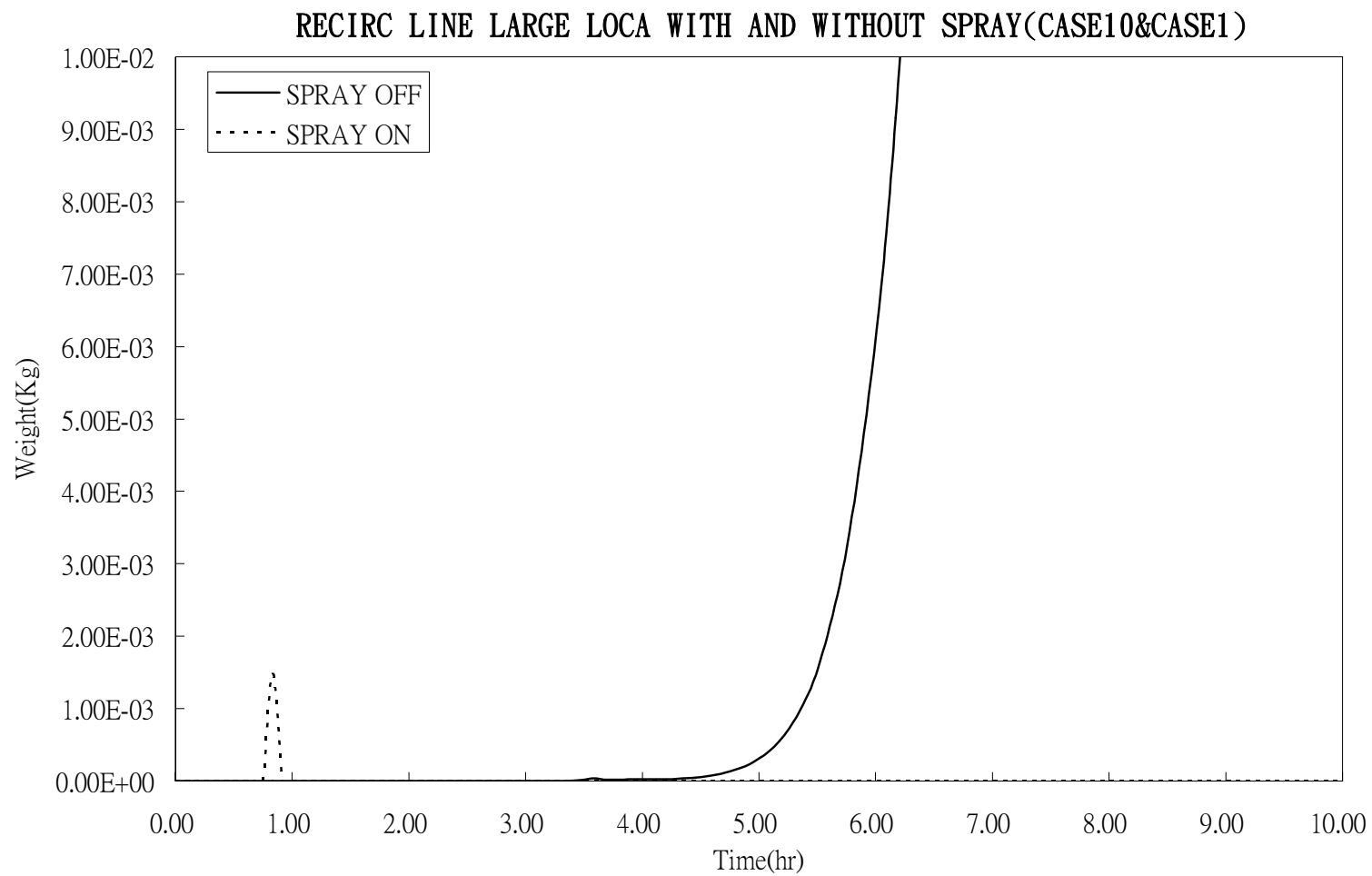
圖B. 3. 2. 4-2 CSI外釋狀況



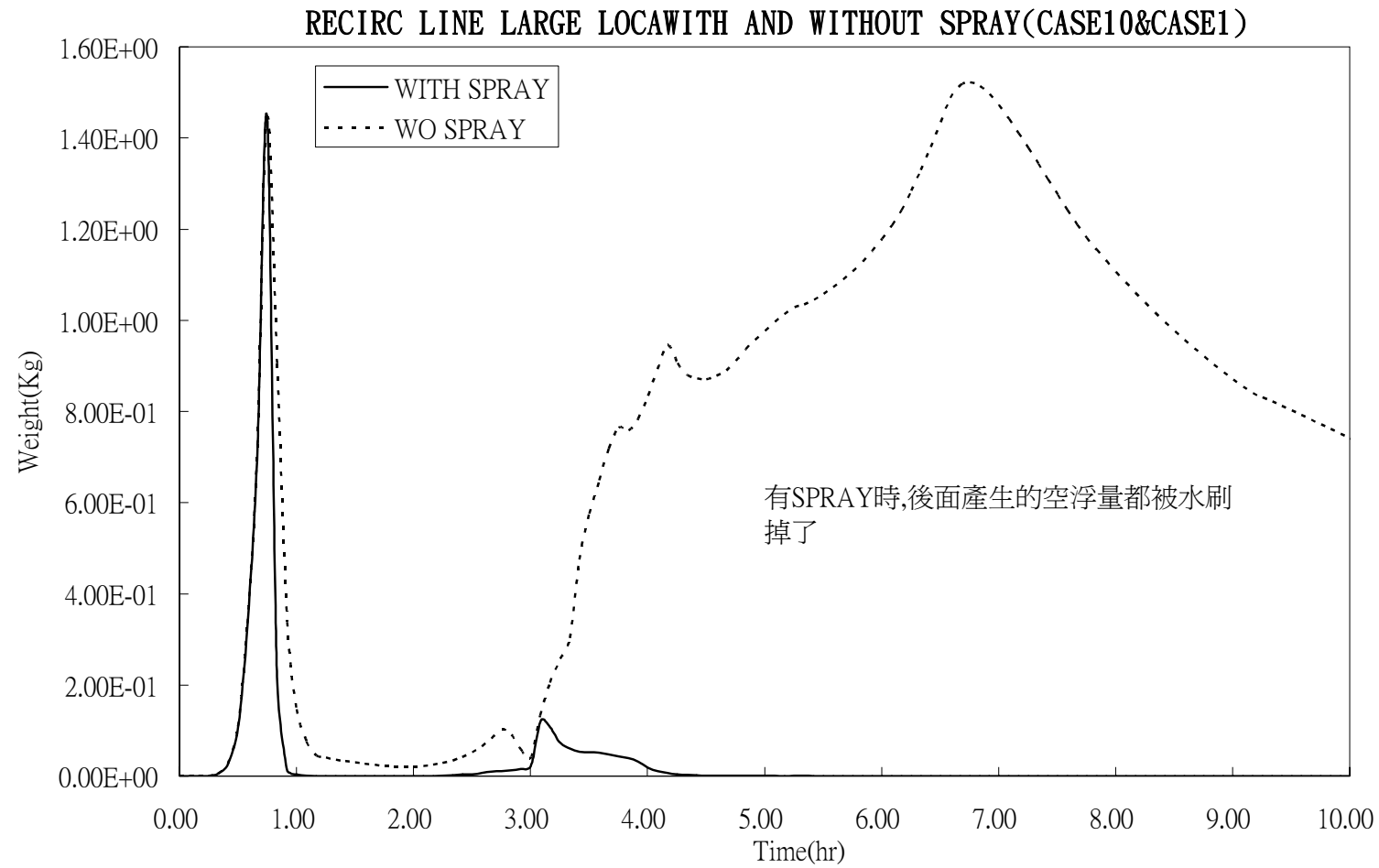
圖B. 3. 2. 4-3 TeO₂外釋狀況



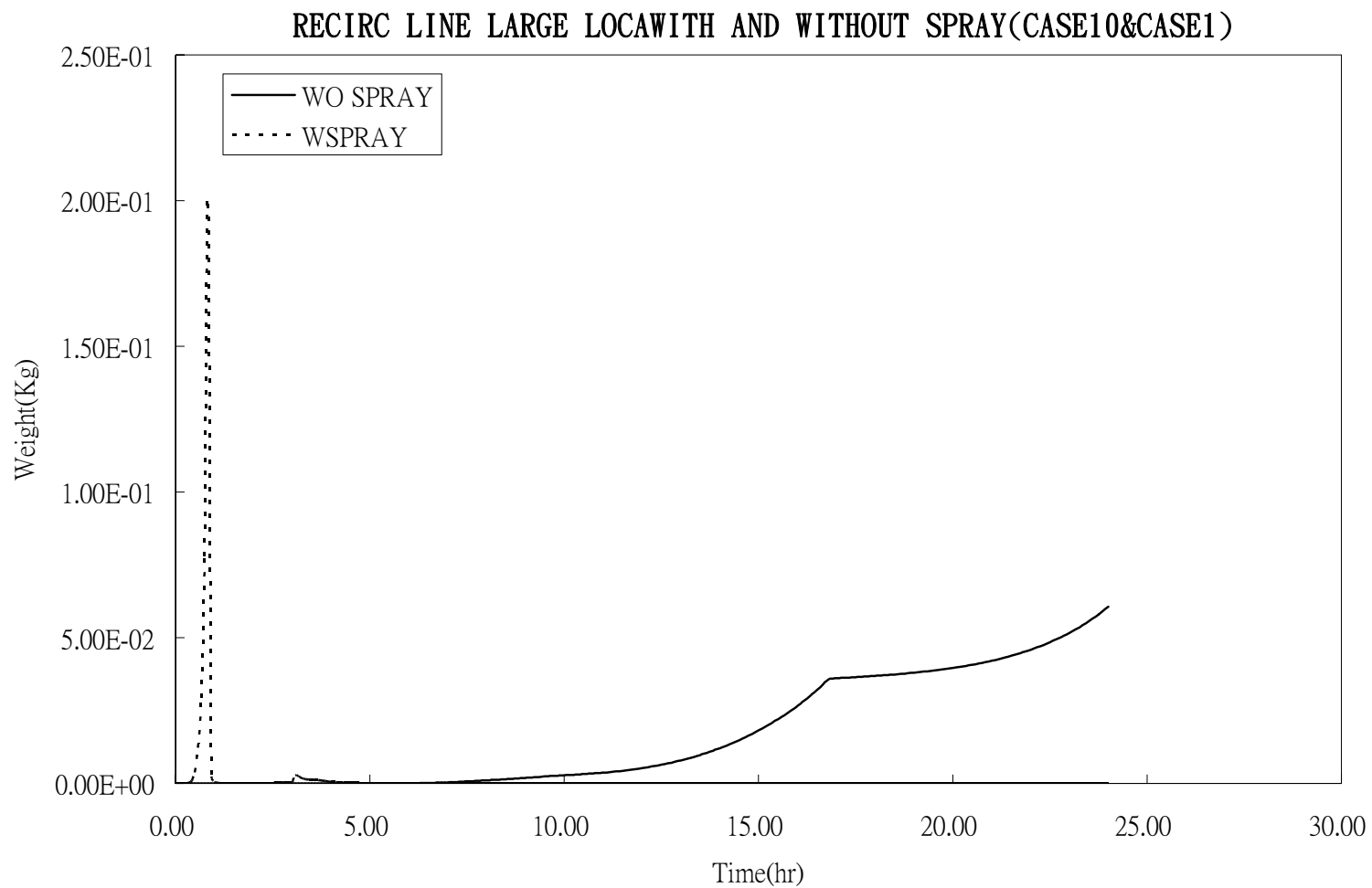
圖B.3.2.4-4 圍阻體壓力



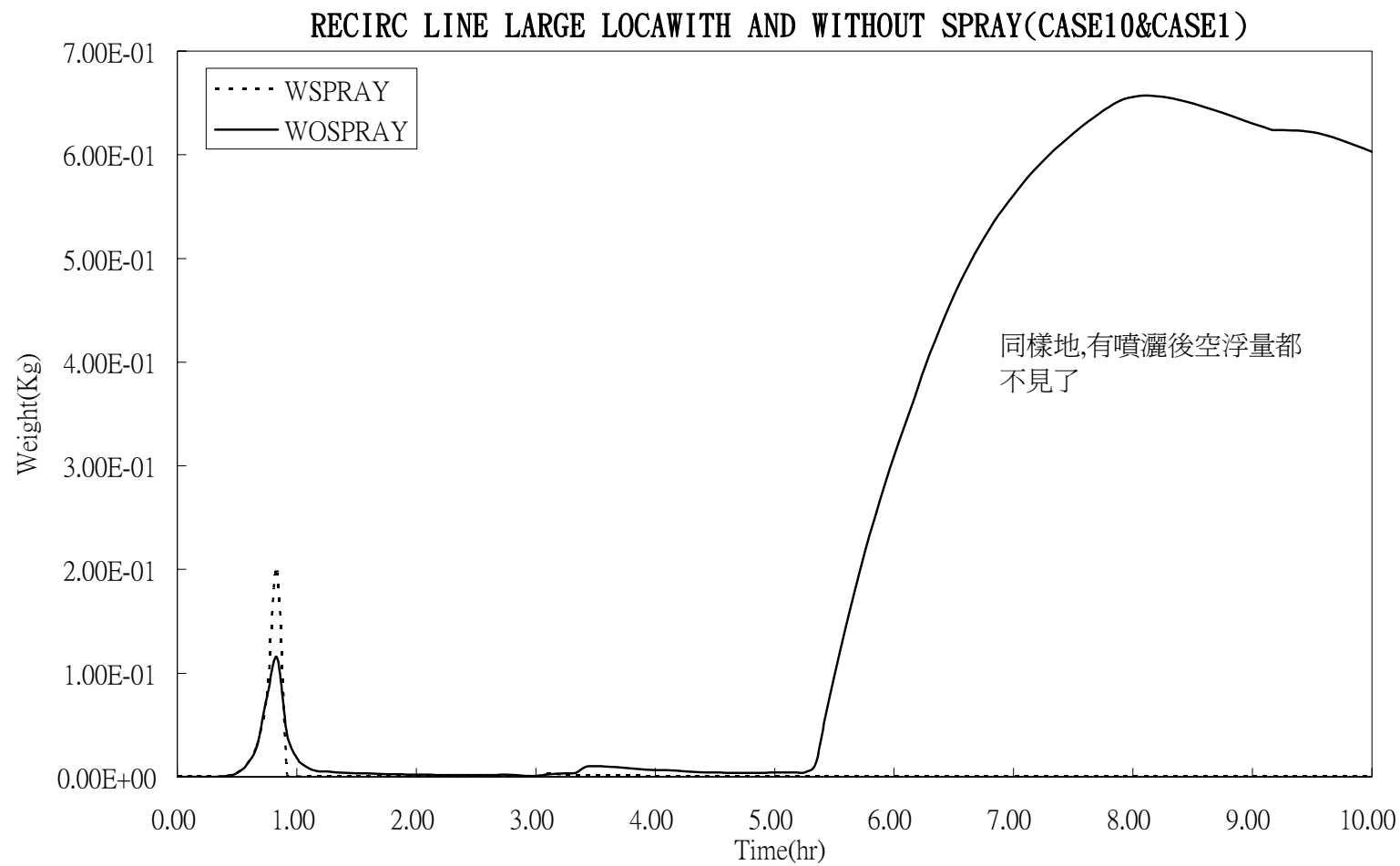
圖B. 3. 2. 4-5 圍阻體CSI氣態



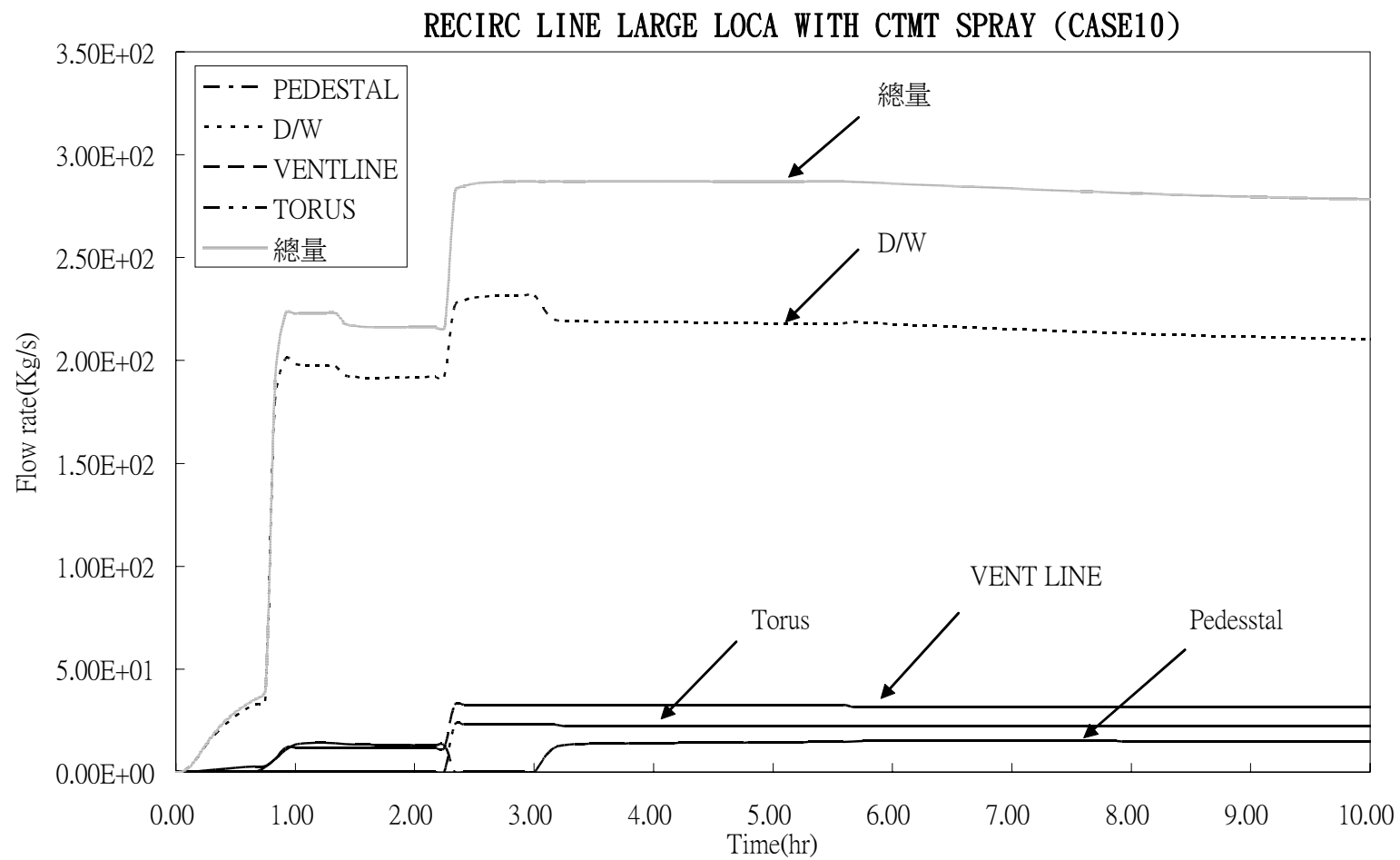
圖B. 3. 2. 4-6 圍阻體CSI空浮比



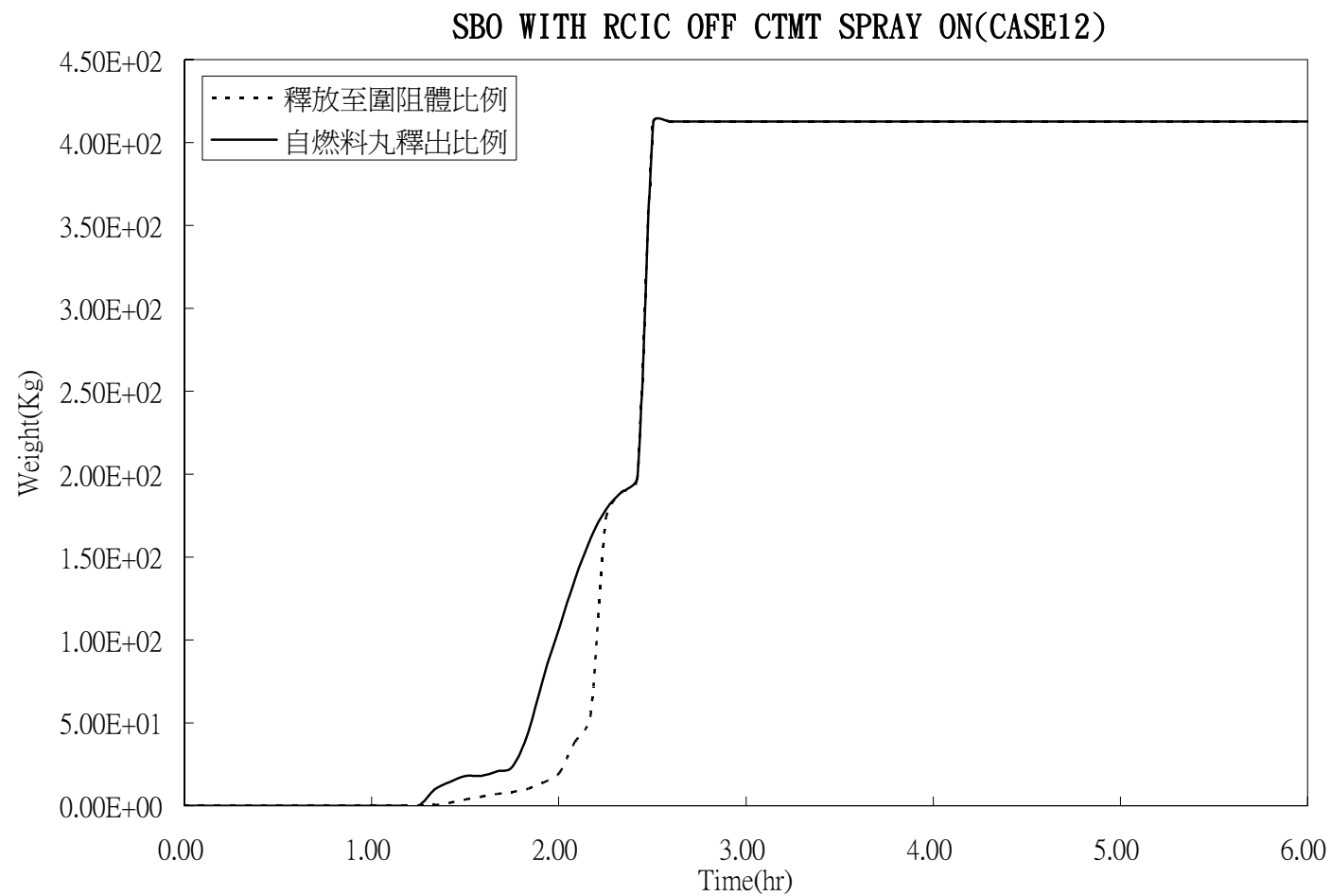
圖B. 3. 2. 4-7 圍阻體TeO₂氣態比



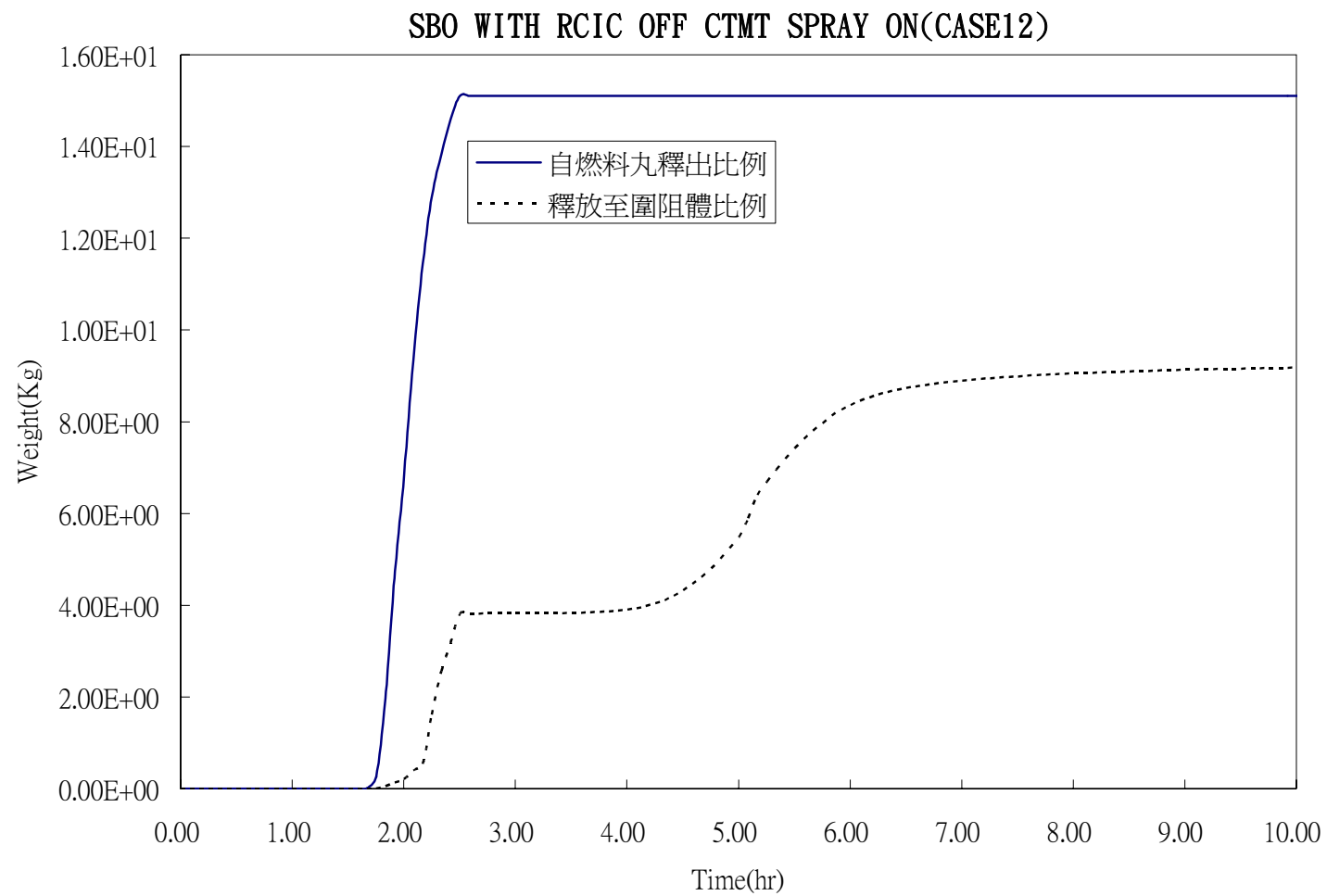
圖B. 3. 2. 4-8 圍阻體TeO2空浮比



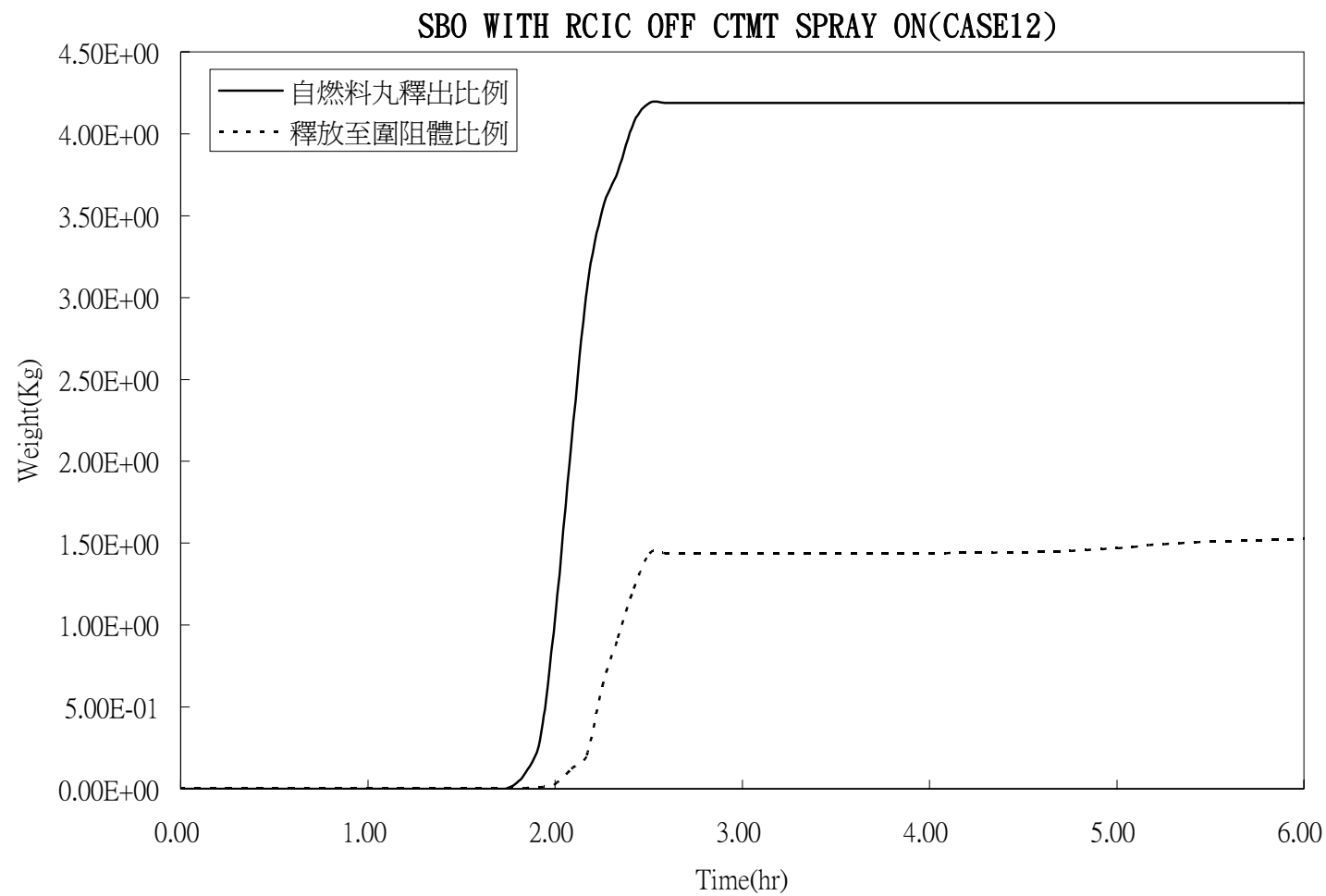
圖B. 3. 2. 4-9 圍阻體內氫氣量比較



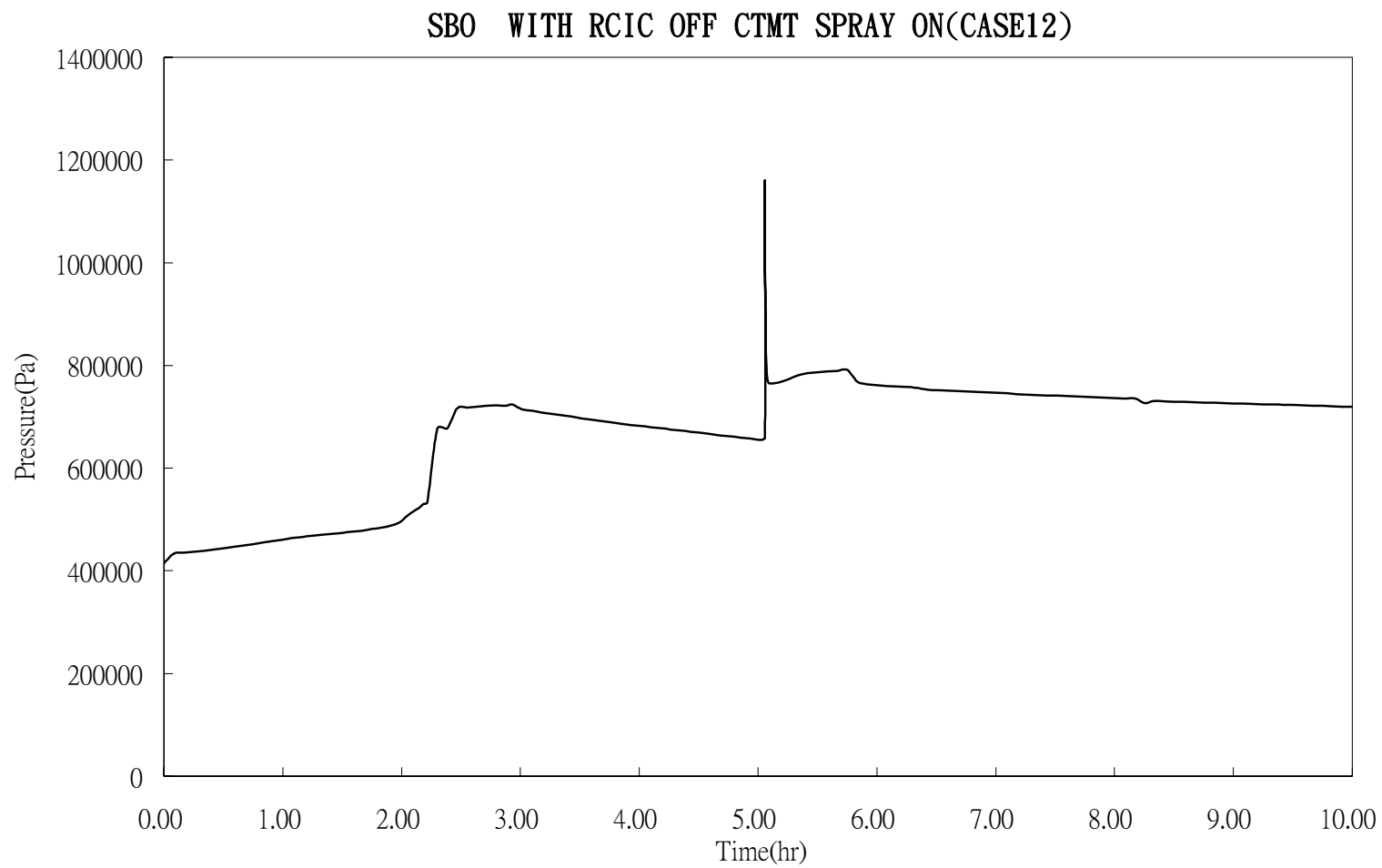
圖B. 3. 2. 4-10 惰性氣體外釋狀況



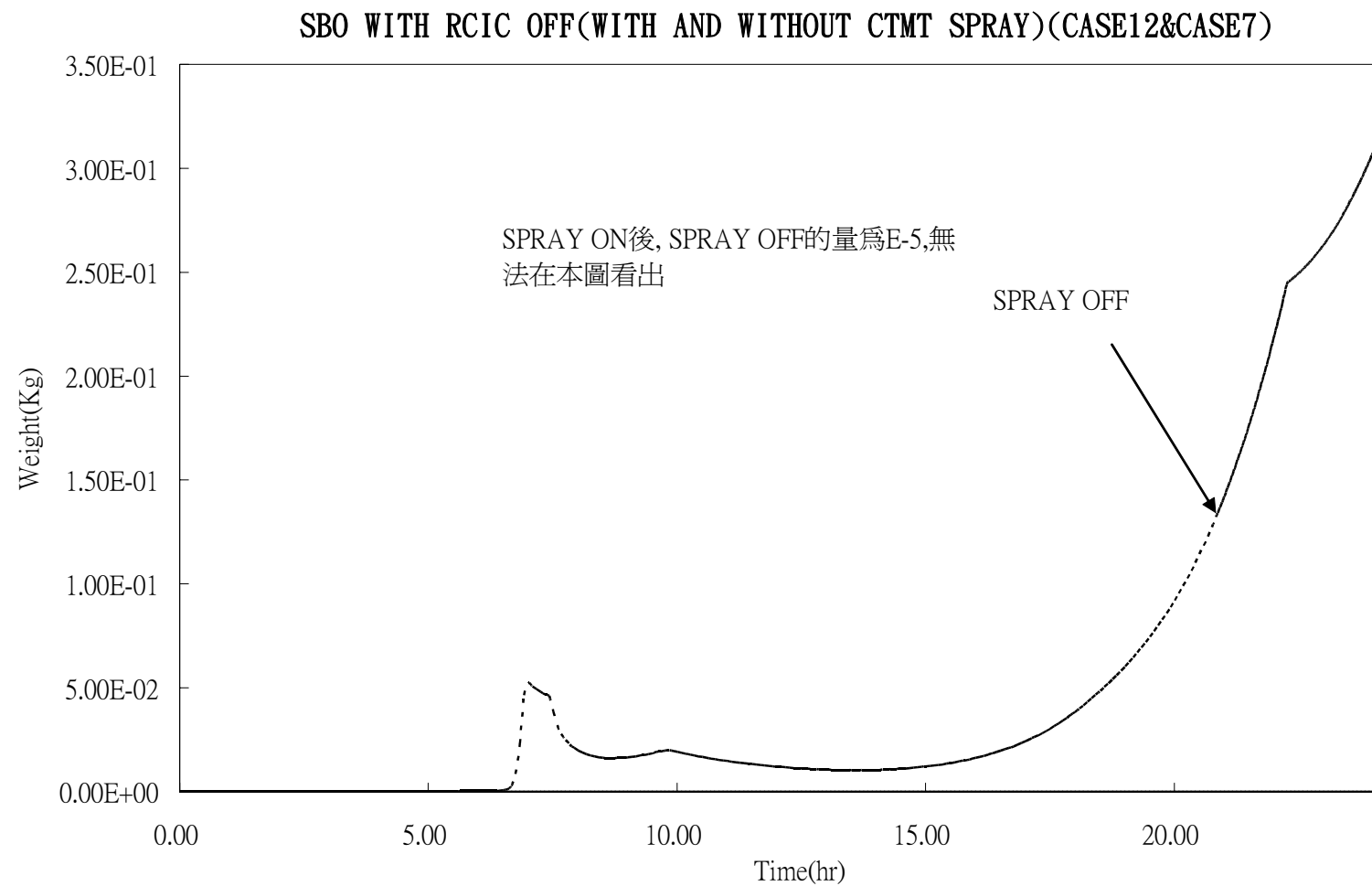
圖B. 3. 2. 4-11 CSI 外釋狀況



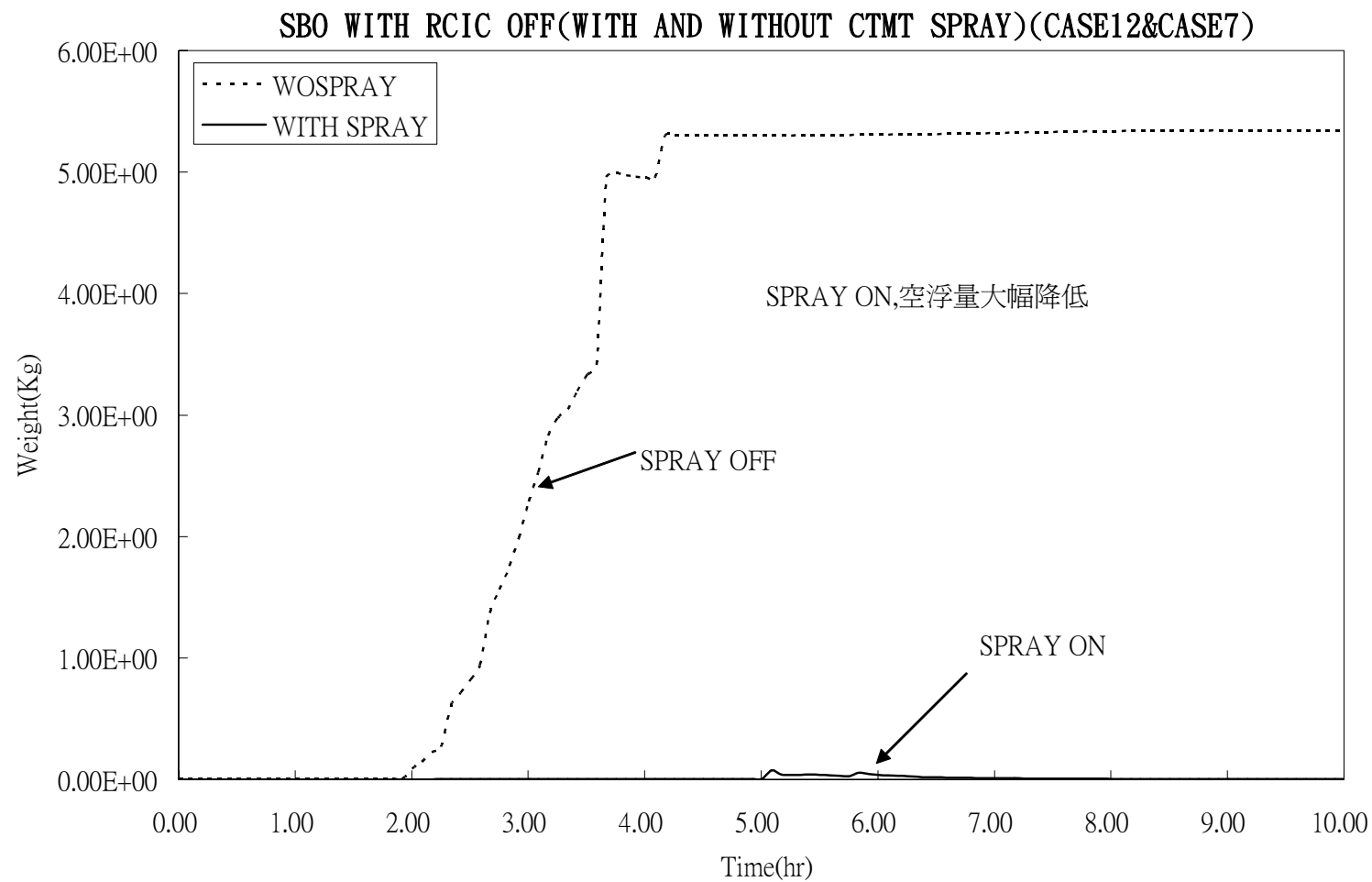
圖B. 3. 2. 4-12 TeO₂外釋狀況



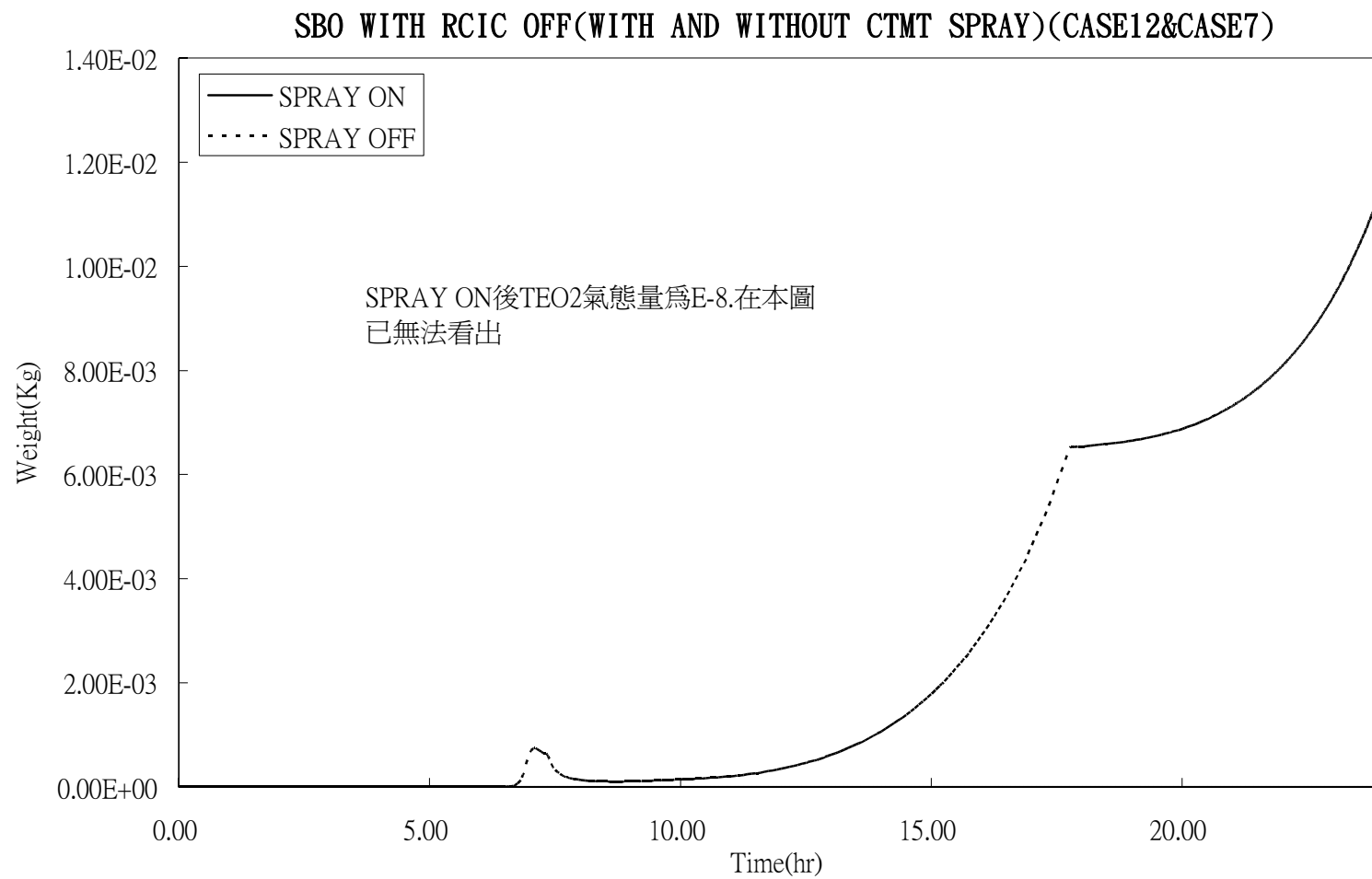
圖B. 3. 2. 4-13 圍阻體壓力



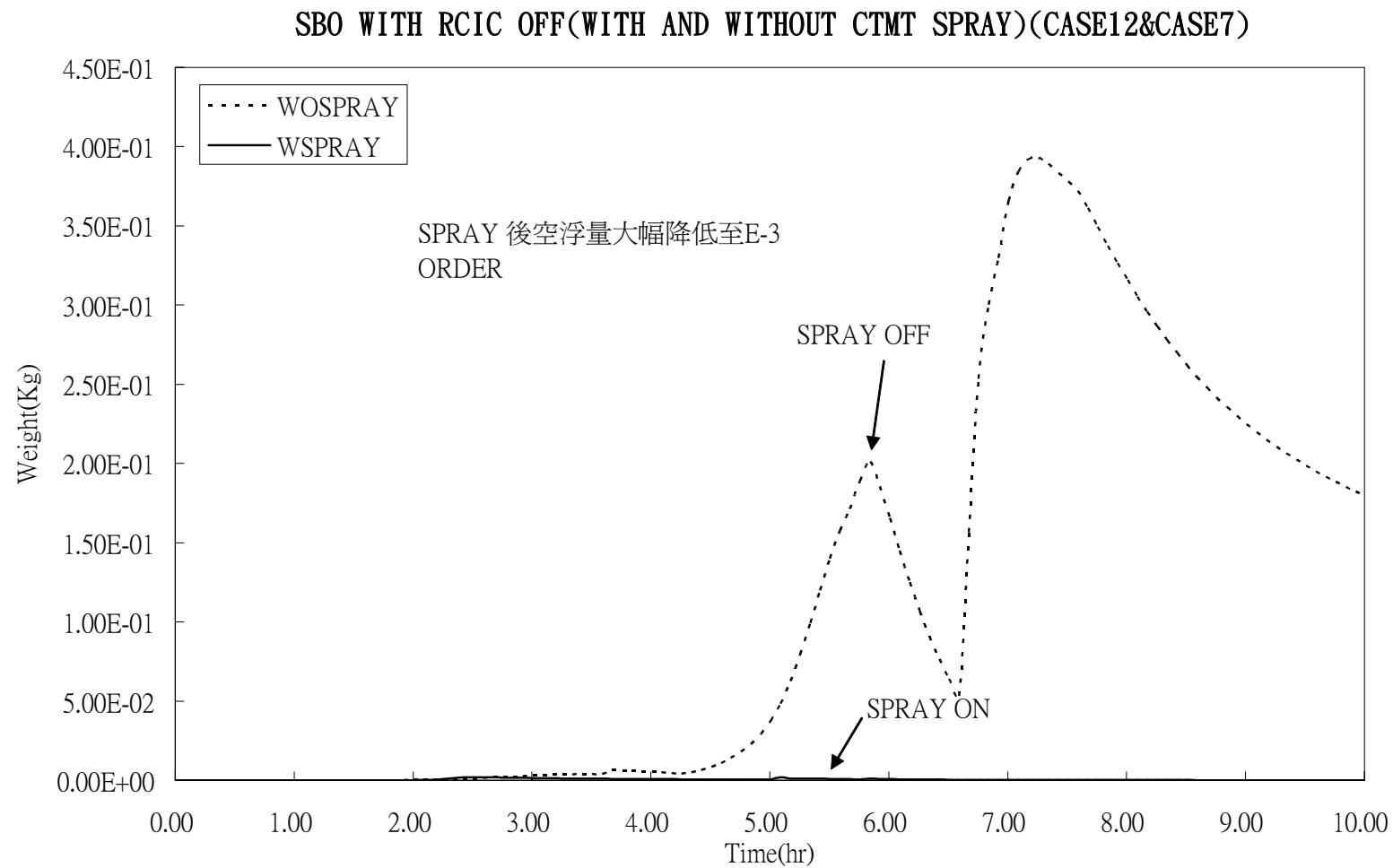
圖B. 3. 2. 4-14 圍阻體CSI氣態



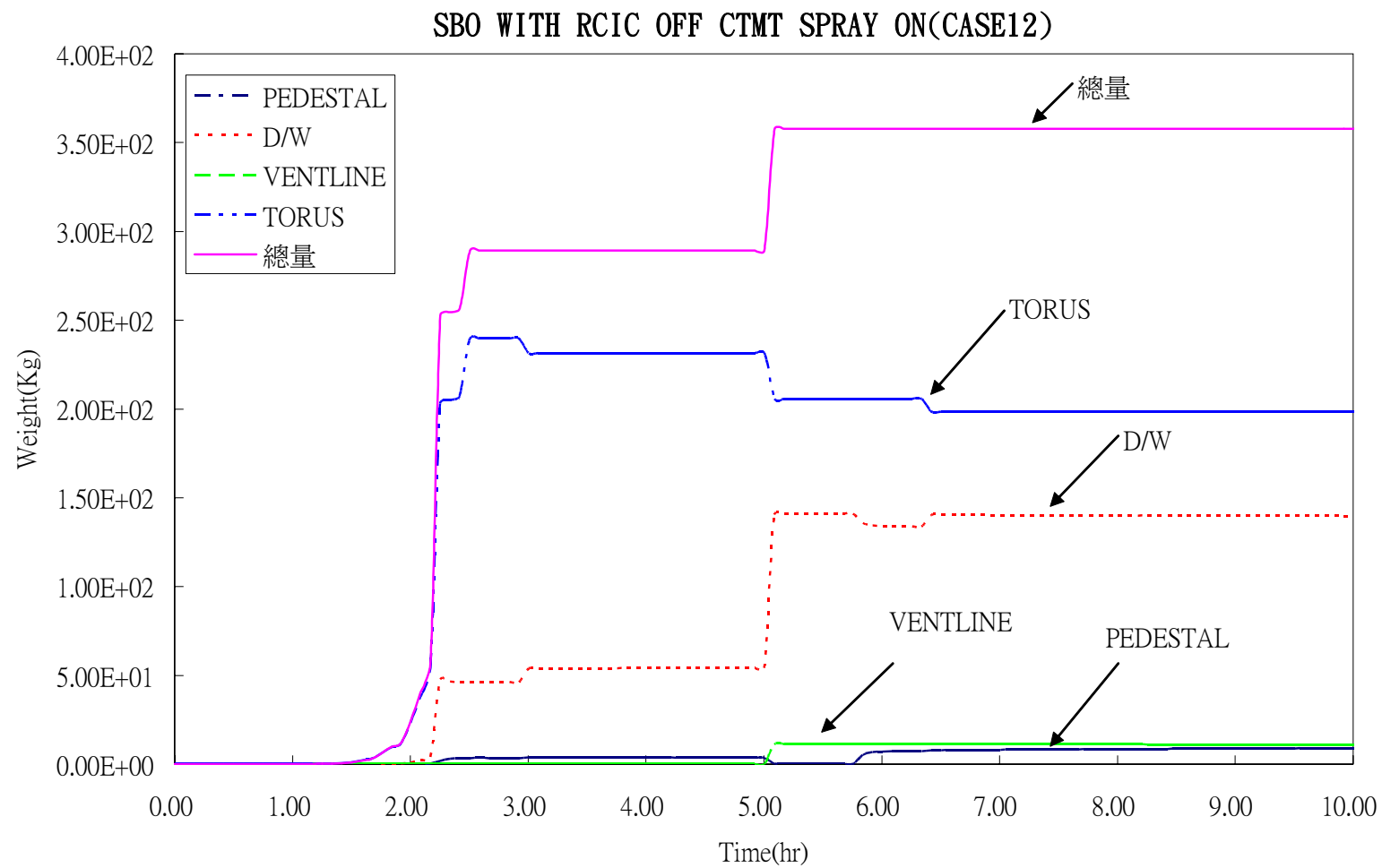
圖B. 3. 2. 4-15 圍阻體CSI空浮比



圖B. 3. 2. 4-16 圍阻體TeO2氣態比



圖B. 3. 2. 4-17 圍阻體內TeO₂空浮比



圖B. 3. 2. 4-18 圍阻體內氬氣量比較

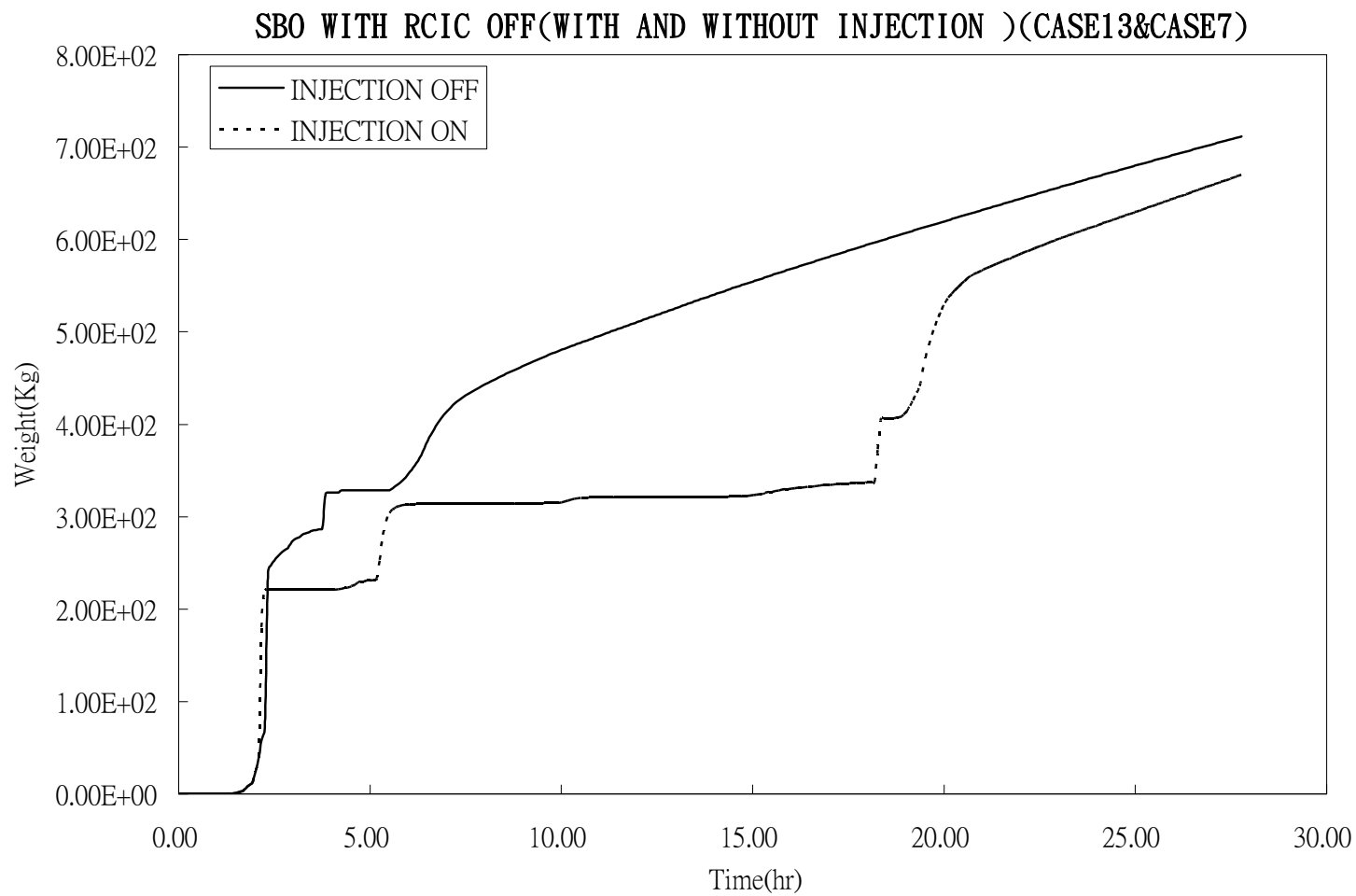
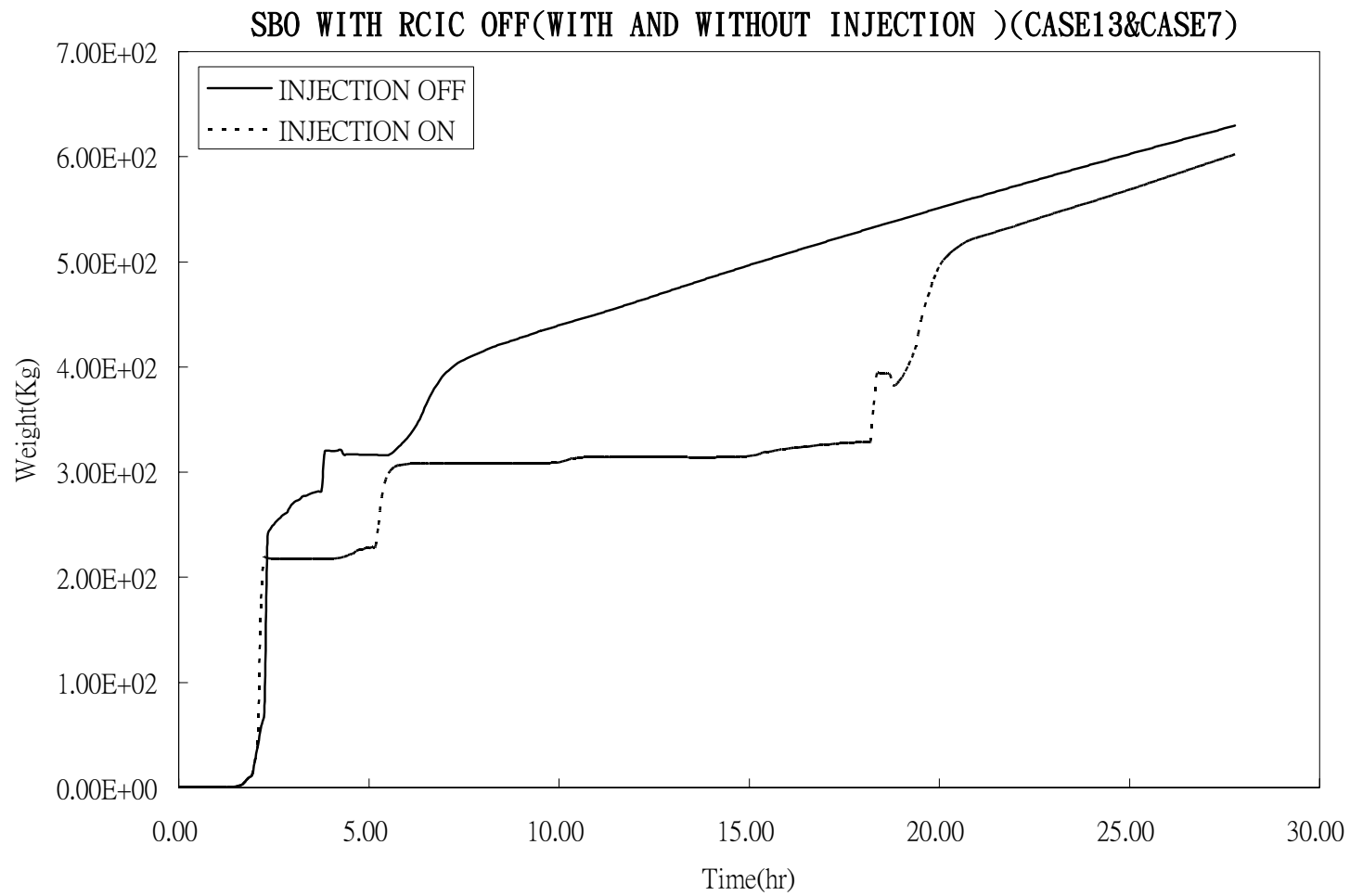


圖 B. 3. 2. 5-1 氫氣產生量



圖B. 3. 2. 5-2 釋放到圍阻體氫氣量

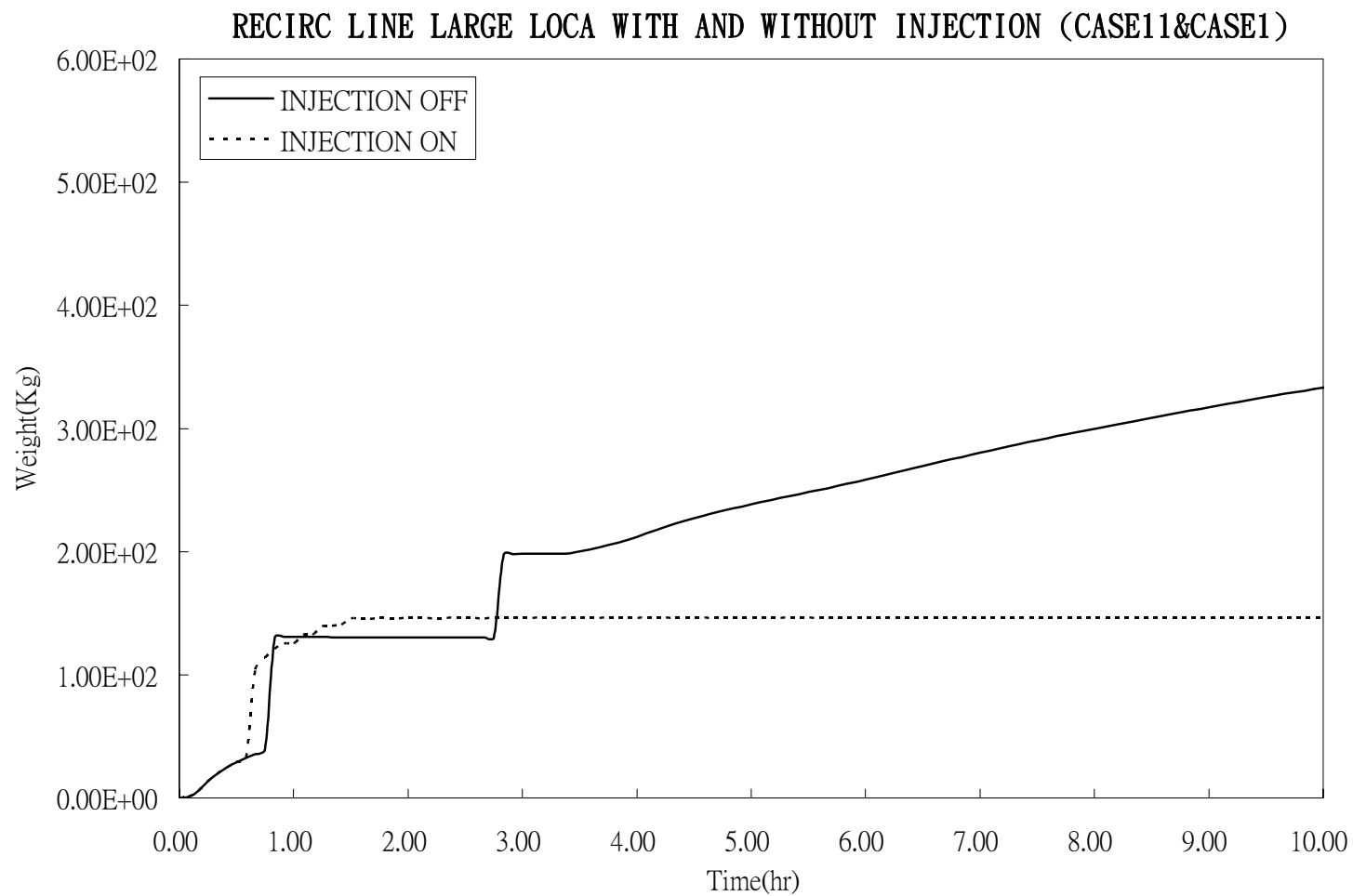


圖 B. 3. 2. 5-3 氫氣產生量

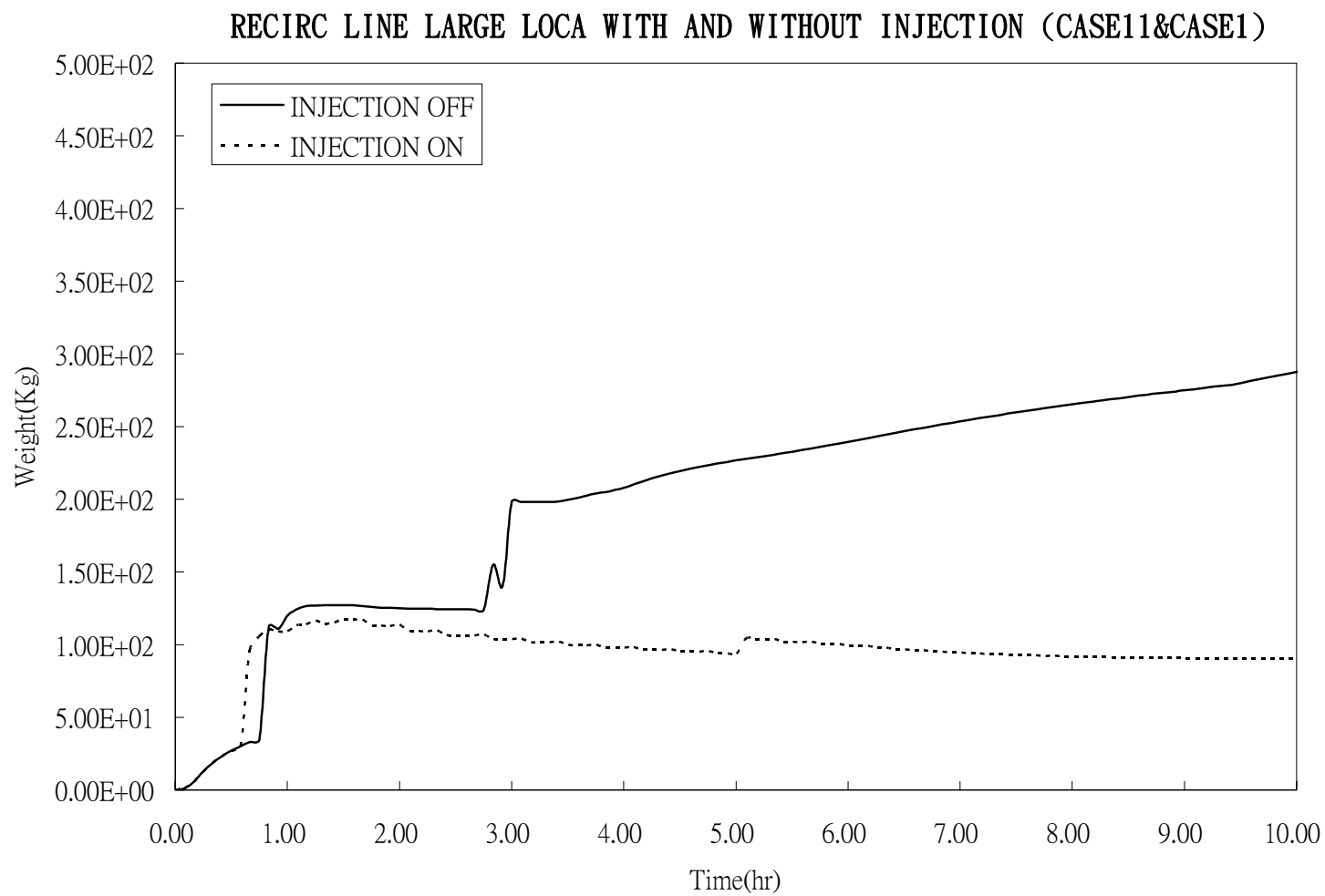


圖 B.3.2.5-4 釋放到圍阻體氫氣量