

第六章第六節 異常狀況、意外事故及天然災害事件之安全評估

目錄

(一) 前言	6.6.1-1
1. 貯存場內積水	6.6.1-2
2. 颱風過後之焚風造成異常高溫	6.6.1-2
3. 貯存場附近電塔倒塌	6.6.1-2
4. 核一廠風力發電葉片斷落撞擊護箱	6.6.1-2
5. 貯存場附近柴油槽或變電箱爆炸	6.6.1-3
6. 淺層土石流淹沒護箱氣進口	6.6.1-3
7. 落石擊中護箱	6.6.1-3
8. 密封鋼筒外殼表面沾附污泥而影響其散熱能力	6.6.1-3
9. 火災造成中子屏蔽喪失	6.6.1-4
10. 貯存設施運送過程之狀況	6.6.1-4
11. 運送之道路狀況	6.6.1-4
12. 廠房吊運之墜落狀況	6.6.1-4
13. 惡劣氣候	6.6.1-4
14. 火山噴發	6.6.1-5
(二) 貯存時異常事件分析與結果	6.6.2-1
1. 貯存時周圍溫度異常	6.6.2-1
2. 混凝土護箱進氣口一半堵塞	6.6.2-3
3. 密封鋼筒異常操作負載	6.6.2-5
4. 儀器故障	6.6.2-6
(三) 貯存時或操作意外事件分析與結果	6.6.3-1
1. 最大預期熱負載	6.6.3-1
2. 意外壓力	6.6.3-2
3. 混凝土護箱進、出氣口完全堵塞	6.6.3-4
4. 混凝土護箱於 61 cm 高度墜落分析評估	6.6.3-6

5. 混凝土護箱傾倒.....	6.6.3-8
6. 爆炸.....	6.6.3-10
7. 火災意外.....	6.6.3-11
8. 地震事件.....	6.6.3-13
9. 洪水.....	6.6.3-14
10. 雷擊.....	6.6.3-16
11. 颱風及颱風投射物.....	6.6.3-19
12. 飛機撞擊評估.....	6.6.3-21
13. 燃料底部撞擊評估.....	6.6.3-22
14. 土石流.....	6.6.3-23
(四) 結語	6.6.4-1
(五) 參考文獻	6.6.5-1
附錄 6.6.A 密封鋼筒異常操作負載分析計算	6.6.A-1
附錄 6.6.B 意外壓力分析計算	6.6.B-1
附錄 6.6.C 混凝土護箱於 61 cm 高度墜落分析計算	6.6.C-1
附錄 6.6.D 混凝土護箱傾倒分析計算	6.6.D-1
附錄 6.6.E 地震對護箱及燃料池結構物分析計算.....	6.6.E-1
附錄 6.6.F 洪水分析計算.....	6.6.F-1
附錄 6.6.G 颱風與颱風投射物分析計算	6.6.G-1
附錄 6.6.H 飛機撞擊機率分析計算	6.6.H-1
附錄 6.6.I 燃料底部撞擊評估.....	6.6.I-1

附圖目錄

圖 6.6.3-1 所有氣口堵塞狀況下貯存系統之溫度歷程	6.6.3-27
圖 6.6.A-1 密封鋼筒及提籃有限元素模型	6.6.A-4
圖 6.6.C-1 混凝土護箱底座	6.6.C-13
圖 6.6.C-2 混凝土護箱底座有限元素模型	6.6.C-14
圖 6.6.C-3 混凝土護箱底座在不同應變率下之應力-應變曲線圖	6.6.C-15
圖 6.6.C-4 混凝土護箱 61 cm 墜落意外時密封鋼筒底部加速度歷程(材料具靜態應變率性質).....	6.6.C-16
圖 6.6.C-5 混凝土護箱 61 cm 墜落意外時密封鋼筒底部加速度歷程(材料具動態應變率性質).....	6.6.C-17
圖 6.6.C-6 燃料提籃承載圓盤之 1/4 模型	6.6.C-18
圖 6.6.C-7 60 g 底部撞擊分析之密封鋼筒模型	6.6.C-19
圖 6.6.C-8 60 g 底部撞擊之密封鋼筒應力評估的密封鋼筒截面	6.6.C-20
圖 6.6.D-1 提籃墜落方向性分析-傾倒情況	6.6.D-29
圖 6.6.D-2 燃料提籃/密封鋼筒有限元素模型	6.6.D-30
圖 6.6.D-3 燃料提籃/密封鋼筒有限元素模型-密封鋼筒	6.6.D-31
圖 6.6.D-4 燃料提籃/密封鋼筒有限元素模型-承載圓盤	6.6.D-32
圖 6.6.D-5 密封鋼筒截面應力位置	6.6.D-33
圖 6.6.D-6 承載圓盤截面應力位置-全模型	6.6.D-34
圖 6.6.D-7 79.3 Hz 之模態	6.6.D-35
圖 6.6.D-8 80.2 Hz 之模態	6.6.D-36
圖 6.6.D-9 210.9 Hz 之模態	6.6.D-37
圖 6.6.E-1 混凝土護箱尺寸	6.6.E-18
圖 6.6.E-2 混凝土護箱含外加屏蔽尺寸	6.6.E-18
圖 6.6.E-3 外加屏蔽設計混凝土護箱之配置尺寸	6.6.E-19
圖 6.6.E-4 地震頻譜的比對	6.6.E-20
圖 6.6.E-5 RG 1.60 地震加速度	6.6.E-21

圖 6.6.E-6 SHAKE 分析所用之地盤模型	6.6.E-22
圖 6.6.E-7 SASSI 分析模式	6.6.E-23
圖 6.6.E-8 SASSI 分析模式(BE case).....	6.6.E-24
圖 6.6.E-9 (a)土壤與結構互制後貯存場址混凝土基板表面水平 X 方向加速度	6.6.E-25
圖 6.6.E-9 (b)土壤與結構互制後貯存場址混凝土基板表面水平 Y 方向加速度	6.6.E-25
圖 6.6.E-9 (c)土壤與結構互制後貯存場址混凝土基板表面水平 Z 方向加速度	6.6.E-25
圖 6.6.E-10座標定義，有限元素模型網格，全模型(左)及模型半剖面(右)示意圖	6.6.E-26
圖 6.6.E-11混凝土外加屏蔽及混凝土基座相對移動位置之觀測點	6.6.E-27
圖 6.6.E-12 地震時之混凝土外加屏蔽觀測點位置	6.6.E-28
圖 6.6.E-13 摩擦係數 0.2 時，外加屏蔽相對於混凝土基座之位移	6.6.E-29
圖 6.6.E-14 摩擦係數 0.8 時，外加屏蔽相對於混凝土基座之位移	6.6.E-30
圖 6.6.E-15 摩擦係數 0.2 時，外加屏蔽上蓋之位移	6.6.E-31
圖 6.6.E-16 摩擦係數 0.8 時，外加屏蔽上蓋之位移	6.6.E-32
圖 6.6.E-17 摩擦係數 0.2，外加屏蔽與混凝土護箱之相互作用力	6.6.E-33
圖 6.6.E-18 摩擦係數 0.8，外加屏蔽與混凝土護箱之相互作用力	6.6.E-34
圖 6.6.E-19 無外加屏蔽情況下，混凝土護箱及混凝土基座相對移動位置之觀測點	6.6.E-35
圖 6.6.E-20 摩擦係數 0.2，有及無外加屏蔽情況下，混凝土護箱相對於混凝土基座 之位移	6.6.E-36
圖 6.6.E-21 摩擦係數 0.8，有及無外加屏蔽情況下，混凝土護箱相對於混凝土基座 之位移	6.6.E-37
圖 6.6.G-1 使用在颱風評估之主要尺寸及力矩臂	6.6.G-14
圖 6.6.H-1 飛機撞擊機率計算流程圖	6.6.H-11
圖 6.6.H-2 台灣地區直昇機機場分佈圖	6.6.H-12

圖 6.6.H-3 核一廠與松山機場相對位置與距離	6.6.H-12
圖 6.6.H-4 松山機場歷年飛機起降架次	6.6.H-13
圖 6.6.H-5 核一廠與桃園機場相對位置與距離	6.6.H-13
圖 6.6.H-6 桃園機場歷年起降架次	6.6.H-14
圖 6.6.H-7 松山機場進場航線圖	6.6.H-14
圖 6.6.H-8 台北飛航情報區航路圖	6.6.H-15
圖 6.6.H-9 輕型航空器目視走廊	6.6.H-16
圖 6.6.H-10 超輕型載具飛行空域(八斗子空域)	6.6.H-16
圖 6.6.H-11 國軍訓練空域圖表 6.6.H-1 美國軍方及民間飛機墜機率(C)... 6.6.H-17	6.6.H-17
圖 6.6.I-1 燃料棒水平向束制式意圖	6.6.I-3
圖 6.6.I-2 GE 8×8 燃料棒組件第一模態挫屈圖	6.6.I-3
圖 6.6.I-3 GE 9×9 燃料棒組件第一模態挫屈圖	6.6.I-4
圖 6.6.I-4 GE 9×9 燃料護套第一模態挫屈圖	6.6.I-5

附表目錄

表 6.6.1-1 本計畫進行之異常、天然災害及意外事件分析.....	6.6.1-6
表 6.6.2-1 各組件在嚴厲環境溫度下的溫度分析結果與容許溫度表	6.6.2-7
表 6.6.2-2 半個進氣口堵塞異常狀況下各組件溫度	6.6.2-7
表 6.6.3-1 最大預期熱負載下的溫度分析結果與容許溫度表	6.6.3-28
表 6.6.3-2 空氣進出口全堵塞事故發生 72 h 後燃料護套及設施重要組件溫度.....	6.6.3-28
表 6.6.3-3 火災事故燃料護套及設施重要組件最高溫度	6.6.3-28
表 6.6.A-1 密封鋼筒異常操作(無內部壓力)主薄膜應力 P_m (MPa).....	6.6.A-5
表 6.6.A-2 密封鋼筒異常操作(無內部壓力)主薄膜加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa).....	6.6.A-5
表 6.6.A-3 密封鋼筒異常操作加正常/異常內部壓力(15 psig)主薄膜應力 P_m (MPa).....	6.6.A-6
表 6.6.A-4 密封鋼筒異常操作加正常/異常內部壓力(15 psig)主薄膜加彎曲應力 P_m+P_b (MPa)	6.6.A-7
表 6.6.A-5 密封鋼筒異常操作加正常/異常內部壓力(15 psig)主要加次要 $P + Q$ 應力 (MPa)	6.6.A-8
表 6.6.A-6 承載圓盤異常條件下之應力 P_m (MPa).....	6.6.A-9
表 6.6.A-7 承載圓盤異常條件下之應力 P_m+P_b (MPa).....	6.6.A-10
表 6.6.A-8 承載圓盤異常條件下之應力 P_m+P_b+Q (MPa).....	6.6.A-11
表 6.6.A-9 燃料提籃鉸件盤之最大應力-異常狀況(MPa).....	6.6.A-12
表 6.6.B-1 密封鋼筒意外內壓(448.50 KPa)主薄膜應力 P_m (MPa)	6.6.B-3
表 6.6.B-2 密封鋼筒意外內壓(448.50 KPa)主薄膜應力加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa).....	6.6.B-3
表 6.6.B-3 密封鋼筒正常吊運加意外內壓 (448.50 KPa) 主薄膜應力 P_m (MPa)	6.6.B-4
表 6.6.B-4 密封鋼筒正常吊運加意外內壓(448.50 KPa)主薄膜應力加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)	6.6.B-5

表 6.6.C-1 60 g 底部撞擊(103.5KPa (15 psig)內壓)密封鋼筒主薄膜應力 P_m (MPa)	6.6.C-21
表 6.6.C-2 60 g 底部撞擊(103.5KPa(15 psig)內壓)密封鋼筒主薄膜應力加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)	6.6.C-22
表 6.6.C-3 60 g 底部撞擊時提籃鉸件之最大應力	6.6.C-23
表 6.6.C-4 60 g 底部撞擊(無 103.5KPa (15 psig)內壓)密封鋼筒主薄膜應力 P_m (MPa)	6.6.C-23
表 6.6.C-5 60 g 底部撞擊(無 103.5KPa (15 psig)內壓)密封鋼筒主要薄膜應力加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)	6.6.C-24
表 6.6.C-6 60 g 底部撞擊時承載圓盤之主薄膜應力加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)	6.6.C-25
表 6.6.C-7 60 g 底部端撞擊密封鋼筒挫屈評估	6.6.C-26
表 6.6.D-1 密封鋼筒對傾倒情況之主薄膜應力 (P_m) – 90° 提籃墜落方向 (MPa)	6.6.D-38
表 6.6.D-2 密封鋼筒對傾倒情況之主薄膜加主彎曲應力($P_m + P_b$) – 31.82°提籃墜落方向(MPa)	6.6.D-39
表 6.6.D-3 承載圓盤進行應力評估之中截面位置 –全模型	6.6.D-40
表 6.6.D-4 承載圓盤對傾倒情況最大應力	6.6.D-44
表 6.6.D-5 承載圓盤對傾倒情況挫屈評估	6.6.D-44
表 6.6.D-6 承載圓盤對傾倒情況之主薄膜應力 (P_m) – Disk No. 5 - 77.92°墜落方向 (MPa)	6.6.D-45
表 6.6.D-7 承載圓盤對傾倒情況之主薄膜加主彎曲應力 ($P_m + P_b$) –Disk No. 5 - 77.92° 墜落方向(MPa)	6.6.D-46
表 6.6.D-8 承載圓盤對傾倒情況挫屈評估 - Disk No. 5- 77.92° 墜落方向	6.6.D-47
表 6.6.E-1 SHAKE 91 輸入參數	6.6.E-38
表 6.6.E-2 SHAKE 91 輸出參數與 SASSI 輸入參數	6.6.E-38
表 6.6.E-3 混凝土護箱之各項參數	6.6.E-38
表 6.6.E-4 在設定 VCC 重心水平加速度下避免傾倒之條件	6.6.E-39

表 6.6.E-5 含外加屏蔽之混凝土護箱各項參數	6.6.E-39
表 6.6.E-6 地震衝擊下的工字樑與螺栓受力值	6.6.E-39
表 6.6.F-1 密封鋼筒增加外壓(22 psi)及無內壓(0 psi)時主要應力(P_m) (MPa) ..	6.6.F-5
表 6.6.F-2 密封鋼筒增加外壓 151.8KPa(22 psi)及無內壓時主要應力加彎曲應力(P_m + P_b) (MPa)	6.6.F-6
表 6.6.H-1 美國軍方及民間飛機墜機率(C).....	6.6.H-18
表 6.6.H-2 台灣地區固定翼機場特性現況分析	6.6.H-18
表 6.6.I -1 INER-HPS 燃料棒型式	6.6.I-6
表 6.6.I -2 INER-HPS 燃料棒第一模態挫屈負載 g 值	6.6.I-6

六、異常狀況、意外事故及天然災害事件之安全評估

(一) 前言

依據「申請設置用過核子燃料乾式貯存設施安全分析報告導則」要求，就設施操作環境條件與貯存系統特性，預測用過核子燃料運轉可能發生之異常狀況、意外事故及自然災害事件並進行相關安全評估分析。本節敘述貯存設施在運貯時的異常、意外及天然災害狀況之分析。異常事件係指一年或二十年貯存期間可能發生之事件(Design Event II, ANSI/ANS 57.9)，如貯存時周圍溫度異常、進氣口堵塞或儀器故障等。意外事件是指發生機率極低，但在生命週期可能發生之事件，考慮貯存期間極不可能發生(occur infrequently)之事件(Design Event III)，如貯存設施搬運時之 61 cm(24 in)垂直墜落或貯存時之設施傾倒等事件所引發的結構受力狀態分析；以及混凝土基座上之貯存設施的外在環境發生重大變異時的情況，如遭受火災侵襲或週邊交通工具爆炸之分析。另外在意外事件也評估貯存期間可能發生之天然災害事件(Design Event IV)，並且假設最大天然災害，如地震、颱風與雷擊等對於貯存設施侵襲所造成的影響評估。依據我國法規並參考 NUREG-1567 第十五章建議，本章節分析考慮下列項目：

(1) 異常事件種類

- 1.貯存時周圍溫度異常
- 2.混凝土護箱進氣口一半堵塞
- 3.密封鋼筒異常操作負載
- 4.儀器故障

(2) 意外事件種類

- 1.最大預期熱負載
- 2.意外壓力
- 3.混凝土護箱進、出氣口完全堵塞
- 4.混凝土護箱於61 cm高度墜落分析評估
- 5.混凝土護箱傾倒
- 6.爆炸
- 7.火災意外
- 8.地震事件
- 9.洪水
- 10.雷擊

11. 颱風及颱風投射物
12. 飛機撞擊評估
13. 燃料棒底部撞擊
14. 土石流

本章節後續分析中證實在以上異常與意外事故中，所有貯存相關設施符合結構相關法規之要求，事故後密封鋼筒依然保有結構完整性，確保設施之密封性與用過核子燃料之再取出性，並且無放射性物質洩漏之虞。

除了以上事件之分析外，針對核一廠場址之各特定因素，假想下列事件加以評估如下：

1. 貯存場內積水

貯存場址中有良好的排水規劃，使場址中不致積水，若豪雨仍造成貯存場內積水，其影響亦可被護箱氣進口堵塞與洪水分析之結果所涵蓋。

2. 颱風過後之焚風造成異常高溫

分析中以單一熱負載進行分析。該熱負載可涵蓋異常周圍溫度(-40 °C 及 41 °C)，最大預期熱負載(周圍溫度 56 °C)及進氣口半堵塞的狀況；並以 23 kW/護箱之熱負載，考慮上述貯存時的異常及意外狀況。並據中央氣象局資料顯示，台灣有史以來的最高溫度為 40.2 °C，發生於 2004 年 7 月 20 日的台東地區，該測量溫度包含焚風狀況，故分析中所用之條件已涵蓋焚風所造成的影響。

3. 貯存場附近電塔倒塌

因核一廠內電塔均遠離貯存場址，電塔倒塌不影響貯存場址運作，故電塔倒塌事件不在本分析報告中陳述。

4. 核一廠風力發電葉片斷落撞擊護箱

核一廠風力發電葉片斷落不致拋射至貯存場址，其分析陳述於颱風及其拋射物分析相關章節中。

5. 貯存場附近柴油槽或變電箱爆炸

其對貯存場混凝土護箱產生之氣壓低於 22 psia，可被本節分析之爆炸情節所涵蓋；而柴油槽後續之燃燒產生之熱，將可被貯存場鄰近邊坡灌木林燃燒之火災情節所涵蓋。

6. 淺層土石流淹沒護箱氣進口

淺層土石流淹沒護箱氣進口對貯存設施的衝擊，可由護箱進氣口完全堵塞的分析項目所涵蓋。

貯存場設計有擋土牆屏障，並且邊坡與護箱至少距離 10 m 以上，萬一發生淺層滑動土石散落場址，應不致造成進氣口堵塞；惟若發生護箱進氣口完全堵塞事件時，則迅速將堵塞物清除，可在 85 h 內將所有護箱進氣口回復至半堵塞狀態，即可避免因堵塞太久造成燃料束溫度過高的現象。清理時若因空間狹小，無法提供大型機具進入場址時，可經由人力搭配適當工具與小型自動機具進入場址，應可順利於 85 h 內清理此淺層土石，使護箱至少回復至半堵塞狀態。按半堵塞狀態下之分析結果顯示，長期均無安全顧慮。

7. 落石擊中護箱

鄰近貯存場址之邊坡並無大型落石外，本情節亦可被颱風投射物分析之情節所涵蓋。西側邊坡與貯存場間設有擋土牆及緩衝區加以區隔，應無落石擊中護箱之顧慮，此外，本系統之外加屏蔽可提供護箱額外之保護。

8. 密封鋼筒外殼表面沾附污泥而影響其散熱能力

颱風豪雨時，雨水無法直接潑濺密封鋼筒，只有在洪水情節下才可能發生污泥沾附密封鋼筒，惟進、出氣口裝設有護網，污泥不易進入混凝土護箱，而萬一發生時，亦可於事後自進、出氣口交互灌水沖洗。況且洪水為一不可能發生之假設情節。

9. 火災造成中子屏蔽喪失

由於混凝土護箱頂部之混凝土中子屏蔽為不可燃，故火災不影響其屏蔽功能。至於傳送護箱之 NS-4 中子屏蔽，則由於其係被灌製在密封的鋼板內，即使屏蔽上蓋及結構上蓋封焊時產生火花，NS-4 中子屏蔽亦不會與火源接觸。故無火災造成中子屏蔽喪失之顧慮。

10. 貯存設施運送過程之狀況

貯存設施由電廠運送至貯存場址時，混凝土護箱置於低板架之多軸油壓板車上，並以低於 2 km/h 之速度運送混凝土護箱；因操作人員按作業程序多次模擬演練，實際運送時亦將嚴格遵守作業程序規定，故分析中排除運送過程中的人員疏失所造成的意外事故。另多軸油壓板車運送至貯存場過程中，如車輛發生故障屬異常狀況，此故障情形並不影響貯存設施運轉限制條件。故本節將不針對多軸油壓板車異常事件加以評估，僅須進行故障排除。

11. 運送之道路狀況[46]

由電廠至貯存場址的道路狀況均符合 AASHTO HS20-44 之規範，並對於沿途的穿越管線或孔道的路面補強；具較大坡度的路面亦將鋪平緩和坡度；較突路段則對乾華溪護堤進行補強，以確保運送途中不致發生路面承载力不足造成運送機具及貯存設施翻覆事故。

12. 廠房吊運之墜落狀況

反應器廠房內之吊運操作，由於主吊車已改採單一失效保證設計與製造，依據 NUREG-0612 及 ANSI-14.6 之規定，若反應器廠房吊車具單一失效功能，則無意外墜落情況之疑慮，故不需執行廠房內五樓至一樓之吊運墜落意外分析；此外，亦將遵照 NUREG-0612 之規定，採行相關行政防護措施與人員訓練，故本節將不針對反應器廠房內之吊運操作意外加以評估。

13. 惡劣氣候

乾式貯存作業期間，若預期有颱風、狂風、豪雨、閃電等惡劣氣候狀況，

將全面停止乾式貯存相關活動，依 104.22 核一廠防颱作業程序書及 104.22.1 核一場防汛作業程序書進行通報，並依據「核一廠用過核子燃料乾式貯存設施意外事件應變計畫」進行相關應變作業。

14. 火山噴發

經評估，即使假設位於核一廠西南方之大屯火山噴發，其岩漿也不會流經核一廠廠區，對於本乾式貯存場址所可能造成之意外事件為火山灰堆積物造成護箱進氣口全堵塞或半堵塞。若發生此事件，可被本節（三）15.之土石流分析評估及矯正行動所涵蓋。

本計畫已進行之異常狀況、意外事故及自然災害事件分析，與 NUREG-1567 建議項目及核一廠場址特定考慮項目之比較後，如表 6.6.1-1，顯示本計畫已進行之分析，可涵蓋 NUREG-1567 建議項目及核一廠場址特定考慮項目。

表 6.6.1-1 本計畫進行之異常、天然災害及意外事件分析

本計畫分析項目	NUREG-1567 建議項目	核一廠廠址特定考慮項目
(一) 貯存時異常事件分析與結果		
1.貯存時周圍溫度異常	異常周圍溫度	焚風造成異常高溫
2.混凝土護箱進氣口一半堵塞	通氣口部分堵塞	
3.密封鋼筒異常操作負載	異常操作事件	
4.儀器故障		儀器故障
		貯存場內積水
(二) 貯存時或操作意外事件分析與結果		
1.最大預期熱負載	絕熱升溫	
2.意外壓力		
3.混凝土護箱進、出氣口完全堵塞	絕熱升溫	土石流淹沒護箱、淹沒污泥污染
4.混凝土護箱於 61 cm 高度墜落分析評估	護箱墜落	運送護箱墜落
5.混凝土護箱傾倒	護箱翻覆	運送護箱傾覆
6.爆炸	火災與爆炸、場址附近意外事件	柴油槽或變電箱爆炸
7.火災意外	火災與爆炸	柴油槽爆炸
8.地震事件	地震	
9.洪水	洪氾	
10.雷擊	閃電(雷擊)	
11 颱風及颱風投射物	颱風及其投射物	風力發電機葉片斷落、落石擊中護箱
12.飛機撞擊評估	其他(飛機撞擊)	飛機撞擊分析 電塔倒塌、中子屏蔽喪失
13.燃料棒底部撞擊	其他(燃料棒底部撞擊)	

(二) 貯存時異常事件分析與結果

本節主要在描述貯存時異常事件的分析，分析項目有三項，分別為貯存時周圍溫度異常、混凝土護箱進氣口一半堵塞與密封鋼筒異常操作負載。分述如下：

1. 貯存時周圍溫度異常

貯存設施之正常周圍溫度設定為 32 °C，而異常溫度則設定為-40 °C(-40 °F)及 41 °C(106 °F)之間；本節分析當氣候異常造成貯存設施超出其正常運轉溫度時，其對貯存系統造成的影響。

(1) 肇因

本節以本章三、(四)節所訂之異常周圍溫度(41 °C 及-40 °C)及熱負載，計算各貯存組件穩態狀況下溫度，以評估異常周圍溫度對密封鋼筒及混凝土護箱的影響。評估中，該異常周圍溫度狀況可能持續數天。

(2) 偵測

每日監測周圍溫度及混凝土護箱空氣出口溫度。

(3) 分析與結果

以本章三、(五)節建立之熱流分析模式進行分析，評估貯存系統在 23 kW 熱負載時的各組件受力狀況。各組件在異常周圍溫度下的溫度分析結果與容許溫度整理如表 6.6.2-1，顯示各組件溫度變化皆在容許範圍內。

混凝土護箱熱應力分析方面，本章六、(二).2 節進氣口一半堵塞的異常事件，涵蓋異常周圍溫度之熱應力狀況，分析結果詳見本章六、(二).2 節。密封鋼筒及燃料提籃組件熱應力分析，以本章二、(六).2 節建立之 ANSYS 模型進行。熱應力與其他異常應力結合(如密封鋼筒內壓及操作負載)之分析結果詳見表 6.2.6-19、6.2.6-21 與 6.2.6-22，所有應力滿足 ASME 規範要求。

(4) 矯正行動

此狀況無矯正行動要求。

(5) 輻射影響

此事件無輻射影響。

2. 混凝土護箱進氣口一半堵塞

本節評估乾式貯存系統在正常周圍溫度 32 °C(90 °F)時，半個進氣口堵塞狀況下所造成的影響。

(1) 肇因

雖然此事發生機率不高，但本分析仍考量進氣口可能因吸入碎片或穴居動物入侵而造成半堵塞。按進氣口上已裝有濾網，將會減低此狀況發生之可能性。

(2) 偵測

對於進氣口堵塞而減少空氣對流，造成溫度上升的異常事件偵測，可藉由混凝土護箱出氣口溫度之連續自動監測得知進氣口堵塞狀況，亦可由安全人員、運轉人員或其他常態巡視活動得知。

(3) 分析與結果

分析方式與本章六、(二).1 節相同，其中混凝土護箱 ANSYS 模型的邊界條件調整為只有一半的進氣口，各組件因此狀況造成溫度上升，其分析結果與容許溫度整理如表 6.6.2-2，結果顯示各組件最高溫度皆在容許範圍內。

密封鋼筒及燃料提籃組件熱應力分析，以本章二、(六).2 節建立之 ANSYS 模型進行。熱應力與其他異常應力結合(如密封鋼筒內壓及操作負載)之密封鋼筒的應力分析顯示最小安全餘裕為 0.52；混凝土護箱之混凝土拉應力分析計算結果，顯示最小安全餘裕為 0.31，發生於進氣口半堵塞時之軸向應力。分析結果顯示混凝土護箱進氣口半堵塞時，所有應力狀態皆可滿足 ASME 規範要求。密封鋼筒在護箱進氣口一半堵塞時的應力分析結果，詳見表 6.2.6-19、6.2.6-21 與 6.2.6-22，其應力狀態皆滿足 ASME Section III, NB 的 Service Level A 要求。

(4) 矯正行動

造成堵塞的碎片應以人工移除，並採取措施預防堵塞再次發生。

(5) 輻射影響

以 14 kW 的條件而言，假設工作人員在進氣口以雙手清理堵塞物 15 min，最大接觸劑量率與最大肢端劑量分別為 0.38 mSv/h 及 0.10 mSv，全身劑量則相對小很多。

3. 密封鋼筒異常操作負載

本章節評估密封鋼筒於載入混凝土護箱，或由混凝土護箱或傳送護箱內取出時密封鋼筒的操作負載[35][36]。

(1) 肇因

操作密封鋼筒時因吊車操作錯誤，或操作者的疏忽所發生的非預期載重。

(2) 偵測

密封鋼筒異常操作狀況可經由操作人員目視或由操作雜音得知，此狀況操作人員可明顯得知。

(3) 分析與結果

以 ANSYS 模型進行密封鋼筒異常操作分析，分析模式包含燃料提籃中的承載圓盤(support disk)及銲件(weldment)。密封鋼筒異常吊運操作的負載為吊運的各軸向為 0.5 g，最終之側向加速度為 0.7071 g，垂直方向加速度為 1.5 g (1 g+0.5 g)。分析結果皆有正值的安全餘裕且應力符合規範規定。

詳細安全餘裕數值列於本節附錄 6.6.A 中表 6.6.A-3 至表 6.6.A-9。

(4) 矯正行動

當錯誤發生時必須停止作業，直到一切回復正常後再行操作。因為密封鋼筒之周邊及底部之輻射較高，如果需檢視其狀況時應依相關輻射防護規定進行。

(5) 輻射影響

應無相關輻射影響，若有必要進行檢視時應依 ALARA 原則處理。

4. 儀器故障

乾式貯存系統在混凝土護箱四個出氣口處，裝設電子式溫度感應設備，可連續讀取並記錄溫度。

(1) 肇因

儀器可能因零件故障，或其他意外事件造成之電力中斷、儀器或讀數器損壞，而導致其功能失效。

(2) 偵測

當讀數器無法顯示溫度，或顯示之溫度與其他相似的出氣口溫度不同即可獲知。

(3) 分析與結果

因混凝土護箱出氣口溫度為連續讀取並每日記錄，故最長之無溫度紀錄期間為 24 h。最有可能造成溫度上升之狀況為進氣或出氣口堵塞，本章六、(三).3 節針對混凝土護箱所有進氣及出氣口皆堵塞的狀況進行分析，各組件於狀況發生後，到達容許溫度限值的時間皆超過 85 h，故在達到組件溫度限值前，應已修復儀器或提供可用之替代機具。

每日溫度監測的目的在確認被動冷卻系統功能正常，故儀器故障在正常情況下不影響貯存設施的運轉。

(4) 矯正行動

故障的儀器應修復或更換，在此之前則由人工監測及記錄溫度。

(5) 輻射影響

此事件無輻射影響。

表 6.6.2-1 各組件在嚴厲環境溫度下的溫度分析結果與容許溫度表

組件名稱	異常低溫-41 °C 時 組件最高溫度(°C)	異常高溫 40 °C 時 組件最高溫度(°C)	容許溫度(°C)
燃料護套	292.3	350.8	570.0
承載圓盤	271.1	333.2	371.1
導熱圓盤	270.2	332.3	398.8
密封鋼筒殼體	128.2	198.0	426.6
混凝土護箱混凝土	5.1	108.8	176.6
外加屏蔽結構體混凝土	-24.8	100.3	

表 6.6.2-2 半個進氣口堵塞異常狀況下各組件溫度

組件名稱	空氣進口半堵塞 組件最高溫度 °C	容許溫度 °C
燃料護套	367.4	570.0
承載圓盤	352.2	371.1
導熱圓盤	350.5	398.8
密封鋼筒殼體	215.8	426.6
混凝土護箱混凝土	133.1	176.6
外加屏蔽結構體混凝土	99.5	

(三) 貯存時或操作意外事件分析與結果

本節主要在描述貯存或操作時意外事件的分析，分析項目計有 14 項，包含貯存時意外壓力、溫度的巨大變化或儀器故障與混凝土護箱傾倒、或操作時混凝土護箱含密封鋼筒墜落、甚至混凝土護箱與密封鋼筒遭受外部爆炸或火災、飛機撞擊、燃料棒底部撞擊，以及想像可能的最大天然災害侵襲時的狀況分析。分述如下：

1. 最大預期熱負載

本節依據 ANSI/ANS 57.9 最大熱負載之條件，評估乾式貯存系統在最大預期熱負載 56 °C(133 °F)周圍溫度下所造成的影響。分析結果顯示，在 56 °C 周圍溫度依然不對貯存設施造成結構安全之顧慮。

(1) 肇因

起因於極不可能發生的氣候異常。

(2) 分析與結果

分析方法同本章六、(二).1 節中嚴酷周圍溫度 41 °C(106 °F)及-40 °C (-40 °F)時的分析模式，但邊界條件為周圍溫度為 56 °C 時的狀況，其分析結果及容許溫度見表 6.6.3-1[35]。

混凝土護箱熱應力分析依照以本章二、(六).2 節正常運轉狀況分析所建立之模型分析之，因周圍溫度 56 °C 時的熱負載狀況可以被周圍溫度 32 °C 下，且半個進氣口堵塞(23 kW)時的情況所涵蓋，故其熱負載狀況熱應力及其他異常/意外事故應力結合之分析結果，詳見本章六、(二).2 節。

(3) 矯正行動

起因於自然現象故無矯正行動。

(4) 輻射影響

本事件無輻射影響。

2. 意外壓力

假設密封鋼筒中所有燃料棒皆破損，則所有燃料棒釋出之氣體將增加密封鋼筒之內部壓力，本節即分析此意外壓力對密封鋼筒的影響。分析結果顯示，此假設狀況不會對密封鋼筒造成顯著之影響。

(1) 肇因

假設密封鋼筒中所有燃料棒皆破損時，燃料棒中之分裂性氣體釋放至密封鋼筒中，使密封鋼筒內部壓力上升。

(2) 偵測

密封鋼筒中的燃料棒破損，並不容易從密封鋼筒表面或從混凝土護箱外部測量或偵測。

(3) 分析與結果

分析項目包含密封鋼筒最大內壓及其造成之應力，分析項目如下：

最大內壓情況一

密封鋼筒最大內壓力決定於兩種情形，燃料棒 100 %破損及最大溫度意外情況，最大溫度意外包含火災及混凝土護箱通風口堵塞。其中燃料棒在 23 kW 熱負載及 100 %破損時的溫度及內壓，均高於最大溫度意外情況，故以燃料棒 100 %破損之情況作為分析依據。假設燃料棒 100 %破損時的密封鋼筒內壓力為 326.37 KPa(47.3 psig) [35]。

由內壓產生之最大鋼筒應力一

密封鋼筒分析壓力 448.50 KPa(65 psig)可涵蓋上述之 326.37 KPa(47.3 psig)。而結合正常吊運情況及最大意外內壓 448.50 KPa，其應力分析結果顯示安全餘裕均能維持正值。

以上分析中含有 16 個截面應力(sectional stress)，各應力位置參考本章二節圖 6.2.6-13。各細部應力詳見本節附錄 6.6.B。

(4) 矯正措施

對此假設意外情況，無須矯正措施。

(5) 輻射影響

無輻射影響。

3. 混凝土護箱進、出氣口完全堵塞

分析於正常周圍溫度 32 °C(90 °F)下，混凝土護箱進、出氣口完全堵塞時，密封鋼筒、燃料提籃及混凝土護箱達其設計溫度限值之時間。各種材料之設計溫度限值參考本章三、(四)節。此狀況會在 24 h 內發現並於 85 h 內清除進、出氣口堵塞物後予以矯正。

(1) 肇因

可能的原因為貯存場受土石流、落石、穴居動物等之影響，導致地面混凝土護箱被掩埋使進出氣口阻塞。

(2) 偵測

可由連續溫度監測之異常上升或例行性巡視得知；另土石流、落石萬一發生，大多為颱風、地震或豪雨之異常天候後，故亦可由事後之現場巡視得知。

(3) 分析與結果

分析利用本章三、(五)節建立之模型，假設密封鋼筒在正常貯存狀況下，突然失去對流冷卻機制，熱量經由輻射及傳導進入混凝土護箱鋼內襯及混凝土，故 ANSYS 模型中熱對流元素以熱傳導元素取代之，以分析各組件之最大溫度。分析結果顯示在事件發生 72 h 內所有貯存設施的各部材料，仍低於容許溫度，詳表 6.6.3-2；在事件發生 7 d 內，除混凝土護箱在 85 h 時超過容許溫度外，其餘各部材料含燃料護套溫度仍低於容許溫度。所有通氣口堵塞狀況下燃料護套、密封鋼筒外殼與混凝土之溫度歷程如圖 6.6.3-1。

(4) 矯正措施

堵塞物必須以人工清除，且要求矯正措施以防止氣口再度堵塞。堵塞物必須於 85 h 內清除，以防止混凝土護箱溫度超過法規限值。

(5) 輻射影響

混凝土護箱仍保持其屏蔽功能，故無顯著輻射影響。劑量來自於清理進出氣口時，以 14 kW 的條件而言，在進出氣口附近之劑量率大於正常表面(2.44 $\mu\text{Sv/h}$)，估計清理時之最大劑量率為進氣口 0.38 mSv/h，出氣口 0.151 mSv/h，假設每個氣口需清理 15 min，人員在 8 個進出氣口附近之最大劑量為 2.12 mSv，而全身劑量相對的較少。此外清理混凝土護箱外表面時亦有劑量，估計在清理 2 h 中約接受 5 μSv 劑量。

4. 混凝土護箱於 61 cm 高度墜落分析評估

本節評估混凝土護箱於密封鋼筒滿載用過核子燃料時由 61 cm(24 in) 高度墜落地面時，混凝土護箱及密封鋼筒所受到的影響。評估結果顯示，61 cm 高度的墜落意外事件，對混凝土護箱及密封鋼筒並沒有明顯的影響 [41]。

(1) 肇因

移動混凝土護箱時可使用氣墊從底部托運，或使用移動式的吊運設備從頂部利用吊耳(lug)吊運。使用氣墊設備時，混凝土護箱必須被提高約 10.2 cm(4 in)，以便將氣墊放入混凝土護箱下方，應用氣墊內的壓縮空氣將混凝土護箱舉起並移到預定位置，再於進氣口處使用千斤頂將混凝土護箱升高並移出氣墊。上述操作程序中若發生千斤頂或氣墊失效，將造成混凝土護箱掉落。

混凝土護箱使用移動式吊運設備時，吊運設備應用混凝土護箱頂部之吊耳，將混凝土護箱舉起至不高於 61 cm 的高度，若發生吊運設備或吊耳失效，也會造成混凝土護箱掉落。

(2) 偵測

操作人員於操作現場可立刻得知。

(3) 分析與結果

假設混凝土護箱從 61 cm 高度掉落時，衝擊發生在混凝土護箱底部表面，力量向上傳遞至混凝土護箱及密封鋼筒，保守假設衝擊之表面勁度為無限大，混凝土護箱將因吸收衝擊能量而局部破壞，混凝土護箱進氣口亦會產生變形。經評估，61 cm 高度墜落時可能造成密封鋼筒的最大加速度為 57.4 g，仍小於其設計之容許負載 60 g。分析結果顯示，混凝土護箱的基座處鉚接底板產生約 2.54 cm(1 in)高度的縮減量，此意外事件並不會降低混凝土護箱的屏蔽與熱傳功能，密封鋼筒各組件之應力值也皆在容許範圍內。

詳細分析結果參見本節附錄 6.6.C。

(4) 矯正行動

雖然混凝土護箱經此次意外後仍維持其功能，無需立即修補的行動，但密封鋼筒應評估是否需移到另一個無異常之混凝土護箱中，受損的混凝土護箱應接受檢查，並修補後繼續使用。

(5) 輻射影響

無相關輻射影響。

5. 混凝土護箱傾倒

混凝土護箱傾倒為一假設意外事件情況，是一概括評估案例，其實並沒有任何設計基準會造成護箱的傾倒意外事故。

功能上，在混凝土護箱傾倒時，護箱並沒有承受顯著不利的結果。混凝土護箱、密封鋼筒和燃料提籃，仍然維持設計上的各項功能[42]。

(1) 肇因

在設計基準的條件下，護箱不會傾倒。但仍假設護箱傾倒，並進行傾倒評估。

(2) 偵測

一旦護箱的傾倒發生後，很容易在現場觀測查覺。

(3) 分析與結果

密封鋼筒及燃料提籃在混凝土護箱中傾倒的意外事件分析結果顯示，在極保守的假設條件下，密封鋼筒及其內部組件皆能符合 30 g 側向加速度衝擊之設計需求，所作之分析項目有密封鋼筒的分析、承載圓盤的分析、承載圓盤挫屈評估、燃料管分析與密封鋼筒封銲評估。

詳細分析參考本節附錄 6.6.D。

(4) 矯正行動

發生密封鋼筒及燃料提籃在混凝土護箱中傾倒事件後，應儘速於 85 h 內將進出口全堵塞之狀況排除，使護箱回復至半堵塞狀態，必要時可考慮以強迫空氣冷卻(forced air cooling)的方式達成。依熱傳分析結果，空氣進出口半堵塞情況下，無論持續多久，護箱(含用過核子燃料及密封鋼筒)任一點溫度均不會超過相關限值。此外，經由適當檢驗措施檢視密封鋼筒是否完整，並視混凝土護箱之狀況，決定是否對混凝土護箱採取修補措施。

確定監測儀器是否正常，以確保溫度感應器具未因傾倒意外而喪失功能。

輻射防護程序、機具及措施，則依據放射性物質安全運送規則第 44 條，當運送包件外表面之輻射強度大於 2 mSv/h 時，採用專用運送；本計畫之廠內運送採用專用運送，符合該條規定。此外，IAEA Safety Series No.37 建議：當專用運送之包件外表面輻射強度大於 2 mSv/h 時，防護重點為防止人員接近運送車輛(1990 年版；A-469.1 節)。本計畫執行廠內運送時，除包件外表黏貼警示標誌外，將有保警及輻防人員等隨行，依 RWP 及 REP 之規定執行輻射管制，並管制人員與運送車輛保持安全距離。

(5) 輻射影響

本計畫所設計之護箱不會發生傾倒。萬一傾倒，對 7 kW/護箱並使用保守分析條件，由 MCNP 程式計算結果顯示：護箱底部表面之最大劑量率約 98 mSv/h，護箱底部表面之平均劑量率約 52 mSv/h。

● 傾倒事故前處理

工作人員所受的輻射劑量，主要為前處理設置圍籬、輻射標誌及臨時屏蔽(如 1 m 立方之混凝土塊)時，所需機具為吊車/叉動車及卡車(核一廠已備有)；接近護箱底部所可能接受之劑量，估計需 3 人作業 30 min，其所在位置約離開底部 5 m 處，劑量率約 38 mSv/h(對 14 kW/護箱而言)；三人共可能接受 $38 \times 3 \times 0.5 = 57 \text{ man-mSv}$ ，個人則有 19 mSv 劑量，低於年劑量限值 50 mSv。不會有個人一次超過 50 mSv 劑量限制之情事發生。

● 傾倒事故後處理

後處理程序則為將傾倒的護箱扶正，此時需動用大型吊車(據了解國內大型吊車出租廠商一般皆可於受委託並接獲通知後 48 小時內，到達指定地點)。工作人員同樣儘量避免面對護箱底部，估計需 10 人次作業每次 30 min，其所在位置約離開底部 5 m 處，集體劑量約為 190 man-mSv，個人則有 19 mSv 劑量，低於年劑量限值 50 mSv。故亦不會有個人一次超過 50 mSv 劑量限制之情事發生。

6. 爆炸

依評估，當爆炸產生之逆壓(overpressurization)大於 69 KPa(10 psig)時，將導致範圍內的一般建築物幾近完全解體。本分析延用 NAC UMS 系統之分析，保守假設爆炸發生時對混凝土護箱產生之壓力達 151.8 KPa(22 psig)。由於此值與洪水產生之壓力相同，故根據本章六、(三).10 節天然災害洪水分析(詳見本章六、(三).10 節)結果顯示，此壓力對於密封鋼筒結構無明顯影響。

(1) 肇因

可能起因於設施內工業意外或乾式貯存場附近之其他移動車輛或固定設備爆炸。然而貯存設施內並無使用可燃物或爆裂物，且在場界安全控制措施下，亦不允許貯存場址附近有爆裂物，故此狀況極不可能發生。

(2) 分析與結果

爆炸所產生之壓力低於 15.24 m(50 ft)深洪水壓力 151.8 KPa(22 psig)，該壓力不影響密封鋼筒功能。其分析結果詳見第本章六、(三).10 節。

(3) 矯正行動

爆炸發生後，應檢視混凝土護箱之進氣口及出氣口，確認是否有碎片堵塞，並確認監測儀器是否運作、濾網是否完整。

(4) 輻射影響

此事件無輻射影響。

7. 火災意外

雖然火災在乾式貯存系統壽限內發生的機率極低，本節仍假設火災事件並分析其影響。

(1) 肇因

火災可能由易燃物或運輸車輛所造成，並且火災可在短時間內被撲滅，而車輛及搬運設施之載油（最多 50 gal）是假設唯一的可燃物。其它用於乾式貯存場維護及運轉之設備載油，則相當遠離乾式貯存場，故不在此加以分析。

另外，對於貯存場邊坡之灌木林因天然或人為因素所引起之火災，亦列入評估，評估時設施之熱負載保守採用 23 kW。

(2) 偵測

由連續溫度監測之異常上升或在貯存設施附近觀察到火或煙得知。

(3) 分析與結果

雖然核一廠用過核子燃料乾式貯存場址極不可能發生火災，但仍假設最多 50 gal 的汽油散佈於乾式貯存場址燒及廠址邊坡灌木林火災二狀況進行分析。分析結果及容許溫度詳見表 6.6.3-3。

在燃油火災時，假設 50 gal 汽油潑灑於 1.4 m^2 (15 ft^2) 的面積上，再扣除混凝土護箱的佔地面積後，有 1.5 cm (0.6 in) 高度的燃油分佈於混凝土護箱四周。考慮燃率為 $55 \text{ g/m}^2\text{-s}$ ，則火災可持續 6.15 min。保守以 8 min 燃燒時間進行評估，並且按 10 CFR 71.73C(3) 規定假設火場溫度為 801.7°C (1475°F)。分析結果顯示外加屏蔽結構體之混凝土有 518.3°C 的局部高溫，根據 NUREG-1536 所述，在火災狀況下，容許混凝土溫度超過法規 ACI-349 之限值。在燃油火災過程中，密封鋼筒中之護套溫度上升並不明顯，其最高溫仍遠低於 570.0°C 的限值。再保守採用最小移熱量進行冷卻分析，約需經過 24 h，密封鋼筒即回復正常貯存狀態。

在灌木林火災分析方面，假設灌木林環繞混凝土護箱且火場溫度為 801.7 °C，且火災持續 2 h，分析中保守忽略空氣自然對流移熱。分析結果顯示，外加屏蔽外殼局部高溫可達 748.3 °C，但整體外加屏蔽溫度僅達 159.7 °C。再採用最小移熱量進行冷卻分析，結果顯示約事故發生 5 d 後，密封鋼筒溫度可回復正常貯存狀態。

(4) 矯正行動

火災發生時，場址相關人員應立即滅火，其後應檢視混凝土是否破碎、鋼筋外露、表面變色等劣化現象，並據此修補至設計基準狀態。

(5) 輻射影響

無顯著輻射影響，唯一影響為混凝土表面輻射劑量率因受損而略為上升，經施行矯正行動後，混凝土護箱側表面劑量率須符合小於 0.5 mSv/h (平均)之設計基準。

8. 地震事件

在考量垂直與水平加速度下，以靜力分析計算混凝土護箱及外加屏蔽後會造成傾倒(tip-over)之最小加速度。評估結果顯示，混凝土護箱在設計基準之地震力作用下，不會發生傾倒，但會有輕微的滑動[33]。

(1) 肇因

地震為自然現象，其肇因可能為斷層活動或火山活動所造成的地表震運動及週期振動造成。

(2) 偵測

可影響混凝土護箱與密封鋼筒貯存設施之地震為有感地震，一般人均可察覺。

(3) 分析與結果

本分析針對地震對於外加屏蔽內含混凝土護箱與密封鋼筒，在於地震所造成混凝土基座最大加速度 0.5 g，並且地震持續 40 s 的情況下，分析外加屏蔽、混凝土護箱與密封鋼筒三者的相互關係。結果顯示，以上的地震條件並不會對貯存設施的結構安全造成碰撞或傾倒的不利情況。詳細之分析計算請參考本節附錄 6.6.E。

(4) 矯正措施

查驗混凝土護箱在地震後之狀況，確定地震後混凝土護箱位置應保持適當之中心至中心距離，以及查驗溫度監測系統仍維持正常運作。

(5) 輻射影響

無輻射影響。

9. 洪水

設計基準是假設洪水狀況為深 15.24 m(50 ft)、流速 4.57 m/s(15 ft/s)，可完全淹沒混凝土護箱。分析顯示，在此狀況下垂直的混凝土護箱不會滑動或傾倒，洪水所產生水壓也不會對密封鋼筒造成顯著的應力[40]。洪水所可能導致的進氣口堵塞情況，其分析詳見本章六、(二).2 節及六、(三).3 節。

(1) 肇因

本報告第二章三、(一) 節河川中之洪流量所描述，當乾華溪發生重現期距 100 年之暴雨時，場址附近之渠道仍不會溢堤。雖發生溢堤之洪水可能性極低，但基於保守分析原則，依然假設溢堤現象可能發生，故進行洪水評估。

(2) 偵測

混凝土護箱與密封鋼筒遭洪水侵襲的意外，很容易由連續溫度監測的異常上升或觀察得知。

(3) 分析與結果

以古典流體力學分析護箱，視其為一剛體，並計算其阻力 F_D (drag force)。針對滑動及傾覆狀況的分析，採用 1.1 之安全係數，碳鋼及混凝土間摩擦係數假設為 0.35[2]。

計算 15.24 m(50 ft)深洪水作用在密封鋼筒及混凝土護箱上；保守起見，假設密封鋼筒內部壓力為 0 psi，並以本章二、(六).2 節所建立之 ANSYS 分析模式進行有限元素分析。分析結果顯示，所有應力（含靜載重、活載重、熱載重及洪水造成載重）的不同組合，結果也都不超出容許應力。

詳細分析細節請參照本節附錄 6.6.F。

(4) 矯正行動

洪水過後，應檢查混凝土護箱，護箱底部可能有堆積物堵塞進氣口。並確認溫度監測系統正常運作。

(5) 輻射影響

本事件無輻射影響。

10. 雷擊

本節分析閃電擊中混凝土護箱所造成之影響。

(1) 肇因

雷擊為一隨機的氣象事件，其發生頻率視乾式貯存場的地理位置而定；因混凝土護箱無外在遮蔽設施，故有被閃電擊中之可能。

(2) 偵測

可由雷擊發生時目視而得，也可觀測電流進出點混凝土表面顏色狀況得知，多數核電廠附近，設有閃電偵測設備以做為確保電力穩定的輔助設施。

(3) 分析與結果

假設閃電擊中混凝土護箱最上層之金屬表面，穿過金屬內襯接地，故電流路徑為頂端凸緣之圓周一點，經過碳鋼內襯接地。電流經過處產生 Joulean heating。

最大閃電尖峰電流為 260 μ s 內通過 250 kAmp，連續電流為 2 s 內通過 2 kAmp[3]。

由焦耳定律(Joule's Law)得知組合電流的熱能 Q[4]為：

$$\begin{aligned} Q &= 0.0009478 R[I_1^2(dt_1) + I_2^2(dt_2)] \\ &= (22.98 \times 103) R \text{ Btu} \end{aligned}$$

Q = 熱能(BTU)

I₁ = 尖峰電流(安培)

I₂ = 連續電流(安培)

dt₁ = 尖峰電流歷時(s)

dt₂ = 連續電流歷時(s)

R = 電阻(歐姆)

因為雷擊會造成碳鋼內襯短暫的具穿透性及導電性，相較於電流會平均分佈於表面上，本分析保守假設電流會聚集在表面一小面積內（圓柱體 90°之表面積）導致溫度上升，電流透入深度（m）如下[5]：

$$\delta = \frac{1}{\sqrt{\pi \mu f \sigma}}$$

$$\mu = \text{透入率} = 100\mu_0 (\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} \text{ 亨利/m})$$

$$\sigma = \text{導電率} = 1/\rho = 1/9.78 \times 10^{-8} \text{ 歐姆-m}$$

$$f = \text{頻率(Hz)}$$

有效電阻的計算公式如下：

$$R = \frac{\rho l}{a} \quad R = \text{電阻(歐姆)}$$

$$\rho = \text{電阻率} = 9.78 \times 10^{-8} \text{ 歐姆-m}$$

$$l = \text{導體長度}$$

$$a = \text{導體面積(m}^2\text{)}$$

所得之電阻 R 代入焦耳定律公式可得其熱能 Q。假設熱流邊界無熱能損失或消散，則上升溫度為[6]：

$$\Delta T = \frac{Q}{mc}$$

$$\Delta T = \text{溫度變化}^{\circ}\text{F}$$

$$Q = \text{熱能(BTU)}$$

$$C = 0.113 \text{ BTU/lb}^{\circ}\text{F}$$

$$m = \text{質量(lbm)}$$

計算得出尖峰電流造成之溫度上升 ΔT_1 為 4.7°F (2.6°C)；計算得出連續電流造成之溫度上升 ΔT_2 極小可忽略不計（0.0006°F(0.00033°C)）。相對於整個碳鋼的體積而言，上升溫度 ΔT_1 應在 1°F (0.56°C) 以內。

(4) 矯正行動

閃電擊中後應目視檢查混凝土護箱是否受損，並採取適當措施。

(5) 輻射影響

本事件無輻射影響。

11. 颱風及颱風投射物

此節分析混凝土護箱及外加屏蔽，在最大颱風及颱風投射物衝擊負載下之影響。

(1) 肇因

颱風是不定期氣候變化，每年皆有可能來襲，颱風及颱風投射物有一定能量作用於護箱上。

(2) 偵測

颱風之警報可由氣象局、收音機或電視提供消息。

(3) 分析與結果

分析結果[39]顯示，颱風風壓不會造成混凝土護箱與外加屏蔽滑動或傾倒，所造成之混凝土應力亦在容許範圍內。混凝土壁及封板設計可抵抗颱風投射物之穿透，混凝土亦具備充足之剪力強度以抵抗高能量投射物之衝擊。分析颱風及投射物分別或其組合負載狀況，皆不會使混凝土護箱傾倒。

共計作以下 9 項分析項目：

- 混凝土護箱颱風荷重情況
- 混凝土護箱颱風投射物負載
- 混凝土護箱外殼局部破壞分析(穿透投射物)
- 封板局部破壞(穿透投射物)
- 颱風投射物整體破壞 (高能量投射物)
- 颱風及投射物組合負載(高能投射物)
- 混凝土護箱外殼局部剪力強度(高能投射物)
- 颱風作用力對混凝土間隔塊的影響評估
- 核一廠風力發電機組葉片破斷彈射貯存設施評估

以上分析結果顯示，在無外加屏蔽的掩護下，混凝土護箱的強度已可承受颱風及其投射物的衝擊，故增加外加屏蔽保護後，更可提升貯存設施抗颱風的能力。

詳細計算請參考本節附錄 6.6.G。

(4) 矯正措施

對此假設意外情況，無須矯正措施。

(5) 輻射影響

投射物衝擊混凝土護箱厚度約減少 15.2 cm(6 in)，此局部厚度減少，對 14 kW 與 23 kW 在無外加屏蔽時之狀態而言，輻射劑量率估計小於 0.113 mSv/h 與 0.45 mSv/h，仍低於設計基準 0.50 mSv/h，故無輻射影響。

12. 飛機撞擊評估

本節分析飛機撞擊混凝土護箱之可能性。

(1) 肇因

飛機因偏離航道誤入核一廠禁航區，且不幸準確撞擊混凝土護箱。

(2) 偵測

屬重大事件，可立即得知。

(3) 分析與結果

本計畫依 NUREG-0800 之內容，蒐集核一廠附近民用機場起降次數、禁航區範圍、核一廠附近飛航路線等資訊，經評估符合 NUREG-0800 第一階段定性評估之要求，判定乾式貯存場受飛機撞擊機率小於 1×10^{-7} /年，不須進行撞擊後果評估。詳細分析報告詳如本節附錄 6.6.H。

(4) 矯正行動

無。

(5) 輻射影響

無。

13. 燃料底部撞擊評估

本節計算用過核子燃料在密封鋼筒與混凝土護箱 61 cm(24 in)垂直墜落時的燃料棒挫屈(buckling)分析。

(1) 肇因

當混凝土護箱內裝有用過核子燃料束的密封鋼筒因操作意外造成 61 cm(24 in)墜落時，密封鋼筒底部衝擊力傳遞至用過核子燃料。

(2) 偵測

操作人員於操作現場可立刻得知。

(3) 分析與結果

分析中分別建立包含護套與燃料丸的一般燃料棒的分析模式，與只有燃料護套管的分析模式。並以 ANSYS 有限元素程式進行燃料棒挫屈分析。結果顯示，GE 8x8、GE 9x9 與 GE 9x9 護套的挫屈極限負載，分別為 77.8、64.6 與 162.5 g，均高於混凝土護箱 61 cm 垂直墜落時 60 g 的設計負載，故在於 61 cm(24 in)的墜落事故中，燃料棒不會發生挫屈[34]。詳細分析參見本節附錄 6.6.I。

(4) 矯正行動

無需矯正行動。

(5) 輻射影響

無相關輻射影響。

14. 土石流

依據「核能一廠用過核燃料中期貯存計畫未來營運管理計畫」，土石流為由土、砂、礫、石、岩屑等固體材料，藉由水之潤滑作用，產生連續移動之現象。發展過程可分為「發生段、流動段、堆積段」。「發生段」通常位於溪谷上游坡度較陡處，水流會對溪床堆積物及側岸產生急劇之沖蝕，造成土石崩塌，藉以獲得足夠之土石材料；當水流與土石材料混合，達到土石流之相當濃度時，在適當的坡度下，產生一定的流速，以及對溪床沖刷的能量，且先端之巨礫與流木亦可造成相當的破壞力，此時稱為「流動段」；當土石流到達下游溪床較寬或坡度較緩處(多為 $3^{\circ}\sim 6^{\circ}$)，因流速減緩且逐漸脫水，土砂礫石逐漸沉積，並在谷口或溪流出口形成扇狀堆積地是為「堆積段」。一般而言，土石流只影響於堆積段。

根據農委會水土保持局於 94 年 3 月全國現地調查後所公佈之資料，乾華溪上游有兩處土石流潛勢溪流，位於內阿裏磅地區附近。本開發案場址距離乾華溪上游土石流潛勢溪流之堆積停止段有 5 km 以上，因此，場址不受土石流潛勢溪流之威脅（詳如本安全分析報告之「第二章/二、地質與地震/(一)地質/5.土石流潛勢」章節內容）。另乾華溪在土石流潛勢溪流堆積段與進入核能一廠範圍內之間長度約 5 km 之渠道，其坡度約為 $2^{\circ}\sim 3^{\circ}$ 之間，渠床甚緩，不足以提供土石大規模移動之動能，故本開發案場址並不會受到上游地區土石流災害之影響。再者，本開發案場址的乾華溪內側已增設擋土排樁，具有土壤邊坡穩定的效果，可承受護箱載重的土壤側壓力，也不致因乾華溪岸受豪雨滲漏沖刷而產生立即性危害。

(1) 肇因

假設土石流現象發生於乾式貯存系統附近且超過原有防範災害的設計值時，將有可能導致大量土石與植被移動並造成系統發生掩埋事故，並造成護箱進氣口全部堵塞。

(2) 偵測

依據「核能一廠用過核燃料中期貯存計畫未來營運管理計畫」，雖然本開發案不致受土石流影響，且目前乾華溪上游地區地質情況穩定，但本公司為考慮乾華溪上游如有不當土地利用，可能對下游造成危害，未來乾式中期貯存設施營運期間將對此一地區加強監測工作，除進行不定期的土石流巡視，注意是否有河道阻塞淤積、坡地地表異常改變或異常坍塌等，影響河道正常輸水之情事產生，隨時掌握乾華溪水文狀況之外，並將以乾華溪在石門地區之土石流警戒基準值為基準，將來如發生中央氣象局預測降雨量超過該警戒基準值時，本公司將加強派員進行乾華溪上游巡視，注意是否有溪水混濁、異常山鳴等土石流徵兆產生，做好先期的通報與預防。此外，本公司將持續以衛星進行每半年一次的影像變異監測（原則上於防汛期前後分別進行一次，以利比較分析，未來防汛期間若有強颱直接侵襲本區域時將考量適時增加頻率），並輔以人工現場勘查，以瞭解核能一廠區及乾華溪上游地區四周地形及植被等之變化，並注意是否有濫墾濫伐等情形，達到乾華溪上游土石流發生的預警效果。若集水區內產生潛在危險因素時，將即時通報地方主管機關處理，掌握預防災害之先機。

為確保水土保持設施、基地挖填的穩定性，對邊坡擋土設施與土體的變位與支撐系統的應力變化狀況，本公司已依環評承諾及水保計畫要求設置「坡面穩定監測系統」觀測，根據監測系統的觀測資料，作為乾式貯存設施營運期間維持坡面穩定的依據，以確保鄰近設施的安全。

(3) 分析與結果

依據本安全分析報告章節 6.6.1，淺層土石流淹沒護箱氣進口對貯存設施的衝擊，可由護箱進氣口完全堵塞的分析項目所涵蓋。

貯存場設計有擋土牆屏障，並且邊坡與護箱至少距離 10 m 以上，萬一發生淺層滑動土石散落場址，應不致造成進氣口堵塞；惟若發生護箱進氣口完全堵塞事件時，則迅速將堵塞物清除，可在 85 小時內將所有護箱進氣口回復至半堵塞狀態，即可避免因堵塞太久造成燃料束溫度過高的現象。清理時若因空間狹小，無法提供大型機具進入場址時，可經由人力搭

配適當工具與小型自動機具進入場址，應可順利於 85 小時內清理此淺層土石，使護箱至少回復至半堵塞狀態。按半堵塞狀態下之分析結果顯示，長期均無安全顧慮。

依據原子能委員會放射性物料管理局 101 年 12 月委託清華大學研究撰擬之「假設複合式災害情節對乾貯存施營運影響分析」報告分析顯示，即使在最嚴重假設性之土石流掩埋情節下，用於包封用過核子燃料以防止輻射物質釋出的密封鋼筒，達到其溫度限值(426.6°C)之時間約為 57 天；而內部之用過核子燃料在無其它安全疑慮的前提下，達到燃料護套溫度限值(570°C)的時間為 78 天，考量本公司可於 85 小時內清理至安全狀態，故在此分析所得之達到安全限值時間前，可排除意外狀況並恢復正常貯存作業，不會對貯存設施之安全造成影響。

(4) 矯正行動

依據「核一廠用過核子燃料乾式貯存設施意外事件應變計畫」，萬一貯存場發生土石流之假想意外事件，並造成護箱進氣口全部堵塞時，應於 85 小時內清理堵塞物，使護箱至少回復至半堵塞狀態，再進一步回復至正常狀態(按半堵塞狀態下之分析結果顯示，長期均無安全顧慮)，處理程序為：

- a. 清理時應由輻射防護人員陪同，先作輻射強度量測，再作移除堵塞物的工作。
- b. 以小型挖土機搭配推土機及人力將土石等障礙物排除。
- c. 利用清運車輛將土石等障礙物載離。
- d. 以水喉等工具或以人工清除混凝土護箱底座間之土石及表面污泥。
- e. 檢視溫度監測系統有無故障，若有，溫度感應器故障應於 85 小時內，參照設備操作維修手冊執行故障排除或提供可用之替代機具，或由人工監測及記錄溫度。
- f. 檢視混凝土護箱本體有無破損，如發現混凝土護箱本體或外加屏蔽受損，且產生可能影響輻射屏蔽之瑕疵(深度小於 2.5 公分之表面瑕疵，其寬度大於 2.5 公分；或深度大於 2.5 公分之裂縫，其寬度大於 0.03

公分)時，應立即進行修(填)補作業；若受損嚴重無法修補時，則執行更換。

(5) 輻射影響

本事件無輻射影響。

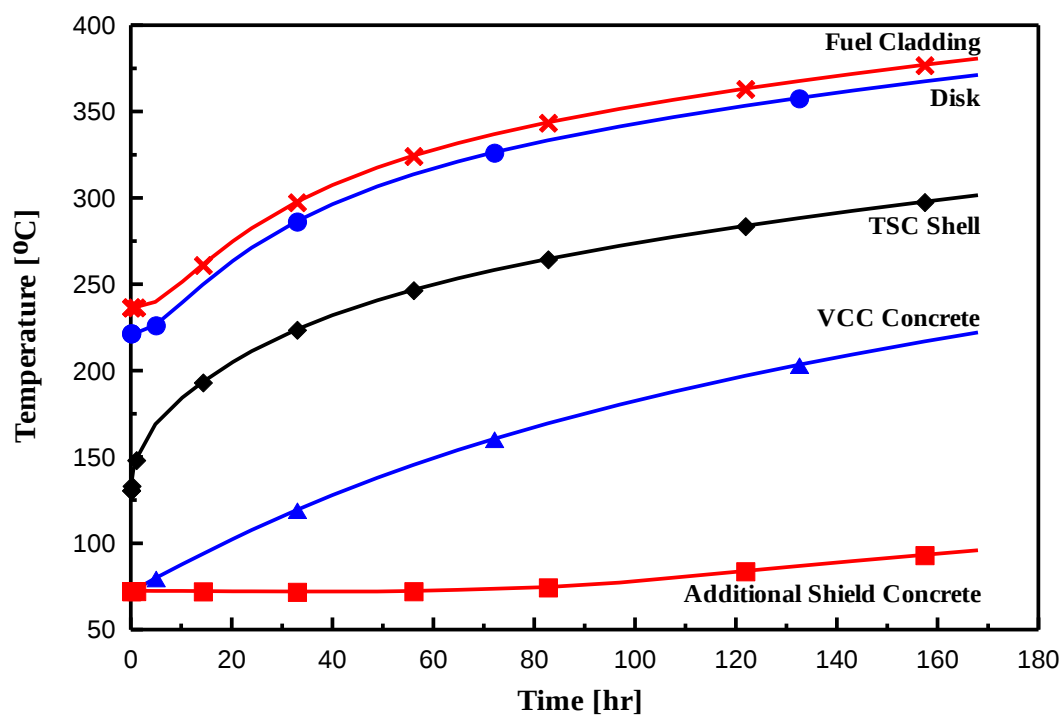


圖 6.6.3-1 所有氣口堵塞狀況下貯存系統之溫度歷程

表 6.6.3-1 最大預期熱負載下的溫度分析結果與容許溫度表

組件名稱	周圍環境溫度 56 °C	容許最高溫度 °C
燃料護套	362.4	570.0
承載圓盤	345.4	371.1
導熱圓盤	344.5	398.8
密封鋼筒殼體	211.3	426.6
混凝土護箱之混凝土	126.9	176.6
外加屏蔽結構體之混凝土	116.7	

表 6.6.3-2 空氣進出口全堵塞事故發生 72 h 後燃料護套及設施重要組件溫度

組件名稱	溫度[°C]	
	熱負載 14 kW	限值
燃料護套	337.0	570.0
承載圓盤	326.4	371.1
導熱圓盤	325.9	398.8
密封鋼筒殼體	258.2	426.6
混凝土護箱混凝土	160.5	176.6
外加屏蔽結構體混凝土	73.7	

表 6.6.3-3 火災事故燃料護套及設施重要組件最高溫度

組件名稱	火災事故 °C	容許最高溫度 °C
燃料護套	345.5	570.0
承載圓盤	327.7	371.1
導熱圓盤	326.7	398.8
密封鋼筒殼體	206.6	426.6
混凝土護箱混凝土	84.4 (整體) 116.6 (局部)	176.6
外加屏蔽結構體 混凝土	110.0 (整體) 518.3 (局部)	

*針對火災事故，法規NUREG-1536容許混凝土溫度超過法規ACI-349限值要求。

(四) 結語

以上各節保守分析結果顯示，貯存設施的設計不論是遭遇異常狀況、意外事故或假想天然災害時，貯存設施均能維持正值之安全餘裕，表示貯存設施的設計皆能滿足設施的相關法規要求。

在於假想之意外事故中，61 cm 垂直墜落事件可能會造成混凝土護箱結構受損，但並不影響混凝土護箱的屏蔽功能，並且護箱中的密封鋼筒仍保持結構完整。在所有假想的意外事故及天然災害分析中，最小的安全餘裕出現在護箱傾倒事故中，密封鋼筒承載圓盤的最小安全餘裕為 0.02，整體密封鋼筒及內部燃料提籃均保持結構完整，無放射性物質洩漏之餘。

其次在熱負載方面，當貯存設施在燃料衰變熱為 23 kW 時，系統在進氣口半堵塞及異常高溫(56 °C)的穩態條件下，系統仍維持正向安全餘裕，但在燃料衰變熱為 14 kW 並且進氣口為全堵塞狀態時，混凝土護箱的混凝土溫度在 85 h 後可達法規限定之溫度值，其餘設施及燃料鈦合金護套溫度值在 7 天內都可低於材料溫度限值。火災分析結果顯示，在保守的火災假設條件下，外加屏蔽接近火源的局部區域將超過規範限值，但不影響微設施結構安全與其屏蔽功能。

分析結果也顯示，貯存設施對於假想之天災，如洪水、雷擊、颱風及颱風拋射物之襲擊，具有相當高的安全餘裕，使得貯存設施對於以上的天災具備良好的抗災能力。即使是高達 0.5 g 地震加速度作用下，貯存設施依然保有其正常功能，除混凝土護箱有輕微水平滑動外(有外加屏蔽時約 4.2 cm，無外加屏蔽時約 13.1 cm)，護箱無傾倒之虞。其餘如飛機撞擊機率評估與用過核子燃料底部撞擊評估結果也能符合相關規範要求。

綜合本章節各意外事故及天然災害評估，貯存設施在各種保守假設條件下，密封鋼筒維持結構完整，無破損洩漏之虞。

(五) 參考文獻

1. Cote, Arthur E., Fire Protection Handbook, 18th Edition, National Fire Protection Association, Quincy, Massachusetts.
2. "Steel to Concrete Coefficient of Friction, Preliminary Tests," Report No. CEB 77-46, Tennessee Valley Authority, Knoxville, Tennessee, December 1977.
3. Cianos, N., and E.T. Pierce, "A Ground Lightning Environment for Engineering Usage," Technical Report No. 1, Stanford Research Institute, Menlo Park, California, Contract No. LS-2817-A3, SRI Project No. 1834, August 1972.
4. Summer, W.I., "American Electrician's Handbook," 10th Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1981
5. Fink, D.G., and Beaty, W. H., "Standard Handbook for Electrical Engineers," 13th Edition, McGraw-Hill, Inc., New York, 1993.
6. Blevins, R.D., Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Krieger Publishing Co., Malabar, Florida, 1995.
7. Boyer, H. E., Atlas of Stress-Strain Curves, ASM International, Metals Park, Ohio, 1987.
8. Green, Robert E, "Machinery's Handbook 25th Edition," Industrial Press Inc., New York, 1996.
9. NUREG/CR-6608, "Summary and Evaluation of Low-Velocity Impact Tests of Solid Steel Billet onto Concrete Pads," Lawrence Livermore National Laboratory, February 1998.
10. Blevins, R.D., Formulas for Natural Frequency and Mode Shape, Krieger Publishing Co., Malabar, Florida, 1995.
11. ISG-15, "Materials Evaluation," Interim Staff Guidance-15, Nuclear Regulatory Commission, January 2001.
12. NUREG/CR-6322, "Buckling Analysis of Spent Fuel Basket," Lee, A.S., and Bumpas, S.E., Office of Nuclear Material and Safeguards, U.S. Nuclear Regulatory Commission, Washington, DC, May 1995.
13. NUREG/CR-0481, SAND77-1872, "An assessment of Stress-Strain Data Suitable for Finite-Element Elastic-Plastic Analysis of Shipping Containers," Henry J. Rack & Gerald A. Knorosky, September 1978.
14. "Seismic Analysis of Safety-related Nuclear Structures and Commentary ",

- ASCE 4-98, American Society of Civil Engineers, 1998.
15. Roberson, J.A. and C.T. Crowe, "Engineering Fluid Mechanics," Houghton Mifflin Co., Boston, Massachusetts, 1975.
 16. "Minimum Design Loads for Building and Other Structures," ASCE 7-02, American Society of Civil Engineers, New York, 2002/11/1.
 17. NUREG-0800, "Standard Review Plan," US NRC, June 1987. (Missile masses taken from Draft Revision 3, April 1996.)
 18. "A Review of Procedures for the Analysis and Design of Concrete Structures to Resist Missile Impact Effects," NSS 5-940.1, Nuclear and Systems Sciences Group, Holmes & Narver, Inc., Anaheim, California, September 1975.
 19. Full-Scale Tornado-Missile Impact Tests," EPRI NP-440, Sandia Laboratories for the Electric Power Research Institute, Palo Alto, California, July 1977.
 20. "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures (ACI-349-85) and Commentary-ACI 349R-85," American Concrete Institute, Detroit, Michigan, March 1986.
 21. Topical Report, "Design of Structures for Missile Impact," BC-TOP-9A, Revision 2, Bechtel Power Corporation, San Francisco, California, September 1974.
 22. NUREG-1567, "Standard Review Plan for Spent Fuel Dry Storage Facilities", March 2000.
 23. 行政院原子能委員會放射性物料管理局委託研究計畫研究報告「用過核燃料中期貯存設施於地震事件下結構完整性，計畫編號922003FCMA003，中華民國九十二年十二月十九日。
 24. "NRC Staff's Brief on the Appropriate Regulatory Standard to Be Used in Evaluating Aircraft Crash Hazards at an Independent Spent Fuel Storage Installation Under 10 CFR Part 72" July 13, 2001 (Docket No.72-22-ISFSI)
 25. 交通部運輸研究所，「台灣地區國內民航發展之研究總報告」，民國八十六年。
 26. 交通部民用航空局，「台灣地區直昇機飛行場分佈」。
 27. 交通部民用航空局，「松山機場管制架次年度統計表」，民國九十五年。
 28. 交通部民用航空局，「台閩地區民航運輸各機場營運量」，民國九十四年。

29. 交通部民用航空局，「松山機場進離場航圖」，民國九十二年。
30. 交通部民用航空局，「台北飛航情報區航路圖」，民國九十五年。
31. 交通部民用航空局，「台北飛航情報區飛航指南」，民國九十三年。
32. Regulatory Guide 1.76, “Design Basis Tornado for Nuclear Power Plants”, U.S. ACE, April 1974.
33. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06022最新板，“混凝土護箱地震分析”
34. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06024最新板，“燃料掉落分析”
35. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06015最新板，“在貯存狀態的密封鋼筒結構分析”
36. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06008最新板，“密封鋼筒燃料管分析”
37. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06014最新板，“密封鋼筒頂部/底部及燃料格架支撐板銲件分析”
38. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06016最新板，“密封鋼筒/提籃傾倒分析”
39. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06019最新板，“颱風及拋射物分析”
40. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06005最新板，“混凝土護箱洪水意外分析”
41. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06020最新板，“混凝土護箱24英吋掉落分析”
42. 核能研究所，ISFSI計算書，ISFSI-04-CAL-02-06021最新板，“混凝土護箱傾倒分析”
43. Funk,R,Shear “Friction Transfer Mechanisms for Support Attached Concrete”. American Concrete International Journal, vol. 11, No.7, July 1989,pp.53~58.
44. Shoei-Sheng Chen, “Flow-Induced Vibration of Circular Cylindrical Structures”, Argonne National Lab., Hemisphere Publishing Corp..

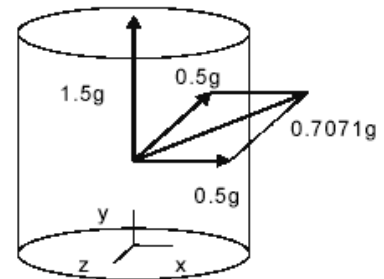
45. American Institute of Steel Construction, "Specification for Structural Steel Buildings — Allowable Stress Design and Plastic Design," published in the AISC "Manual of Steel Construction"
46. "公路橋樑設計規範", 民國九十年一月十二日交通部交技(90)字第000481-1號
47. RG 1.60, Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear power Plants, USNRC, Dec. 1973
48. ANSI/ANS 57.9, "Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation (Dry Type)," American National Standards Institute, 1984.
49. "Metal Containment Shell Buckling Design Methods, Class MC, Section III, Division 1, ASME Code Case N-284-1, March 14, 1995.

附錄 6.6.A 密封鋼筒異常操作負載分析計算

由與本章二、(六).2 節相同之 ANSYS 模型進行密封鋼筒異常操作分析，其模型如圖 6.6.A-1，模型包含燃料提籃中的承載圓盤(Support disk)及鉸件(Weldment)，圓盤以 SHELL63 元素建立，將負載從燃料提籃傳到密封鋼筒外殼，燃料提籃與密封鋼筒外殼區域以 CONTAC52 元素模擬。橫向負載以密封鋼筒內部物體重量（包含估計的重力加速度）之均勻分佈於承載圓盤及鉸件槽(slots)；燃料提籃作用於密封鋼筒之垂直方向負載，則以燃料提籃重量（包含估計的重力加速度）均勻分佈於密封鋼筒底板之壓力模擬。材料容許應力以操作時組件溫度較高溫度者之容許應力考量。

密封鋼筒異常操作的負載為 X、Y、Z 方向各 0.5 g，最終之側向加速度為 0.7071 g，垂直向加速度為 1.5 g（1 g+0.5 g）。

模型之邊界條件與本章二、(六).2 節之正常操作狀況分析相同，另假設側向負載發生密封鋼筒置於混凝土護箱內時，且兩者之接觸面以 CONTAC52 元素模擬。



密封鋼筒異常的操作下之主薄膜應力（primary membrane）與主薄膜應力加彎曲應力（primary membrane plus bending），整理如表 6.6.A-1 及 6.6.A-2。

密封鋼筒異常的操作下，考量組合載重包含密封鋼筒最大異常操作負載、內壓力（15 psig）及熱應力之負載，得密封鋼筒之 16 個截面（含 19 個角度位置）之主薄膜應力、主薄膜應力加彎曲應力（primary membrane plus bending）及主薄膜應力加次要應力，分別整理如表 6.6.A-3、6.6.A-4 及 6.6.A-5。

為了解承載圓盤及上下鉸件結構強度於異常負載下是否足夠，故以 ANSYS 模擬異常負載下，1.5 g 之垂直力與 0.5 g 之兩側向力作用在承載圓盤及上下鉸件之狀況。

分析應用與本章二、(六).2 節承載圓盤及上下鉸件相同之 ANSYS 模型，支撐圓盤圓周上設有一水平位移束制點，並將承載圓盤分成數個截面(cross section)，如圖 6.2.6-16，以評估最大應力之位置（承載圓盤評估採用 426.7°C (800°F)之容許應力）。就異常操作狀況而言，承載圓盤與上下鉸件的應力是依據 ASME Code，Section III，Subsection NG，Level C 中容許應力評估。對

於主薄膜應力 (P_m)、主薄膜應力加彎曲應力 (P_m+P_b) 及主薄膜應力加彎曲應力加次要應力 (P_m+P_b+Q) 評估結果，列於表 6.6.A-6 到 6.6.A-8，頂部及底部鉚件之最大應力、容許應力及安全餘裕，則整理如表 6.6.A-9，分析結果皆有正值的安全餘裕且應力符合規範規定。

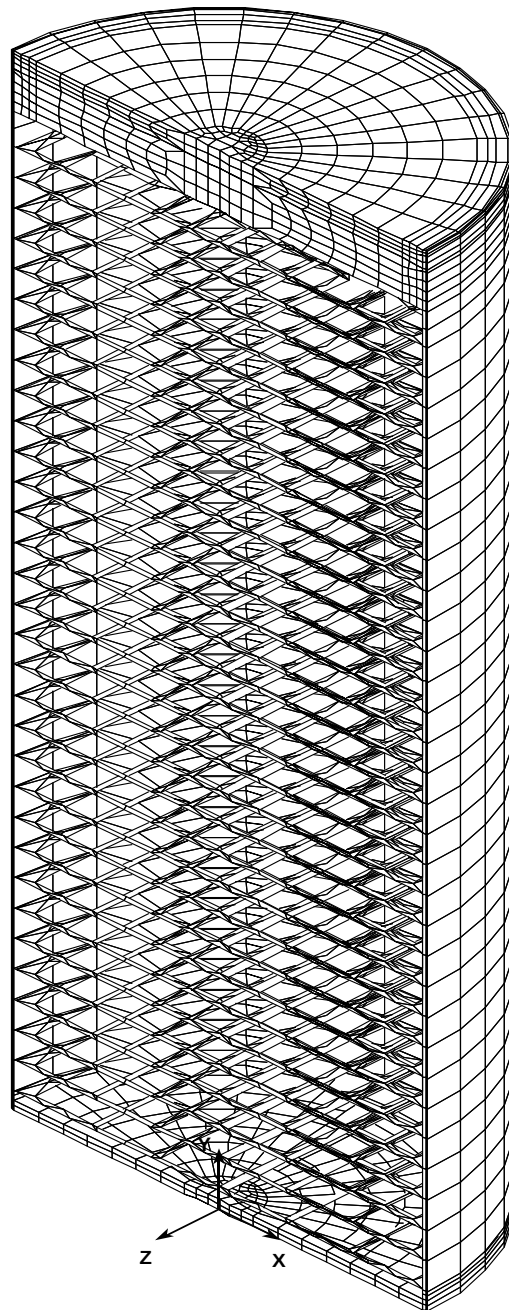


圖 6.6.A-1 密封鋼筒及提籃有限元素模型

表 6.6.A-1 密封鋼筒異常操作(無內部壓力)主薄膜應力 P_m (MPa)

截面位置 ¹	角度 (度) ¹	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度
1	0	-4.49	18.84	4.55	-0.21	-0.14	-0.48	23.39
2	0	13.94	-9.66	-16.70	-1.59	-0.48	-2.48	31.19
3	0	-2.21	8.00	-24.98	6.14	-0.48	-1.93	36.09
4	0	-0.28	5.73	0.00	-0.14	-0.07	0.00	6.00
5	0	-0.62	5.24	0.00	0.00	0.00	0.00	5.93
6	0	-0.83	5.45	-0.07	0.00	0.00	0.00	6.28
7	0	-1.04	6.42	-0.28	0.00	0.14	-0.07	7.45
8	0	0.41	13.25	0.21	0.21	1.24	0.14	13.32
9	0	1.17	19.11	4.07	0.69	1.93	0.07	18.29
10	0	-2.97	23.87	3.31	1.24	2.76	0.76	27.39
11	0	-4.62	16.70	8.63	-5.11	2.14	0.41	24.15
12	0	-1.04	25.25	5.38	2.00	1.31	0.97	26.84
13	0	-14.84	-3.86	8.97	-11.18	0.35	0.83	30.84
14	0	2.14	-0.14	2.48	0.69	-2.07	0.00	5.11
15	180	-0.35	0.00	-0.28	0.00	0.00	0.00	0.35
16	0	-0.14	0.00	0.21	-0.07	0.14	0.00	0.48

¹ 應力截面及角度定義詳見圖6.2.6-13。

表 6.6.A-2 密封鋼筒異常操作(無內部壓力)主薄膜加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)

截面位置 ¹	角度(度) ¹	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度
1	0	25.12	48.85	3.73	1.79	0.21	-0.90	45.33
2	0	5.31	-83.77	-40.85	-5.80	-1.24	-4.21	90.25
3	0	-9.25	118.13	4.62	7.45	1.04	1.04	128.27
4	0	-0.28	5.24	-1.66	-0.14	-0.21	-0.14	6.97
5	0	-0.62	5.31	0.21	0.00	0.00	0.07	5.93
6	120	-1.24	4.90	-0.35	0.00	0.00	0.76	6.62
7	0	-1.10	6.76	0.90	0.00	0.14	0.00	7.87
8	0	0.35	13.46	-0.55	0.21	1.45	0.07	14.28
9	0	-0.48	19.60	3.31	-0.28	2.90	-0.35	20.63
10	0	-4.62	36.09	7.04	2.69	1.66	1.45	41.33
11	0	-8.49	10.90	8.28	-11.87	1.86	0.35	30.98
12	0	-5.04	32.98	6.14	2.42	1.59	1.38	38.57
13	0	-30.91	-14.28	7.45	-9.52	-0.83	1.86	42.92
14	180	61.55	2.55	61.62	0.69	-2.07	0.07	59.27
15	0	-1.86	-0.07	-1.73	0.00	0.00	0.00	1.79
16	0	8.21	0.28	8.63	-0.07	0.14	-0.07	8.35

¹ 應力截面及角度定義詳見圖6.2.6-13。

表 6.6.A-3 密封鋼筒異常操作加正常/異常內部壓力(15 psig)主薄膜應力 Pm (MPa)

截面位置 ¹	角度 (度) ¹	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
1	0	-4.42	28.91	8.28	-1.45	-0.07	-0.28	33.47	145.18	3.34
2	0	20.70	-16.08	-25.25	-3.04	-0.41	-3.66	46.85	145.11	2.10
3	0	-3.45	11.11	-37.95	9.11	-0.83	-3.04	53.82	144.83	1.69
4	0	-0.14	8.83	5.38	-0.21	-0.14	0.41	9.04	133.65	13.79
5	0	-0.62	8.14	5.38	0.00	0.00	0.48	8.83	123.51	12.98
6	0	-0.90	8.28	5.31	0.00	0.00	0.48	9.18	123.03	12.41
7	0	-1.10	9.25	5.11	0.00	0.14	0.41	10.35	132.55	11.81
8	0	0.00	16.15	2.69	0.07	1.31	0.62	16.42	142.76	7.69
9	0	0.28	21.94	5.52	0.83	2.07	0.48	22.01	145.25	5.60
10	0	-3.04	26.01	5.04	0.35	2.83	0.97	29.60	145.31	3.91
11	0	-3.45	16.15	9.52	-5.04	2.00	0.48	22.49	146.21	5.50
12	0	-1.79	21.53	5.24	1.38	1.52	1.04	23.74	145.25	5.12
13	0	-12.49	-2.69	10.28	-10.83	0.28	1.17	29.95	146.21	3.88
14	0	3.59	-0.21	4.07	1.10	-3.24	0.00	8.00	138.55	16.31
15	180	-0.48	-0.07	-0.48	0.00	0.00	0.00	0.41	144.83	348.83
16	0	0.00	0.00	0.35	-0.07	0.14	0.00	0.48	145.80	300.86

¹ 應力截面及角度定義詳見圖6.2.6-13。

² 材料容許應力參考ASME Service Level C。

表 6.6.A-4 密封鋼筒異常操作加正常/異常內部壓力(15 psig)主薄膜加彎曲應力
Pm+Pb (MPa)

截面位置 ¹	角度(度) ¹	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
1	0	33.74	73.62	4.76	1.73	0.35	-1.24	69.00	215.49	2.12
2	0	8.49	-130.69	-62.45	-9.11	-1.10	-6.28	140.90	215.35	0.53
3	0	-14.21	184.30	9.11	11.11	0.76	1.66	199.82	218.66	0.09
4	0	-0.14	9.38	7.59	-0.21	0.00	0.62	9.59	187.82	18.58
5	0	-0.62	8.21	5.66	0.00	0.00	0.48	8.83	171.12	18.38
6	0	-0.97	8.56	6.21	0.00	-0.07	0.55	9.52	170.36	16.89
7	0	-1.24	9.73	6.83	0.00	0.07	0.55	10.97	185.20	15.88
8	0	-0.07	16.70	2.97	0.07	1.10	0.62	16.97	209.62	11.35
9	0	-0.62	28.29	6.49	0.35	2.83	0.35	29.26	215.63	6.37
10	0	-4.55	30.84	6.69	1.52	1.86	1.38	35.81	215.83	5.03
11	0	-6.76	13.59	10.07	-12.01	1.86	0.55	31.81	217.97	5.85
12	0	-4.97	28.08	5.93	1.31	1.79	1.38	33.47	215.69	5.45
13	0	-27.67	-13.59	8.76	-8.90	-0.97	2.28	41.06	218.04	4.31
14	170	96.53	4.00	96.60	1.04	-3.24	0.14	92.94	199.48	1.15
15	0	-1.38	-0.14	-1.45	0.00	0.00	0.00	1.38	214.73	154.60
16	0	8.28	0.28	8.83	-0.07	0.21	-0.07	8.56	217.01	24.36

¹ 應力截面及角度定義詳見圖6.2.6-13。

² 材料容許應力參考ASME Service Level C。

表 6.6.A-5 密封鋼筒異常操作加正常/異常內部壓力(15 psig)主要加次要 P + Q 應力
(MPa)

截面位置 ¹	角度 (度) ¹	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
1	60	21.87	95.70	29.88	-0.41	-1.73	-4.83	76.18	345.69	3.54
2	60	-43.88	-156.15	-7.31	-6.35	8.21	-31.05	167.81	345.69	1.06
3	60	11.80	211.97	-6.35	3.04	-10.28	15.25	227.98	345.69	0.52
4	0	-1.31	8.28	19.04	-0.35	-2.83	1.45	21.25	334.17	14.72
5	0	-8.42	1.66	56.10	-0.48	-4.55	5.52	65.83	308.84	3.69
6	0	-9.25	2.76	59.00	0.48	4.55	5.80	69.55	307.53	3.42
7	0	-3.59	13.04	25.94	0.28	2.76	1.86	30.29	331.34	9.94
8	0	0.14	50.78	25.94	4.35	1.45	4.55	52.23	345.69	5.62
9	10	6.28	35.47	9.80	7.38	1.17	1.66	33.19	345.69	9.42
10	0	-37.54	21.80	-9.18	-3.80	0.28	1.86	59.96	345.69	4.77
11	20	10.90	-55.13	-8.56	4.42	-4.97	-8.00	70.10	345.69	3.93
12	0	-37.54	21.80	-9.18	-3.80	0.28	1.86	59.96	345.69	4.77
13	30	-17.80	9.87	-10.63	2.48	-2.00	11.87	37.05	345.69	8.33
14	180	-103.78	-1.66	-102.47	0.90	-1.45	-1.04	102.74	345.69	2.36
15	150	-6.83	-0.76	-6.62	0.00	0.07	0.07	6.07	345.69	55.93
16	120	-0.41	-6.49	-1.31	0.00	0.69	-0.28	6.21	345.69	54.67

¹ 應力截面及角度定義詳見圖6.2.6-13。

² 材料容許應力參考ASME Service Level C。

表 6.6.A-6 承載圓盤異常條件下之應力 P_m (MPa)

截面 ¹	Sx	Sy	Sxy	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
277	6.21	-5.52	0.69	12.42	444.36	34.78
10	2.07	-2.76	-4.83	11.73	445.05	36.94
265	-6.21	4.14	0.69	11.04	444.36	39.25
262	-5.52	4.14	0.69	10.35	442.98	41.80
259	-4.83	4.14	0.69	8.97	442.29	48.31
77	3.45	-5.52	0.00	8.97	443.67	48.46
194	-4.14	3.45	0.69	8.28	442.29	52.42
197	-3.45	3.45	0.69	7.59	442.98	57.36
103	-6.90	-0.69	0.69	6.90	444.36	63.40
263	-6.21	-6.21	0.69	6.90	442.98	63.20
276	4.14	-2.76	0.69	6.90	440.91	62.90
229	-5.52	1.38	0.69	6.90	444.36	63.40
16	-2.76	2.76	-2.07	6.90	445.05	63.50
264	-6.21	0.00	0.69	6.90	443.67	63.30
76	4.14	-2.07	0.69	6.21	440.22	69.89
286	3.45	-3.45	0.69	6.90	442.98	63.20
12	-1.38	0.69	-3.45	6.21	445.05	70.67
260	-5.52	-5.52	0.69	6.21	442.29	70.22
11	0.00	-0.69	-2.76	6.21	445.05	70.67
269	-4.83	-5.52	0.00	6.21	443.67	70.44
273	0.00	-5.52	0.00	5.52	443.67	79.38
261	-5.52	0.00	0.69	5.52	442.98	79.25
289	-5.52	-4.14	0.69	5.52	442.98	79.25
88	4.14	-1.38	0.69	5.52	440.91	78.88
85	-5.52	-4.83	0.00	5.52	444.36	79.50
9	0.00	0.00	-2.76	5.52	445.05	79.63
193	-4.83	-4.83	0.69	5.52	442.29	79.13
211	-3.45	2.07	0.69	5.52	444.36	79.50
166	5.52	0.69	0.69	5.52	444.36	79.50
268	-4.83	-2.76	0.69	5.52	440.22	78.75
97	4.83	-0.69	0.69	5.52	442.98	79.25
14	-2.76	0.69	-2.07	5.52	445.05	79.63
81	0.00	-4.83	0.00	5.52	443.67	79.38
258	-4.83	0.00	0.69	4.83	442.29	90.57
280	-4.83	-3.45	0.69	4.83	440.91	90.29
294	-4.83	-0.69	1.38	4.83	442.98	90.71
196	-4.14	-4.83	0.69	4.83	442.98	90.71
295	0.69	-4.14	0.69	4.83	444.36	91.00
84	-4.83	-2.07	0.69	4.83	440.91	90.29
246	-0.69	-4.83	0.69	4.83	444.36	91.00

1. 截面位置如圖6.2.6-16。

2. 用427°C (800°F)之容許應力。

表 6.6.A-7 承載圓盤異常條件下之應力 P_m+P_b (MPa)

截面 ¹	Sx	Sy	Sxy	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
295	-8.97	-34.50	3.45	34.50	372.60	9.80
294	-15.18	-33.81	3.45	34.50	372.60	9.80
254	-33.12	-15.18	3.45	33.81	372.60	10.02
265	-31.74	-4.83	2.76	32.43	372.60	10.49
257	-30.36	-9.66	3.45	31.05	372.60	11.00
289	-15.87	-29.67	4.14	30.36	372.60	11.27
293	-13.11	-30.36	2.76	30.36	372.60	11.27
243	-29.67	-10.35	1.38	30.36	372.60	11.27
24	-29.67	-9.66	0.69	29.67	372.60	11.56
263	-28.29	-16.56	4.83	29.67	372.60	11.56
275	11.73	29.67	2.07	29.67	372.60	11.56
252	28.98	11.73	2.07	28.98	372.60	11.86
274	11.73	28.29	2.07	28.98	372.60	11.86
267	-11.04	-28.29	1.38	28.98	372.60	11.86
241	28.29	9.66	1.38	28.29	372.60	12.17
75	-11.73	-28.29	2.07	28.29	372.60	12.17
288	12.42	27.60	2.76	28.29	372.60	12.17
22	-28.29	-11.73	2.07	28.29	372.60	12.17
246	-27.60	-11.73	3.45	28.29	372.60	12.17
227	6.21	28.29	1.38	28.29	372.60	12.17
208	-11.04	-27.60	2.07	28.29	372.60	12.17
32	27.60	11.04	2.07	27.60	372.60	12.50
51	27.60	6.90	0.69	27.60	372.60	12.50
237	27.60	12.42	2.07	27.60	372.60	12.50
83	-11.04	-27.60	2.07	27.60	372.60	12.50
62	26.91	9.66	2.76	27.60	372.60	12.50
19	26.91	11.04	2.07	27.60	372.60	12.50
21	26.91	11.73	2.07	27.60	372.60	12.50
240	26.91	12.42	2.07	26.91	372.60	12.85
74	11.04	26.91	2.07	26.91	372.60	12.85
228	5.52	26.91	2.07	26.91	372.60	12.85
174	26.91	11.73	2.07	26.91	372.60	12.85
238	26.91	9.66	1.38	26.91	372.60	12.85
209	-9.66	-26.91	2.07	26.91	372.60	12.85
18	26.91	11.04	2.07	26.91	372.60	12.85
266	11.73	26.91	2.07	26.91	372.60	12.85
137	11.73	26.22	2.07	26.91	372.60	12.85
49	-26.22	-10.35	1.38	26.91	372.60	12.85
184	-26.22	-11.04	2.07	26.91	372.60	12.85
249	-26.22	-9.66	0.69	26.22	372.60	13.21

1. 截面位置如圖6.2.6-16。
2. 用 427°C (800°F)之容許應力。

表 6.6.A-8 承載圓盤異常條件下之應力 P_m+P_b+Q (MPa)

截面 ¹	Sx	Sy	Sxy	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
295	-18.63	-137.31	8.28	137.31	621.00	3.52
268	-64.17	-129.72	15.18	133.17	621.00	3.66
289	-45.54	-129.72	11.73	131.10	621.00	3.74
16	104.19	43.47	46.92	129.72	621.00	3.79
14	102.81	39.33	45.54	126.96	621.00	3.89
2	-2.76	122.82	0.00	125.58	621.00	3.95
1	-2.76	122.82	0.00	125.58	621.00	3.95
139	-60.03	-122.13	14.49	125.58	621.00	3.95
3	-1.38	122.13	0.00	123.51	621.00	4.03
4	-1.38	122.13	0.00	123.51	621.00	4.03
276	-42.78	-120.06	8.97	121.44	621.00	4.11
265	-118.68	-44.85	11.04	120.06	621.00	4.17
166	-8.97	-117.30	6.21	117.30	621.00	4.29
266	-66.93	-113.16	15.18	117.30	621.00	4.29
24	-108.33	-70.38	20.01	116.61	621.00	4.33
18	-110.40	-59.34	17.94	115.92	621.00	4.36
137	-66.24	-111.78	14.49	115.92	621.00	4.36
160	-37.95	-113.85	9.66	115.23	621.00	4.39
21	-110.40	-53.13	16.56	115.23	621.00	4.39
31	-109.02	-59.34	17.94	114.54	621.00	4.42
15	90.39	37.26	-43.47	114.54	621.00	4.42
300	-66.93	-104.88	20.01	113.16	621.00	4.49
263	-111.09	-44.85	10.35	112.47	621.00	4.52
34	-108.33	-51.75	16.56	112.47	621.00	4.52
147	-41.40	-111.09	8.28	111.78	621.00	4.56
269	-53.82	-108.33	13.11	111.09	621.00	4.59
274	-53.13	-108.33	13.11	111.09	621.00	4.59
13	87.63	33.12	-41.40	109.71	621.00	4.66
37	-100.74	-66.24	19.32	109.02	621.00	4.70
246	-107.64	-35.88	10.35	109.02	621.00	4.70
171	-62.10	-102.12	18.63	109.02	621.00	4.70
241	-106.95	-46.92	8.97	108.33	621.00	4.73
238	-104.88	-57.96	12.42	108.33	621.00	4.73
243	-106.26	-46.92	8.97	107.64	621.00	4.77
145	-52.44	-104.19	12.42	107.64	621.00	4.77
111	-103.50	-56.58	12.42	106.26	621.00	4.84
267	-63.48	-101.43	13.11	104.88	621.00	4.92
277	-25.53	-101.43	9.66	102.81	621.00	5.04
114	-100.74	-43.47	8.97	102.12	621.00	5.08
138	-62.79	-97.29	13.11	101.43	621.00	5.12

1. 截面位置如圖6.2.6-16。
2. 用 427°C (800°F)之容許應力。

表 6.6.A-9 燃料提籃鉚件盤之最大應力-異常狀況(MPa)

元件	應力類型	最大應力強度 ¹ MPa / (ksi)	r節點溫度 °C / (°F)	容許應力 ^{2,3} Mpa / (ksi)	安全餘裕
頂部鉚件	Pm + Pb	6.07/0.88	112/233	133.86/19.4	21.05
	Pm +Pb + Q	100.05/14.5	109/228	362.25/52.5	2.60
底部鉚件	Pm + Pb	10.35/1.5	129/265	155.25/22.5	14.00
	Pm +Pb + Q	321.54/46.6	95/203	414.00/60.0	0.29

1. 有限元素分析之節點應力。
2. 頂部鉚件 (Top Weldment) 容許應力保守以260°C (500°F) 評估，底部鉚件(Bottom Weldment) 容許應力保守以149°C (300°F) 。
3. Pm的容許應力保守以Pm+Pb評估。

附錄 6.6.B 意外壓力分析計算

分析項目包含密封鋼筒最大內壓及其造成之應力，分析如下：

最大內壓情況一

計算需求為：密封鋼筒之自由體積、填充及分裂氣體，以及隨後添加之氦氣(helium)壓力(初始為 1atm)，密封鋼筒最大內壓力決定於兩個情形，燃料棒 100 %破損及最大溫度意外情況。最大溫度意外包含火災及混凝土護箱通風口堵塞。

保守計算最大系統壓力是當燃料棒假設 100 %破損時，壓力為 326.37 KPa(47.3 psig)。

由內壓產生之最大鋼筒應力一

應力分析參考本章二、(六).2 節之 ANSYS 模型及分析結果，分析使用壓力 448.50 KPa (65 psig)可涵蓋上述之 326.37 KPa (47.3 psig)，則意外壓力造成之最大應力分析結果如表 6.6.B-1(Pm, primary membrane stress)及表 6.6.B-2 (Pm + Pb, primary membrane plus bending stress)。而結合正常吊運情況及最大意外內壓 448.50 KPa (65 psig)，其應力分析結果及安全餘度整理如表 6.6.B-3 及表 6.6.B-4。

以上表中含有 16 個截面應力(sectional stress)，此位置參考圖 6.2.6-13。

以本章三、(六)節所建立之熱流模型進行分析，並以設計熱負載 23 kW 評估貯存系統各組件狀況。各組件在異常周圍溫度下的溫度分析結果與容許溫度，整理如表 6.6.3-1 至 6.6.3-3，顯示各組件溫度變化皆在容許範圍內。

表 6.6.B-1 密封鋼筒意外內壓(448.50 KPa)主薄膜應力 P_m (MPa)

截面位置 (1)	角度 (度)	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度
1	0	3.04	43.68	17.11	-6.28	0.55	1.17	42.61
2	0	29.26	-28.43	-36.29	-6.21	0.62	-4.90	66.88
3	0	-5.31	12.56	-55.68	12.49	-1.10	-4.69	75.16
4	0	-0.07	11.66	23.60	0.00	0.00	2.07	24.06
5	0	-0.07	11.73	23.46	0.00	0.00	2.07	23.79
6	0	-0.07	11.73	23.46	0.00	0.00	2.07	23.79
7	0	-0.07	11.73	23.46	0.00	0.00	2.07	23.86
8	0	-0.07	11.73	11.94	-0.41	0.07	1.10	12.20
9	0	1.17	8.56	6.21	1.04	-0.14	0.48	7.79
10	0	-3.80	5.80	4.07	-1.04	0.00	0.62	9.86
11	60	3.38	-0.83	4.49	0.28	-0.48	-0.97	5.93
12	10	-2.00	-5.73	1.04	-1.86	0.35	0.55	7.65
13	0	-0.83	5.18	3.17	0.28	-0.21	0.35	6.14
14	0	6.56	-0.48	6.56	2.00	-5.04	0.00	12.89
15	0	-0.83	-0.21	-0.83	0.00	0.14	0.00	0.62
16	0	0.62	0.00	0.62	-0.07	0.14	0.00	0.69

(1) 應力截面定義詳見圖 6.2.6-13。

表 6.6.B-2 密封鋼筒意外內壓(448.50 KPa)主薄膜應力加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)

截面位置 (1)	角度(度)	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度
1	0	33.47	105.57	3.66	-0.41	0.62	-1.52	101.91
2	0	14.15	-203.34	-92.12	-14.21	1.04	-8.76	219.95
3	0	-21.25	284.21	19.67	15.80	-1.17	2.62	307.03
4	0	-0.14	11.32	23.81	0.00	0.00	2.07	24.27
5	0	-0.14	11.73	23.74	0.00	0.00	2.07	24.20
6	0	-0.14	11.73	23.74	0.00	0.00	2.07	24.20
7	0	-0.14	11.73	23.74	0.00	0.00	2.07	24.20
8	0	0.07	13.32	12.56	-0.41	0.07	1.17	13.38
9	0	1.24	18.42	9.11	2.62	-0.21	0.69	18.00
10	0	-2.90	22.08	9.18	0.76	0.00	0.97	25.10
11	80	-0.76	-12.49	3.93	0.21	-1.24	-0.83	16.75
12	80	-1.31	-10.42	-5.31	-0.55	3.04	0.76	10.69
13	0	-7.38	2.28	0.55	0.76	-0.35	0.62	9.86
14	170	151.04	5.93	151.04	1.86	-4.97	0.07	145.35
15	160	-10.07	-0.62	-10.07	0.00	0.14	0.00	9.45
16	180	5.66	0.21	5.73	-0.07	0.14	0.00	5.52

(1) 應力截面定義詳見圖 6.2.6-13。

表 6.6.B-3 密封鋼筒正常吊運加意外內壓(448.50 KPa)主薄膜應力 P_m (MPa)

截面位置 ⁽¹⁾	角度 (度)	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度	容許應力 ⁽²⁾	安全餘裕
1	0	3.80	56.10	21.94	-8.07	0.69	1.52	54.86	276.55	4.04
2	0	37.33	-36.43	-47.96	-8.07	0.76	-6.35	87.15	276.55	2.17
3	0	-6.69	16.22	-73.83	15.87	-1.38	-6.21	98.88	276.55	1.80
4	180	-0.07	15.18	23.67	0.00	0.00	-2.07	24.15	267.31	10.07
5	180	-0.07	15.04	23.46	0.00	0.00	-2.07	23.87	247.09	9.35
6	180	-0.07	14.70	23.46	0.00	-0.07	-2.07	23.87	245.99	9.30
7	180	-0.07	14.08	23.46	0.00	-0.07	-2.07	23.87	265.10	10.10
8	0	0.14	19.53	11.66	-0.41	0.55	1.04	19.60	276.55	13.11
9	0	1.31	18.70	8.69	1.31	0.90	0.69	17.73	276.55	14.60
10	0	-5.52	17.87	6.42	-0.48	1.52	1.04	23.74	276.55	10.65
11	0	0.83	5.73	7.87	-3.17	0.76	0.69	8.97	276.55	29.83
12	90	0.28	-9.32	-2.21	-1.24	2.69	0.69	10.90	276.55	24.37
13	0	0.97	2.90	9.87	-3.59	0.00	1.52	12.01	276.55	22.03
14	0	8.42	-0.41	8.42	2.55	-6.62	0.00	16.70	276.55	15.56
15	0	-0.90	-0.21	-0.90	0.00	0.14	0.00	0.69	276.55	399.80
16	0	0.76	0.00	0.76	-0.07	0.07	0.00	0.76	276.55	363.36

⁽¹⁾ 應力截面定義詳見圖 6.2.6-13。

⁽²⁾ 材料容許應力參考 ASME Service Level D。

表 6.6.B-4 密封鋼筒正常吊運加意外內壓(448.50 KPa)主薄膜應力加彎曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)

截面位置 (1)	角度 (度)	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度	容許應力 ⁽²⁾	安全餘裕
1	0	42.57	135.72	3.31	-0.55	0.76	-2.00	132.55	414.83	2.13
2	0	18.08	-261.23	-119.65	-18.42	1.31	-11.39	282.62	414.83	0.47
3	0	-27.12	366.53	23.39	20.08	-1.52	3.17	395.85	414.83	0.05
4	180	-0.21	14.84	24.29	0.07	0.00	-2.14	24.84	401.03	15.14
5	180	-0.21	15.39	24.63	0.00	-0.07	-2.21	25.19	370.60	13.72
6	180	-0.21	15.18	24.98	0.00	-0.07	-2.21	25.53	369.01	13.45
7	180	-0.14	14.56	24.77	0.00	0.00	-2.14	25.32	397.65	14.70
8	0	0.28	20.98	11.52	-0.41	0.41	1.04	20.84	414.83	18.91
9	0	0.83	29.88	11.45	2.62	1.24	0.69	29.60	414.83	13.01
10	0	-3.86	29.53	10.01	0.76	1.93	1.04	33.74	414.83	11.29
11	0	-0.21	18.22	11.45	-6.69	1.24	0.97	23.05	414.83	17.00
12	90	-2.00	-15.04	-4.69	-1.59	3.86	0.83	14.77	414.83	27.09
13	0	0.21	9.18	9.11	-6.42	0.90	0.69	15.80	414.83	25.25
14	180	197.13	8.07	197.13	2.48	-6.56	0.07	189.54	414.83	1.19
15	0	-10.90	-0.69	-10.90	0.00	0.14	0.00	10.21	414.83	39.62
16	100	4.42	0.14	4.42	-0.07	0.07	-0.14	4.42	414.83	92.94

(1) 應力截面定義詳見圖 6.2.6-13。

(2) 材料容許應力參考 ASME Service Level D。

附錄 6.6.C 混凝土護箱於 61 cm 高度墜落分析計算

假設衝擊發生在垂直於混凝土護箱底部表面，力量向上傳遞至混凝土護箱及密封鋼筒，保守假設衝擊時之密封鋼筒表面勁度為無限大，所以護箱墜落時的能量將由混凝土護箱吸收。該能量則為混凝土護箱的撞擊力與其位移的乘積，並且撞擊後的混凝土護箱持續於撞擊部分破碎，直到所有護箱墜落能量被完全吸收為止。所以混凝土護箱將因吸收衝擊能量而部分破壞，造成混凝土護箱進氣口變形。

當混凝土護箱從 61 cm 高度掉落時，經評估其最大加速度 57.4 g，小於其設計之容許負載(60 g)；這意外事件並不會降低混凝土護箱的屏蔽功能，只造成混凝土護箱基座處產生約 2.54 cm(1 in)的變形量，各組件之應力值皆在容許範圍內。護箱墜落造成混凝土護箱基座變形而減少進氣口面積與冷卻空氣的流通量，但因進氣口變形量不大，故此情況仍可被進氣口半堵塞分析所涵蓋，分析詳見本章六、(二).2 節。

61 cm 高度墜落事件，對混凝土護箱變形分析、密封鋼筒加速度、應力、挫屈分析、燃料提籃應力分析、繫桿應力分析、繫桿間隔環應力分析及燃料管應力分析詳述如下。

A. 混凝土護箱變形分析[41]

於 61 cm 高度墜落事件中，混凝土護箱的混凝土環狀壁體與鋼構底板相接，分析中假設底板為剛性，並且混凝土基座及其下方之土壤不吸收能量，因此墜落衝擊產生的能量皆由混凝土護箱環狀壁體所吸收，假設墜落時混凝土應力達到其抗壓強度時即破裂，並且於墜落中持續破裂到掉落高度之潛在能量全部被吸收，分析時保守忽略混凝土破裂時內部骨材摩擦吸收的能量。另外，因密封鋼筒與混凝土護箱非直接連結，故在分析混凝土護箱變形時，假設密封鋼筒不吸收能量。分析應用之能量平衡方程式如下：

$$w(h + \delta) = P_o A \delta$$

其中：

$$h = 61 \text{ cm}(24 \text{ in}), \text{ 墜落高度,}$$

δ = 混凝土護箱破裂深度，

P_o = 4,000 psi(280 kg/cm²)，混凝土抗壓強度，

A = $\pi(R_1^2 - R_2^2) = 7,904 \text{ in}^2$ (50,993 cm²)，混凝土環狀壁體垂直
投射面積，

w = 190,000 lb(86,070 kg)(包括混凝土及鋼筋)

由平衡方程式計算出混凝土護箱破裂深度：

$$\delta = \frac{hw}{P_o A - w} = \frac{(24)(190,010)}{(4000)(7,904) - (190,010)} = 0.145 \text{ inch} (0.37 \text{ cm})$$

得混凝土護箱破裂深度，亦即為進氣口的變形為 0.145in (0.37 cm)。

B. 密封鋼筒加速度分析

密封鋼筒在墜落時於混凝土護箱底座上方產生一作用力量。在此作用力衝擊下，預期會造成混凝土護箱基座進氣口上方之破鋼材料降伏。分析中以 LS-DYNA 程式計算密封鋼筒受此作用力產生之加速度及底座的變形量。底座鉸件如圖 6.6.C-1。

以 ANSYS 程式建立半對稱之混凝土護箱基座模型，如圖 6.6.C-2，模型為 8 節點 SOLID 元素及 4 節點 SHELL 元素所組成，模型中 X-Z 平面為對稱平面。保守假設密封鋼筒的衝擊面是剛性平面，故忽略其吸收之能量，並使用 LS-DYNA 程式分析密封鋼筒的最大加速度及混凝土護箱基座鉸件的變形量。

分析模式中，以 LS-DYNA 的線段連續塑性(piece-wise linear plasticity)模組，定義混凝土護箱基座中鉸接環、鉸接板及內部錐形物的材料性質，如圖 6.6.C-3。這模組可同時使用相對於各種不同應變率的材料應力-應變曲線，該應力-應變曲線由參考文獻[7]得知。為了要確保所決定的變形及加速度是最大值，需執行二個模擬分析：一個使

用靜態應力-應變曲線以涵蓋混凝土護箱底座的最大變形，另一個則利用多種應力-應變曲線來作不同材料應變率的計算。

密封鋼筒從 61 cm 高度墜落時底部衝擊最大加速度分別為 45.0 g(多種應變速率)及 44.5 g(靜態應變速率)。圖 6.6.C-4 與 6.6.C-5 中顯示，在率波頻率為 200 Hz 時，相對於材料靜態應變率與多種應變速率的應力-應變曲線的加速度分別為 44.5 g 與 45.0 g。

LS-DYNA 採用之濾波頻率，是由執行二個 1/4 對稱的底板鉸件模型分析後決定。這兩個分析模式之邊界條件為對稱平面，其中第二項分析考量於底板中心點有一垂直方向的束制條件，分析結果得自然頻率分別為 173 Hz 及 188 Hz，故選用濾波頻率為 200 Hz。

LS-DYNA 的分析結果，鉸接底板的最大變形量為 2.54 cm(1 in)，遠小於 30.5 cm(12 in)的進氣口高度，所以墜落事故不會造成進氣口堵塞。

密封鋼筒及提籃對衝擊的動態響應，可經由系統中許多撓曲元件而放大，在密封鋼筒與燃料提籃中，燃料提籃的承載圓盤則足以說明這種響應。為了計算承載圓盤的暫態反應，必須計算承載圓盤的動態負載因子(dynamic load factor, DLF)，該動態負載因子是承載圓盤因密封鋼筒底部撞擊時所造成的承載圓盤慣性力。使用 1/4 對稱的燃料提籃承載圓盤模型模擬以決定 DLF 值，其 ANSYS 模型如圖 6.6.C-6。

分析模型中為了支撐承載圓盤，於燃料提籃上的每一繫桿(tie-rod)位置上放置一垂直方向的拘束條件，以允許加速度作用在繫桿上時，承載圓盤可自由地振盪。使用 LS-DYNA 計算加速度歷時後，再用 ANSYS 執行暫態分析。該加速度歷時為相對應於不同應變率的應力-應變曲線，由於本分析使用相依於材料應變率的應力-應變曲線，故分析中已可涵蓋墜落事故中所產生之最大加速度。

DLF 值為最大承載圓盤的位移量(發生於圓盤中心)除以靜態分析的最大位移(靜態分析利用 LS-DYNA 計算所得最大的加速度)，得 DLF 值為 1.29。

因此 DLF 乘上加速度得有效加速度為 57.4 g，但是在護箱 61 cm 墜落時的密封鋼筒及承載圓盤的應力分析時，則以 60 g 的加速度保守涵蓋 57.4 g 的計算加速度。這個分析用的加速度值已考慮混凝土護箱基座在不同應變速率影響下的塑性行為，並且考慮衝擊平面無任何能量吸收。

C. 密封鋼筒應力分析

使用 60 g 的負載以分析混凝土護箱從 61 cm 高度掉落時的密封鋼筒應力值，此 60 g 的負載已可涵蓋護箱 61 cm 高度掉落時的計算加速度 57.4 g。其 ANSYS 有限元素模型如圖 6.6.C-7，模型架構及細部描述詳見本章二、(六).2.(1)節，應力評估包含有內壓力 15 psig 及無內壓之分析。

密封鋼筒主要組件有鋼筒外殼、底板、燃料提籃、屏蔽上蓋與結構上蓋等組件。其中鋼筒組件的外殼、底板及結構上蓋之設計必須滿足 ASME Code, Section III, Subsection NB 應力強度之限制。

密封鋼筒 60 g 底部衝擊之分析結果詳表 6.6.C-1 到 6.6.C-5，表中相對於密封鋼筒之截面位置如圖 6.6.C-8。分析結果為包含施加內部壓力 15 psig 之狀況，因此會有較小的容許安全餘裕。

表 6.6.C-1~2 及 6.6.C-4~5 中的安全餘裕，表示圖 6.6.C-8 中各應力截面位置在其各個圓周角度的最小安全餘裕。在圖 6.6.C-8 中，各圓周方向的網格截面相隔 9°。

密封鋼筒之結構上蓋鉸道(圖 6.6.C-8，截面 13)之分析中，採用密封鋼筒金屬母材之容許應力值為依據，因為金屬鉸材的抗拉強度大於鋼筒母材，並根據 NRC ISG-15 之規定，將截面 13 之鉸道處的容許應力值乘以 0.8 折減因子。鉸道處的分析結果列表於表 6.6.C-1 至 2 與表 6.6.C-4 至 5，分析結果顯示鉸道應力值，均符合 ASME Code 要求。

在表 6.6.C-1 至 2 與表 6.6.C-4 至 5 中的容許應力值為 Type 304L 的容許應力值。但在屏蔽上蓋中的材料為 Type 304，其容許應力值稍高於 Type 304L，故使用 Type 304L 的容許應力值評估是為保守。

D. 密封鋼筒挫屈分析

應用 ASME B&PV Code Case N-284-1 分析密封鋼筒受 60 g 的底板衝擊時，能滿足 RG 7.6 C.5 對挫屈分析之要求。

影響圓柱壁體(具內壓力)挫屈的應力包含軸向薄膜應力、圓周方向薄膜應力及平面剪應力，這些應力視負載情況可能單獨或同時存在。挫屈分析時保守忽略鋼筒內部 15 psig 壓力，如此可造成比較小的安全餘裕，鋼筒無內壓時的底部撞擊的薄膜應力值，列表於表 6.6.C-4，薄膜加彎曲應力結果列表於表 6.6.C-5。60 g 底部衝擊挫屈分析結果詳見表 6.6.C-7。

由 ANSYS 應力分析結果，對每一種負載組合取 60g 的底板衝擊對軸向薄膜應力、圓周方向薄膜應力及平面剪應力之最大值，並計算其合力。分析中使用最大應力分量，其最終挫屈反應方程式比值之分析結果如表 6.6.C-7，結果顯示比值都小於 1.0，故滿足 Code Case N-284-1 的挫屈驗證要求，証明密封鋼筒在 61 cm 護箱墜落事故時不會發生挫屈行為。

E. 燃料提籃應力分析[37]

承載圓盤及鉸件(Weldment)之應力分析，使用與本章二、(六).3 節相同之 ANSYS 模型，以評估 60 g 負載垂直作用於承載圓盤及鉸件之受力狀況，承載圓盤的應力分佈截面位置如圖 6.2.6-16。承載圓盤及鉸件應力評估，依據 ASME Code, Section III, Subsection NG, Level D 之容許應力，其薄膜應力 P_m 及薄膜應力加彎曲應力 P_m+P_b 所對應的容許應力值分別為 $0.7S_u$ 及 S_u 。分析結果如表 6.6.C-6。表中列出前 40

大的主薄膜應力加彎曲應力，其中最小的安全餘裕為 0.6；另外鐸件的應力分析結果詳如表 6.6.C-3，頂部鐸件及底部鐸件的最小安全餘裕分別為 0.88 及 0.26，注意承載圓盤及鐸件主薄膜應力值都是 0，因為當衝擊時沒有負載作用於承載圓盤及鐸件平面上。

F. 繫桿應力分析

繫桿功能為固定燃料提籃，分析時並不是負載路徑，組裝燃料提籃時繫桿經由桿端螺帽施加 50±10 ft-lb 之扭矩，作用於繫桿之預載張力 P_B 為[8]：

$$T = P_B(0.159L + 1.156\mu d)$$

其中：

$$T = 60 \text{ ft-lb}$$

$$L = 1/8$$

$$\mu = 0.15$$

$$d = 1.625 \text{ in}$$

得 P_B 值：

$$P_B = 2,387 \text{ lb/rod}$$

繫桿最大張應力發生於燃料提籃放入密封鋼筒時，每根繫桿之荷重為：

$$P = 2,387 + \frac{1.1 \times 17,551}{6} = 5,605 \text{ lb.} \quad \text{分析時使用 6000 lb.}$$

其中燃料提籃重量為 17,551 lb(7,951 kg)

室溫下(21°C(70°F))最大張應力為：

$$S = \frac{6,000}{\pi \times 0.25 \times 1.625^2} = 2,893 \text{ psi}$$

安全餘裕為：

$$MS = \frac{20,000}{2,893} - 1 = 5.91$$

因為繫桿於意外掉落時並無荷重，故無須另行分析。

G. 繫桿間隔環應力分析

燃料提籃的承載圓盤及導熱圓盤使用繫桿及間隔環組成，由 ASME SA312 Type 304 不銹鋼製成的間隔環(spacer)總截面積為 4.03 in²(26.0 cm²)，分隔間隔環(split spacer)截面積為 2.45 in²(15.8 cm²)。

間隔環：

外徑=2.875 in

內徑=1.771 in

分隔間隔環：

外徑=2.5 in (切削加工外徑)

內徑=1.771 in

外徑=2.875 in

當護箱從 61 cm 高度掉落時，重量包括承載圓盤、頂部鉚件、導熱圓盤及端點螺帽都是由間隔環支撐，分析時將 60 g 作用在間隔環上，而最大負載發生在底部鉚件上的間隔環上，分隔間隔環之最大負載發生在燃料提籃底部以上的第 10 片承載圓盤上。

作用於底部鉚件上間隔環之負載為 126,000 lb(57,078 kg)：

$$P = 60(P_s) + P_T = 125,147 \text{ lb. 分析用 } 126,000 \text{ lb}$$

其中：

$$P_T = 2,387 \text{ lb}(1,081 \text{ kg, 預加扭力負載})$$

$P_s = 2,046 \text{ lb}(927 \text{ kg, 在間隔環上方之提籃結構對間隔環造成的負載})$

$$P_s = \frac{17,551 - 623 - 4651}{6} = 2,046 \text{ lb (927 kg)}$$

其中：

17,551 lb (7,951 kg) 燃料提籃重

623 lb (282 kg) 底部鉚件重

4,651 lb(2,107 kg) 燃料管重

分隔間隔環之負載為 102,000 lb(46,206 kg)：

$$P = 60(P_S) + P_T = 101,747 \text{ lb. 分析時使用 } 102,000 \text{ lbs.}$$

其中：

$P_T = 2,387 \text{ lb(1,081 kg)}$ ，預加扭力負載)

$P_s = 1,656 \text{ lb(750 kg)}$ ，在間隔環上方之提籃結構對間隔環造成的負載)

$$P_s = \frac{17,551 - 623 - 4,651 - 10 \times 204 - 60 \times 5}{6} = 1,656 \text{ lb}$$

17,551 lb (7,951 kg) 燃料提籃重

623 lb (282 kg) 底部鉚件重

4,651lb(2,107 kg) 燃料管重

204lb(92.4 kg) 承載圓盤重(數量 10 個)

5lb(2.3 kg) 間隔環重(數量 60 個)

間隔環之安全餘裕整理如下：

負載 Kg(lb)	截面積 mm ² (in ²)	應力 Mpa (psi)	溫度 °C (°F)	容許應力 Mpa (psi)	安全餘裕 MS
間隔環					
57152 (126,000)	2600 (4.03)	215.74 (31,266)	121 (250)	330.86 (47,950)	0.53
分隔間隔環					
46266 (102,000)	1581 (2.45)	287.27 (41,633)	177 (350)	314.92 (45,640)	0.10

分析所採用的溫度，足以保守涵蓋所有貯存狀態下分析位置的實際溫度。因為貯存時底部銲件的間隔環溫度為 56.1 °C (133.0 °F) (底部銲件邊緣溫度)，分隔間隔環溫度為 121.7 °C (251.1 °F) (底部以上第 10 片承載圓盤的邊緣溫度)。雖然間隔環、分隔間隔環與承載圓盤的邊緣相鄰，但間隔環、分隔間隔環中心與承載圓盤的邊緣約有 6 cm 的距離，故以 121 °C 與 177 °C 的材料強度計算間隔環與分隔間隔環的安全餘裕。分析結果顯示二者在混凝土護箱 61 cm 垂直墜落時，皆有正向安全餘裕。

H. 燃料管應力分析[36]

當混凝土護箱從 61 cm 高度掉落時，燃料束是由密封鋼筒之底板所支撐，燃料管沒有支撐燃料束的重量，因此燃料管的分析只考慮燃料管自重、密封鋼筒的減速度及燃料管最小截面積，最小截面積位在燃料管與底部銲件的接觸面上，最小截面積計算如下：

$$A = (\text{厚度}) \times (\text{平均周長})$$

$$A = (0.048 \text{ in.}) \times (8.80 \text{ in.} + 0.048 \text{ in.}) \times (4) = 1.69 \text{ in}^2 (10.9 \text{ cm}^2)$$

燃料管最大受壓及承載應力：

$$S_b = \frac{(60g)(153 \text{ lbs})}{1.69 \text{ in}^2} = 5,432 \text{ psi } (15,875 \text{ kg/cm}^2)$$

Type 304 不銹鋼為 750 °F(399 °C)之降伏應力為 17,300 psi(1,211 kg/cm²)，安全餘裕為：

$$MS = \frac{S_y}{S_b} - 1 = \frac{17,300 \text{ psi}}{5,432 \text{ psi}} - 1 = + 2.18 \quad \text{於 } 750^\circ\text{F}(399^\circ\text{C})$$

I. 外加屏蔽吊裝時掉落意外事故評估

在核一廠用過核燃料乾式貯存的操作過程中，當密封鋼筒已填裝用過燃料，並連同混凝土護箱安置於場址混凝土基座之特定位置後，必須安裝外加屏蔽於混凝土護箱外圍，以強化設施的屏蔽功能。

本評估的目的即在於評估外加屏蔽於混凝土護箱垂直上方吊運時，若不慎掉落對於混凝土護箱的可能衝擊。

評估結果顯示，外加屏蔽吊裝時墜落對於混凝土護箱的衝擊，可以由颱風及颱風拋射物對混凝土護箱的撞擊分析中予以涵蓋，無需執行額外的分析工作。

評估方法乃依 RG1.76 [3]及 NUREG-0800 對颱風及其拋射物對核電廠相關設備的撞擊分析方式，分析外加屏蔽吊運時掉落對混凝土護箱的衝擊。在 NUREG-0800 中規範颱風拋射物對設施的影響中，考量重量 4,000 lb、280 lb 及 0.15 lb 三者以時速 126 mph 的情況下對設施的撞擊評估；分析結果顯示，此類撞擊皆不致造成設施內密封鋼筒或用過核子燃料之損壞。其中 4,000 lb 及 0.15 lb 二者分別是考慮撞擊時設施(指混凝土護箱，不含外加屏蔽)是否傾倒及通風口處是否遭拋射物穿透的狀況評估；而直徑為 8 in 的 280 lb 圓殼物體撞擊則是考慮拋射物撞擊時對設施的破損分析。故 280 lb 直徑 8 in 圓殼物體以 126 mph

時速，對於乾式貯存混凝土護箱的頂部衝擊評估結果，將用以比對外加屏蔽吊運時掉落撞擊混凝土護箱的評估。

重量 280 lb，直徑 8 in 的圓殼物體以 126 mph 速度運動時，其動能約為 6.89×10^8 lb-in。而最大的外加屏蔽重量約為 53,353 lb，其在 33.4 in (0.85 m) 高度自由落體墜落時，其動能可達與 280 lb 速度為 126 mph 運動物體的動能。故若外加屏蔽吊運高度限制在混凝土護箱上方 33.4 in (0.85 m) 以下時，可滿足低於法規颱風拋射物對設施衝擊的動能。

在颱風及拋射物分析中，已分析混凝土護箱頂蓋可承受 UNREG-0800 所規範之 280 lb 的拋射物撞擊，其撞擊面積為 8 in 直徑面積 (50.27 in^2)，而在外加屏蔽吊裝墜落時的撞擊面積應遠大於 8 in 直徑面積，故單位面積的撞擊力應小於 280 lb 拋射物撞擊的意外狀況。另外，評估中只估算混凝土護箱鋼質頂蓋承擔外加屏蔽墜落時的能量，但在實際情況中的外加屏蔽墜落能量是由混凝土護箱鋼質頂蓋及混凝土護箱之頂部混凝土結構共同承擔，故評估之情況應已保守涵蓋實際外加屏蔽墜落撞擊混凝土護箱鋼質頂蓋的能量，亦即在外加屏蔽墜落時，混凝土護箱及其頂蓋安全無虞。

外加屏蔽吊運時，將採行政措施限制其吊運高度不可高於混凝土護箱上空 33.4 in (0.85 m) 高度，並且吊運時，應避免底座外加屏蔽外緣尖角處行經混凝土護箱頂蓋上方，以排除墜落時外加屏蔽尖角處撞擊混凝土護箱頂蓋的顧慮。上述行政措施將納入外加屏蔽吊運操作程序中。

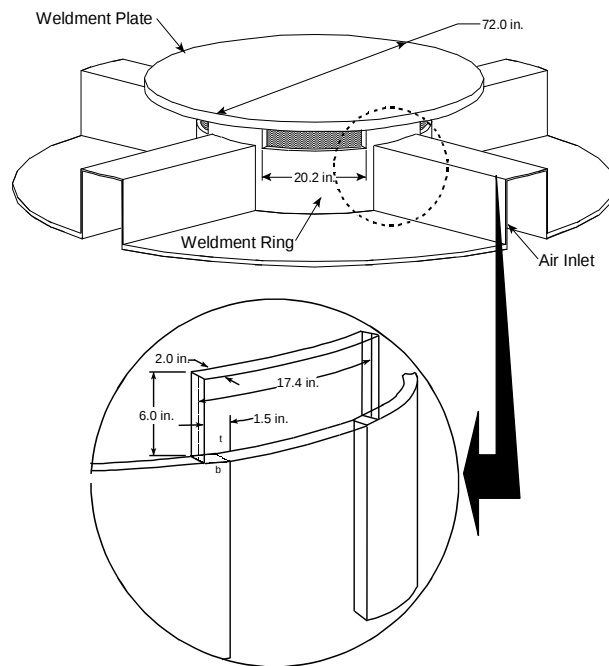


圖 6.6.C-1 混凝土護箱底座

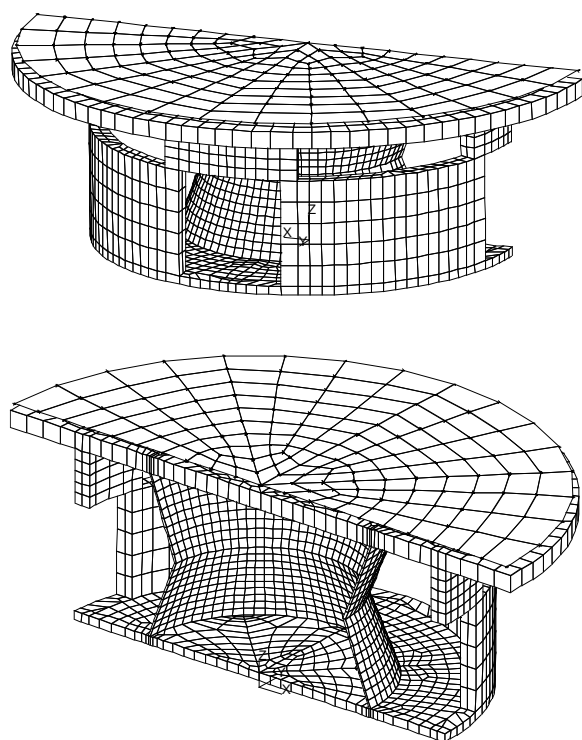


圖 6.6.C-2 混凝土護箱底座有限元素模型

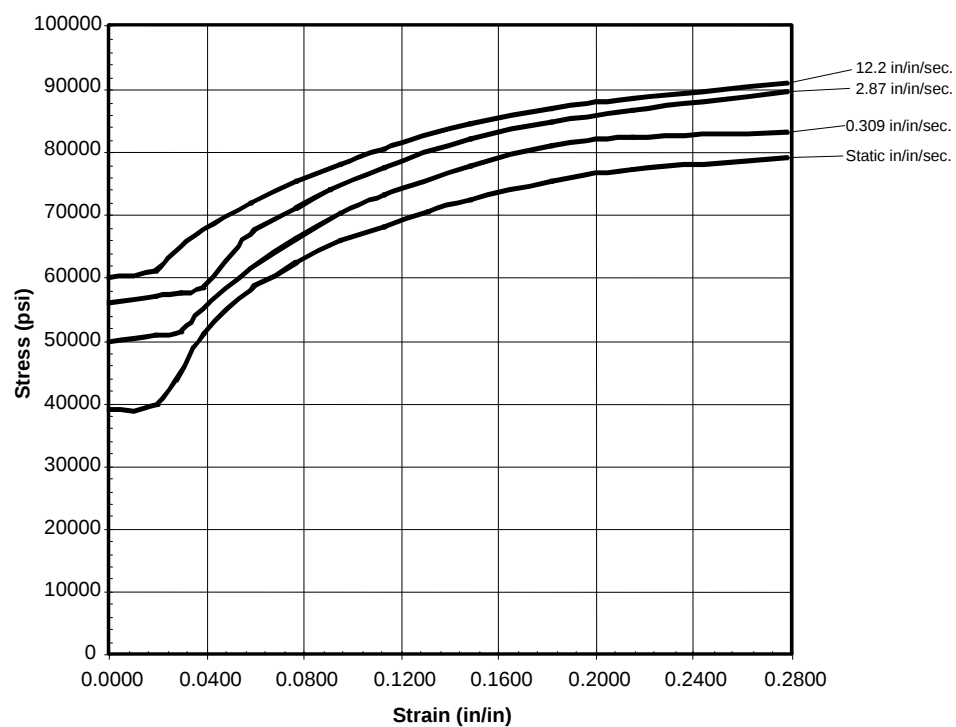


圖 6.6.C-3 混凝土護箱底座在不同應變率下之應力-應變曲線圖

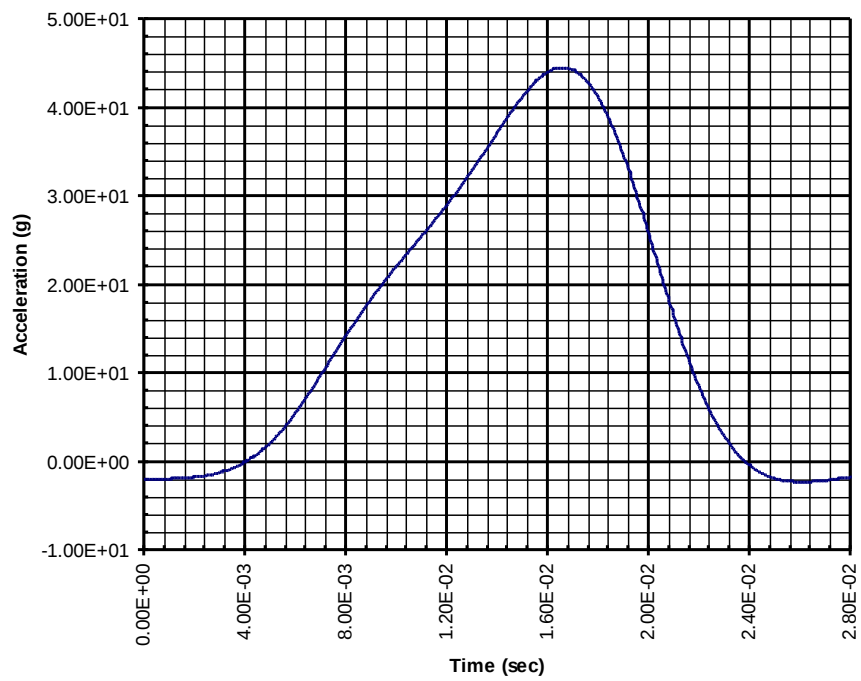


圖 6.6.C-4 混凝土護箱 61 cm 墜落意外時密封鋼筒底部加速度歷程(材料具靜態應變率性質)

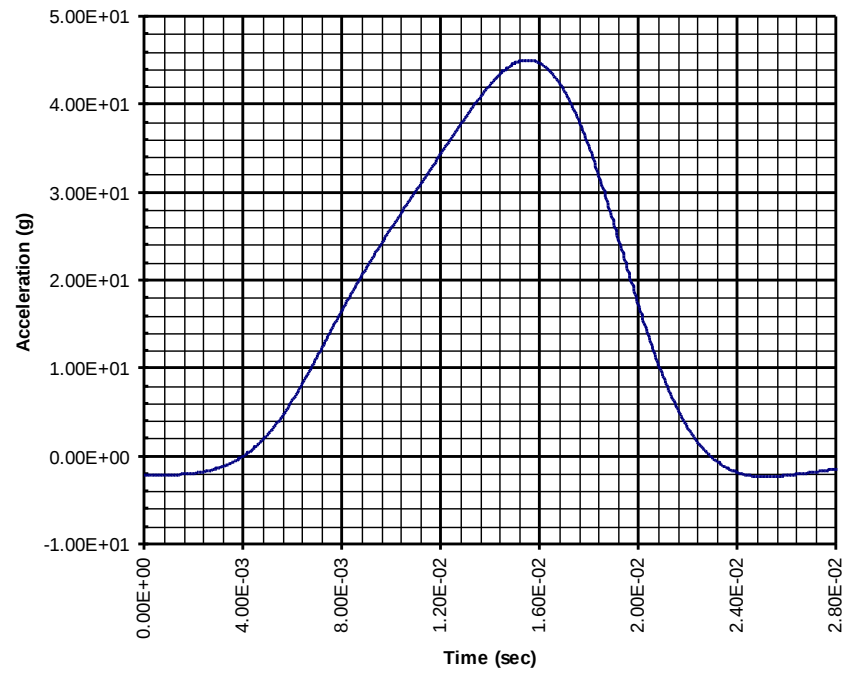


圖 6.6.C-5 混凝土護箱 61 cm 墜落意外時密封鋼筒底部加速度歷程(材料具動態應變率性質)

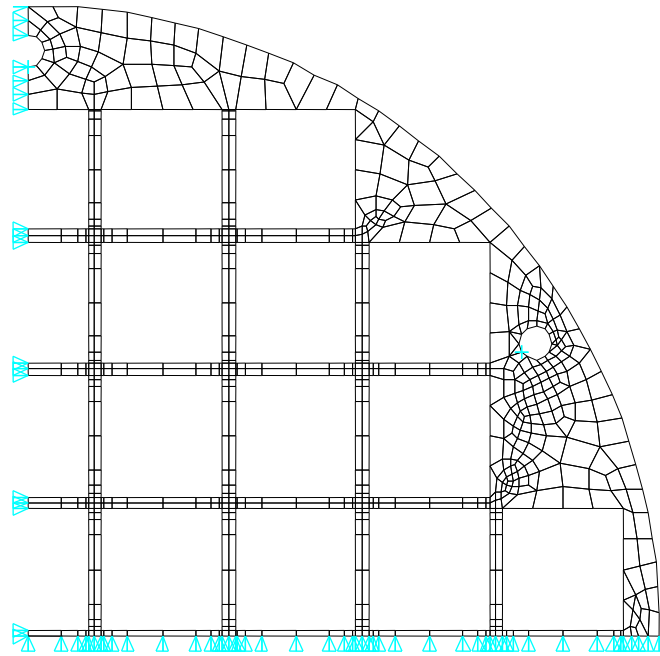


圖 6.6.C-6 燃料提籃承載圓盤之 1/4 模型

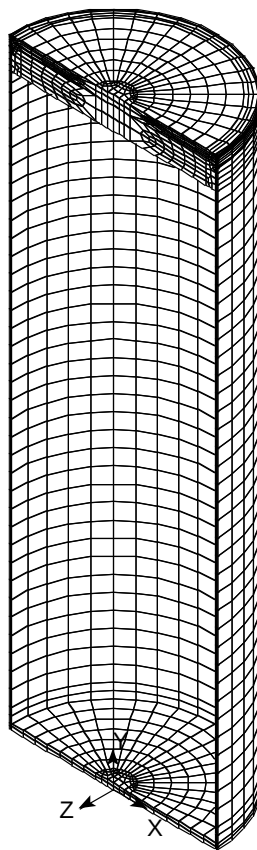


圖 6.6.C-7 60 g 底部撞擊分析之密封鋼筒模型

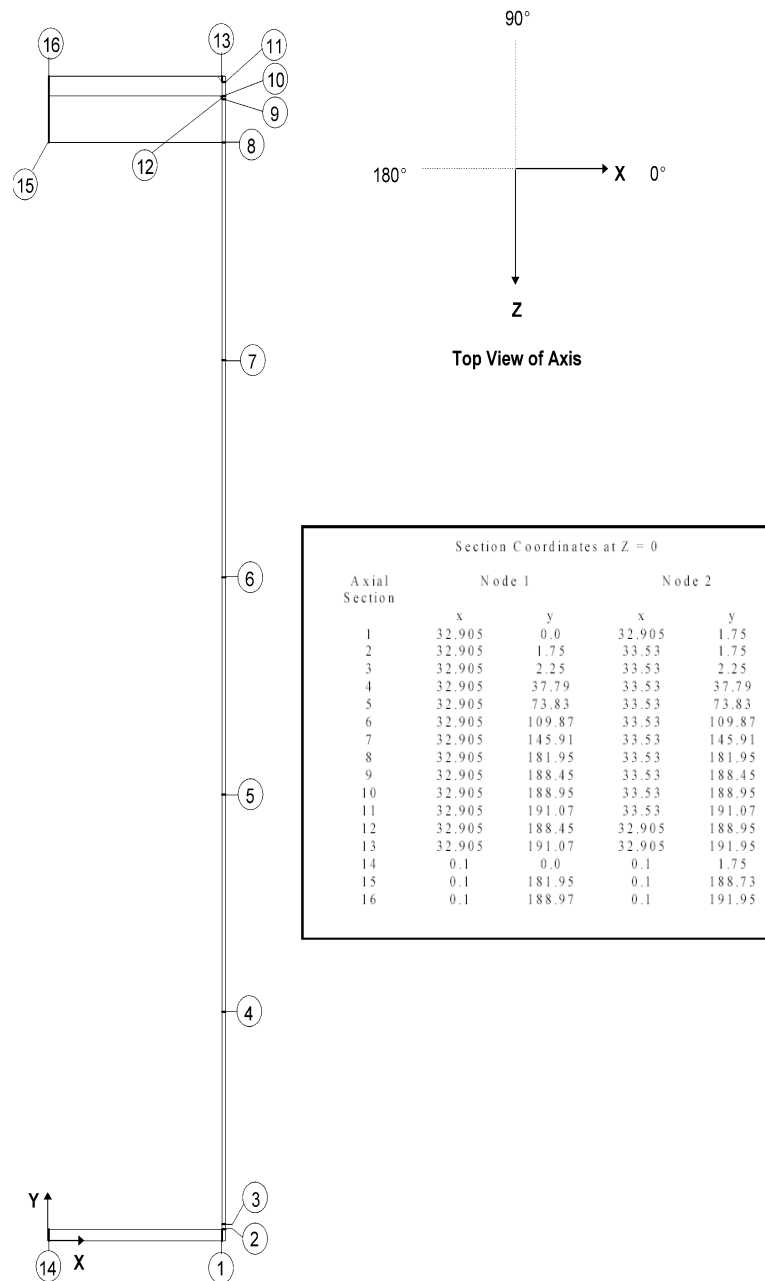


圖 6.6.C-8 60 g 底部撞擊之密封鋼筒應力評估的密封鋼筒截面

表 6.6.C-1 60 g 底部撞擊(103.5 KPa (15 psig)內壓)密封鋼筒主薄膜應力 Pm (MPa)

截面 位置 ¹	角度 (度)	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度	容許應力 ^{2,3}	安全 餘裕
1	0	-0.07	-3.24	-20.15	0.28	-0.35	-2.35	20.63	276.55	12.4
2	0	5.45	-7.59	-42.71	1.04	-0.28	-2.21	48.44	276.55	4.71
3	0	-1.24	-9.59	-49.47	0.76	0.07	1.10	48.37	276.55	4.72
4	0	0.00	5.45	-45.68	-0.48	0.00	0.00	51.20	276.55	4.40
5	0	0.00	5.38	-41.81	-0.48	0.00	0.00	47.27	276.55	4.85
6	0	0.00	5.38	-37.88	-0.48	0.00	0.00	43.33	276.55	5.38
7	0	0.00	5.38	-34.02	-0.48	0.00	0.00	39.47	276.55	6.01
8	0	0.62	5.80	-26.77	-0.48	0.14	0.55	32.64	276.55	7.47
9	60	-5.11	-13.80	-13.59	0.00	0.00	-3.17	10.56	276.55	25.2
10	0	10.49	-7.94	-8.83	1.38	-0.07	1.10	19.60	276.55	13.13
11	0	-11.59	-6.00	3.38	-0.21	-0.28	-2.14	15.59	276.55	16.70
12	0	4.83	-3.66	10.97	0.83	-0.28	2.69	15.80	276.55	16.51
13	0	2.76	-6.90	-12.35	0.90	-0.55	-1.52	15.53	276.55	16.78
14	0	0.76	0.76	-7.18	0.00	0.00	0.00	7.94	276.55	33.97
15	0	1.86	1.86	-0.28	0.00	0.28	0.07	2.28	276.55	119.94
16	100	-1.31	-1.31	-0.28	0.00	0.21	0.07	1.17	276.55	239.72

1. 截面位置定義如圖6.6.C-8。
2. 材料容許應力參考ASME Code Service Level D。
3. 容許應力包含0.8之折減因子。

表 6.6.C-2 60 g 底部撞擊(103.5 KPa(15 psig)內壓)密封鋼筒主薄膜應力加彎曲應力
Pm + Pb (MPa)

截面 位置 ¹	角度 (度)	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度	容許應力 ^{2,3}	安全 餘裕
1	0	4.97	-1.73	-21.53	0.55	-0.48	-2.83	27.19	414.83	14.26
2	0	3.04	-13.66	-61.34	1.38	-0.07	-1.45	64.52	414.83	5.43
3	0	-0.55	-11.39	-56.72	0.97	0.14	1.38	56.30	414.83	6.37
4	0	-0.07	5.52	-45.75	-0.48	0.00	0.00	51.27	414.83	7.09
5	0	0.00	5.45	-41.81	-0.48	0.00	0.00	47.33	414.83	7.77
6	0	0.00	5.45	-37.88	-0.48	0.00	0.00	43.40	414.83	8.56
7	0	-0.07	5.45	-33.95	-0.48	0.00	0.00	39.47	414.83	9.50
8	0	1.66	4.07	-33.81	-0.28	0.21	1.04	37.95	414.83	9.93
9	80	-3.52	-18.98	-32.91	0.00	0.00	-5.52	31.40	414.83	12.22
10	80	5.93	-18.01	-38.30	0.00	0.00	-2.83	44.57	414.83	8.30
11	0	-9.11	2.90	30.91	-0.76	-0.28	-3.24	40.57	414.83	9.22
12	0	17.18	2.42	19.32	1.10	-0.07	5.93	22.01	414.83	17.85
13	0	19.11	-0.62	-5.80	1.59	-0.83	-2.21	25.46	414.83	15.28
14	0	0.76	0.76	-7.18	0.00	0.00	0.00	7.94	414.83	51.41
15	180	25.32	25.32	0.41	0.00	0.28	0.07	24.91	414.83	15.66
16	180	-13.04	-13.04	-0.55	0.00	0.21	0.07	12.56	414.83	32.05

1. 截面位置定義如圖6.6.C-8。
2. 材料容許應力參考ASME Code Service Level D。
3. 容許應力包含0.8之折減因子。

表 6.6.C-3 60 g 底部撞擊時提籃鉸件之最大應力

元件	應力類型	最大應力強度 ¹ (Mpa)	容許應力 ² (Mpa)	安全餘裕
頂部鉸件	$P_m + P_b$	235.29	441.60	0.88
底部鉸件	$P_m + P_b$	358.11	449.88	0.26

1. 有限元素分析之節點應力。
2. 容許應力保守取鉸件之最高溫時值。

表 6.6.C-4 60 g 底部撞擊(無 103.5 KPa (15 psig)內壓)密封鋼筒主薄膜應力 P_m (MPa)

截面位置 ¹	角度(度)	S_x	S_y	S_z	S_{xy}	S_{yz}	S_{xz}	應力強度	容許應力 ^{2,3}	安全餘裕
1	0	-0.28	-3.86	-21.80	0.35	-0.35	-2.42	22.08	276.55	11.51
2	0	4.97	-8.21	-44.02	1.04	-0.28	-2.35	49.34	276.55	4.61
3	0	-1.10	-10.70	-52.23	0.90	0.07	0.69	51.20	276.55	4.40
4	0	0.00	0.00	-48.44	0.00	0.00	0.00	48.44	276.55	4.71
5	0	0.00	0.00	-44.51	0.00	0.00	0.00	44.51	276.55	5.21
6	0	0.00	0.00	-40.57	0.00	0.00	0.00	40.64	276.55	5.81
7	0	0.00	0.00	-36.71	0.00	0.00	0.00	36.71	276.55	6.54
8	0	0.76	2.42	-29.05	-0.14	0.14	0.69	31.53	276.55	7.77
9	60	-5.66	-14.97	-14.42	0.00	0.00	-3.52	11.25	276.55	23.60
10	0	11.66	-8.56	-9.32	1.52	-0.07	1.10	21.25	276.55	12.02
11	0	-12.63	-6.56	3.80	-0.21	-0.28	-2.35	17.11	276.55	15.15
12	0	5.38	-4.14	11.59	0.90	-0.35	2.90	16.97	276.55	15.27
13	0	3.04	-7.52	-13.46	0.97	-0.62	-1.66	17.04	276.55	15.25
14	0	0.55	0.55	-7.04	0.00	0.00	0.00	7.66	276.55	35.17
15	0	2.07	2.07	-0.28	0.00	0.35	0.07	2.42	276.55	112.70
16	100	-1.45	-1.45	-0.28	0.00	0.21	0.07	1.24	276.55	218.98

1. 截面位置定義如圖6.6.C-8。
2. 材料容許應力參考ASME Code Service Level D。
3. 容許應力包含0.8之折減因子。

表 6.6.C-5 60 g 底部撞擊(無 103.5 KPa (15 psig)內壓)密封鋼筒主要薄膜應力加彎
曲應力 $P_m + P_b$ (MPa)

截面 位置 ¹	角度 (度)	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度	容許應力 ^{2,3}	安全餘裕
1	0	4.55	-2.90	-24.70	0.62	-0.48	-3.17	29.95	414.83	12.84
2	0	2.76	-13.46	-59.82	1.31	-0.07	-1.31	62.72	414.83	5.62
3	0	-0.83	-11.18	-54.65	0.97	0.07	1.10	53.96	414.83	6.69
4	0	0.00	0.00	-48.44	0.00	0.00	0.00	48.44	414.83	7.56
5	0	0.00	0.00	-44.51	0.00	0.00	0.00	44.51	414.83	8.32
6	0	0.00	0.00	-40.57	0.00	0.00	0.00	40.64	414.83	9.21
7	0	0.00	0.00	-36.71	0.00	0.00	0.00	36.71	414.83	10.3
8	0	1.79	0.69	-36.09	0.07	0.21	1.17	38.02	414.83	9.92
9	80	-3.93	-20.36	-34.57	0.00	0.00	-6.07	33.05	414.83	11.56
10	80	6.49	-19.39	-40.92	0.00	0.00	-3.24	47.89	414.83	7.67
11	0	-9.87	3.17	33.88	-0.83	-0.35	-3.59	44.37	414.83	8.35
12	0	19.11	2.62	20.77	1.17	-0.07	6.49	23.94	414.83	16.32
13	0	20.91	-0.69	-6.35	1.73	-0.90	-2.42	27.88	414.83	13.87
14	0	0.62	0.62	-7.04	0.00	0.00	0.00	7.66	414.83	53.26
15	170	27.67	27.67	0.55	0.00	0.35	0.14	27.12	414.83	14.29
16	180	-14.28	-14.28	-0.55	0.00	0.21	0.07	13.73	414.83	29.23

1. 截面位置定義如圖6.6.C-8。
2. 材料容許應力參考ASME Code Service Level D。
3. 容許應力包含0.8之折減因子。

表 6.6.C-6 60 g 底部撞擊時承載圓盤之主薄膜應力加彎曲應力 P_m+P_b (MPa)

截面 ¹	Sx	Sy	Sxy	應力強度	容許應力	安全餘裕
257	364.05	135.14	78.60	388.18	620.54	0.6
192	350.95	122.04	-78.60	375.08	620.54	0.66
65	346.81	115.14	-79.98	371.63	620.54	0.67
108	69.64	362.67	-48.95	370.25	620.54	0.68
54	351.64	76.53	72.40	369.56	620.54	0.68
129	344.05	111.70	78.60	368.18	620.54	0.69
234	66.88	359.22	-46.88	366.81	620.54	0.69
119	341.98	73.77	-66.88	357.84	620.54	0.73
246	339.92	61.36	-67.57	355.08	620.54	0.75
182	339.23	71.02	67.57	355.08	620.54	0.75
300	79.29	338.54	28.96	341.98	620.54	0.82
171	79.29	338.54	28.96	341.98	620.54	0.82
229	93.77	108.94	77.91	179.96	620.54	2.45
301	-44.82	130.31	-18.62	178.58	620.54	2.47
172	-44.82	130.31	-18.62	178.58	620.54	2.47
269	72.40	-97.22	-26.89	177.89	620.54	2.49
140	72.40	-97.22	-26.89	177.89	620.54	2.49
203	72.40	-97.22	26.20	177.20	620.54	2.5
77	71.71	-97.22	26.20	177.20	620.54	2.5
166	90.32	108.94	-76.53	176.51	620.54	2.51
235	-28.96	144.79	13.79	175.82	620.54	2.53
295	89.63	107.56	-76.53	175.82	620.54	2.53
109	-28.96	144.10	13.79	175.13	620.54	2.54
71	11.03	81.36	79.98	175.13	620.54	2.55
134	11.72	81.36	-79.98	175.13	620.54	2.55
263	11.03	81.36	-79.98	175.13	620.54	2.55
197	11.03	80.67	79.98	174.44	620.54	2.56
103	91.01	97.91	77.22	171.68	620.54	2.61
165	-84.81	-30.34	-81.36	171.68	620.54	2.62
294	-84.81	-30.34	-81.36	171.68	620.54	2.62
27	105.49	-61.36	20.00	170.99	620.54	2.62
102	-84.81	-31.03	81.36	170.99	620.54	2.62
228	-84.81	-31.03	81.36	170.99	620.54	2.62
40	104.80	-61.36	-20.00	170.99	620.54	2.62
73	14.48	93.77	75.15	169.61	620.54	2.66
187	-140.65	-44.13	58.61	168.23	620.54	2.68
60	-140.65	-44.13	58.61	168.23	620.54	2.69
252	-140.65	-44.13	-58.61	168.23	620.54	2.69
124	-139.97	-44.13	-58.61	168.23	620.54	2.69
199	23.44	95.15	75.15	166.86	620.54	2.73

1. 截面位置如圖6.2.6-16。

表 6.6.C-7 60 g 底部端撞擊密封鋼筒挫屈評估

	密封鋼筒外殼
軸向(Axial)應力 σ_ϕ (MPa, (psi)) ^{1,2}	62.10(9,000)
環向(Hoop)應力 σ_θ (MPa, (psi)) ^{1,2}	20.70(3,000)
剪應力 $\sigma_{\phi\theta}$ (MPa, (psi)) ²	3.45(500)
彈性挫屈方程式 (ASME Code Case N-284-1, 1713.1.1 [49])	
軸向壓縮+環向壓縮 $(\sigma_\phi - 0.5\sigma_{ha})/(\sigma_{xa} - 0.5\sigma_{ha}) + (\sigma_\theta / \sigma_{ha})^2$	0.326
軸向壓縮+剪 $(\sigma_\phi / \sigma_{xa}) + (\sigma_{\phi\theta} / \sigma_{xa})^2$	0.193
環向壓縮+剪 $(\sigma_\theta / \sigma_{ra}) + (\sigma_{\phi\theta} / \sigma_{ra})^2$	0.437
軸向壓縮+環向壓縮+剪 $(\sigma_\phi - 0.5K_s\sigma_{ha})/(K_s\sigma_{xa} - 0.5K_s\sigma_{ha}) + (\sigma_\theta / K_s\sigma_{ha})^2$	0.326
塑性挫屈方程式 (ASME Code Case N-284-1, 1713.2.1 [49])	
軸向壓縮 $\sigma_\phi / \sigma_{xc}$	0.232
環向壓縮 $\sigma_\theta / \sigma_{rc}$	0.437
軸向壓縮+剪 ³ $\sigma_\phi / \sigma_{xc} + (\sigma_{\phi\theta} / \sigma_{xc})^2$	0.232
環向壓縮+剪 $\sigma_\theta / \sigma_{rc} + (\sigma_{\phi\theta} / \sigma_{rc})^2$	0.437

1. 保守的涵概性壓應力。
2. 包含熱應力。
3. σ_ϕ 為軸向應力，於ASME Code Case N-284-1中繕打錯誤為 σ_θ 。

附錄 6.6.D 混凝土護箱傾倒分析計算

貯存設施的傾倒分析中只計算密封鋼筒於混凝土護箱中的傾倒狀況，而不計外加屏蔽的影響，因地震分析計算所得的結果顯示在設計基準下，貯存設施不會輕倒；再者，密封鋼筒於混凝土護箱中的傾倒分析結果顯示無安全顧慮，此分析計算已可涵蓋外加屏蔽傾倒對於貯存設施的影響。

護箱在傾倒發生後，內部裝有滿載用過核子燃料的密封鋼筒之混凝土護箱的重心位置，將以重心至旋轉點的距離為半徑繞旋轉點改變。當重心通過旋轉點的上方，護箱及密封鋼筒的位能將轉變成動能，最後水平躺在貯存場址基座上。護箱的運動特性決定於護箱的結構特性與貯存場址基座及基座下土壤特性。

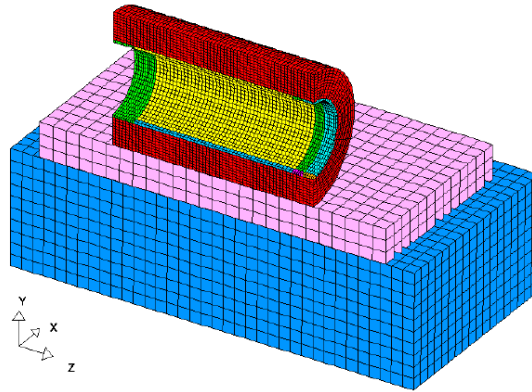
護箱傾倒評估的目標在於決定傾倒過程中最大的加速度值，以進行本章節後續之護箱及密封鋼筒結構的安全評估。護箱傾倒分析方法參照 NUREG/CR-6608[9]；分析評估中亦採用 NUREG/CR-6608 之相同程式—LS-DYNA 程式軟體。

貯存場基座及基礎參數如下：

混凝土厚度	最大 91.44 cm(36 in)
次層土壤厚度	最小 3.05 m (10 ft)
標稱混凝土抗壓強度	$\leq 350 \text{ kg/cm}^2 (5,000 \text{ psi})$ 在 28 天
混凝土乾密度(ρ)	$2002 \leq \rho \leq 2563 \text{ kg/m}^3 (125 \leq \rho \leq 160 \text{ lb/ft}^3)$
現地土壤密度(ρ)	$1602 \leq \rho \leq 2563 \text{ kg/m}^3 (100 \leq \rho \leq 160 \text{ lb/ft}^3)$
土壤彈性係數	$\leq 207 \text{ Mpa} (30,000 \text{ psi})$

A. 護箱傾倒分析

由於混凝土護箱傾倒為一沿護箱中心軸線成一半對稱的形態，故有限元素分析模式取一半混凝土護箱，貯存場混凝土基座和土壤底部，分析模式如下圖所示。



分析模式中混凝土基座尺寸 9.14 m(30 ft)長、9.14 m(30 ft)寬，厚度 0.914 m(3 ft)。中央支承著一個混凝土護箱，基座下的土壤尺寸考慮為 10.66 m(35 ft)長乘 10.66 m(35 ft)寬，厚度 3.05 m(10 ft)。由於結構對稱，只模擬了一半的混凝土護箱、ISFSI 混凝土基座和土壤。

混凝土被視為一均質等向性材料。混凝土護箱及混凝土基座在 LS-DYNA 分析模式中以材料 Type Number 16 模擬。以下所列的混凝土基座及土壤特性為 LS-DYNA 參數輸入。

模型中 ISFSI 混凝土基座材料參數如下：

抗壓強度(f_c') = 5,000 psi

密度(ρ_c) = 125 pcf

波森比(ν_c) = 0.22 (NUREG/CR-6608)

彈性係數(E_c) = $33\rho_c^{1.5}\sqrt{f_c'}$ = 3.261E6 psi (ACI 318-95)

體積係數(K_c) = $E_c/(3(1-2\nu_c))$ = 1.941E6 psi (Blevins[10])

模型中 ISFSI 混凝土基座下土壤材料參數如下：

密度 = 160 pcf

波森比(ν_s) = 0.45 (NUREG/CR-6608)

彈性係數 = 30,000 psi

混凝土護箱鋼內襯參數如下：

密度 = 0.284 lb/in³

波森比 = 0.31

$$\text{彈性係數} = 2.9\text{E}7 \text{ psi}$$

為計入屏蔽塞(shield plug)、滿載之密封鋼筒(loaded canister)和混凝土護箱底座的重量，使用有效密度於鄰近衝擊對稱平面的鋼內襯(steel liner)的第一列元素。此密度值代表在傾倒狀況下，鋼內襯的區域(圓周方向 6 度)中，在傾倒狀況下屏蔽塞、滿載之密封鋼筒和混凝土護箱底座的重量。接觸角(6 度)是根據密封鋼筒及燃料提籃的傾倒狀況決定(附錄 6.6.C)。

邊界條件及幾何條件

鋼內襯與混凝土護箱外殼界面、混凝土護箱與混凝土基座界面及基座與土壤界面的摩擦係數用 0.25。模型中所有埋置於土壤中的混凝土面（三個側面及底面）垂直於面的位移量是受拘束的。對稱邊界條件應用於對稱平面上的所有節點。

混凝土護箱水平撞擊混凝土基座的初始條件為一初始垂直速度，基座與土壤初始為靜止狀態。

混凝土護箱初始速度為一角速度 (ω)，旋轉點選定為混凝土護箱底部邊緣。根據能量守恆計算護箱傾倒時之角速度值。

從能量守恆：

$$mgh = \frac{I\omega^2}{2}$$

其中：

mg = 滿載混凝土護箱的重量

$$= 328,000 \text{ lb}(148,584 \text{ kg})$$

h = 混凝土護箱重心(L_{CG})之高度改變量 =

$$\sqrt{R^2 + L_{CG}^2} - R = 66.46 \text{ in}(168.8 \text{ cm})$$

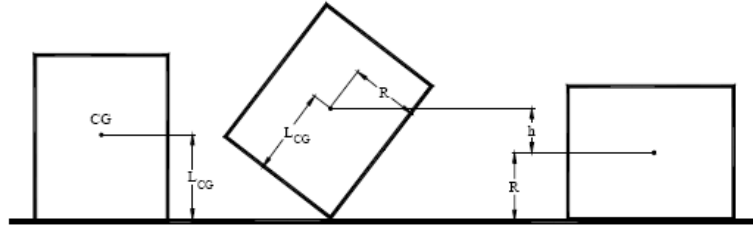
其中：

L_{CG} = 混凝土護箱在混凝土基座上之重心位置

$$= 116.0 \text{ in}(294.6 \text{ cm})$$

R = 混凝土護箱的半徑 = 68 in(172.7 cm)

I = 混凝土護箱對轉動點之全質量慣性矩
 = 19,422,461 lb-s²-in



混凝土殼和鋼內襯的轉動慣量計算為採用空心圓柱計算公式：

$$I = \frac{m}{12}(3R_1^2 + 3R_2^2 + 4L^2) + md^2$$

其中：

m = 質量(lb-s²/in)

R_1 和 R_2 = 圓柱體之內外半徑(in)

L = 圓柱體高(in)

d = 重心與轉動點之距離(in)

屏蔽塞、負載之密封鋼筒和混凝土護箱底座的轉動慣量計算，為採用實心圓柱計算公式為：

$$I = \frac{m}{12}(3R^2 + 4L^2) + md^2$$

其中：

m = 圓柱體質量(lb-s²/in)

R = 圓柱體之半徑(in)

L = 圓柱體高(in)

d = 兩樞軸之距離(in)

$$\text{角速度計算為 } \omega = \sqrt{\frac{2mgh}{I}}$$

$$= 1.50 \text{ radians/s}$$

分析時保守採用 1.51 rad/s。

過濾器頻率

加速度取護箱鋼內襯內表面之值，因為該面代表鋼內襯與密封鋼筒的交界面，即衝擊面。根據 NUREG/CR-6608 的方法，根據護箱的主要振態頻率選擇過濾頻率，並以 Butterworth 過濾器過濾節點加速度。

樑僅受橫方向上彎曲的主要自然振動頻率 (By Blevins[6], Table 8-1 Case-4) 為：

$$f = \frac{\lambda^2}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{\rho AL^4}}$$

其中：

$\lambda = 3.92660231$ ，簡支樑

混凝土護箱及鋼內襯的頻率計算如下：

混凝土護箱的面積 $= \pi \{(68)^2 - (39.75)^2\} = 9562.8 \text{ in}^2$

混凝土護箱的慣性矩 $= (\pi/4) \{(68)^4 - (39.75)^4\} = 14,832,070 \text{ in}^4$

$$f_c = 823,568 \frac{\lambda^2}{L^2} = 252 \text{ Hz}$$

鋼內襯的面積 $= \pi \{(39.75)^2 - (37.25)^2\} = 604.8 \text{ in}^2$

鋼內襯的慣性矩 $= (\pi/4) \{(39.75)^4 - (37.25)^4\} = 448,673 \text{ in}^4$

$$f_s = 861,707 \frac{\lambda^2}{L^2} = 264 \text{ Hz}$$

相對應於直徑，混凝土護箱的長度較短，剪力效應也同時須考慮進來。可使用 Dunkerley 公式(Blevins[6])。系統頻率可用下列公式求得：

$$\frac{1}{f^2} = \frac{1}{f_c^2} + \frac{1}{f_s^2}$$

得系統頻率為 182 Hz，故將截斷(Cut-off)頻率設定為 185 Hz 以過濾分析結果並量測尖峰加速度值。

暫態分析結果(Transient Analysis)

採用分析模式中混凝土護箱鋼內襯的最大加速度值作密封鋼筒及燃料提籃的負載評估，如下表：

對應組件位置	自混凝土護箱底座之高程(mm)	加速度(g)
頂部承載圓盤	4,645.66	26.9
頂部結構蓋板	5,415.28	29.8

B. 分析方法的驗證

鋼柱 (steel billet) 放置在混凝土底座的傾倒測試在 NUREG/CR-6608 中已實行，並提供數據資料證實分析方法的可行性。故分析時使用與該報告相同的條件與分析模式，並使用 LS-DYNA 程式模擬計算。

在 NUREG/CR-6608 中，使用濾頻以後的，得到以下的結果：

節點/測量位置 ¹	最大測試值(g)	核研所分析值(g)
27518 / A1	237.5	242.5
28721 / A5	231.5	227.9

¹ 參照 NUREG/CR-6608[9]

C. 密封鋼筒及燃料提籃在護箱傾倒事件中的分析[38]

此節評估密封鋼筒及燃料提籃承載圓盤在傾倒意外事件的影響，應用 ANSYS 有限元素程式評估側邊衝擊載重狀況。

分析結果顯示密封鋼筒及燃料提籃承載圓盤在護箱傾倒事件中，具備足夠之結構特性且滿足法規 ASME Section III Division I Subsection NB、NG 對於應力的要求。

密封鋼筒及燃料提籃在護箱傾倒事件中的結構反應評估，採用 ANSYS 三維有限元素模型。模型包含密封鋼筒頂部、頂部五個燃料提籃承載圓盤和燃料提籃頂部銲接元件(weldment disk)。結構分析並且針對燃料提籃不同的墜落角度，以期求得最大主薄膜應力及最大主薄膜加主彎曲應力。其分析角度取 0° , 31.82° , 49.46° , 77.92° 和 90° 。

密封鋼筒及燃料提籃分析。以五個密封鋼筒承載圓盤及燃料提籃之三維模型進行側向載重評估，保守模擬在傾倒意外事件中，混凝土護箱內的狀況。因在 0° 及 90° 狀況下，承載圓盤幾何形式與墜落角度對稱，模擬對稱結構的一半已符合需求；全結構三維模型，則使用於墜落角度 31.82° 、 49.46° 及 77.92° 。

模型敘述

圖 6.6.D-1～圖 6.6.D-6，為評估密封鋼筒及燃料提籃在傾倒意外事件的有限元素模型。圖 6.6.D-2 中為密封鋼筒及燃料提籃在墜落角度 31.82° 之模型，圖中僅繪出密封鋼筒模型的一半代表之。

以 SOLID 45 元素建立密封鋼筒殼、屏蔽上蓋及結構上蓋，每個結點有三個自由度(UX,UY 及 UZ)。而屏蔽上蓋頂部外緣與結構上蓋底部外緣交界處之接觸力，以及屏蔽上蓋側面與密封鋼筒內壁交界處之接觸力，則使用 CONTAC 52 元素來計算，縫隙尺寸則依組件之原設計標稱尺寸(nominal dimensions)來設定。另外，屏蔽上蓋底部邊緣和支承環交界處之接觸力，則使用 COMBIN 40 縫隙元素來計算，縫隙尺寸則設定為 2.54×10^{-8} cm(1×10^{-8} in)。

屏蔽上蓋頂部與結構上蓋底部(不包含最外緣)交界處之接觸力，亦使用 COMBIN 40 元素來計算，而縫隙尺寸則使用 0.20 cm(0.08 in)，此數據乃是考慮結構上蓋與屏蔽上蓋兩者間會因製造之尺寸公差而存在間隙，而此處之最大累積公差值即為 0.2 cm。

密封鋼筒殼和混凝土護箱內表面交界處之接觸力，則使用 CONTAC 52 元素來計算，其縫隙尺寸則依組件之原設計標稱尺寸來設定，即等於密封鋼筒標稱外半徑和混凝土護箱標稱內半徑的差額。

以上所有 CONTAC 52 及 COMBIN 40 之縫隙勁度(gap-stiffness)，指定為 1×10^6 lb/in。

頂部五個燃料提籃承載圓盤及頂部鉸件，使用 SHELL 63 元素模擬，每個節點有六個自由度(UX,UY,UZ,ROTX,ROTY 及 ROTZ)。對於頂部第一和第五個承載圓盤，使用較緻密的網格(圖 6.6.D-4)，其餘承載圓盤和頂部鉸件採用較粗略的網格。另外，對於燃料提籃承載圓盤側面和密封鋼筒殼間之交界處之接觸力、頂部鉸件和密封鋼筒殼間之交界處之接觸力，也是使用 CONTAC 52 元素來計算接觸力，其縫隙尺寸則依組件之原設計標稱尺寸來設定，亦即為環片與密封鋼筒殼之標稱半徑差。以上所有 CONTAC 52 元素，均指定縫隙勁度值為 1×10^6 lb/in。

密封鋼筒殼底部的邊界條件設定，則是在靠近底部第五承載圓盤處之密封鋼筒殼之元素的節點施與軸向(Y 向)之位移限制(即設定位移為 0)。對於半對稱模型(0° 及 90° 墜落方向)，則使用對稱的邊界條件使用於模型的對稱面上(即對稱面法線方向之位移為 0)。因使用縫隙元素表示密封鋼筒殼和混凝土護箱內表面間之接觸，故相對應於混凝土護箱的節點，在所有的自由度上均受拘束(UX,UY 及 UZ 均設定為 0)。此外，因對承載圓盤而言，在側向衝擊狀態下沒有平面外負載，所以，設定燃料提籃軸向位移為 0($UY=0$)及平面內轉動的量為 0($ROTX=0$ 及 $ROTZ=0$)。

模型上負載包含密封鋼筒內部壓力(氣壓)、燃料相關組件作用於承載圓盤繫帶上之負載(燃料重)，以及作用於整體密封鋼筒之慣性負

載(與撞擊方向相反之衝擊力)。本計算之內部壓力值設定為 15 psig，此壓力值與其他異常及意外事故時之結構分析時所使用的壓力值一樣。至於承載圓盤繫帶上承受之負載，則是來自於燃料束、燃料管及導熱圓盤的總重量(W)，其負載設定方式是先求出每個繫帶側面承受之總重量(W)的分量(w)後，再將此分量轉換為作用於繫帶側面之面壓力($p = w/A$ ，A 表示繫帶側面之面積)，而後將此壓力值輸入 ANSYS 分析軟體(此負載型態一般稱為壓力負載-pressure load)。而對整體密封鋼筒之慣性負載的設定，則以最大加速度 30 g(保守值)作用在全模型節點上的 X 軸方向，以模擬在護箱傾倒意外事件中，密封鋼筒所承受之側向衝擊力。

在護箱傾倒意外事件中，混凝土護箱之鋼內襯的最大加速度發生位置，在頂部承載圓盤及密封鋼筒結構蓋的頂部，其值分別為 26.9 g 及 29.8 g。為決定承載圓盤的慣性負載的效果，使用受負載下的承載圓盤的振形來計算動態荷重係數(DLF)。相對應於承載圓盤在平面內運動之振形由 ANSYS 輸出。然而，只有主要振態的振態質量參與係數被用來計算動態荷重係數(DLF)。從承載圓盤的有限元素模型分析，得到主要自然頻率和相對應振態質量參與係數如下：

自然頻率 (Hz)	% 振態質量參與係數
79.3	38.4
80.2	54.9
210.9	3.4

圖 6.6.D-7 至圖 6.6.D-9，為相對應於這些頻率的模態。因為要清楚表示振形，圖中所描繪的位移量乃利用 ANSYS 加以誇大顯示。相對應於真實位移量的應力，表示於表 6.6.D-4 至表 6.6.D-8。使用混凝土護箱之鋼內襯頂部承載圓盤的加速度歷時 DLF 1.04。應用 DLF 至 26.9 g，得到頂部承載圓盤的加速度峰值為 28.0 g，密封鋼筒上蓋的 DLF 認定為 1，因為上蓋有顯著的平面勁度且認定為鋼性(結構上蓋 3 in(7.6 cm)厚，屏蔽上蓋 7 in(17.8 cm)厚)，結構上蓋頂部的加速度峰

值為 29.8 g。所以，施加 30 g 至整體密封鋼筒/燃料提籃結構模型是保守的。

分析中，取均佈周圍溫度 32 °C(90 °F)施加在模型上用以決定材料特性。在承載圓盤後處理過程中，保守假設溫度從中央最大溫度 371 °C(700 °F)至外緣最小溫度 204.4 °C(400 °F)線性分佈，來決定容許應力值。密封鋼筒取 260 °C(500 °F)來決定容許應力值，這溫度涵蓋正常貯存、異常貯存及意外狀況之溫度值。

密封鋼筒的分析結果

在模型每一個角分區，得到密封鋼筒軸向 13 處截面應力(全模型共 80 個角位置，半對稱模型有 41 個)。應力截面位置如圖 6.6.D-5。

密封鋼筒應力評估標準採用 ASME Code, Section III, Subsection NB。比較線性截面應力和容許應力，容許應力保守取為在 260 °C(500 °F)之下，除了 148.9 °C(300 °F)使用於屏蔽上蓋鉸道(第 10 截面)，121.1 °C(250 °F)使用於結構上蓋鉸道(第 11 截面)。經計算得屏蔽上蓋最大溫度為 135.3 °C(275.5 °F)，結構上蓋為 134.3 °C(273.7 °F)。從 Subsection NB，得意外狀況的容許應力值如下表。不銹鋼 Type 304L 之 S_m 及 S_u 分別為 16.7 和 60.9 ksi(密封鋼筒殼及結構上蓋)，不銹鋼 Type 304 之 S_m 及 S_u 分別為 20.0 和 66.0(屏蔽上蓋)。

應力類型	意外狀況(Level D) 容許應力
P_m	小於 $0.7S_u$ 或 $2.4S_m$
$P_m + P_b$	小於 $1.0S_u$ 或 $3.6S_m$

對 90°燃料提籃墜落方向之主薄膜應力和 31.82°燃料提籃墜落方向之主薄膜加彎曲應力，整理在表 6.6.D-1 及表 6.6.D-2 中。密封鋼筒應力結果在五個燃料提籃墜落評估方向上是相似的。在此顯示 49.46°墜落方向。

在護箱傾倒意外事件中，密封鋼筒殼在結構上蓋及屏蔽上蓋處承受慣性力，導致高局部承壓應力(第 7 至 9 截面，撞擊處大約±4.5°位置)。根據 ASME Code Section III, Appendix F，對等級 D(Level D) (意

外)狀況，支承應力不須要檢驗；因此，密封鋼筒殼的上蓋承壓區之應力不必表示(第 7 至 9 截面)。表 6.6.D-1 和 6.6D-2 中，應力在結構上蓋/密封鋼筒殼銲接區(第 11 截面)為衝擊區域的應力平均值，此處銲接在半徑方向為壓應力。依據 ISG-15, Rev. 0[11]，於結構上蓋與密封鋼筒殼銲接的容許應力使用 0.8 的銲接折減係數。使用 0.8 的係數是正確的，因為銲接材料的最大拉力超過底部金屬強度。

在護箱傾倒意外事件中，應力評估結果顯示，密封鋼筒之最小安全餘裕為+0.58(P_m 應力，90°墜落時)，+0.55(P_m+P_b 應力，31.82°墜落)。

承載圓盤的分析結果

為評估承載圓盤最臨界的區域，考慮一系列的交叉截面。為幫助確認這些截面，圖 6.6.D-6 顯示這些截面在承載圓盤全模型中的位置。表 6.6.D-3 列出相對應點 1、點 2 之橫截面，其在承載圓盤的平面上跨越繫帶(ligament)的橫截面。應力評估時使用局部座標系統(x y 軸平行於承載圓盤繫帶)。

承載圓盤的應力評估為根據 ASME Code, Section III, Subsection NG。護箱傾倒意外事件中之承載圓盤容許應力可從 Subsection NG 得出，如下表(依據截面溫度值)。承載圓盤的溫度分佈決定於對單一承載圓盤之熱傳導結果，其邊界條件為中心最大溫度 371 °C(700 °F)，外緣最小溫度 204.4 °C(400 °F)。

應力類型	意外狀況 (Level D) 容許應力
P_m	小於 $0.7S_u$ 或 $2.4S_m$
P_m+P_b	小於 $1.0S_u$ 或 $3.6S_m$

屏蔽上蓋和結構上蓋對密封鋼筒殼上部提供額外勁度，其限制了密封鋼筒殼及承載圓盤的變形量。然而，最大 P_m+P_b 應力及最小安全餘裕，發生在第五承載圓盤處(從燃料提籃的上部)。此處屏蔽上蓋和結構上蓋的勁度效果並未展現。

在護箱傾倒意外事件中，第五承載圓盤的應力評估總結於表 6.6.D-4。其包含五個燃料提籃掉落方向的評估，由表 6.6.D-4 中，77.92°掉落方向之承載圓盤產生最小安全餘裕。因此，在 77.92°掉落方向之 P_m 及 P_m+P_b 應力密度，分別表示於表 6.6.D-6 及 6.6.D-7 中。這些表列出第五承載圓盤 30 個最小安全餘裕的應力結果，最大 P_m 應力發生在截面 202，其最小安全餘裕為+0.30；最大 P_m+P_b 應力發生在截面 169 處，安全餘裕為+0.02（應力如表 6.6.D-7，截面位置如圖 6.6.D-6）。

承載圓盤挫屈評估

在護箱傾倒意外事件中，承載圓盤受平面內載重，平面內負載施加壓力和平面內彎矩在承載圓盤上。承載圓盤的挫屈以 NUREG/CR-6322[12] 中的方法與接受的準則評估之。因為 ASME Code 確認 17-4PH 環片材料為肥粒鐵(ferritic)，故使用非奧斯田鐵(Non-Austenitic)之公式評估之。

承載圓盤繫帶的挫屈評估基於 NUREG/CR-6322 之方程式 31 與 32。這兩個方程式採用“限度分析設計”(limit analysis method)方法。護箱傾倒意外事件中之最大力量與彎矩，來自於有限元素分析之應力結果。

分析時使用之符號與單位如下：

P = 施加之軸向壓力，kip

M = 施加之彎矩，kip-inch

P_a = 容許軸向壓力，kip

P_{cr} = 臨界軸向壓力，kip

P_e = 尤拉挫屈負載，kip

P_y = 平均降伏負載，等於投影面積乘以標稱最小降伏應力，(在最小操作狀態下)

C_c = 臨界柱細長比

C_m = 彎矩放大係數

M_m = 無軸力作用下之塑性設計構件的抵抗彎矩，kip-in

M_p = 塑性彎矩，kip-in

F_a = 無彎矩作用下之軸向壓應力，ksi

F_e = 棱形桿件之尤拉應力除以安全係數，ksi

k = 有效柱長度對真實無支撐長度的比率

l = 無支撐長度，in

r = 旋轉半徑，in

S_y = 降伏應力，ksi

A = 構件橫截面積，in²

Z_x = 塑性截面模數，in³

λ = 容許降低係數

從 NUREG/CR-6322，以下方程式被使用於評估承載圓盤：

$$\frac{P}{P_{cr}} + \frac{C_m M}{M_m [1 - \frac{P}{P_e}]} \leq 1.0$$

$$\frac{P}{P_y} + \frac{M}{1.18 M_p} \leq 1.0$$

其中：

$$P_{cr} = 1.7 \times A \times F_a$$

$$F_a = \frac{P_a}{A} \quad P_a = P_y \left[\frac{1 - \frac{\lambda^2}{4}}{1.11 + 0.5\lambda + 0.17\lambda^2 - 0.28\lambda^3} \right]$$

$$\lambda = \frac{1}{\pi} \left[\frac{kl}{r} \right] \sqrt{\frac{S_y}{E}} \quad (\text{意外狀態})$$

$$P_e = 1.92 \times A \times F_e$$

$$F_e = \frac{\pi^2 \cdot E}{1.3 \left[\frac{k \cdot l}{r} \right]^2} \quad (\text{Level D-意外狀態})$$

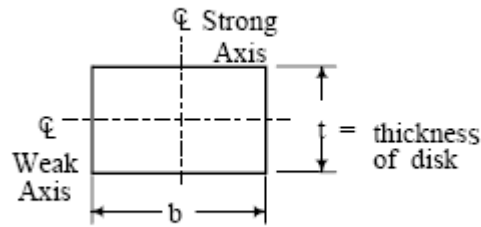
$$P_y = S_y \times A$$

$C_m=0.85$ (側移構件)

$$M_p = S_y \times Z_x$$

$$M_m = M_p \cdot \left[1.07 - \frac{\left(\frac{1}{r}\right) \cdot \sqrt{S_y}}{3160} \right] \leq M_p$$

對所有截面在圖 6.6.D-6 中所定義的之支撐圓盤繫帶進行挫屈評估。使用橫截面應力計算在每一個負載組合下，在繫帶上的每一個截面，最大相對應的壓力(P)與彎矩(M)決定如下：



$$P = \sigma_m \times A \quad M = \sigma_b \times S$$

其中， σ_m 為薄膜應力， σ_b 為彎曲應力， A 為面積($b \times t$)， S 為截面模數。因環片在護箱傾倒意外事件中，只承受平面內負載，故以強軸彎矩被考量為挫屈評估。

為決定安全餘裕：

$$P_1 = \frac{P}{P_{cr}} \quad M_1 = \frac{C_m M}{\left(1 - \frac{P}{P_e}\right) M_m} \quad (P_1 + M_1 \leq 1)$$

且

$$P_2 = \frac{P}{P_y} \quad M_2 = \frac{M}{1.18 M_p} \quad (P_2 + M_2 \leq 1)$$

安全餘裕如下：

$$MS1 = \frac{1}{P_1 + M_1} - 1$$

且

$$MS2 = \frac{1}{P_2 + M_2} - 1$$

在護箱傾倒意外事件中，表 6.6.D-5 總結五個燃料提籃墜落方向中第五承載圓盤挫屈評估結果(第五承載圓盤承受最大應力)。如表顯示，77.92°例子中產生最小挫屈安全餘裕；因此，在 77.92°燃料提籃墜落方向之挫屈分析結果，顯示在表 6.6.D-8。此表顯示出在此墜落方向上 30 個最小的安全餘裕。如表中所呈現，承載圓盤滿足 NUREG/CR-6322 的要求。

燃料管分析(fuel tube)

燃料管提供中子吸收板結構支撐及安裝位置。燃料管並不提供燃料束結構支撐。為保證燃料管在護箱傾倒意外事件中保持功能，燃料管的結構評估考慮在側撞下，減加速度為 60 g，此負載為計算護箱傾倒意外事件中的燃料提籃最大負載。

在護箱傾倒意外事件中，燃料提籃中的不銹鋼承載圓盤支撐燃料管。燃料提籃承載圓盤支撐燃料管全長度，間距 3.205 in(8.14 cm)(小於燃料管寬度 5.9 in(15 cm)的一半)。考慮燃料管承受最大燃料束重量，702 lb(318 kg)，60 g 載重係數和 40 個燃料提籃承載圓盤(實際為 41 個燃料提籃承載圓盤，但基於保守分析原則，採用 40 個承載圓盤進行分析。)支撐位置，燃料管剪應力計算如下：

$$\text{剪力} = (60 \text{ g})(702)/40 = 1,053 \text{ lb}$$

$$\text{面積} = (0.048)(5.9)(2) = 0.566 \text{ in}^2$$

$$\text{剪應力} = 1,053/0.566 = 1,860 \text{ psi}$$

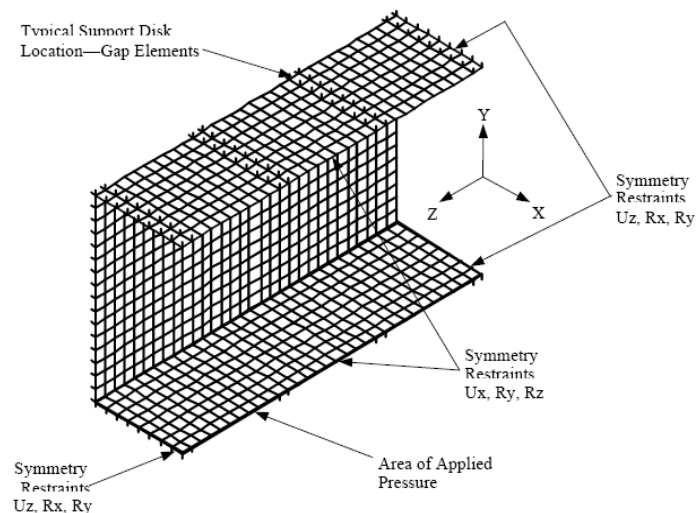
Type 304 不銹鋼燃料管材料的降伏強度，在 750 °F(398.9 °C)溫度下為 17,300 psi(1,211 kg/cm²)。保守的使用容許剪應力為燃料管降

伏強度的一半(8,650 psi(605.5 kg/cm²))，結果仍然得到一很大的正安全餘裕。顯示在側向衝擊中，燃料管仍保持其原來位置及功能。

在側向衝擊中，燃料束重量轉移至燃料提籃承載圓盤，為透過燃料束均佈負載直接經由燃料管傳遞至承載圓盤。兩種負載情況考慮在燃料管評估中。第一種情況考慮燃料束負載在燃料管內表面為一均佈壓力。第二種假定燃料束格架座落於承載圓盤跨距中點，並且在有效格架面積上產生局部均佈負載。

對兩種不同的負載情況建立兩個不同的燃料管 ANSYS 有限元素分析模式，因燃料管結構行為對任一負載為非線性。如下所示，第一個模式表示一個燃料管截面，長度為三個跨距。也就是說，模型支承於四個承載圓盤上。分析模式中保守考慮燃料管壁厚 0.048 in(0.122 cm)，其為唯一材料代表承受燃料束的減速度 60 g 之均佈壓力負載。燃料束勁度並未被考慮在燃料管的施加壓力負載過程中。

燃料管使用 ANSYS 塑性、四邊形殼元素(SHELL43)，承載圓盤以間隙元素(CONTACT52)表示，間隙元素外側結點在三個平移方向均受束制。邊界束制採用對稱邊界條件，燃料管上有效載重來自於燃料束的減速度 60 g，以壓力施加於燃料管的內側面積上。



有限元素分析結果顯示，燃料管最大應力為 19.5 ksi，局部位於燃料管在承載圓盤的截面上。在 750 °F(398.9 °C)下，Type 304 不銹鋼的最大強度為 63.1 ksi。安全餘裕為：

$$MS = \frac{63.1}{18.6} - 1 = +2.39$$

分析結果顯示，最大總應變為 0.00536 in/in。定義可接受的不銹鋼的彈-塑性材料破壞應變 0.40 in./in.的一半。在 750 °F(398.9 °C)下 [13]，應變安全餘裕為：

$$MS = \frac{0.40 / 2}{0.00536} - 1 = +37.31$$

同樣地，彈-塑性應力的安全餘裕為：

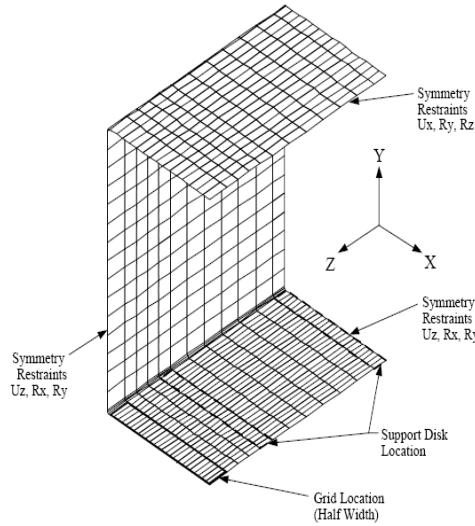
$$MS = \frac{63.1 - 17.3}{18.6 - 17.3} - 1 = +35.23$$

其中，在 750°F(398.9°C)下，Type 304 不銹鋼的降伏強度為 17.3 ksi。

第二個有限元素模型使用於評估燃料束格架(spacer grid)座落於兩承載圓盤跨距中點之載重狀況。燃料管局部在格架(grid)有效面積上承受均佈載重。如以下所述，模型為四分之一對稱的燃料管截面。模型保守地考慮燃料管壁厚 0.048 in(0.122 cm)。並保守忽略中子吸收板(0.135 in(0.34 cm))及不銹鋼蓋板(0.018 in(0.046 cm))的作用。燃料管壁以 ANSYS SHELL43 元素模擬，其外部承載圓盤以 CONTACT52 元素模擬。

基於美國 LLNL(Lawrence Livermore National Laboratory)之燃料棒側面撞擊評估(UCID-21246)，燃料棒及燃料束在護箱傾倒事件側面撞擊下，維持其結構完整；並且燃料管的位移極小。在承載圓盤間之燃料管截面的最大位移量不會超過燃料格架的厚度，其為格架外圍表面和燃料棒排列外圍表面的距離。當燃料管位移達到格架厚度，燃料棒會與燃料管的內表面相接觸且燃料棒的重量會經由燃料管壁轉移至承載圓盤。因此，此模型之概括負載情況，以在模型中相對應格架位置的節點上給定一負 Y 方向的位移量 0.08 in(0.203

cm)。注意 0.08 in (0.203 cm) 包含所有燃料束位移量。模型中假設燃料束格架為剛性，並且施加一保守位移量。



有限元素分析結果顯示，燃料管最大應變為 0.11 in/in，位置在模型中燃料管角隅局部，接近格架與燃料管側壁處。在 750 °F(398.9 °C)下，不銹鋼 Type 304 的最大強度為 63.1 ksi。其安全餘裕為：

$$MS = \frac{63.1}{40.8} - 1 = +0.54$$

定義可接受的不銹鋼的彈-塑性材料破壞應變 0.40 in./in. 的一半。在 750°F(398.9°C)下[13]，應變安全餘裕為：

$$MS = \frac{0.40 / 2}{0.11} - 1 = +0.81$$

同樣地，彈-塑性應力的安全餘裕為：

$$MS = \frac{63.1 - 17.3}{40.8 - 17.3} - 1 = 0.94$$

其中，在 750 °F(398.9 °C)下，Type 304 不銹鋼的降伏強度為 17.3 ksi。最大總應變及彈-塑性應力分析顯示燃料管保持在提籃中的位置。

燃料管降伏

使用燃料棒的位移驗證燃料管的強度，以驗證在側向傾倒下，燃料管仍未降伏。因為負載從燃料棒傳送至燃料管，所以分析中給予燃料棒位移負載是符合實際載重情況的。在 9×9 BWR 燃料束中，保守假設 9 個累計燃料棒位移量(堆疊在每一個上面)。

單一燃料棒位移量的計算，可假設成一個四連續跨度的樑，計算如下：

$$\Delta_{\max} = 0.0065 \frac{wL^4}{EI} = 4.415 \times 10^{-6} \text{ in}$$

其中：

$$w = \text{mass} / \text{length} = \rho_{\text{zirc}} A_{\text{zirc}} + \rho_{\text{UO}_2} A_{\text{UO}_2} = 0.05 \text{ lb} / \text{in} \times 9 \text{ rods} = 0.4498 \text{ lb} / \text{in}$$

$$\text{燃料棒護套外徑 OD} = 0.424 \text{ in}$$

$$\text{燃料棒護套內徑 ID} = 0.424 - 2 \times 0.03 = 0.364 \text{ in}$$

$$\text{燃料棒護套密度 (Zirc-4)} = \rho_{\text{zirc}} = 0.237 \text{ lb/in}^3$$

$$\text{燃料棒護套截面積} = A_{\text{zirc}} = (\pi/4)(0.424^2 - 0.364^2) = 0.0371 \text{ in}^2$$

$$\text{UO}_2 \text{ 密度} = \rho_{\text{UO}_2} = 0.396 \text{ lb/in}^3$$

$$\text{UO}_2 \text{ 截面積} = A_{\text{UO}_2} = (\pi/4) \times 0.364^2 = 0.104 \text{ in}^2$$

$$L = \text{承載圓盤的間距} = 3.205 \text{ in}$$

$$E_{\text{zirc}} = 10.75 \times 10^6 \text{ psi}$$

$$I_{\text{zirc}} = (\pi/64) \times (0.424^4 - 0.364^4) = 7.247 \times 10^{-4} \text{ in}^4 \times 9 \text{ rods} = 0.0065 \text{ in}^4$$

使用 E_{zirc} 及 I_{zirc} 為保守假設，最大燃料棒位移估計為 4.415×10^{-6} in。對 60 g 加速度而言，燃料棒位移量為 0.0003 in(0.00076 cm)。

應用兩承載圓盤中點位移量，最大應力強度為 5,812 psi。在 750 °F(398.9 °C)下，燃料管降伏應力 (Type 304 不銹鋼) 為 17,300 psi；所以，在 60 g 側向墜落下，燃料管保持彈性。

中子吸收板保持附著於燃料管的保證評估，由考慮中子吸收板及不銹鋼附板所產生的負載，假設 60 g 負載。由板間銲接所承受。銲道上整體負載重及合應力之計算為：

$$F_{b/ss} = (g)(\rho)(t)(w)(l) \quad \text{中子吸收板及不銹鋼吸附板的負載}$$

其中：

g = 加速度(g)

ρ = 材料的密度(lb/in³)(鋁的密度(0.098 lb/in³)保守的使用於中子吸收板)

t = 材料的厚度(in)

w = 材料的寬度(in)

l = 材料截面的長度(in)

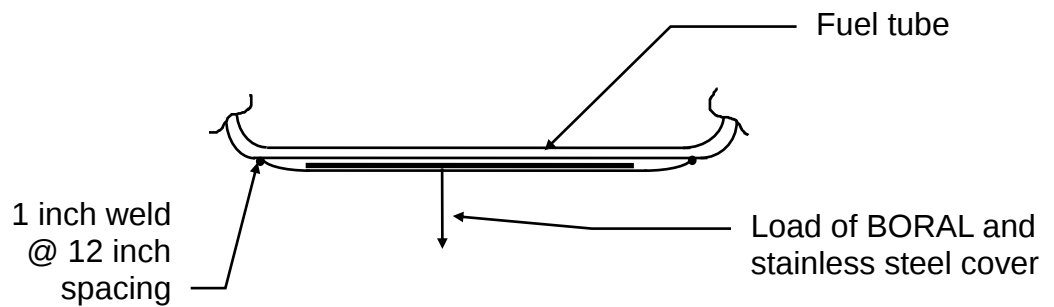
銲道上的力量來自於 12 in(30.48 cm)長的中子吸收板(F_b)及 12 in(30.48 cm)長的不銹鋼板 (F_{ss})為：

$$\begin{aligned} F_b &= (60g)(0.098 \text{ lb/in}^3)(0.135 \text{ in})(5.45 \text{ in})(12 \text{ in}) \\ &= 51.9 \text{ lb} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} F_{ss} &= (60g)(0.291 \text{ lb/in}^3)(0.018 \text{ in})(5.79 \text{ in})(12 \text{ in}) \\ &= 21.8 \text{ lb} \end{aligned}$$

對 12-in 的長度，1-in 銲接件的合力 (F_t) 為：

$$F_t = 57.9 \text{ lb} + 21.8 \text{ lb} = 73.7 \text{ lb}$$



銲接應力為：

$$\sigma = P/A = (73.7 \text{ lb} / 2) / ((1 \text{ in})(0.018 \text{ in})) = 2,074 \text{ psi}$$

因銲接材料為 Type 304 不銹鋼，安全餘裕(在 750 °F(398.9 °C) 下)為：

$$MS = \frac{17,300}{2,047} - 1 = +7.5$$

所以，中子吸收板保持圍繞在每一個燃料管壁外側表面上。

密封鋼筒封銲評估

密封鋼筒封銲是槽銲，厚度為 0.75 in(1.91 cm)，容許應力之折減因子為 0.8。依據 ASME Code, Sec.III, NB，以分析密封鋼筒在混凝土護箱在傾倒事件下之應力。密封鋼筒銲接位置如圖 6.6.D-5 中截面 11，分析結果其主薄膜應力之安全餘度為 1.02，主薄膜應力加彎曲應力之安全餘度為 1.58。

密封鋼筒封銲是採用多道次銲接在 304L 不銹鋼殼上施銲，銲道缺陷由 PT 非破壞檢測，並須考量可檢測之臨界缺陷大小。銲道臨界負載分析以 J-積分/撕裂(J-integral/tearing modulus)模式分析。

以結構上蓋上之徑向應力分量，以評估臨界缺陷之尺寸。依 ASME Code, Sec. XI, Level D，安全因子為 $\sqrt{2}$ 。為評估缺陷，故須考量圖 6.6.D-5 中截面 11 銲道。根據傾倒事件的分析，銲道上之最大徑向應力為 7.3 ksi，保守以 11.4 ksi 應力來評估缺陷，故其安全因子大於 $\sqrt{2}$ ，此時最小可接受之缺陷尺寸為 0.44 in(1.12 cm)。若使用最小可偵測之缺陷尺寸為 0.375 in(0.95 cm)，則在裂紋達到臨界缺陷尺寸 0.44 in(1.12 cm)前即可發現裂紋。

D. 外加屏蔽連同混凝土護箱傾倒評估

混凝土護箱傾倒分析中已進行混凝土護箱傾倒加速度評估及證明該傾倒加速度作用下密封鋼筒內各元件依然保有結構完整性。然而在核一廠乾式貯存計畫中，含有外加屏蔽的設計，在有外加屏蔽的傾倒狀況是否能被單純的混凝土護箱（內含密封鋼筒及燃料）傾倒分析所涵蓋即是本評估目的。

評估結果

由四項傾倒分析時的重要參數作為評估有無外加屏蔽時的傾倒分析比較。四項參數分別是傾倒時的重心落差、傾倒時護箱著地的瞬間速度、傾倒時的混凝土護箱動能及傾倒時的撞擊勁度。評估結果顯示，含外加屏蔽之護箱傾倒時，此四項參數均較混凝土護箱傾倒時的評估值為安全，故原混凝土護箱傾倒分析已可涵蓋其連同外加屏蔽傾倒的狀況。

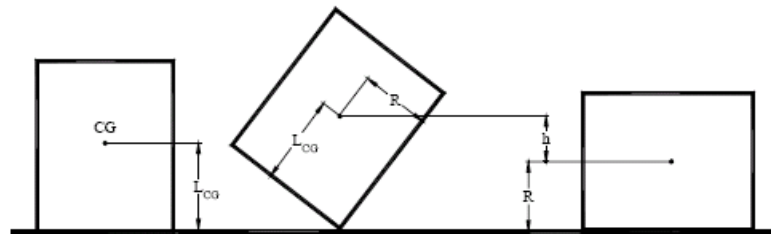
評估方法

分別對以下四參數進行評估：

- 傾倒時的重心落差
- 傾倒時護箱著地瞬間速度
- 傾倒時混凝土護箱動能
- 傾倒時的撞擊勁度

1. 傾倒時的重心落差

在加裝外加屏蔽後，其傾倒重心高度落差(h)由原混凝土護箱傾倒時的 66.46 in 降低至 60.39 in，故對混凝土護箱而言，有外加屏蔽時傾倒的能量釋放量較無外加屏蔽時低。



2. 傾倒時護箱著地瞬間速度

含外加屏蔽傾倒時的 質量慣性矩的計算如下表。有外加屏蔽時傾倒，雖然增加整體質量及傾倒時的旋轉半徑，但卻降低重心落差及增加質量慣性矩。

Part ID	Part Name	Mass	Inertia	y - coordinate	Z - coordinate
		(lb-s ² /in)	(lb-s ² -in)	(in)	(in)
1	VCC	246	1,415,000.00	88.58	112.2
2	Pedestal	18.15	14,230.00	88.57	11.32
3	Basket	38.89	133,300.00	89.9	112.8
4	Can Lids	6.48	4,699.00	89.89	208.1
5	VCC Lids	9.71	7,065.00	89.89	218.8
6	BaslE	85.49	232,100.00	50.19	112.8
7	Can1E	13.59	148.80	50.19	208.1
8	VCC1E	6.47	84.35	50.19	218.8
9	AOS/Bottom	138.19	593,103.00	88.58	18.94
10	AOS/Mid#1	95.15	305,870.50	88.58	68.48
11	AOS/Mid#2	95.15	305,870.50	88.58	129.70
12	AOS/Mid#3	91.65	159,610.85	88.58	190.09
13	AOS/Top	59.95	130,280.08	88.58	228.58

其傾倒時的角速度可由 $\omega = \frac{\sqrt{2mgh}}{2}$ 而得，並考慮以下二種傾倒時

的狀況。

狀況一：傾倒時外加屏蔽頂蓋未脫離外加屏蔽

$$\omega = 1.31 \text{ rad/sec}$$

狀況二：傾倒時外加屏蔽頂蓋已脫離外加屏蔽

$$\omega = 1.42 \text{ rad/sec}$$

以上無論傾倒時外加屏蔽頂蓋是否脫離外加屏蔽，二種傾倒狀況的著地角速度皆低於混凝土護箱傾倒的角速度 1.50 rad/s，故護箱及屏蔽撞擊地面的線速度亦降低，顯示有外加屏蔽時有利於設施的防護。

3. 傾倒時混凝土護箱動能

有外加屏蔽時傾倒的能量為混凝土護箱與外加屏蔽護箱的能量總和。其中混凝土護箱的能量為：

- 無外加屏蔽時

$$\frac{1}{2} I_{VCC+TSC} \omega^2_{VCC+TSC} = \frac{1}{2} 9.711 \times 10^6 \times 1.50^2 = 1.092 \times 10^7 \text{ lb-in}$$

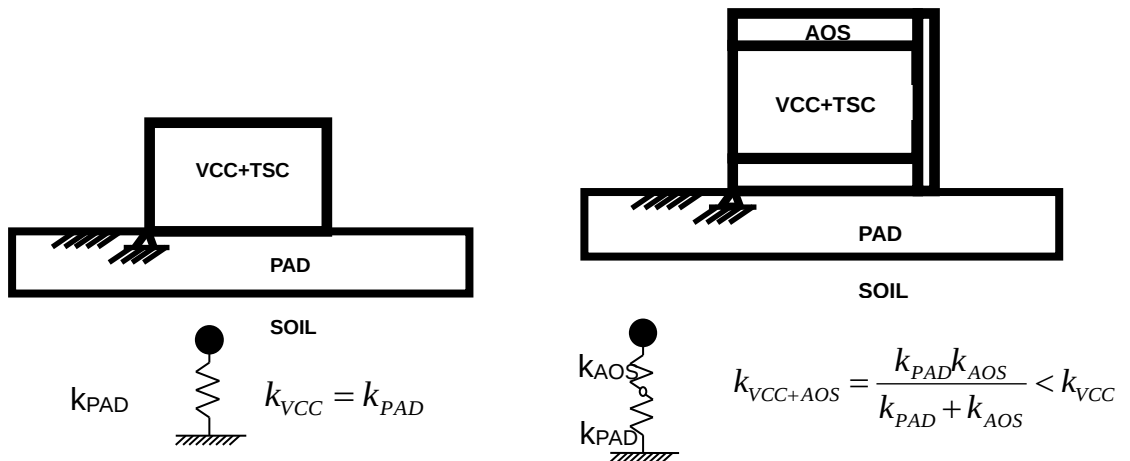
- 有外加屏蔽時

$$\frac{1}{2} I_{VCC+TSC(AOS)} \omega^2_{VCC+TSC} = \frac{1}{2} 1.092 \times 10^7 \times 1.37^2 = 1.052 \times 10^7 \text{ lb-in}$$

評估結果顯示，有外加屏蔽時傾倒的混凝土護箱動能降低，可減少對護箱內密封鋼筒及燃料的衝擊。

4. 傾倒時的撞擊勁度

外加屏蔽或混凝土護箱傾倒時的撞擊力大小與傾倒時的基座撞擊勁度有關，撞擊勁度愈小，則傾倒的撞擊力愈小。貯存設施加裝外加屏蔽前後的撞擊勁度以下圖表示。左圖為原混凝土護箱設計，右圖為加裝外加屏蔽設計。評估中假設原混凝土護箱為剛體，而外加屏蔽及混凝土基座為彈性體。



以上評估顯示加裝外加屏蔽後，無論外加屏蔽得勁度為何，系統皆可獲得較小的撞擊勁度，以降低護箱於傾倒時的撞擊力，此種結果有利於保護傾倒意外中的密封鋼筒及燃料的結構完整性。

結論

傾倒評估中的四項重要評估參數，含傾倒時的重心落差、傾倒時的護箱著地瞬間角速度、傾倒時混凝土護箱動能及傾倒時的撞擊勁度，於含外加屏蔽時，均較無外加屏蔽時安全，故評估結果顯示無外加屏蔽的傾倒分析可涵蓋有外加屏蔽的傾倒分析。

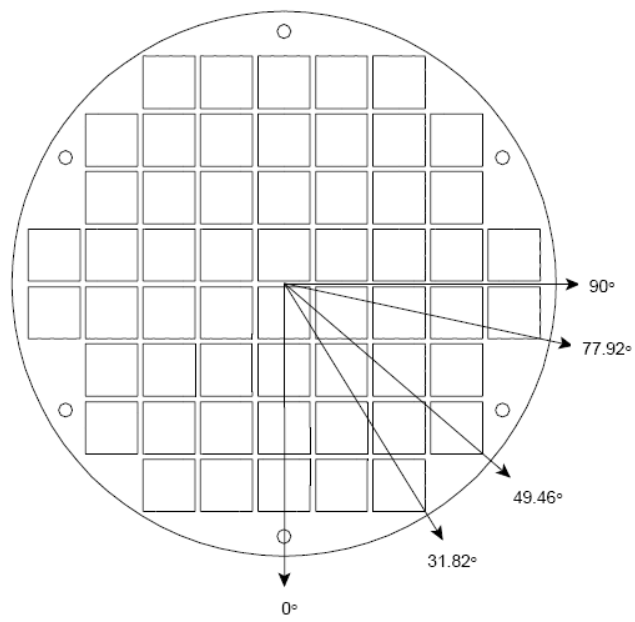


圖 6.6.D-1 提籃墜落方向性分析-傾倒情況

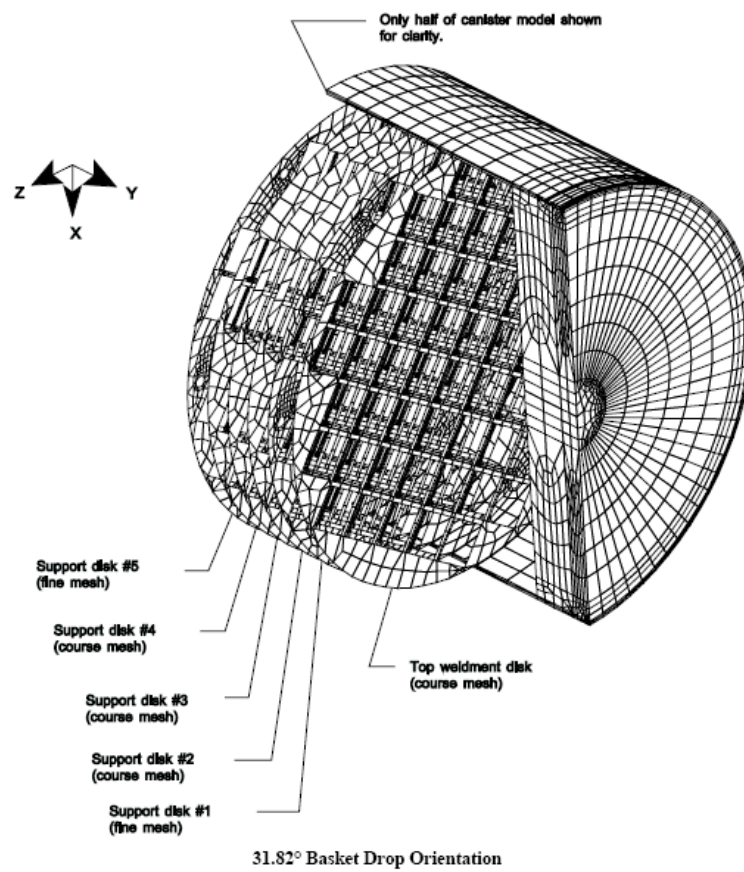
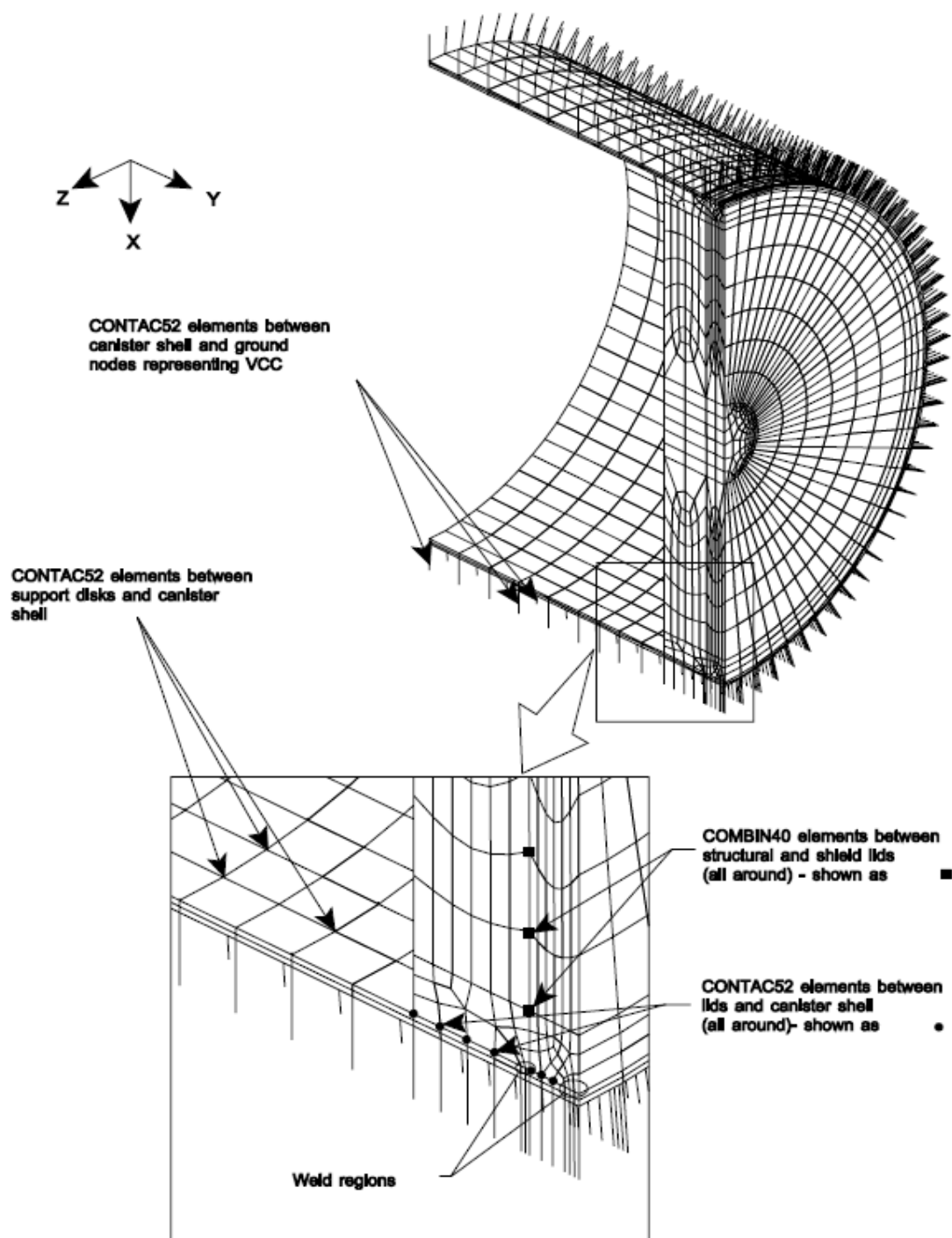


圖 6.6.D-2 燃料提籃/密封鋼筒有限元素模型



Only Half of Canister Shown for Clarity

圖 6.6.D-3 燃料提籃/密封鋼筒有限元素模型-密封鋼筒

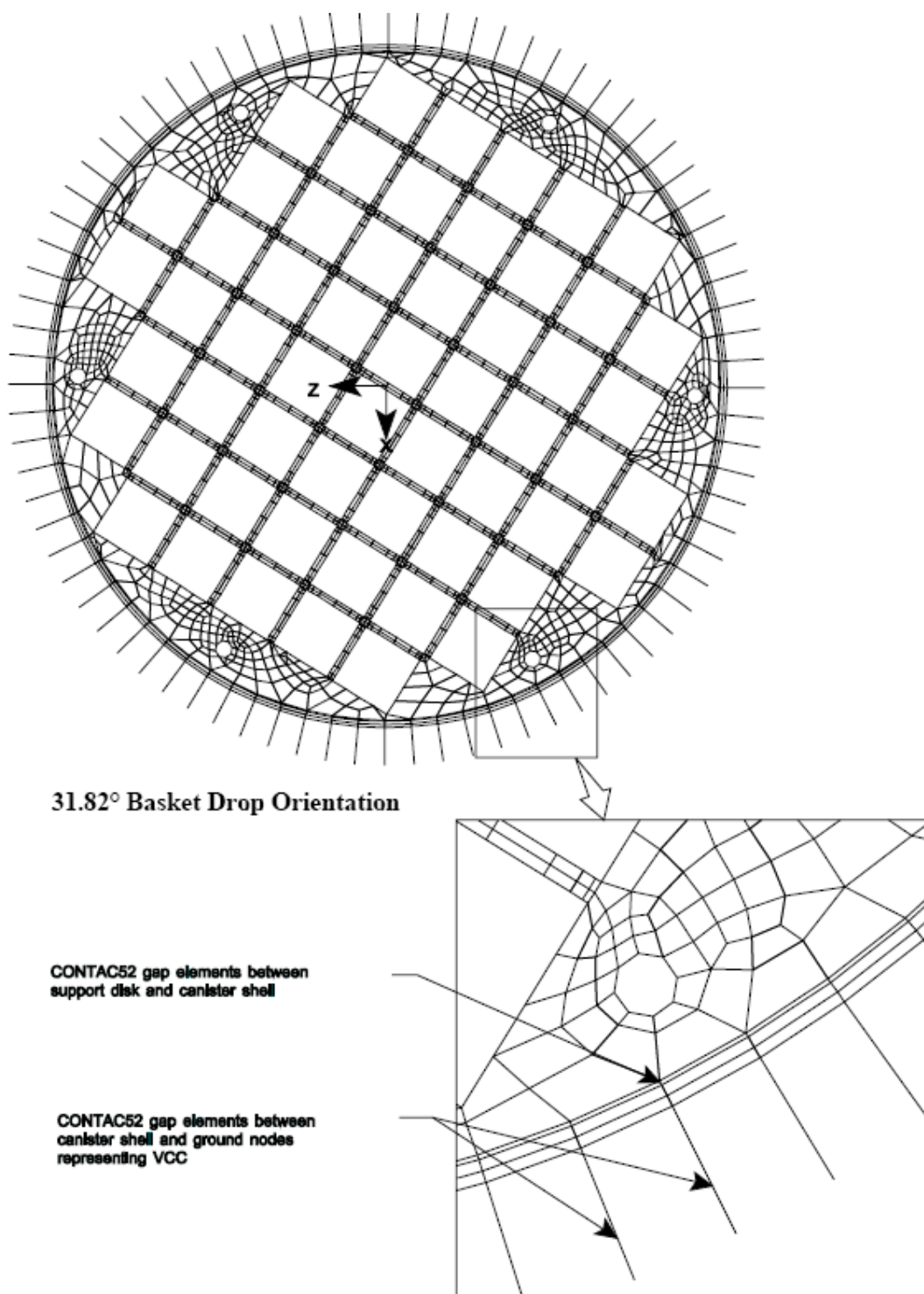
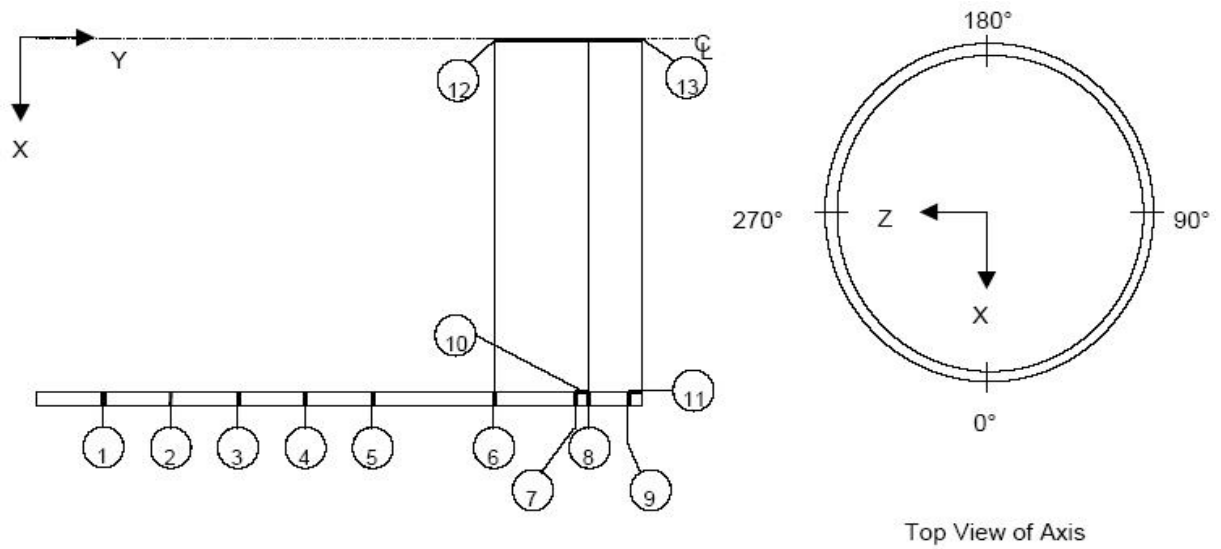


圖 6.6.D-4 燃料提籃/密封鋼筒有限元素模型-承載圓盤



Section Coordinates at Z = 0 and X > 0				
Location	Point 1		Point 2	
	X	Y	X	Y
1	32.905	144.32	33.53	144.32
2	32.905	148.15	33.53	148.15
3	32.905	151.98	33.53	151.98
4	32.905	155.81	33.53	155.81
5	32.905	159.64	33.53	159.64
6	32.905	175.25	33.53	175.25
7	32.905	182.25	33.53	182.25
8	32.905	182.75	33.53	182.75
9	32.905	184.87	33.53	184.87
10	32.905	182.25	32.905	182.75
11	32.905	184.87	32.905	185.75
12	0.1	175.75	0.1	182.73
13	0.1	182.77	0.1	185.75

General Notes:

- 1) Impact from the tipover condition is at 0° (in the circumferential direction).
- 2) For the full 360° models, there are 80 sections at each location for a total of 1040 sections. For the half 180° models, there are 41 sections at each location for a total of 533 sections.
- 3) Location 10 is through the length of the shield lid weld. Locations 8 and 7 are through the canister shell at top and bottom of the shield lid weld, respectively.
- 4) Location 13 is through the length of the structural lid weld. Location 9 is through the canister shell at the bottom of the structural lid weld.

圖 6.6.D-5 密封鋼筒截面應力位置

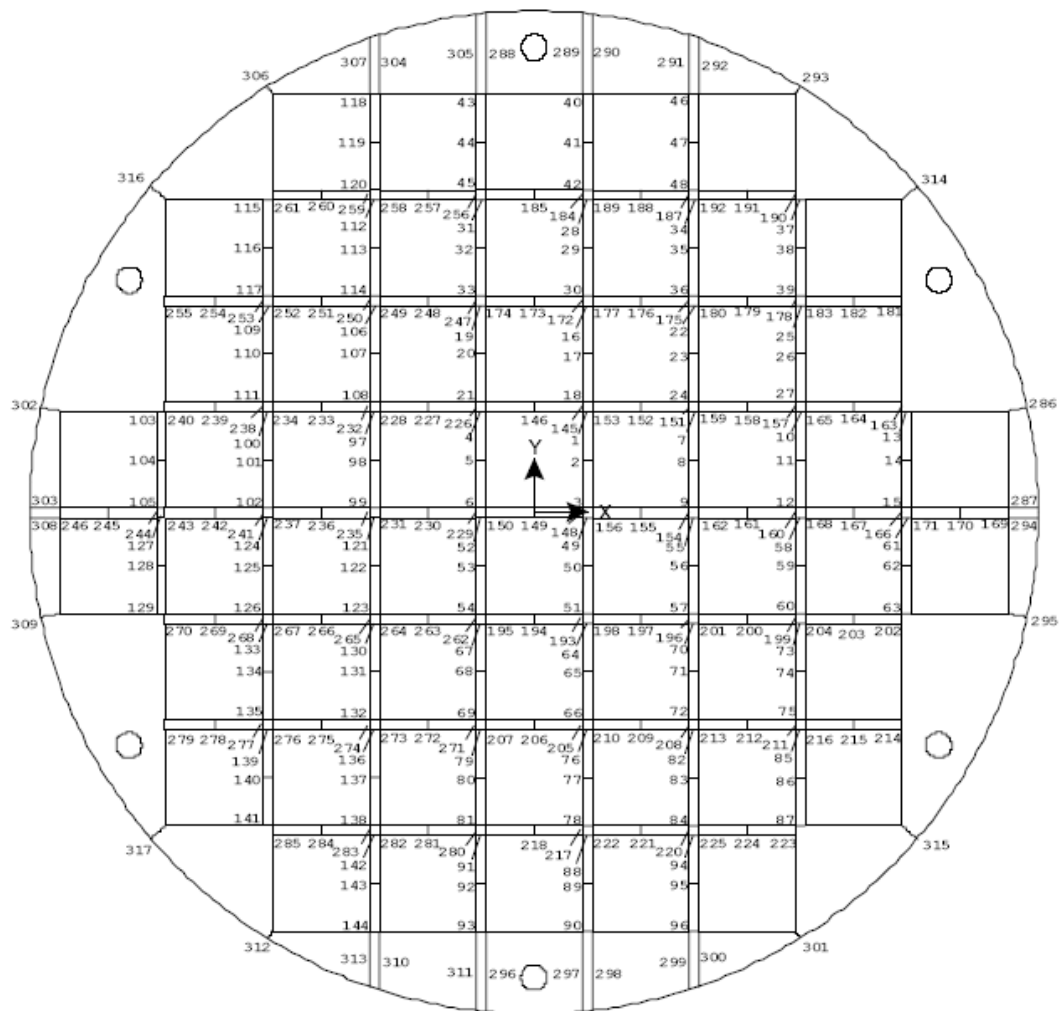
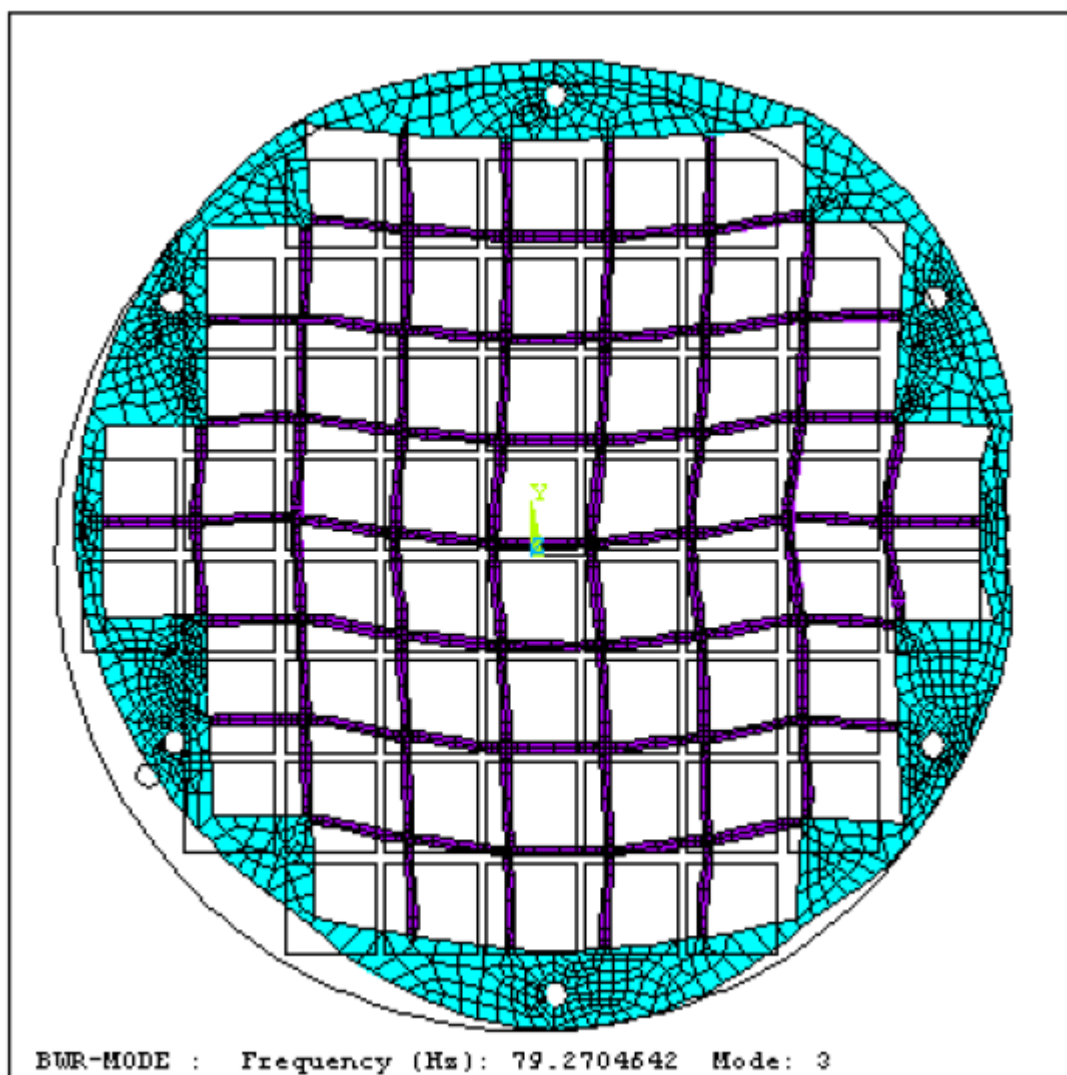
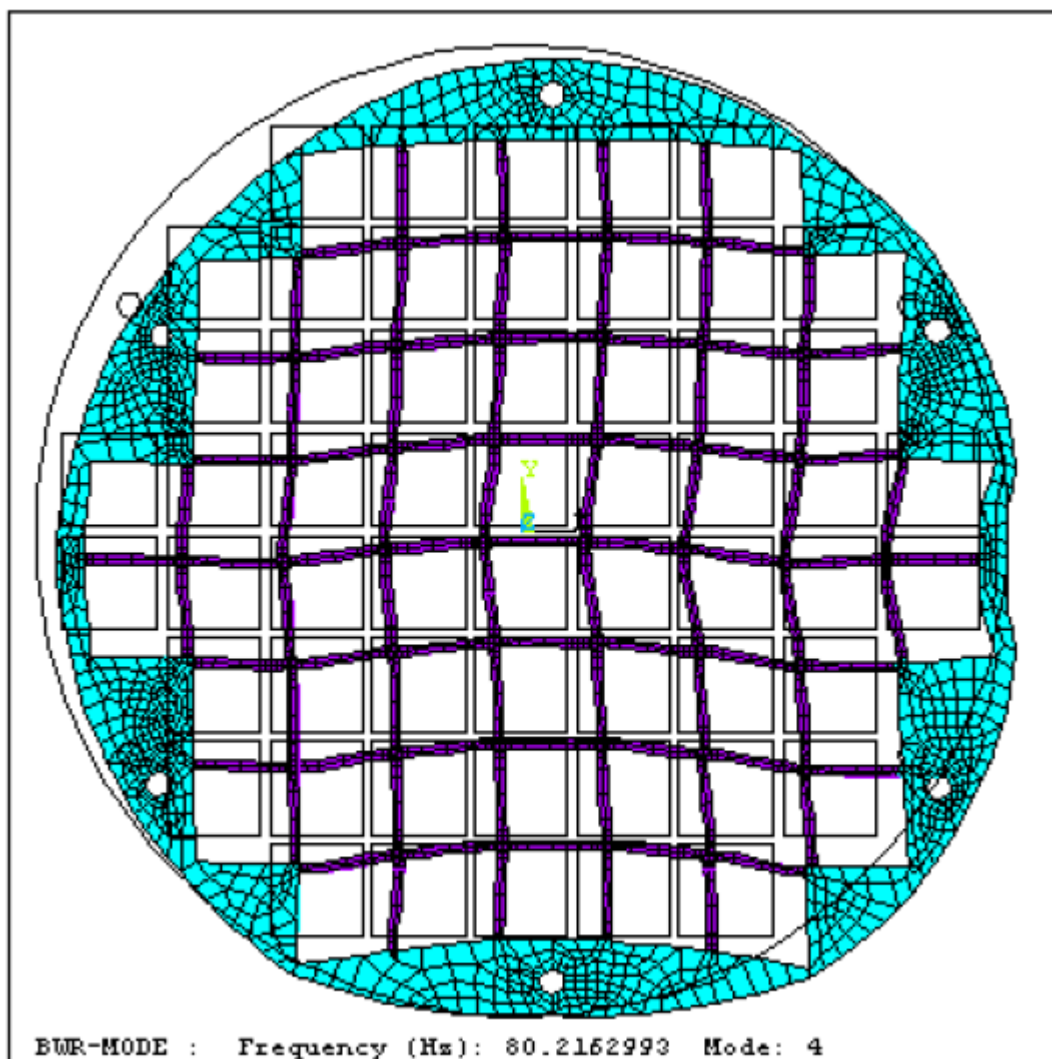


圖 6.6.D-6 承載圓盤截面應力位置-全模型



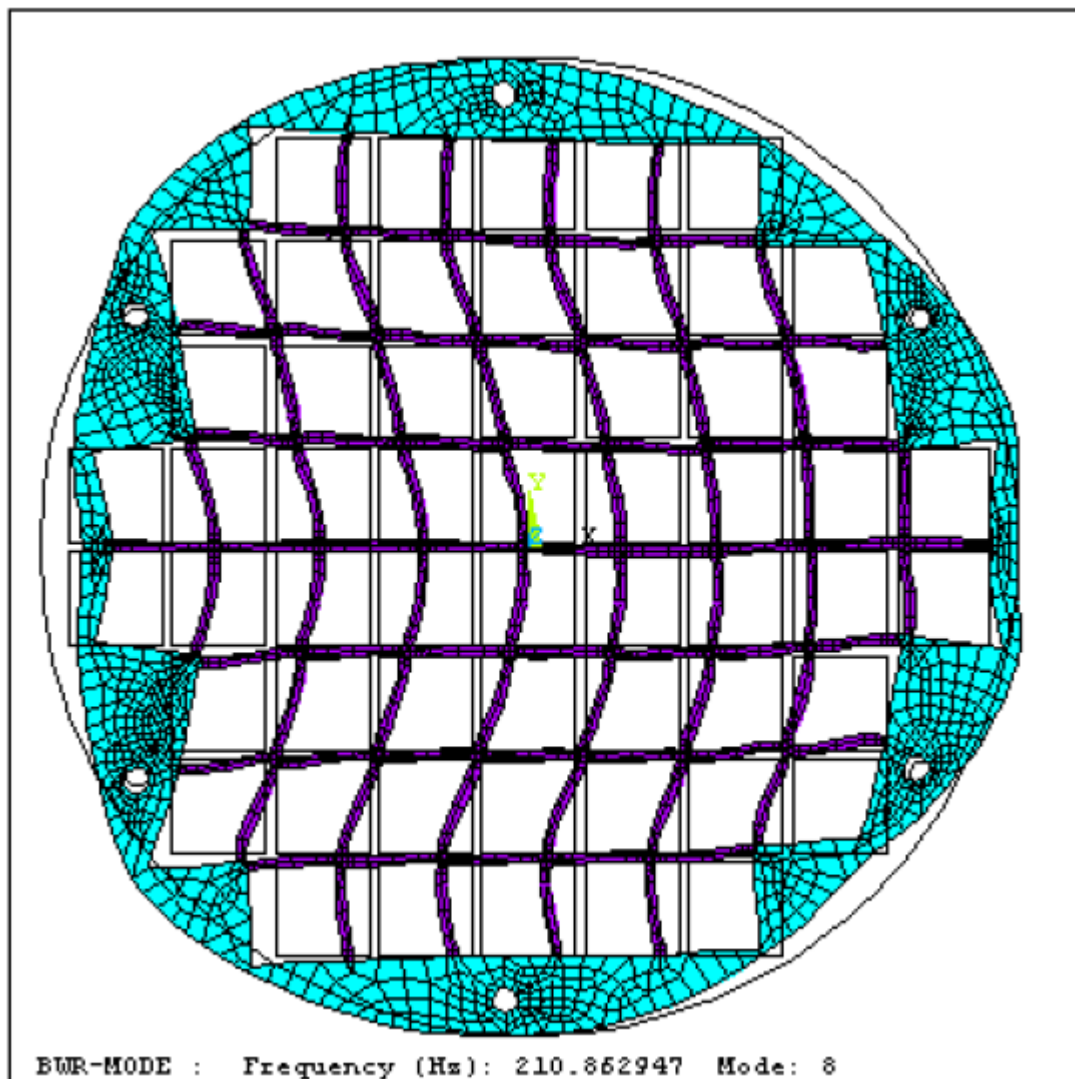
註：此模態已經由 ANSYS 程式放大位移量。

圖 6.6.D-7 79.3 Hz 之模態



註：此模態已經由 ANSYS 程式放大位移量。

圖 6.6.D-8 80.2 Hz 之模態



註：此模態已經由 ANSYS 程式放大位移量。

圖 6.6.D-9 210.9 Hz 之模態

表 6.6.D-1 密封鋼筒對傾倒情況之主薄膜應力 (P_m) – 90° 提籃墜落方向(MPa)

截面位置 ⁽¹⁾	截面角度 角度 (deg)	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度	容許應力	安全餘裕
1	0	-15.18	15.87	20.70	-0.69	-0.69	-2.76	36.09	245.09	5.79
2	0	-16.56	33.81	21.39	-3.45	0.00	3.45	50.58	245.09	3.85
3	0	-15.87	31.74	20.70	2.76	0.69	-0.69	47.75	245.09	4.13
4	0	-15.18	34.50	17.94	-2.07	0.69	-0.69	49.82	245.09	3.92
5	0	-17.94	22.08	15.18	5.52	1.38	1.38	42.02	245.09	4.83
6	0	-4.14	-35.88	11.04	3.45	-1.38	-6.21	49.75	245.09	3.93
7 ⁽²⁾	9	6.21	6.21	17.94	5.52	-17.94	0.69	39.33	245.09	5.23
8 ⁽²⁾	9	16.56	2.07	17.94	-2.76	-12.42	0.69	30.50	245.09	7.04
9 ⁽²⁾	9	20.70	-4.83	5.52	5.52	-14.49	-2.07	38.64	245.09	5.34
10	0	-210.45	-85.56	-164.22	9.66	-6.90	-64.86	174.50	276.55 ⁽³⁾	0.58
11 ⁽⁴⁾	0~8.2	-106.74	-49.40	-31.46	-22.29	-9.94	9.32	91.84	221.21 ⁽⁴⁾	1.41
12	0	-2.76	0.69	0.00	0.00	0.00	0.00	3.38	245.09	71.49
13	0	-6.21	2.07	0.00	0.00	0.00	0.00	8.14	245.09	29.10

Stresses are presented in the cylindrical coordinate system, x = radial, y = circumferential and z = axial directions.

1. Section locations are shown in 圖 6.6.D-5.
2. Stresses are not presented for the sections with localized bearing stress. In accordance with ASME Section III, Appendix F, bearing stresses need not be evaluated for Level D service (accident) conditions.
3. Allowable stress at 300°F.
4. Stresses are determined by averaging the stresses over the impact region. A stress reduction factor of 0.8 is applied to the allowable stress at 250°F.

表 6.6.D-2 密封鋼筒對傾倒情況之主薄膜加主彎曲應力(Pm + Pb) – 31.82°提籃墜落方向(MPa)

截面位置 ⁽¹⁾	截面角度 (deg)	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度	容許應力	安全餘裕
1	359.7	-8.28	142.14	41.40	1.38	4.83	2.07	150.49	367.63	1.44
2	359.7	-9.66	160.08	31.05	0.00	4.83	-0.69	170.02	367.63	1.16
3	359.7	-12.42	164.91	42.09	1.38	4.14	-0.69	177.19	367.63	1.07
4	359.7	-10.35	158.70	35.88	1.38	5.52	0.00	169.19	367.63	1.17
5	359.7	-11.04	148.35	48.30	1.38	7.59	0.00	160.08	367.63	1.30
6	359.7	0.69	-133.86	-17.25	2.07	9.66	-4.14	136.41	367.63	1.69
7 ⁽²⁾	8.7	13.11	46.23	135.24	0.69	-17.25	8.28	125.99	367.63	1.92
8 ⁽²⁾	8.7	37.26	39.33	122.13	-4.83	-31.05	-17.94	113.78	367.63	2.23
9 ⁽²⁾	8.7	46.23	-31.05	28.29	27.60	-27.60	-4.14	109.09	367.63	2.37
10	359.7	-224.94	-111.78	-193.89	-13.11	-9.66	-116.61	236.67	414.83 ⁽³⁾	0.75
11 ⁽⁴⁾	351.4~7.9	-120.75	-55.89	-11.04	2.07	0.00	13.11	113.16	331.82 ⁽⁴⁾	1.93
12	4.2	-4.83	0.69	0.69	0.00	-0.69	-1.38	6.56	367.63	55.08
13	4.2	-10.35	-2.07	8.28	1.38	-1.38	0.00	19.04	367.63	18.30

Stresses are presented in the cylindrical coordinate system, x = radial, y = circumferential and z = axial directions.

1. Section locations are shown in 圖 6.6.D-5.
2. Stresses are not presented for the sections with localized bearing stress. In accordance with ASME Section III, Appendix F, bearing stresses need not be evaluated for Level D service (accident) conditions.
3. Allowable stress at 300°F.
4. Stresses are determined by averaging the stresses over the impact region. A stress reduction factor of 0.8 is applied to the allowable stress at 250°F.

表 6.6.D-3 承載圓盤進行應力評估之中截面位置 –全模型

截面 ¹	Point 1		Point 2		截面 ¹	Point 1		Point 2	
	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y
1	80	168	96	168	44	-80	616	-96	616
2	80	88	96	88	45	-80	536	-96	536
3	80	8	96	8	46	256	696	272	696
4	-80	168	-96	168	47	256	616	272	616
5	-80	88	-96	88	48	256	536	272	536
6	-80	8	-96	8	49	80	-8	96	-8
7	256	168	272	168	50	80	-88	96	-88
8	256	88	272	88	51	80	-168	96	-168
9	256	8	272	8	52	-80	-8	-96	-8
10	432	168	448	168	53	-80	-88	-96	-88
11	432	88	448	88	54	-80	-168	-96	-168
12	432	8	448	8	55	256	-8	272	-8
13	608	168	624	168	56	256	-88	272	-88
14	608	88	624	88	57	256	-168	272	-168
15	608	8	624	8	58	432	-8	448	-8
16	80	344	96	344	59	432	-88	448	-88
17	80	264	96	264	60	432	-168	448	-168
18	80	184	96	184	61	608	-8	624	-8
19	-80	344	-96	344	62	608	-88	624	-88
20	-80	264	-96	264	63	608	-168	624	-168
21	-80	184	-96	184	64	80	-184	96	-184
22	256	344	272	344	65	80	-264	96	-264
23	256	264	272	264	66	80	-344	96	-344
24	256	184	272	184	67	-80	-184	-96	-184
25	432	344	448	344	68	-80	-264	-96	-264
26	432	264	448	264	69	-80	-344	-96	-344
27	432	184	448	184	70	256	-184	272	-184
28	80	520	96	520	71	256	-264	272	-264
29	80	440	96	440	72	256	-344	272	-344
30	80	360	96	360	73	432	-184	448	-184
31	-80	520	-96	520	74	432	-264	448	-264
32	-80	440	-96	440	75	432	-344	448	-344
33	-80	360	-96	360	76	80	-360	96	-360
34	256	520	272	520	77	80	-440	96	-440
35	256	440	272	440	78	80	-520	96	-520
36	256	360	272	360	79	-80	-360	-96	-360
37	432	520	448	520	80	-80	-440	-96	-440
38	432	440	448	440	81	-80	-520	-96	-520
39	432	360	448	360	82	256	-360	272	-360
40	80	696	96	696	83	256	-440	272	-440
41	80	616	96	616	84	256	-520	272	-520
42	80	536	96	536	85	432	-360	448	-360
43	-80	696	-96	696	86	432	-440	448	-440

¹.詳見圖 6.6.D-6 截面位置。

表 6.6.D-3 承載圓盤進行應力評估之中截面位置 –全模型(續)

截面 ¹	Point 1		Point 2		截面 ¹	Point 1		Point 2	
	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y
87	432	-520	448	-520	130	-256	-184	-272	-184
88	80	-536	96	-536	131	-256	-264	-272	-264
89	80	-616	96	-616	132	-256	-344	-272	-344
90	80	-696	96	-696	133	-432	-184	-448	-184
91	-80	-536	-96	-536	134	-432	-264	-448	-264
92	-80	-616	-96	-616	135	-432	-344	-448	-344
93	-80	-696	-96	-696	136	-256	-360	-272	-360
94	256	-536	272	-536	137	-256	-440	-272	-440
95	256	-616	272	-616	138	-256	-520	-272	-520
96	256	-696	272	-696	139	-432	-360	-448	-360
97	-256	168	-272	168	140	-432	-440	-448	-440
98	-256	88	-272	88	141	-432	-520	-448	-520
99	-256	8	-272	8	142	-256	-536	-272	-536
100	-432	168	-448	168	143	-256	-616	-272	-616
101	-432	88	-448	88	144	-256	-696	-272	-696
102	-432	8	-448	8	145	80	168	80	184
103	-608	168	-624	168	146	0	168	0	184
104	-608	88	-624	88	147	-80	168	-80	184
105	-608	8	-624	8	148	80	8	80	-8
106	-256	344	-272	344	149	0	8	0	-8
107	-256	264	-272	264	150	-80	8	-80	-8
108	-256	184	-272	184	151	256	168	256	184
109	-432	344	-448	344	152	176	168	176	184
110	-432	264	-448	264	153	96	168	96	184
111	-432	184	-448	184	154	256	8	256	-8
112	-256	520	-272	520	155	176	8	176	-8
113	-256	440	-272	440	156	96	8	96	-8
114	-256	360	-272	360	157	432	168	432	184
115	-432	520	-448	520	158	352	168	352	184
116	-432	440	-448	440	159	272	168	272	184
117	-432	360	-448	360	160	432	8	432	-8
118	-256	696	-272	696	161	352	8	352	-8
119	-256	616	-272	616	162	272	8	272	-8
120	-256	536	-272	536	163	608	168	608	184
121	-256	-8	-272	-8	164	528	168	528	184
122	-256	-88	-272	-88	165	448	168	448	184
123	-256	-168	-272	-168	166	608	8	608	-8
124	-432	-8	-448	-8	167	528	8	528	-8
125	-432	-88	-448	-88	168	448	8	448	-8
126	-432	-168	-448	-168	169	784	8	784	-8
127	-608	-8	-624	-8	170	704	8	704	-8
128	-608	-88	-624	-88	171	624	8	624	-8
129	-608	-168	-624	-168	172	80	344	80	360

表 6.6.D-3 承載圓盤進行應力評估之中截面位置- 全模型(續)

截面 ¹	Point 1		Point 2		截面 ¹	Point 1		Point 2	
	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y
173	0	344	0	360	216	448	-344	448	-360
174	-80	344	-80	360	217	80	-520	80	-536
175	256	344	256	360	218	0	-520	0	-536
176	176	344	176	360	219	-80	-520	-80	-536
177	96	344	96	360	220	256	-520	256	-536
178	432	344	432	360	221	176	-520	176	-536
179	352	344	352	360	222	96	-520	96	-536
180	272	344	272	360	223	432	-520	432	-536
181	608	344	608	360	224	352	-520	352	-536
182	528	344	528	360	225	272	-520	272	-536
183	448	344	448	360	226	-96	168	-96	184
184	80	520	80	536	227	-176	168	-176	184
185	0	520	0	536	228	-256	168	-256	184
186	-80	520	-80	536	229	-96	8	-96	-8
187	256	520	256	536	230	-176	8	-176	-8
188	176	520	176	536	231	-256	8	-256	-8
189	96	520	96	536	232	-272	168	-272	184
190	432	520	432	536	233	-352	168	-352	184
191	352	520	352	536	234	-432	168	-432	184
192	272	520	272	536	235	-272	8	-272	-8
193	80	-168	80	-184	236	-352	8	-352	-8
194	0	-168	0	-184	237	-432	8	-432	-8
195	-80	-168	-80	-184	238	-448	168	-448	184
196	256	-168	256	-184	239	-528	168	-528	184
197	176	-168	176	-184	240	-608	168	-608	184
198	96	-168	96	-184	241	-448	8	-448	-8
199	432	-168	432	-184	242	-528	8	-528	-8
200	352	-168	352	-184	243	-608	8	-608	-8
201	272	-168	272	-184	244	-624	8	-624	-8
202	608	-168	608	-184	245	-704	8	-704	-8
203	528	-168	528	-184	246	-784	8	-784	-8
204	448	-168	448	-184	247	-96	344	-96	360
205	80	-344	80	-360	248	-176	344	-176	360
206	0	-344	0	-360	249	-256	344	-256	360
207	-80	-344	-80	-360	250	-272	344	-272	360
208	256	-344	256	-360	251	-352	344	-352	360
209	176	-344	176	-360	252	-432	344	-432	360
210	96	-344	96	-360	253	-448	344	-448	360
211	432	-344	432	-360	254	-528	344	-528	360
212	352	-344	352	-360	255	-608	344	-608	360
213	272	-344	272	-360	256	-96	520	-96	536
214	608	-344	608	-360	257	-176	520	-176	536
215	528	-344	528	-360	258	-256	520	-256	536

表 6.6.D-3 承載圓盤進行應力評估之中截面位置- 全模型(續)

截面 ¹	Point 1		Point 2		截面 ¹	Point 1		Point 2	
	X	Y	X	Y		X	Y	X	Y
259	-272	520	-272	536	289	80	696	80	829
260	-352	520	-352	536	290	96	696	96	827
261	-432	520	-432	536	291	256	696	256	792
262	-96	-168	-96	-184	292	272	696	272	787
263	-176	-168	-176	-184	293	432	696	439	708
264	-256	-168	-256	-184	294	784	-8	833	-8
265	-272	-168	-272	-184	295	784	-168	814	-174
266	-352	-168	-352	-184	296	-80	-696	-80	-829
267	-432	-168	-432	-184	297	80	-696	80	-829
268	-448	-168	-448	-184	298	96	-696	96	-827
269	-528	-168	-528	-184	299	256	-696	256	-792
270	-608	-168	-608	-184	300	272	-696	272	-787
271	-96	-344	-96	-360	301	432	-696	439	-708
272	-176	-344	-176	-360	302	-784	168	-814	174
273	-256	-344	-256	-360	303	-784	8	-833	8
274	-272	-344	-272	-360	304	-256	696	-256	792
275	-352	-344	-352	-360	305	-96	696	-96	827
276	-432	-344	-432	-360	306	-432	696	-439	708
277	-448	-344	-448	-360	307	-272	696	-272	787
278	-528	-344	-528	-360	308	-784	-8	-833	-8
279	-608	-344	-608	-360	309	-784	-168	-814	-174
280	-96	-520	-96	-536	310	-256	-696	-256	-792
281	-176	-520	-176	-536	311	-96	-696	-96	-827
282	-256	-520	-256	-536	312	-432	-696	-439	-708
283	-272	-520	-272	-536	313	-272	-696	-272	-787
284	-352	-520	-352	-536	314	608	520	633	541
285	-432	-520	-432	-536	315	608	-520	633	-541
286	784	168	814	174	316	-608	520	-633	541
287	784	8	833	8	317	-608	-520	-633	-541
288	-80	696	-80	829					

表 6.6.D-4 承載圓盤對傾倒情況最大應力

撞擊角度	P_m			$P_m + P_b$		
	應力強度 (MPa)	容許應力 (MPa)	安全餘裕	應力強度 (MPa)	容許應力 (MPa)	安全餘裕
0°	253.92	434.70	+0.71	332.58	621.00	+0.87
31.82°	199.41	434.70	+1.18	465.75	621.00	+0.33
49.46°	160.08	434.70	+1.72	383.64	621.00	+0.62
77.92°	333.96	434.70	+0.30	608.58	621.00	+0.02
90°	413.31	434.70	+0.05	492.66	621.00	+0.26

Note: See 圖 6.6.D-1 墜落角度

表 6.6.D-5 承載圓盤對傾倒情況挫屈評估

撞擊角度	安全餘裕MS1	安全餘裕MS2
0°	1.18	1.05
31.82°	0.52	0.49
49.46°	0.92	0.82
77.92°	0.16	0.14
90°	0.29	0.49

表 6.6.D-6 承載圓盤對傾倒情況之主薄膜應力 (P_m) – Disk No. 5 - 77.92°墜落方向
(MPa)

截面位置	Sx	Sy	Sxy	應力強度	容許應力	安全餘裕
202	-169.05	164.91	6.90	333.96	434.70	0.30
199	-146.28	104.19	8.97	251.85	434.70	0.73
196	-125.58	91.08	8.97	216.66	434.70	1.01
193	-105.57	81.42	8.97	187.68	433.32	1.31
63	-129.72	51.06	17.25	184.23	434.70	1.36
203	-168.36	-0.69	5.52	168.36	434.70	1.58
204	-168.36	-116.61	4.83	168.36	434.70	1.58
262	-86.25	76.59	8.97	163.53	433.32	1.65
201	-146.28	-113.85	6.90	147.66	434.70	1.94
200	-146.28	0.00	8.28	146.97	434.70	1.96
265	-66.93	73.83	8.97	142.14	434.70	2.06
73	-129.03	11.73	-4.14	140.76	434.70	2.09
166	-83.49	50.37	11.73	135.24	434.70	2.21
198	-124.89	-109.02	6.90	127.65	433.32	2.39
197	-125.58	0.00	8.28	126.27	434.70	2.44
268	-48.99	73.83	6.21	123.51	434.70	2.52
15	-65.55	48.30	17.94	119.37	434.70	2.64
195	-104.88	-102.12	6.90	110.40	433.32	2.93
270	-48.30	-106.95	4.14	107.64	434.70	3.04
194	-104.88	0.00	8.28	106.26	433.32	3.08
295	-30.36	-86.25	-39.33	106.26	434.70	3.09
169	-95.22	-82.11	16.56	106.26	434.70	3.09
211	-82.80	22.08	4.83	104.88	434.70	3.14
160	-72.45	27.60	13.80	103.50	434.70	3.20
60	-80.04	15.87	17.25	102.12	434.70	3.26
170	-94.53	0.00	15.18	99.36	434.70	3.38
264	-85.56	-95.91	6.90	99.36	434.70	3.38
70	-97.29	1.38	-2.07	98.67	434.70	3.41
171	-94.53	-0.69	13.80	97.98	434.70	3.44
37	-67.62	29.67	0.00	97.29	434.70	3.47

Note: 圖 6.6.D-6 截面位置

表 6.6.D-7 承載圓盤對傾倒情況之主薄膜加主彎曲應力 (Pm + Pb) –Disk No. 5 -
77.92° 墜落方向(MPa)

截面位置	Sx	Sy	Sxy	應力強度	容許應力	安全餘裕
169	-601.68	-184.23	53.82	608.58	621.00	0.02
63	-22.08	442.98	-8.28	465.75	621.00	0.33
202	-345.69	102.12	-16.56	449.88	621.00	0.38
160	-439.53	-109.71	11.04	440.22	621.00	0.41
171	-428.49	-132.48	22.77	429.87	621.00	0.44
57	39.33	422.97	1.38	422.97	621.00	0.47
60	33.81	420.21	4.14	420.21	621.00	0.48
51	-195.96	-408.48	32.43	413.31	617.55	0.49
15	72.45	410.55	6.90	411.24	621.00	0.51
154	-408.48	-119.37	11.73	408.48	619.62	0.52
162	-405.72	-162.84	24.15	407.79	620.31	0.52
54	-180.09	-396.75	29.67	400.89	617.55	0.54
199	-380.88	20.70	-10.35	401.58	621.00	0.55
156	-387.09	-162.15	23.46	389.16	605.82	0.56
148	-385.71	-117.30	11.04	386.40	604.44	0.56
9	106.26	385.71	10.35	386.40	619.62	0.60
123	-164.91	-382.26	26.91	385.71	621.00	0.61
3	-178.02	-371.91	24.84	375.36	604.44	0.61
13	34.50	380.19	8.97	380.19	621.00	0.63
150	-365.70	-159.39	22.08	367.77	604.44	0.64
6	-166.98	-365.01	22.77	367.77	604.44	0.64
166	-378.12	-74.52	4.83	378.12	621.00	0.64
12	111.78	376.74	15.18	377.43	621.00	0.65
229	-365.01	-113.16	9.66	365.01	605.82	0.66
201	-351.90	-200.10	47.61	365.70	621.00	0.70
99	-156.63	-354.66	21.39	356.73	619.62	0.74
196	-354.66	0.00	-8.28	355.35	621.00	0.75
168	-351.90	-137.31	20.01	353.97	621.00	0.75
198	-335.34	-195.96	44.16	348.45	617.55	0.77
231	-345.69	-153.87	21.39	348.45	619.62	0.78

Note: 圖 6.6.D-6 截面位置

表 6.6.D-8 承載圓盤對傾倒情況挫屈評估 - Disk No. 5- 77.92° 墜落方向

截面位置	P (kN)	P _{cr} (kN)	P _y (kN)	M (N-m)	M _p (N-m)	M _m (N-m)	MS1	MS2
169	24.89	140.64	114.28	365.24	471.54	464.75	0.16	0.14
171	24.75	140.32	114.06	240.86	470.41	463.62	0.59	0.54
160	19.01	139.57	113.44	264.60	468.15	461.36	0.58	0.55
199	38.42	139.79	113.61	168.49	469.28	462.49	0.67	0.55
202	44.25	140.46	114.15	127.78	471.54	464.75	0.79	0.62
201	38.33	139.03	112.99	148.13	465.88	460.23	0.78	0.64
162	18.92	138.45	112.54	240.86	464.75	457.97	0.69	0.65
154	16.12	138.32	112.46	249.90	463.62	457.97	0.7	0.67
196	32.90	138.99	112.95	165.10	465.88	460.23	0.81	0.69
156	16.03	135.12	110.10	235.20	454.58	448.92	0.75	0.71
166	21.86	140.28	114.01	212.59	470.41	463.62	0.81	0.74
148	13.22	134.76	109.83	241.99	453.45	447.79	0.77	0.75
198	32.81	137.88	112.10	151.53	462.49	456.84	0.89	0.75
204	44.12	139.83	113.66	98.38	469.28	462.49	0.98	0.76
51	0.62	137.83	112.10	292.87	462.49	456.84	0.82	0.84
193	27.60	137.83	112.10	162.83	462.49	456.84	0.95	0.83
150	13.13	134.76	109.83	227.29	453.45	447.79	0.87	0.84
168	21.73	139.61	113.48	194.50	468.15	461.36	0.92	0.84
54	1.16	137.83	112.10	282.70	462.49	456.84	0.87	0.89
229	10.33	135.12	110.10	235.20	454.58	448.92	0.9	0.88
195	27.51	137.83	112.10	150.39	462.49	456.84	1.05	0.92
123	1.07	138.99	112.95	272.52	465.88	460.23	0.95	0.98
3	0.09	134.76	109.83	268.00	453.45	447.79	0.96	0.99
6	0.62	134.76	109.83	261.21	453.45	447.79	0.99	1.02
262	22.53	137.88	112.10	161.70	462.49	456.84	1.12	1.01
231	10.19	138.32	112.46	221.63	463.62	457.97	1.04	1.02
99	0.58	138.32	112.46	254.43	463.62	457.97	1.1	1.13
235	7.39	138.45	112.54	223.90	464.75	457.97	1.12	1.11
264	22.39	138.99	112.95	149.26	465.88	460.23	1.25	1.13
237	7.26	139.57	113.44	218.24	468.15	461.36	1.19	1.18

Note: 圖 6.6.D-6 截面位置

附錄 6.6.E 地震對護箱及燃料池結構物分析計算

對於貯存場中混凝土護箱及外加屏蔽在地震事件中的安全性，可透過力學理論之靜態分析，以及經由土壤結構互制效應分析後，再以 LS-DYNA 之顯性動態、暫態分析的方法來評估。靜態分析結果顯示護箱可承受 0.5 g 的水平地震加速度而不會傾倒。在動態分析中，護箱在各為 0.5 g 水平加速度及 0.33 g 的垂直加速度的作用下，護箱也不會傾倒，但會有輕微的滑動現象。在此設計地震下，護箱及外加屏蔽皆可維持結構完整性。

另外，本分析亦針對傳送護箱在燃料池中操作時，地震力對燃料池中工字樑及燃料池壁等結構的影響進行安全性評估。分析時採用之地震加速度是以核一廠 0.3 ZPA 時的燃料池水中工字樑所處高程的地震加速度 0.692 g 作為計算依據。分析結果顯示傳送護箱在燃料池內，若遭遇地震來襲，而造成護箱撞擊週邊的工字樑或燃料池壁時，工字樑、池壁螺栓、池壁不銹鋼內襯及混凝土牆等結構物所承受之應力，皆可維持正向安全餘裕。

A. 地震時之護箱靜態分析

在考量垂直與水平加速度下，以靜力分析計算增加外加屏蔽後之混凝土護箱傾倒時之最小加速度。評估結果顯示，混凝土護箱在設計地震力作用下，不會發生傾倒，但會發生有限度之滑動。

地震發生時，除了地表水平加速度對結構物產生剪力或傾倒力，亦存在因地表垂直加速度及重力所造成之回復力。分析中假設此地表運動使混凝土護箱以底座邊角為支點轉動，當傾倒力矩大於回復力矩時，混凝土護箱會傾倒。利用混凝土護箱含外加屏蔽之幾何形狀，可計算出其在不傾倒狀況下之最大水平與垂直地表加速度。

依據 NUREG-0800 Rev.1, Section 3.7.2, Subsection II,6 [17]規定，在結構自然頻率大於 33 Hz(cycle/s)時，可依等效應力載重進行

分析。並依 ANSI/ANS 57.9 規定在設計基準地震事件時，必須考量混凝土護箱含外加屏蔽傾倒與滑動之安全係數為 1.1[48]。

假設條件

1. 由質量及外形，假設混凝土護箱底部固定於混凝土基座上，則在地震加速度作用下使混凝土護箱內部產生應力。
2. 保守假設在地震作用下有最高之重心位置(C.G)。
3. 外加屏蔽與混凝土護箱之間裝置有混凝土間隔塊，故地震力作用時，不考慮外加屏蔽與混凝土護箱的相對運動。

設計輸入

1. 結構自然頻率大於 33 Hz。
2. 混凝土護箱及外加屏蔽之相關參數請參考表 6.6.E-1 所示。
3. 圖 6.6.E-1 表示無外加屏蔽混凝土護箱之尺寸。圖 6.6.E-2 表示混凝土護箱施加外加屏蔽後之尺寸。

評估結果

1. 傾倒評估

(1) 加速度

地震時若護箱維持穩定，則回復力矩必須大於或等於傾倒力矩。基於此前提，考慮場址岩盤 0.3 g 地震加速度，經過土壤結構互制(SSI)效應後，傳遞至混凝土基座的自由地表水平加速度為 0.5 g。

依據 ASCE 4-98[14]之 100-40-40 之法則，可以得到水平與垂直加速度分量，此方法直接結合了三個正交之分量，當其中一分量有最大反應值時，另兩個分量為最大值之 40 %。

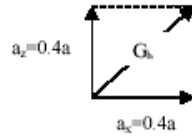
G_h = 兩個水平加速度分量之合向量

G_v = 垂直加速度向量

有兩種分析方式：

狀況一 垂直加速度 a_y 為最大，即 $a_y = a$ ， $a_x = a_z = 0.4a$

$$\text{則 } G_h = \sqrt{a_x^2 + a_z^2}$$

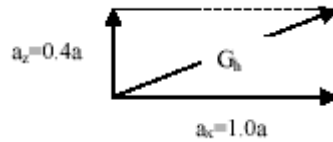


$$G_h = \sqrt{(0.4a)^2 + (0.4a)^2} = 0.566a$$

$$G_v = 1.0 \times a_y = a$$

狀況二 水平加速度 a_x 為最大，即 $a_x = a$ ， $a_y = a_z = 0.4a$

$$\text{則 } G_h = \sqrt{a_x^2 + a_z^2}$$



$$G_h = \sqrt{(1.0a)^2 + (0.4a)^2} = 1.077a$$

$$G_v = 1.0 \times a_y = 0.4 \times a$$

(2) 設計重量及重心

為抵抗傾倒，回復力矩 M_r 須大於傾倒力矩 M_o ，

$$\text{即 } M_r \geq M_o \text{ 或 } F_r \times b \geq F_o \times d$$

$$\Rightarrow W \times (1 - G_v) \times b \geq (W \times G_h) \times d$$

狀況一 垂直加速度 a_y 為最大時，

$$(1-a) \times b \geq 0.566a \times d \quad \text{即} \quad a \leq \frac{b/d}{0.566 + \frac{b}{d}}$$

狀況二 水平加速度 a_x 為最大時，

$$(1-0.4a) \times b \geq 1.077a \times d \quad \text{即} \quad a \leq \frac{b/d}{1.077 + 0.4\left(\frac{b}{d}\right)}$$

b 與 d 依混凝土護箱與外加屏蔽後之尺寸，分別以下標 1 與 2 表示，說明如下：

d_1 = 為混凝土護箱底部到重心之距離 = 115.7 in = 293.88 cm

b_1 = 旋轉點到重心(C.G.)之水平距離 = 63.12 in = 160.33 cm

d_2 = 為加外屏蔽底部到重心之距離 = 113.70 in = 288.80 cm

b_2 = 旋轉點到重心(C.G.)之水平距離 = 87.02 in = 221.03 cm

詳如圖 6.6.E-1 及圖 6.6.E-2 所示。

(3) 設計重心計算

假設密封鋼筒接觸混凝土護箱，故須結合兩者之重心計算。

經計算可得：

a. 混凝土護箱底部到重心 C.G.之距離 d

(a) 混凝土護箱(VCC+TSC)

$$d_1 = 115.7 \text{ in} = 293.88 \text{ cm}$$

(b) 含外加屏蔽之混凝土護箱(AOS+VCC+TSC)，參考表6.6.E-3

$$d_2 = 113.70 \text{ in} = 288.80 \text{ cm} \quad \text{總高度} = 602.7 \text{ cm}$$

b. 旋轉點到重心(C.G.)之水平距離

(a) 混凝土護箱(VCC+TSC)計算

$$b_1 = 63.12 \text{ in} = 160.33 \text{ cm}$$

(b) 含外加屏蔽之混凝土護箱(AOS+VCC+TSC)計算

$$b_2 = 87.02 \text{ in} = 221.03 \text{ cm}$$

(4) 決定最大水平加速度

a. 混凝土護箱(VCC+TSC)計算

狀況一 垂直加速度 a_y 為最大時，

$$a \leq \frac{b_1/d_1}{0.566 + b_1/d_1} \quad \text{即} \quad a \leq 0.49 \text{ g}$$

狀況二 水平加速度 a_x 為最大時，

$$a \leq \frac{b_1/d_1}{1.077 + 0.4(b_1/d_1)} \quad \text{即} \quad a \leq 0.42 \text{ g}$$

加速度 a 取狀況一與狀況二之最小值為 0.42 g，
ANSI/ANS 57.9[48]規定之安全係數 1.1，故允許值為
0.38 g。

b. 含外加屏蔽之混凝土護箱(AOS+VCC+TSC)計算

狀況一 垂直加速度 a_y 為最大時，

$$a \leq \frac{b_2/d_2}{0.566 + b_2/d_2} \quad \text{即} \quad a \leq 0.57 \text{ g}$$

狀況二 水平加速度 a_x 為最大時，

$$a \leq \frac{b_2/d_2}{1.077 + 0.4 \left(b_2/d_2 \right)} \quad \text{即} \quad a \leq 0.55 \text{ g}$$

加速度 a 取狀況一與狀況二之最小值為 0.55 g，ANSI/ANS 57.9 規定之安全係數 1.1，故允許值為 0.50 g。外加屏蔽底座設計寬度 $D = 177.17 \text{ in} = 450 \text{ cm}$ 。

經整理相關數據可知，當混凝土護箱加上外加屏蔽後，假設基座旋轉角隅固定不滑動，以靜力分析得知，為避免傾倒，其重心水平加速度限制在 0.5 g 以下。

2. 滑動評估

為保持混凝土護箱不滑動，抗滑力 F_s 必須大於移動力。

由靜力摩擦方程式：

$$F_s = \mu N \geq G_h W$$

$$\mu(1 - G_v)W \geq G_h W$$

其中：

μ = 為摩擦係數

N = 垂直力

W = VCC 重量

G_v = 垂直加速度分量

G_h = 水平加速度分量

代入兩種 Case：

$$\text{狀況一} \quad \mu(1 - 1.0a) \geq 0.566a$$

$$\text{狀況二} \quad \mu(1 - 0.4a) \geq 1.077a$$

以兩種不同之摩擦係數 μ 來考量，說明如下：

(1). 當護箱底部鋼板與混凝土基座間之摩擦係數 μ 為 0.35[43]時，
先判斷會是否會先產生滑動

$$\text{狀況一} \quad \mu(1-1.0a) \geq 0.566a \quad \text{則 } a \leq 0.38 \text{ g}$$

$$\text{狀況二} \quad \mu(1-0.4a) \geq 1.077a \quad \text{則 } a \leq 0.29 \text{ g}$$

加速度 a 取狀況一與狀況二之最小值為 0.29 g，依 ANSI/ANS 57.9 中規定安全係數應 ≥ 1.1 ，故不產生滑動之水平加速度 $a = 0.29/1.1 = 0.26 \text{ g}$ 。

若考量土壤結構互制 (SSI) 效應，使作用於混凝土護箱之水平加速度增加至 0.50 g，此值大於 0.26 g。

(2). 若護箱底部鋼板與混凝土基座間之摩擦係數 μ 為 0.4 時，

$$\text{狀況一} \quad \mu(1-1.0a) \geq 0.566a \quad \text{則 } a \leq 0.41 \text{ g}$$

$$\text{狀況二} \quad \mu(1-0.4a) \geq 1.077a \quad \text{則 } a \leq 0.32 \text{ g}$$

加速度 a 取狀況一與狀況二之最小值為 0.32 g，依 ANSI/ANS-57.9 中規定安全係數應 ≥ 1.1 ，故不產生滑動之水平加速度 $a = 0.32/1.1 = 0.29 \text{ g}$ 。

若考量土壤結構互制 (SSI) 效應，使作用於混凝土護箱之水平加速度增加至 0.50 g，此值大於 0.29 g。

綜合以上兩點，在評估在尖峰水平地震力下，VCC 與外加屏蔽皆會在地震事件中先產生滑動，但不會傾倒，其滑動量須以 LS-DYNA 進行動態分析，詳細分析詳以下動態分析說明。

B. 地震時場址之土壤結構互制效應分析

評估之目的在於分析含外加屏蔽之整體組件在地震外力下，是否會產生滑動或傾倒，以及是否與相鄰護箱碰撞。並依據 ASCE 4 之規定，垂直加速度為 2/3 倍之水平加速度來評估地震作用力。

由於貯存設施是直立於混凝土基座上，因此土壤結構互制分析是採兩階段的分析方式，先以 SHAKE 91 及 SASSI 2000 程式求得在混

凝土基座上各混凝土護箱位置之地震運動；再將此地震運動作為輸入參數，分析計算混凝土護箱之地震反應。

由於 RG1.60[46]之地震反應譜放大係數比核一廠之設計地震反應譜保守，且核一廠之最終安全分析報告亦有引用，所以本分析採較保守之 RG 1.60 之設計地震反應譜，核一廠 0.3 g 設計地震之 ZPA 為設計地震反應譜。此設計地震之輸入點(control point)為在反應器基礎層之假設露頭(hypothetical outcrop)，且地震是垂直向上傳遞之 P、Sv、Sh 等體波(body waves)。以 SHAKE91 為工具進行土層分析(soil-column analysis)，以求得設計地震狀況下應變相容性(strain-compatible)之土壤動態特性參數及自由場址(free field)位置之設計地震加速度歷時(acceleration time histories)曲線及其反應譜。空間 XYZ 三向(X、Y 為水平方向，Z 為垂直地表方向)之輸入地震係採互為獨立(statistically independent)之加速度歷時。驗證此等加速度歷時及其頻譜的相容性。同時保守地考慮共 40 s 之歷時。SHAKE 91 分析所得之空間 XYZ 三向自由場址地震加速度歷時詳如圖 6.6.E-5。表 6.6.E-1 與 6.6.E-2 為 SHAKE 91 的分析輸入參數與輸出，其中 SHAKE91 分析之結果，做為混凝土基座與土壤互制分析之輸入資料，以求取各混凝土護箱所在節點位置之地震反應。圖 6.6.E-6 為 SHAKE 91 分析所用的地盤模型。

混凝土基座與土壤互制分析係採柔性體積法(flexible volume method)之 SASSI 2000 為分析工具。在 SASSI 分析中，土壤係以半無限彈性空間上的粘彈性水平層來建構，混凝土基座為一彈性埋置結構以三維 8 節點的實體元素建構；混凝土基座位置之開挖區域之土壤亦採三維之實體元素。至於 SASSI 分析中有關阻抗矩陣(impedance matrix)之計算，則採扣除法(the subtraction method)。另外，各混凝土護箱之重量也依其所在之節點位置納入分析模式中。圖 6.6.E-9 即為 SASSI 分析後，各混凝土護箱所在節點位置之最大地震反應。分析結果顯示，核一廠 0.3 g 的設計地震加速度經由乾式貯

存場址土壤結構互制效應後的場址混凝土基座表面最大水平加速度為 0.48 g，最大垂直加速度為 0.27 g。

取前述 SASSI 2000 分析所得各結點位置之最大地震反應，做為混凝土護箱之地震分析輸入，利用 LS-DYNA 進行分析計算混凝土護箱之地震反應，詳如下述之 LS-DYNA 動態分析。

C. 地震時之護箱 LS-DYNA 動態分析

分析方法、分析軟體

使用 ANSYS 建立混凝土護箱、基座、密封鋼筒、混凝土外加屏蔽及混凝土基座之三維有限元素模型全尺寸，如圖 6.6.E-10，並以 LS-DYNA 進行顯性動態暫態(explicit dynamic transient)有限元素分析。

基本假設

1. 結構組件分以下主要部份

- (1) 混凝土護箱+鋼筋+內襯+基座(Pedestal)，視為一體組件。假設其為線彈性材料。
- (2) 密封鋼筒及其所有內部加載零組件，視為一體組件。假設其為剛體。
- (3) 混凝土基座假設為剛體。
- (4) 混凝土外加屏蔽，分為四大組件，假設其為線彈性材料。

2. 混凝土護箱及外加屏蔽之間假設無相對位移。

3. 密封鋼筒假設起始位置偏離混凝土護箱圓柱中心線，並剛好接觸內襯。

4. 所有視為一體之組件，其密度以總重除以總體積之等價體積計算。

設計輸入參數

1. 混凝土護箱+鋼筋+內襯+基座

總重	234,628 lbs
總體積	2,419,700 in ³

- | | |
|------|--------------------------|
| 等價密度 | 0.097 lb/in ³ |
| 彈性係數 | 3.969 E+06 psi |
| 柏松比 | 0.22 |
2. 密封鋼筒*
- | | |
|------|----------------------------|
| 滿載總重 | 75,600 lbs |
| 模型體積 | 24,621 in ³ |
| 等價密度 | 3.07055 lb/in ³ |
| 彈性係數 | 29. E+06 psi |
| 柏松比 | 0.31 |
3. 混凝土基座*
- | | |
|------|--------------------------|
| 密度 | 0.089 lb/in ³ |
| 彈性係數 | 3.969 E+06 psi |
| 柏松比 | 0.22 |
4. 混凝土外加屏蔽
- | | |
|------|--------------------------|
| 密度 | 0.089 lb/in ³ |
| 彈性係數 | 3.969 E+06 psi |
| 柏松比 | 0.22 |
5. 混凝土基座之地板加速度歷時

LS-DYNA 所使用之加速度歷時。此加速度歷時，為以圖 6.6.E-9 水平加速度放大至 0.5 g，垂直加速度放大至 0.33 g 的數值；此加速度值足以涵蓋貯存場址因土壤結構互制效應的地震加速度。

6. 摩擦係數

在 LS-DYNA 地震動態分析計算中，假設兩種摩擦係數，分別為 0.2 與 0.8，亦即分析中假設靜摩擦係數及動摩擦係數皆設為 0.2；另一分析中假設靜/動摩擦係數皆為 0.8。因摩擦係數較小會造成貯存設施較易滑動量；大摩擦係數則造成設施較容易傾倒。此假設符合保守分析原則。

*雖然密封鋼筒與混凝土基座在地震 LS-DYNA 分析中接假設為剛體，因 LS-DYNA 的程式特性，在輸入參數中中仍必須給于材料機械參數，但在計算中其元件性質仍維剛體。

分析結果

分析結果之主要判讀項目為護箱相對於混凝土基座之位移(亦即其相對於地面之滑動距離)，以及其整合模組是否發生傾倒與外加屏蔽上蓋是否脫落。此外也取出各外加屏蔽相對於混凝土護箱之相互作用力，作為判斷混凝土護箱與外加屏蔽間之間隔塊是否在地震過程中破損的依據。在於土壤結構互制分析的結果輸出時間為 40.96 s，但在 LS-DYNA 的護箱地震分析中，除引用土壤結構互制分析的 40.96 s 的計算結果外，延長加速度響應至 50.0 s，以觀察地震開始後 50.0 s 的護箱行為，但 40.96 s 至 50.0 s 的加速度為零。

外加屏蔽相對於混凝土基座之位移

在外加屏蔽底部及混凝土基座靠近外加屏蔽處，各取一點(如圖 6.6.E-12 所示)，取其 X，Y 方向與混凝土基座的相對位移，可得到在摩擦係數皆為 0.2 與 0.8 時，外加屏蔽與混凝土基座的相對位移量。其相對位移如圖 6.6.E-13 及圖 6.6.E-14 所示，圖中正值表示外加屏蔽相對於混凝土基座 (亦即地面)水平方向滑動量，以及垂直方向的相對位移關係。由圖中可知，在摩擦係數為 0.2 時，其最大水平滑動距離約為 4.2 cm (1.66 in)，發生在地震開始約 17 s 時；當摩擦係數為 0.8 時，其最大水平滑動距離約為 0.61 cm (0.24 in)，發生在地震開始約 19 s 時。結果顯示，無論摩擦係數為 0.2 或 0.8，其垂直方向的震盪都相當輕微。

外加屏蔽疊堆之傾倒

分析過程顯示，在加速度歷程尾端時，結構已近驅穩定，且外加屏蔽並無傾倒之虞。此結論可由圖 6.6.E-15 與圖 6.6.E-16 可清楚看出，在圖中之垂直位移中(Z 方向)，外加屏蔽上蓋三個觀察位置因地震而快速顫動，但位移量很小，遠小於各外加屏蔽間搭接處的階級高度 14 cm。且三個觀察點的位置幾乎一直維持在同一水平面上，故

可確定在地震過程中，外加屏蔽上蓋未脫離混凝土護箱，故整個貯存設施在地震後依然維持結構完整。另外，在外加屏蔽上蓋與混凝土基座的相對應位置的水平位移量，幾乎與外加屏蔽底座與混凝土基座的相對水平位移量完全一樣，說明混凝土護箱在地震時，無搖晃的現象發生。並且在地震過程中，外加屏蔽上蓋始終都維持在同一高程，故護箱在地震中無傾倒之虞。

外加屏蔽與混凝土護箱之相互作用力

本設計之外加屏蔽共有五個組件。摩擦係數為 0.2 時，所得之 X 與 Y 方向之外加屏蔽與混凝土護箱相互作用力如圖 17 所示。最大之 X 方向作用力發生於外加屏蔽 4(底部以上第四圈)，其值為為 12,820 lb，最大之 Y 方向作用力發生於屏蔽 4，其值為 4,395 lb。摩擦係數為 0.8 時，所得之 X 與 Y 方向之相互作用力如圖 18 所示，最大之 X 方向作用力發生於外加屏蔽 1(底部圈)，其值為為 30,290 lb，最大之 Y 方向作用力發生於外加屏蔽 4，其值為 41,950 lb。

在於護箱進氣口半堵塞時，ANSYS 計算所得混凝土護箱外表面與外加屏蔽內表面的 1 in 間距間的最大溫差為 44.8 °F，混凝土護箱外表面與外加屏蔽內表面溫度各為 209.1 °F 與 164.3 °F。而混凝土間隔塊之截面積為 93 in²(200 mm x 300 mm)。故地震時之混凝土間隔塊的負載組合為地震負載與熱負載的組合。

$$MS = f'_c / (P/A + E\alpha \delta T) - 1$$

其中

f'_c = 混凝土抗壓強度 (4,000 psi)

P = 混凝土間隔塊之所受外力

A = 混凝土間隔塊之截面積(93 in²)

E = 混凝土楊氏係數 (3.38E+06 psi)

α = 混凝土熱膨脹係數(5.5E-6 in/in/°F)

δT = 混凝土護箱外表面與外加屏蔽內表面的溫差(44.8 °F)

所以考慮地震負載與熱負載的組合後的混凝土間隔塊之安全餘裕為

$$MS_1 = 4,000 / (12,820 / 93 + 3.38E06 \times 5.5E-06 \times 44.8) - 1 = 3.12$$

$$MS_2 = 4,000 / (30,290 / 93 + 3.38E06 \times 5.5E-06 \times 44.8) - 1 = 2.45$$

故摩擦係數為 0.2 與 0.8 時之地震時最大瞬間應力所造成的安全餘裕為分別為 3.12 與 2.45。

無外加屏蔽情況下之混凝土護箱位移

在混凝土護箱底部取一點，並在混凝土基座頂部取一點(如圖 6.6.E-19 所示)，取其 X, 及 Y 方向之位移並相減，可得到在摩擦係數皆為 0.2 時，其 X, Y 及 Z 方向相對位移如圖 6.6.E-20 所示，最大滑動量為 2.57 in。在摩擦係數皆為 0.8 時，其相對位移如圖 6.6.E-21 所示，最大滑動量為 5.15 in。由圖中可知，摩擦係數皆為 0.2 時有無外加屏蔽之情況兩者位移類似，摩擦係數皆為 0.8 時之情況下差別較大，但二者的滑動量皆未使護箱離開混凝土基座；地震過程中之混凝土護箱亦未傾倒。

本結構組件經由 LS-DYNA 之顯性動態、暫態分析可知，外加屏蔽相對於混凝土基座(亦即地面)雖有滑動現象，但其距離約為 4.2 cm；此外，外加屏蔽之疊堆經分析亦不見有傾倒之趨勢。在無外加屏蔽的時候，護箱滑動距離約為 13.1 cm。結果顯示整體護箱在最大 0.5 g 地震加速度與 40 s 的地震加速度歷時下，整體貯存設施仍可維持結構完整性，並且混凝土護箱間無相互碰撞或傾倒之虞。

D. 地震對燃料池中結構的影響

池中工字樑結構位於燃料池底的一角落，由二支水平樑及一支與池底連結的垂直工字柱所構成；以作為拘束燃料傳送護箱於燃料池操作時之用，避免萬一發生地震時，可能造成傳送護箱於池中傾覆而損及格架中的燃料。惟一號機與二號機組之燃料池工字柱結構並不相同，為保守取其面積慣性矩較小者進行分析。結構中，水平樑翼板寬 33 cm(13 in)、厚 2.54 cm(1 in)，副板高為 25.4 cm(10 in)、厚 1.25 cm(0.5 in)，長度為 243.8 cm(8 ft)；垂直柱的翼板寬度為 11.4 cm(4.5 in)、厚 0.95 cm(0.375 in)，副板高為 14.0 cm(5.5 in)、厚 1.91 cm(0.75 in)，長度為 410.3 cm(13.46 ft)。水平樑各由 4 支直徑 4.45 cm(1.75 in) 螺栓與燃料池牆面連結，每支螺栓均深入牆面 61 cm(2 ft) 深。牆面內部之螺栓以 2 支一組，穿越 61 cm(2 ft) 深牆中長寬 30.5 x 17.8 cm(12 x 7 in)、厚 2.54 cm(1 in) 的鋼板，並以螺帽鎖住後銲接，藉以增加螺栓的抗拉能力。

經計算得系統結構的樑與柱的自然頻率分別為 56.96 Hz 與 27.85 Hz，因考慮系統結構中與傳送護箱作用的對象為樑，所以，以樑的自然頻率作為分析基準。因樑的自然頻率 56.96 Hz 超過 33 Hz，故以核一廠 0.3 ZPA 時的水平樑所處高程(33.97 m(111.46 ft))的地震加速度為 0.692 g，作為傳送護箱與水中結構物衝擊力的加速度計算依據，再保守考慮傳送護箱與底板的摩擦係數為 0.2。其他分析參數如下：

傳送護箱滿載用過核子燃料的密封鋼筒重量(W_c)：87 MT

傳送護箱滿載用過核子燃料的密封鋼筒浮力(F_c)：10.9 MT

樑柱結構重量(W_{beam})：0.94 MT

樑柱結構浮力(F_{beam})：0.12 MT

護箱額外負載(added mass) [44]係數(C_{mc})：1.88

樑柱結構額外負載係數(C_{mframe})：1.0

傳送護箱與底板的摩擦係數(μ)：0.2

傳送護箱與樑柱結構的撞擊力為 F_{impact}

$$F_{\text{impact}} = W_c \times 0.692 - \mu(W_c - F_c) + C_{mc} \times F_c + W_{\text{beam}} \times 0.692 - C_{m\text{frame}} \times F_{\text{beam}} = 66.25 \text{ MT}$$

分析中保守使用 70.0 MT 帶入 ANSYS 分析模式中計算，分析時依照 ASEC4，於三個軸向的地震力採 100-40-40 的法則計算，故對二支水平樑，分別以 70.0 MT 及 28.0 MT 的地震衝擊力，分析結構的完整性。

分析結果顯示表 6.6.E-6，依 ASME Code Section III Subsection NF，評估水平樑與螺栓的最小安全餘裕分別為 1.62 與 0.33。雖然傳送護箱撞擊水平樑時造成螺栓對混凝土牆極大的拉拔作用力，但依 ACI 349 規定在直徑 4.45 cm(1.75 in)螺栓深入抗壓強度 4,000 lb/in² 的混凝土牆 61 cm(2 ft)深度下，混凝土牆仍具有 2.0 的安全餘裕。

燃料池的四周為 4.8 mm(0.1875 in)厚的 ASTM 357 A157 的不銹鋼內襯，傳送護箱撞擊於燃料池中操作，萬一遇地震來襲時，亦可能造成護箱與池壁的碰撞。當傳送護箱坐落於燃料池底時，保守使用 32.61 m(107 ft)高程評估傳送護箱的地震加速度為 0.667 g，故傳送護箱撞擊池壁的作用力為

$$F_{\text{wall}} = W_c \times 0.667 - \mu(W_c - F_c) + C_{mc} \times F_c = 54.59 \text{ MT} \quad (C_{mc}=1)$$

分析時保守使用 60 MT (132,159 lb)的對池壁撞擊力，由於傳送護箱與池壁的間距不會大於 12 cm(4.7 in)，而傳送護箱高度為 481.5 cm(189.6 in)，二者相距懸殊；故在傳送護箱與池壁的碰撞過程中，只考慮整體傳送護箱側邊與池壁的碰撞情況。分析中採用參考文獻 [45]中圓柱體與壁體相互推擠時之應力計算方程式，得推擠時之最大應力為：

$$(\sigma_c)_{\max} = 0.591 \sqrt{\frac{pE}{K_D}} = 0.591 \sqrt{\frac{697.04 \times 29.3 \times 10^6}{83.52}} = 9,242 \text{ psi}$$

其中：

$$p = \text{負載/碰撞長度} = 60,000 / (0.454 \times 189.6) = 697.04 \text{ lb/in}$$

$$K_D = \text{傳送護箱直徑} = 83.52 \text{ in}$$

$$E = \text{傳送護箱與池壁不銹鋼內襯彈性係數} = 29.3 \times 10^6 \text{ psi}$$

由於在 ASME Section III Subsection NF 中，對於意外事故 (Service Level D) 的承壓應力 (Bearing Stress) 是不予考慮的，況且 9,242 psi 的壓應力也遠小於 A36 不銹鋼內襯的降伏應力值 (36.0 ksi)，故 9,242 psi 的壓應力並不會對壁體不銹鋼內襯造成安全顧慮。

碰撞時的接觸面積之寬度

$$b = 2.15 \sqrt{\frac{pK_D}{E}} = 2.15 \sqrt{\frac{697.04 \times 83.52}{29.3 \times 10^6}} = 0.096 \text{ in}$$

故池壁不銹鋼內襯中的混凝土牆承壓應力為

$$\frac{60,000 / 0.454}{189.6 \times (0.096 + 0.1875 \times 2)} = 1,480 \text{ psi}$$

混凝土容許承壓應力計算如下：

$$U_b = 0.85 \cdot \phi \cdot f'_c \cdot A_1 \cdot \sqrt{\frac{A_2}{A_1}} = 0.85 \times 2 \times (0.7)(4,000) = 4,760 \text{ psi}$$

其中：

$$\phi = 0.7 \text{ 承載強度折減因子 (strength reduction factor for bearing),}$$

$$A_1 = 189.6 \times (0.096 + 0.1875 \times 2) = 89.02 \text{ in}^2 \text{ 為千斤頂經 45 度傳}$$

遞後之混凝土承載面積

$$A_2 = (b + 2L)H = (0.096 + 2 \times 2 \times 12)189.6 = 9119 \text{ in}^2 \text{ 為混凝土}$$

可承載之面積

$\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \geq 2$ ，按 ACI 349 規定，當 $\sqrt{\frac{A_2}{A_1}} \geq 2$ 時，最多只能採用 2。

混凝土容許承壓應力安全餘裕如下：

$$MS = \frac{4,760}{1,480} - 1 = 2.22$$

基於以上計算得知，傳送護箱在燃料池中的操作過程，若遭遇地震來襲，而造成護箱撞擊週邊的工字樑或燃料池壁，工字樑及其螺栓，與壁體不銹鋼內襯及混凝土牆，皆可維持正向安全餘裕。

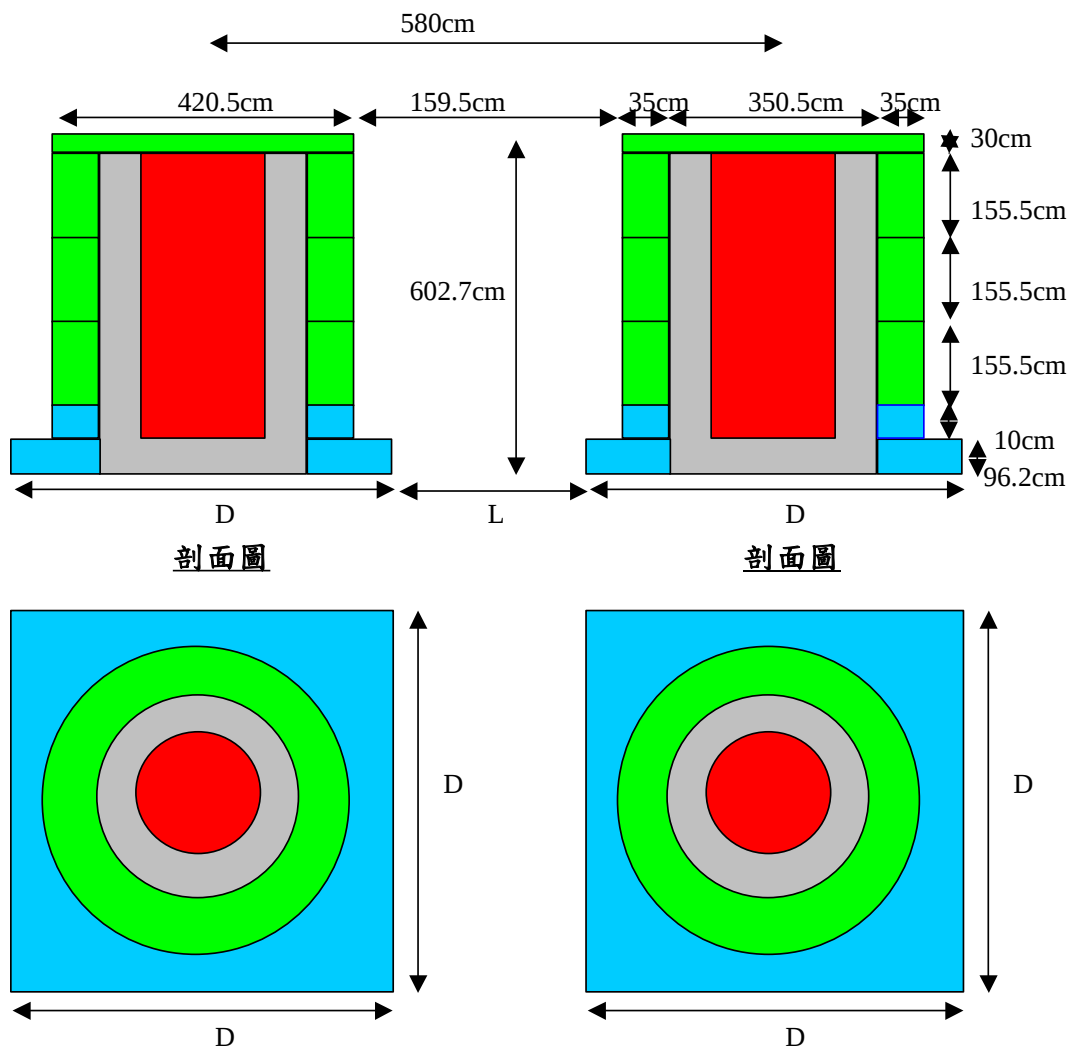


圖 6.6.E-3 外加屏蔽設計混凝土護箱之配置尺寸

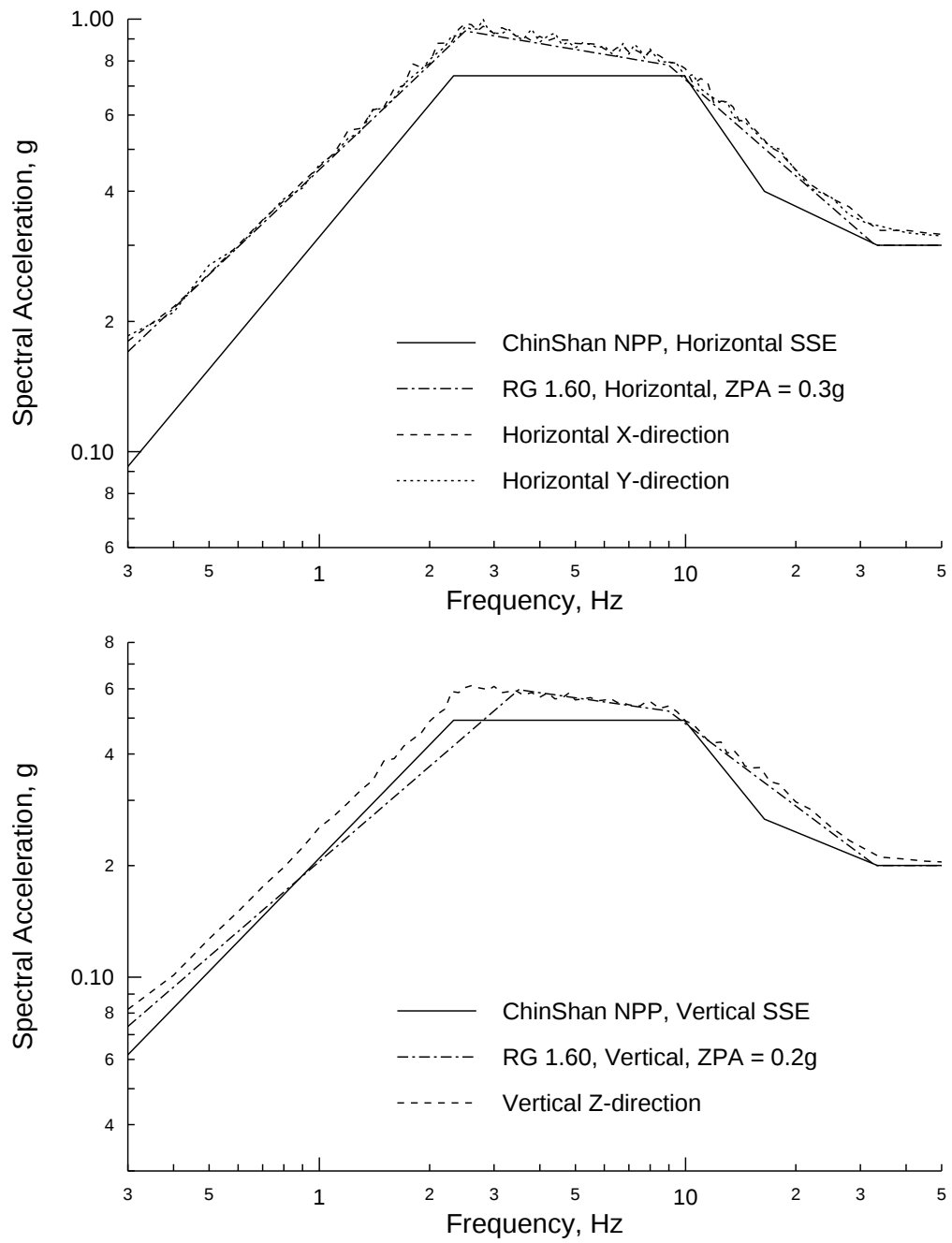


圖 6.6.E-4 地震頻譜的比對

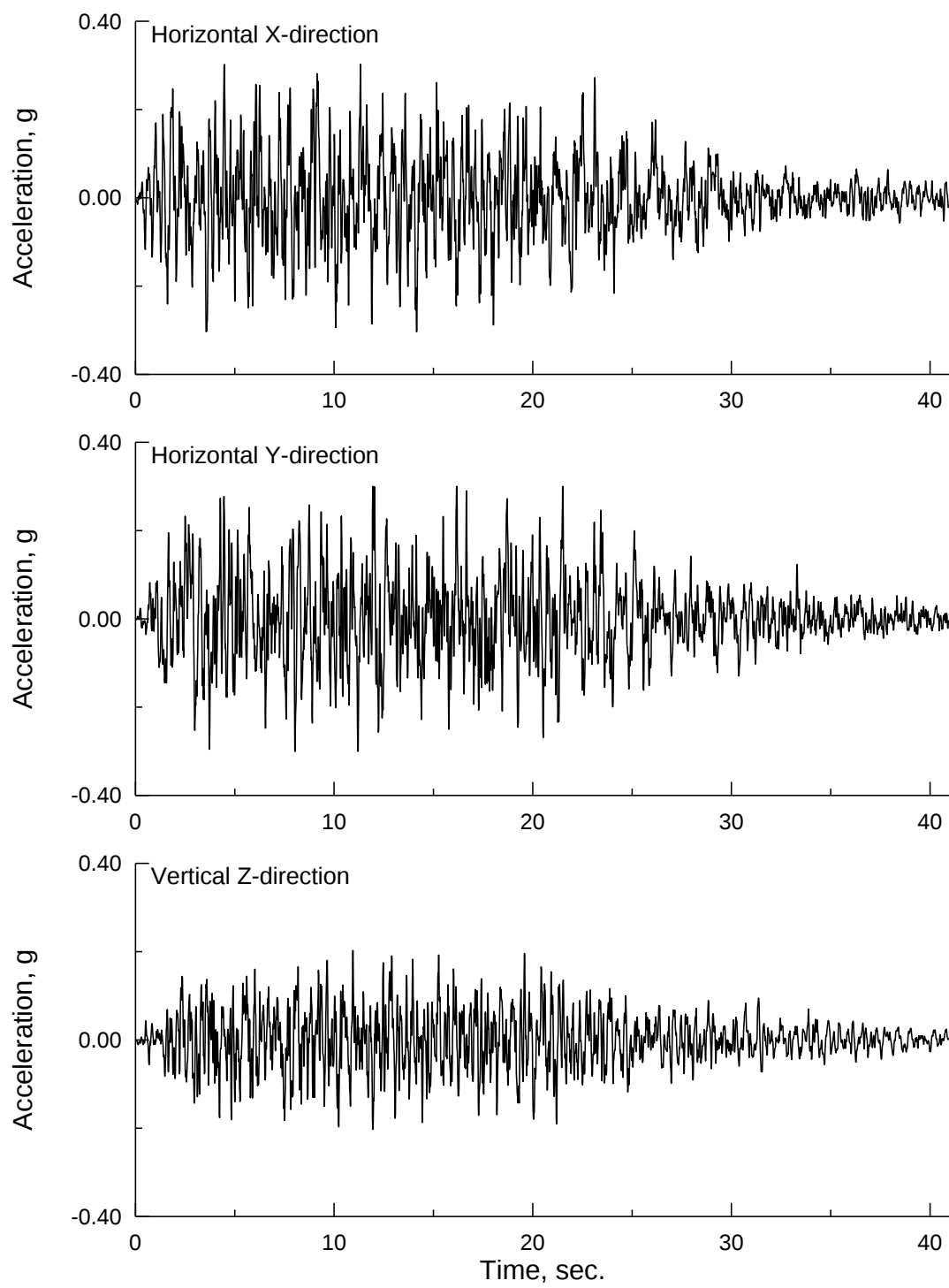


圖 6.6.E-5 RG 1.60 地震加速度

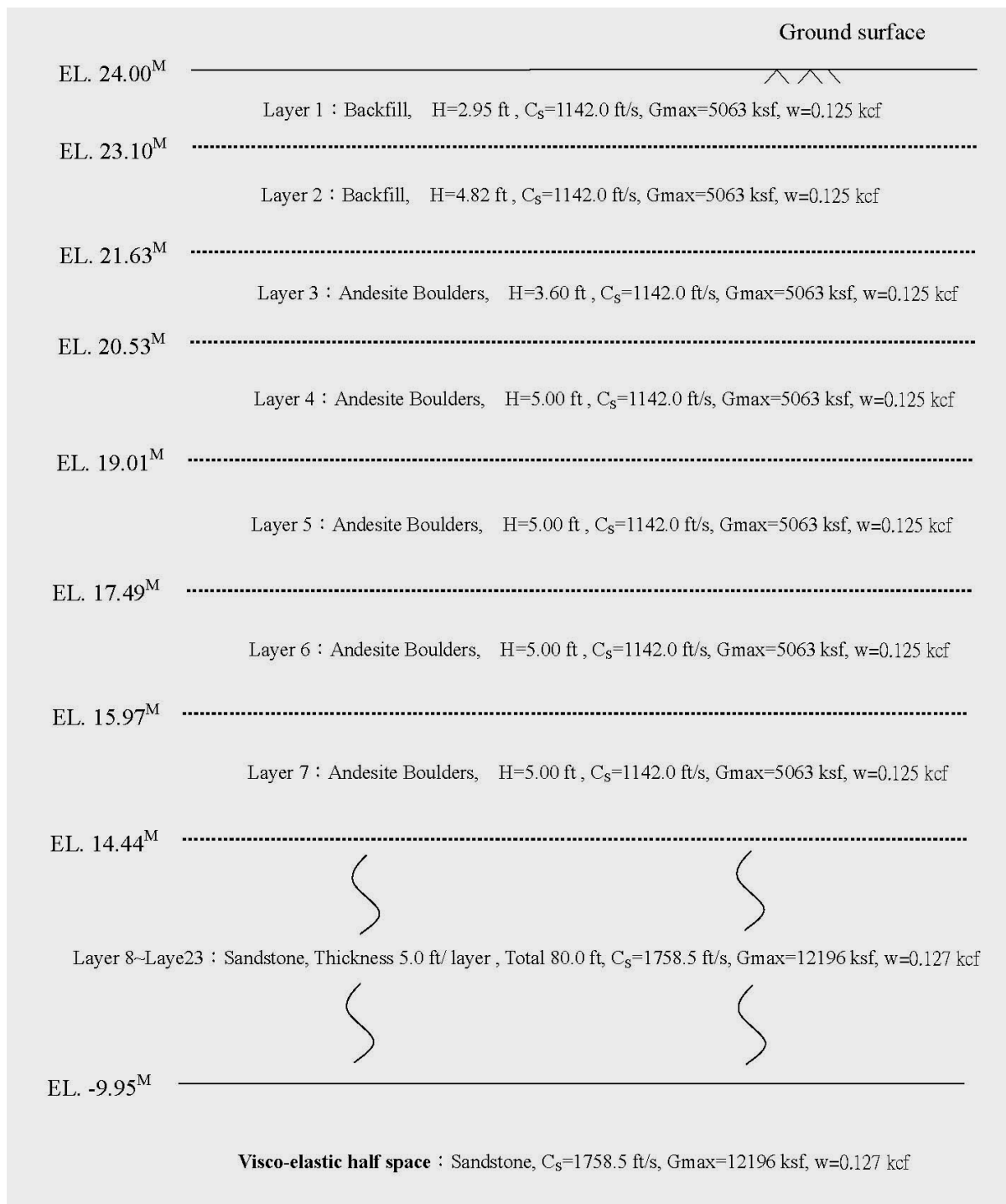
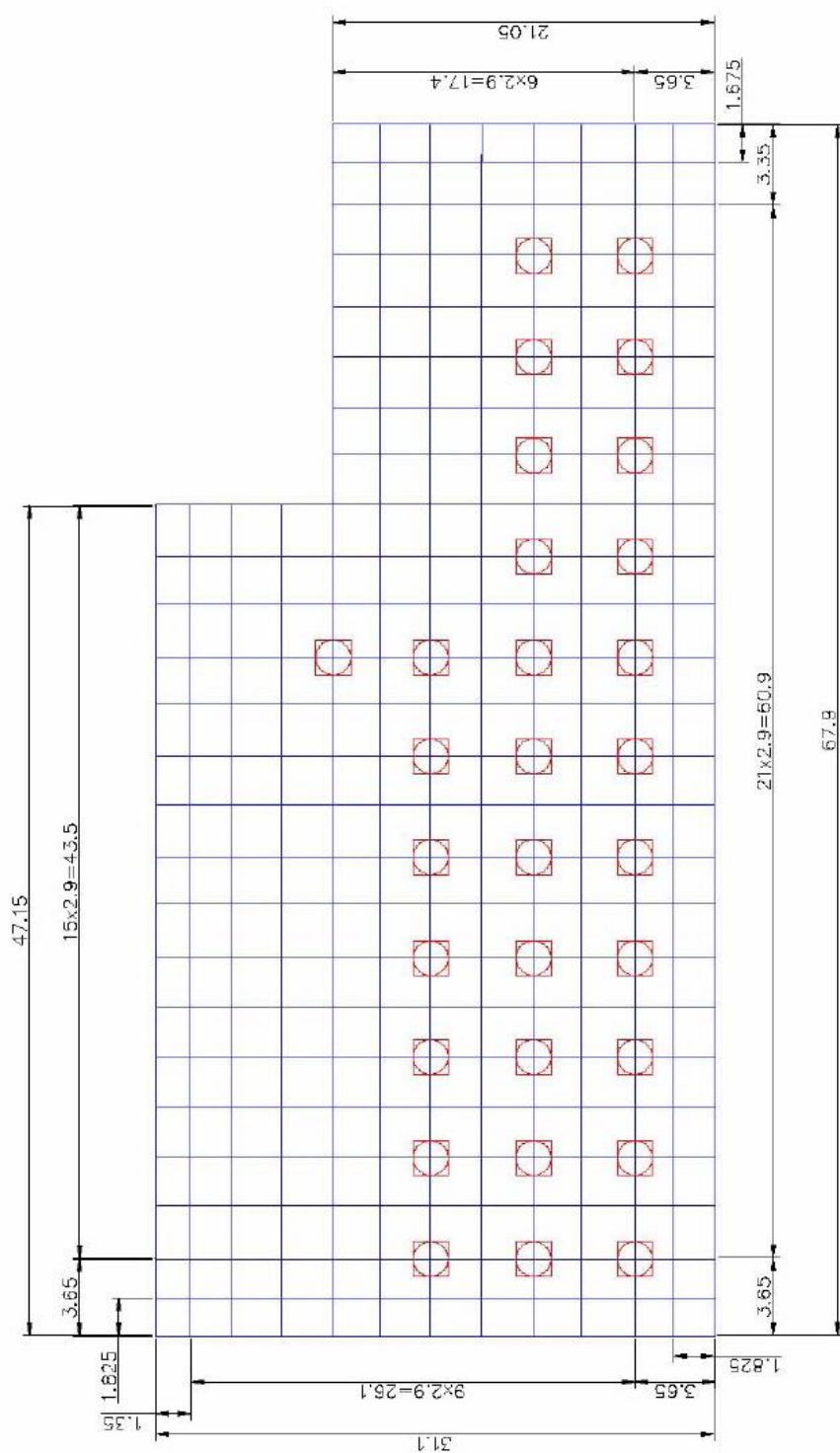


圖 6.6.E-6 SHAKE 分析所用之地盤模型



6.6.E-7 SASSI 分析模式

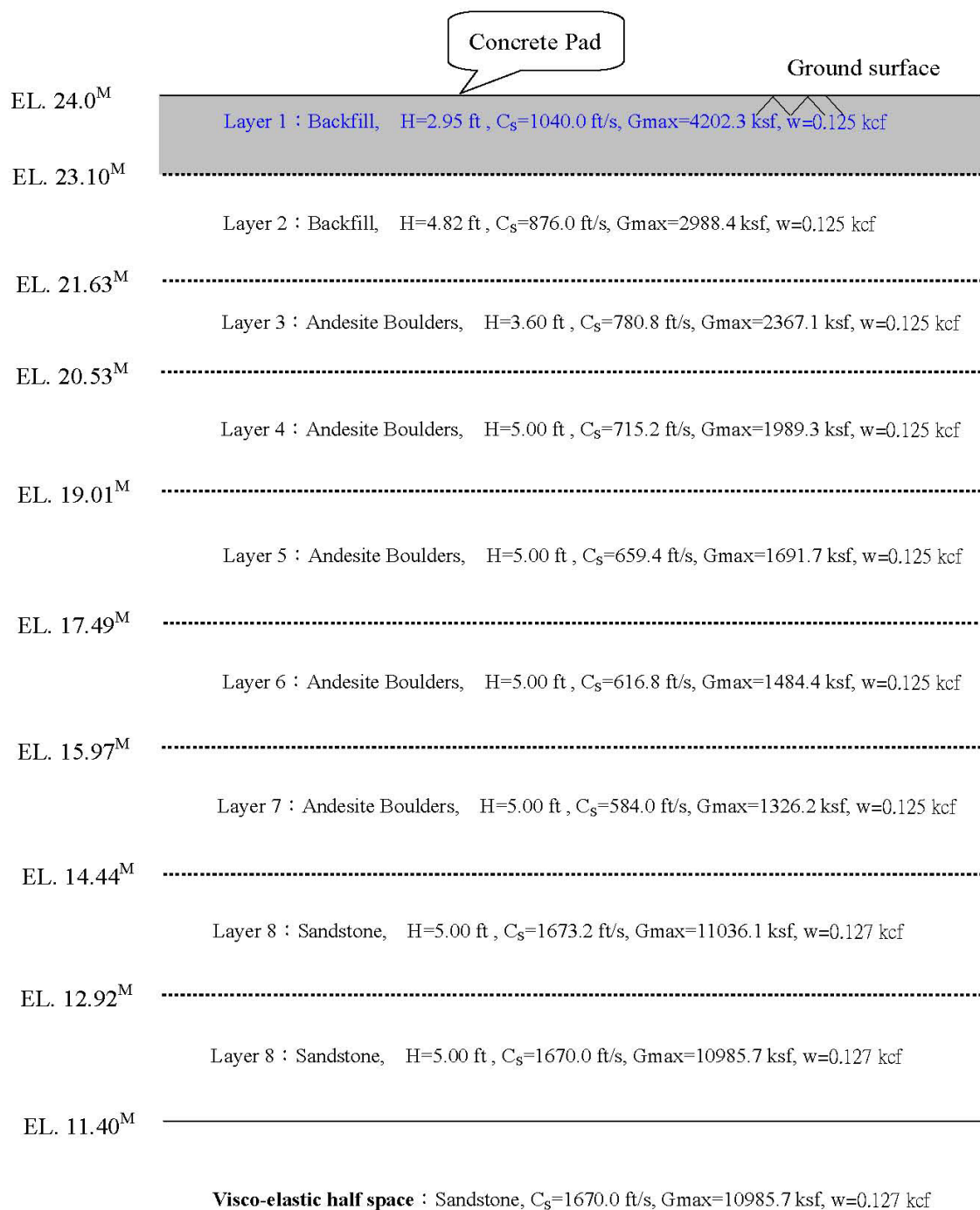


圖 6.6.E-8 SASSI 分析模式(BE case)

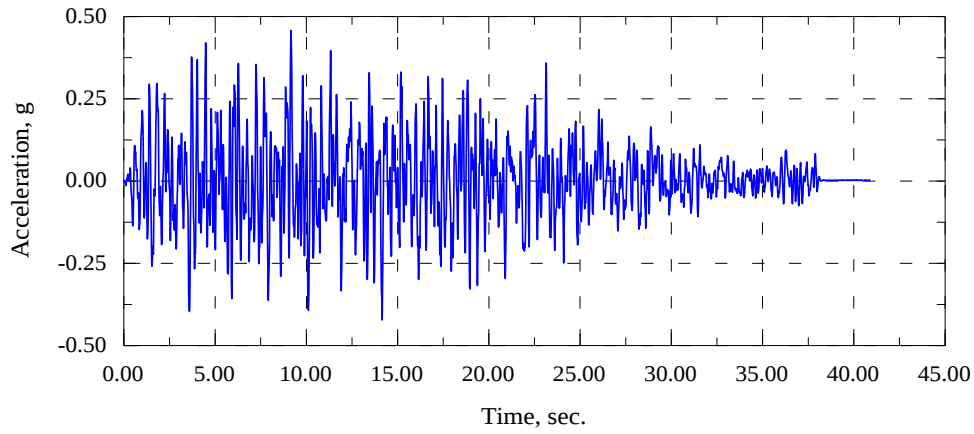


圖 6.6.E-9 (a) 土壤與結構互制後貯存場址混凝土基板表面水平 X 方向加速度

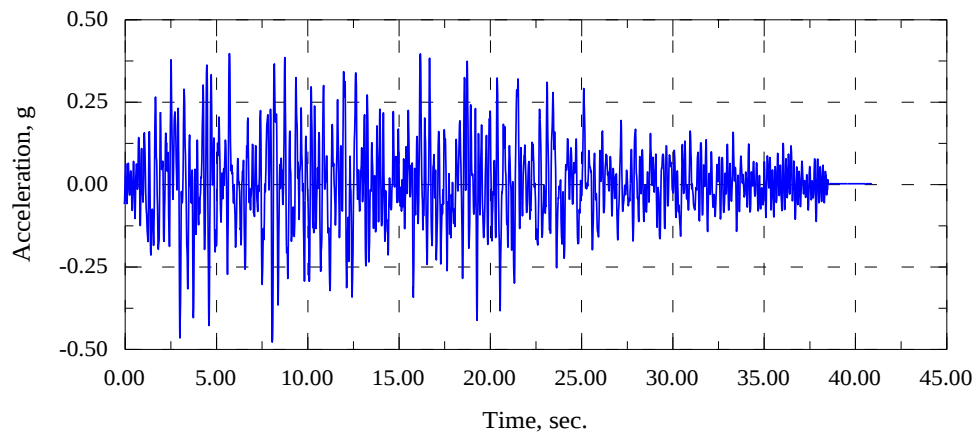


圖 6.6.E-9 (b) 土壤與結構互制後貯存場址混凝土基板表面水平 Y 方向加速度

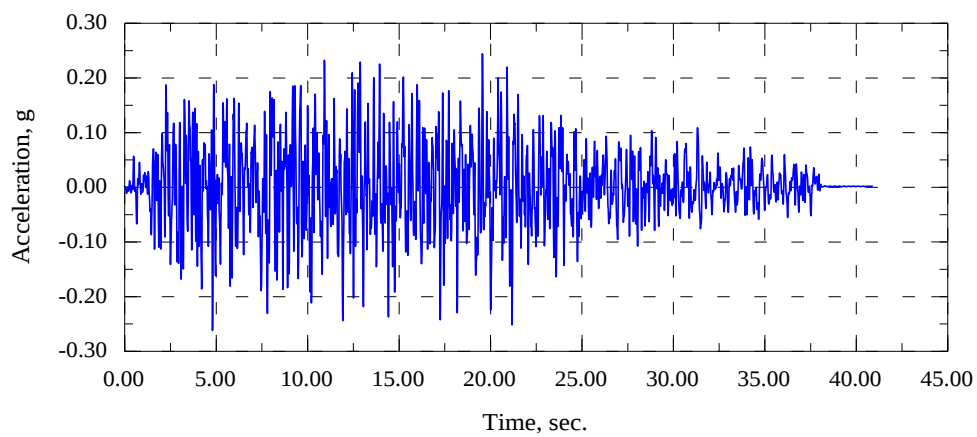


圖 6.6.E-9 (c) 土壤與結構互制後貯存場址混凝土基板表面水平 Z 方向加速度

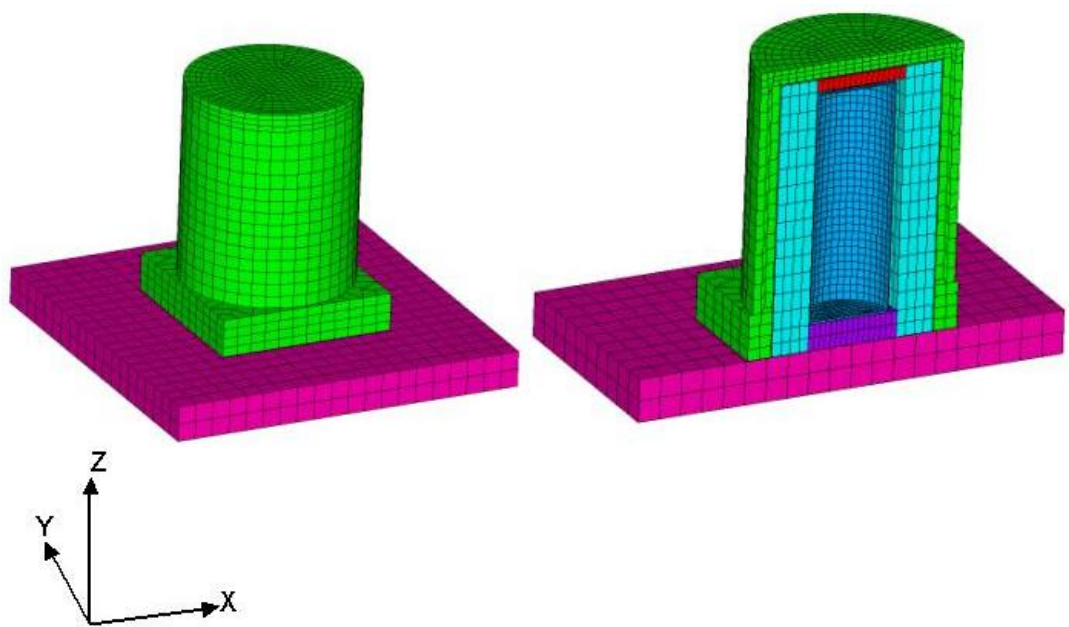


圖 6.6.E-10 座標定義，有限元素模型網格，全模型(左)及模型半剖面(右)示意圖

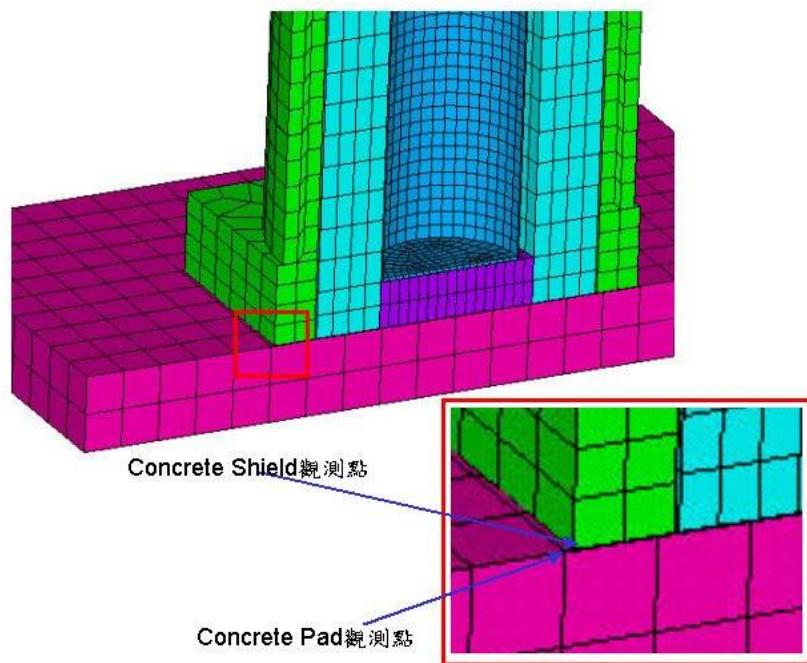
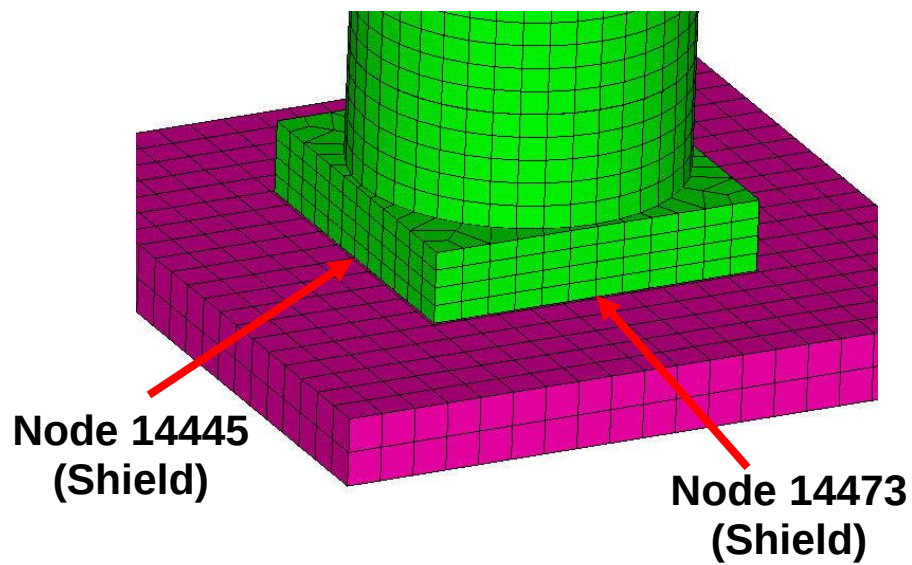
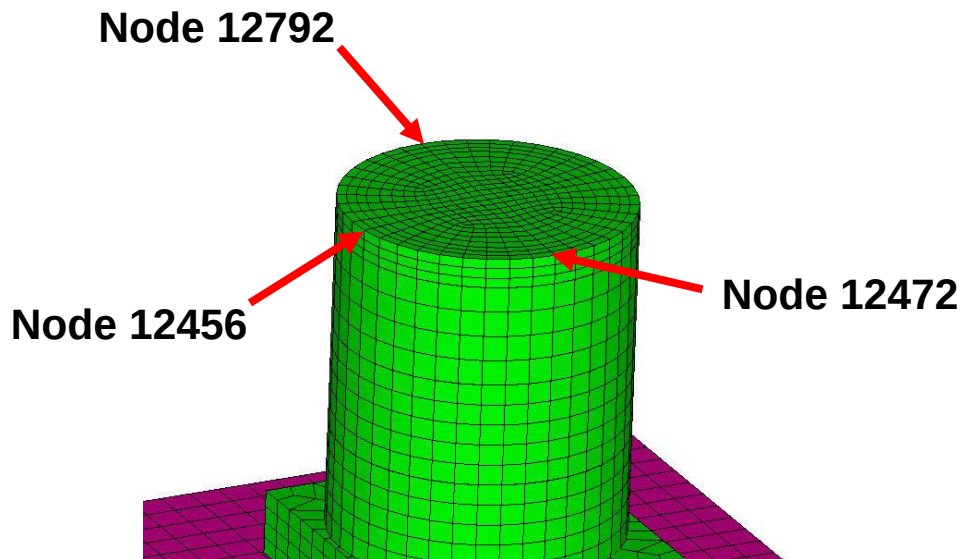


圖 6.6.E-11 混凝土外加屏蔽及混凝土基座相對移動位置之觀測點

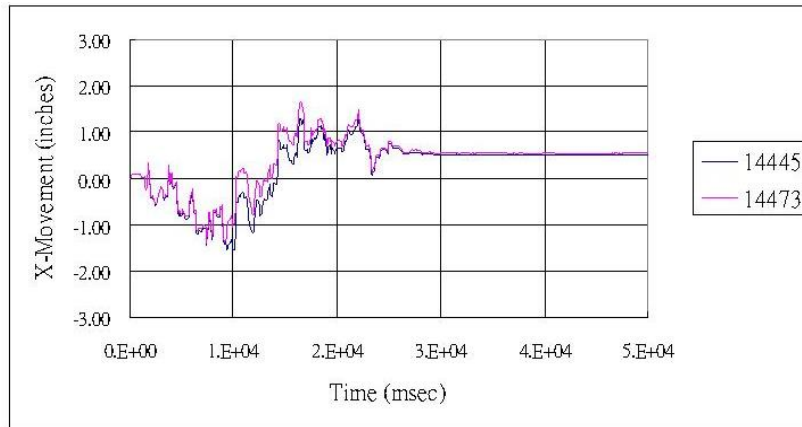


(a) 混凝土外加屏蔽底座之觀測點

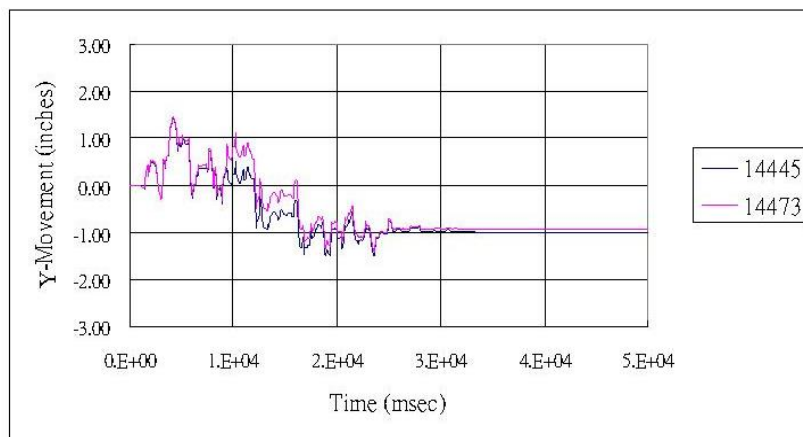


(b) 混凝土外加屏蔽上蓋之觀測點

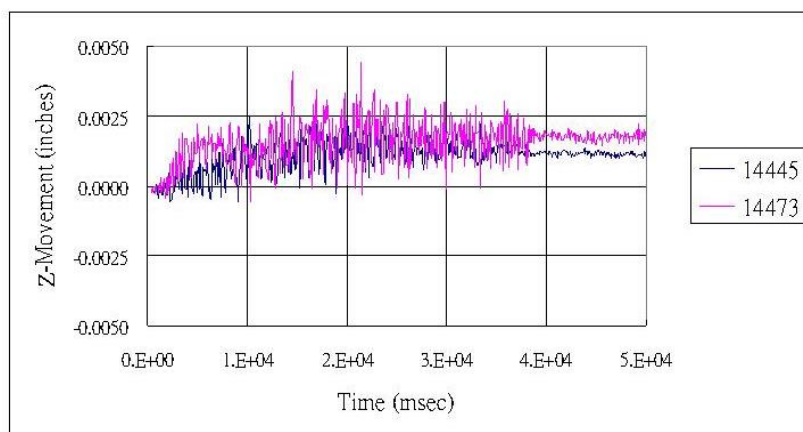
圖 6.6.E-12 地震時之混凝土外加屏蔽觀測點位置



(a) 水平 X 方向外加屏蔽相對於混凝土基座之位移

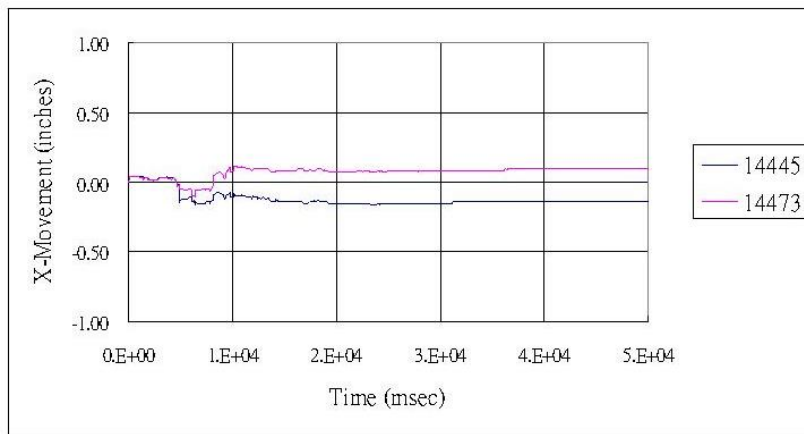


(b) 水平 Y 方向外加屏蔽相對於混凝土基座之位移

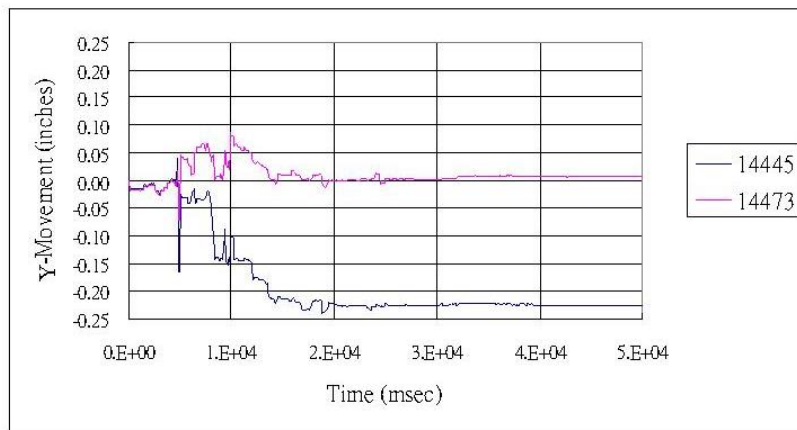


(c) 垂直 Z 方向外加屏蔽相對於混凝土基座之位移

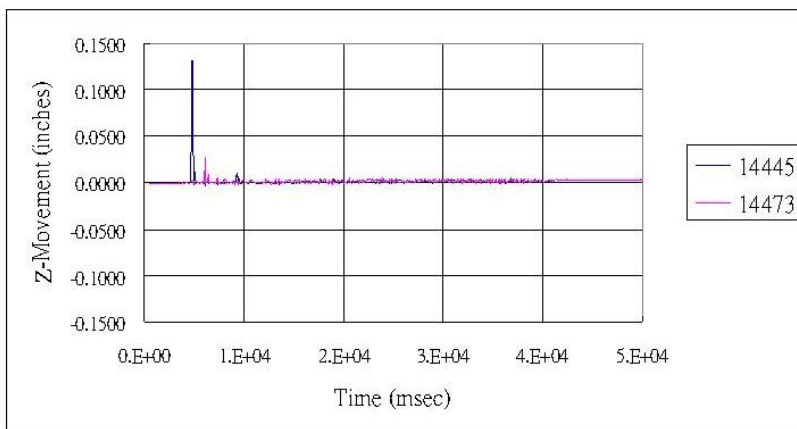
圖 6.6.E-13 摩擦係數 0.2 時，外加屏蔽相對於混凝土基座之位移



(a) 水平 X 方向外加屏蔽相對於混凝土基座之位移

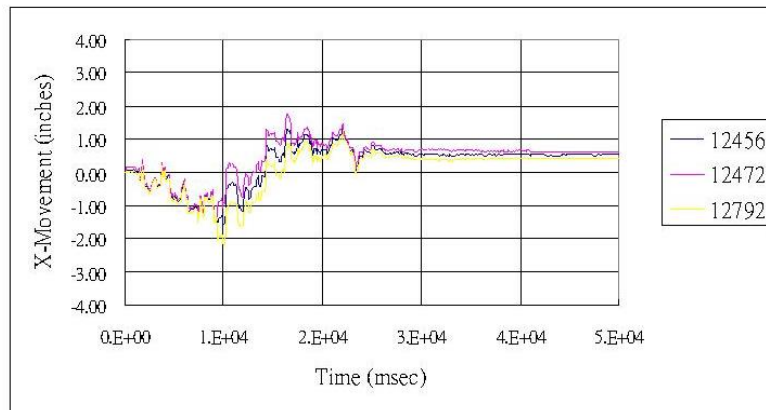


(b) 水平 Y 方向外加屏蔽相對於混凝土基座之位移

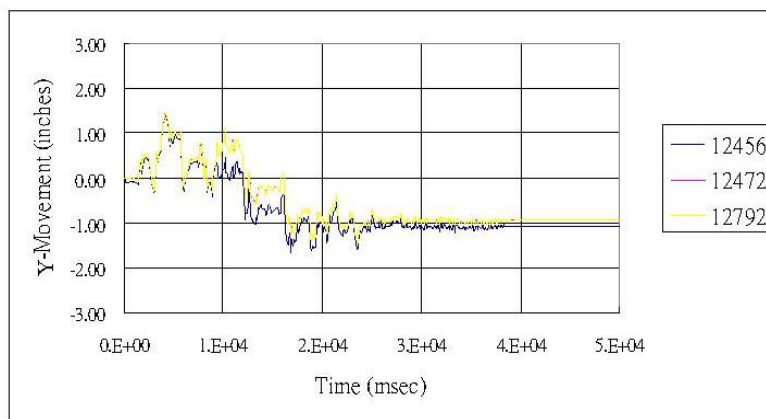


(c) 垂直 Z 方向外加屏蔽相對於混凝土基座之位移

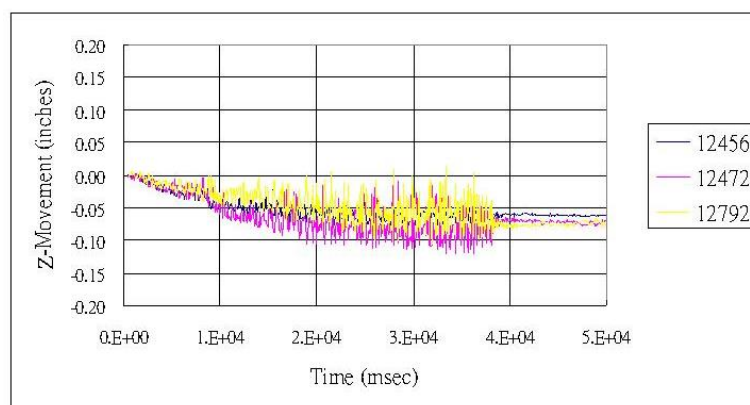
圖 6.6.E-14 摩擦係數 0.8 時，外加屏蔽相對於混凝土基座之位移



(a)水平 X 方向外加屏蔽上蓋之位移

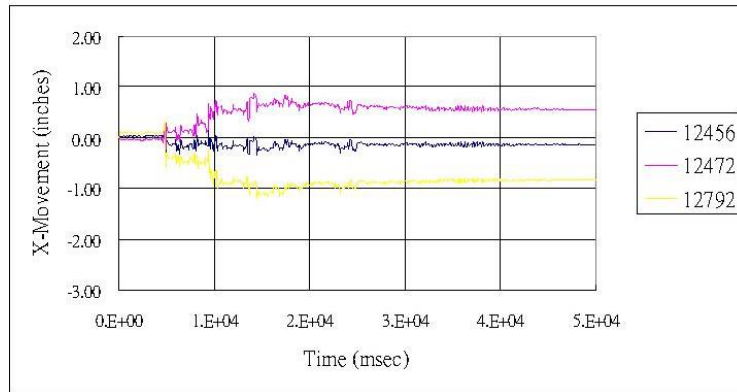


(b)水平 Y 方向外加屏蔽上蓋之位移

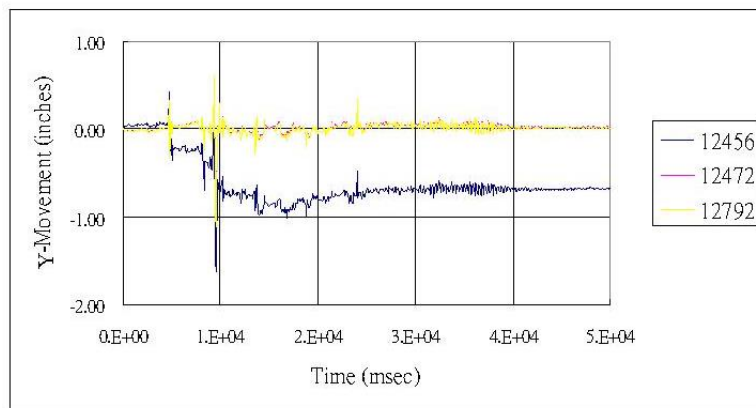


(c)水平 Z 方向外加屏蔽上蓋之位移

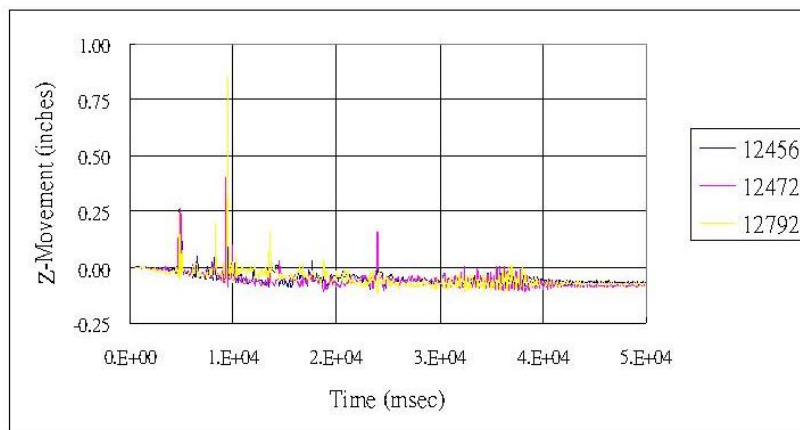
圖 6.6.E-15 摩擦係數 0.2 時，外加屏蔽上蓋之位移



(a)水平 X 方向外加屏蔽上蓋之位移

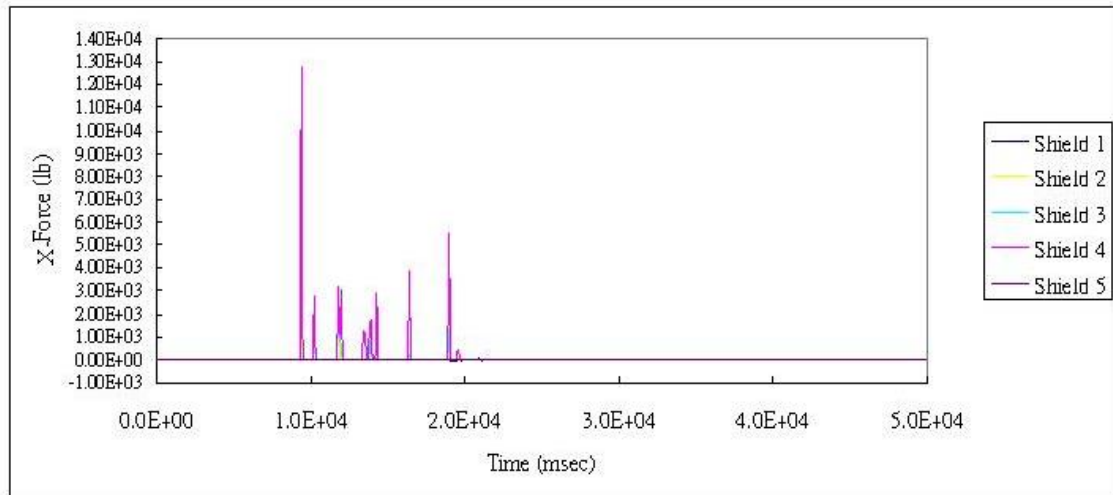


(b)水平 Y 方向外加屏蔽上蓋之位移

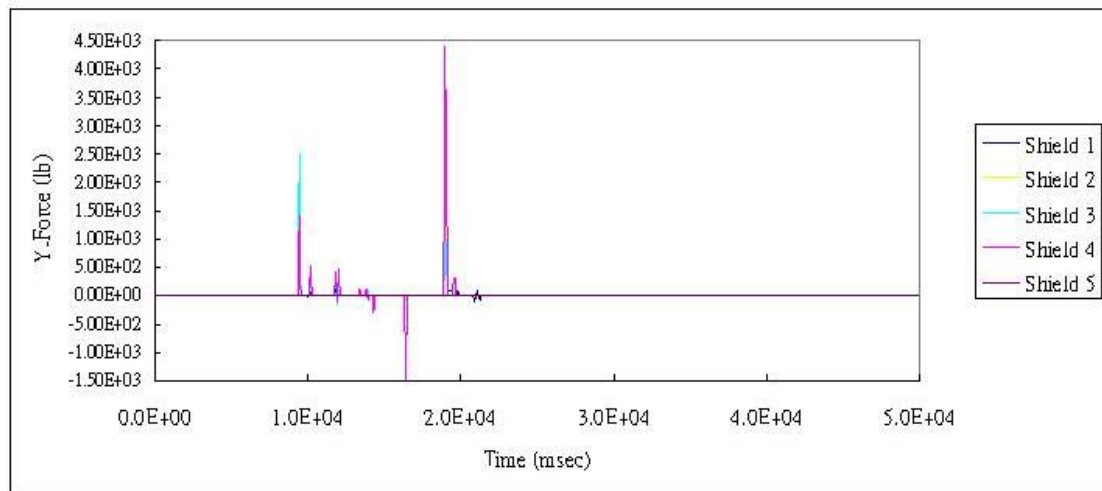


(c)水平 Z 方向外加屏蔽上蓋之位移

圖 6.6.E-16 摩擦係數 0.8 時，外加屏蔽上蓋之位移

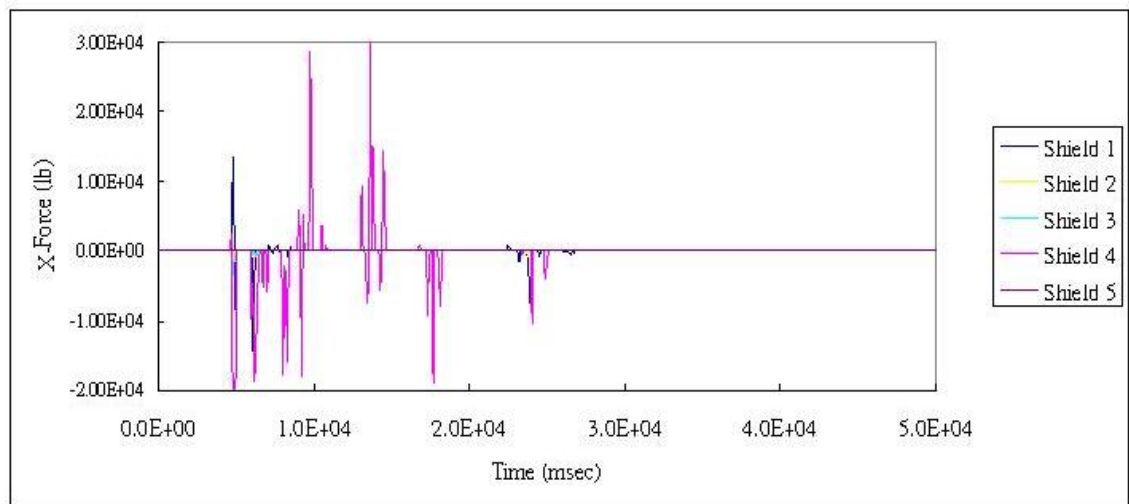


(a) 外加屏蔽與混凝土護箱之 X 方向相互作用力

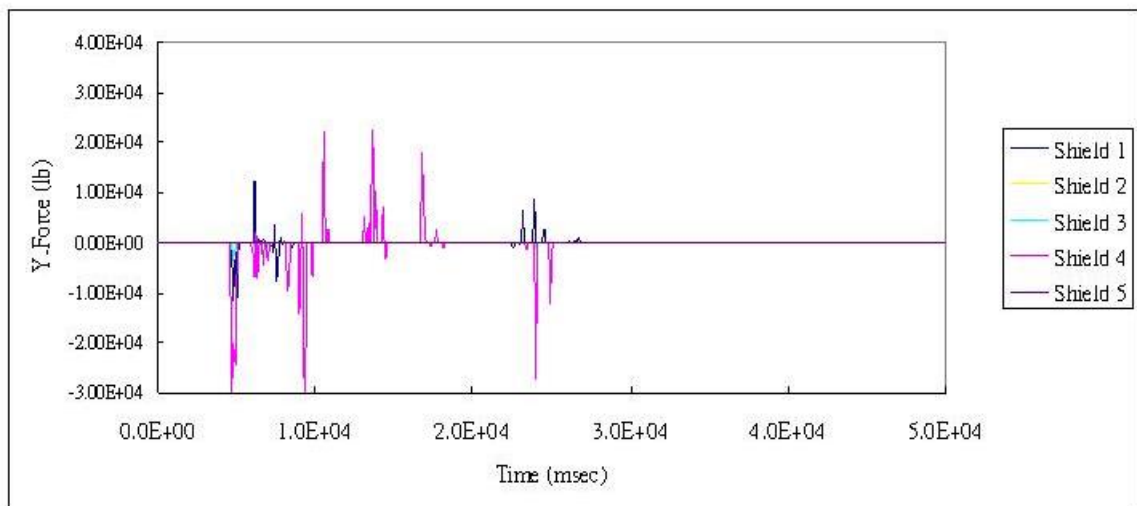


(b) 外加屏蔽與混凝土護箱之 Y 方向相互作用力

圖 6.6.E-17 摩擦係數 0.2，外加屏蔽與混凝土護箱之相互作用力



(a) 外加屏蔽與混凝土護箱之 X 方向相互作用力



(b) 外加屏蔽與混凝土護箱之 Y 方向相互作用力

圖 6.6.E-18 摩擦係數 0.8，外加屏蔽與混凝土護箱之相互作用力

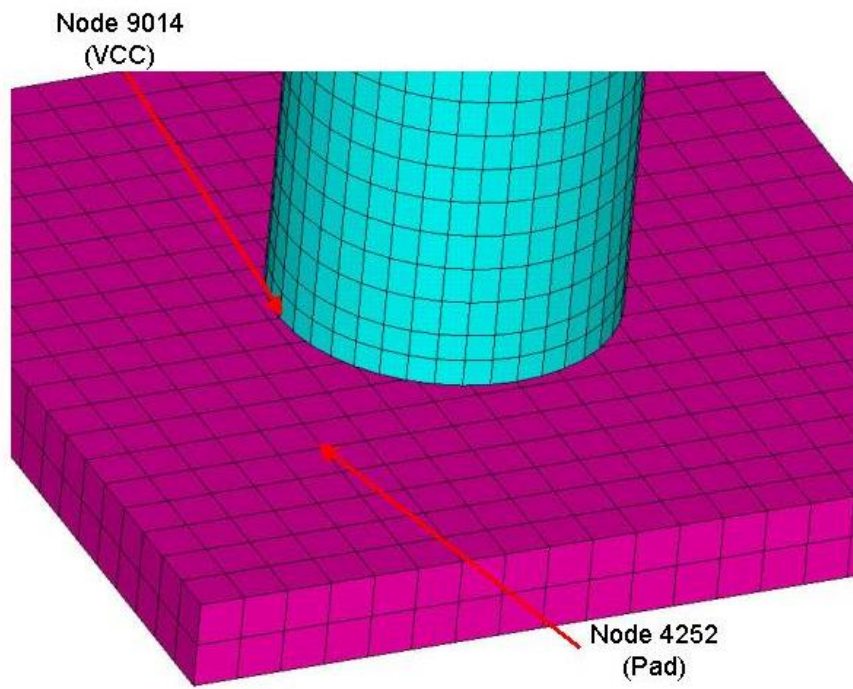
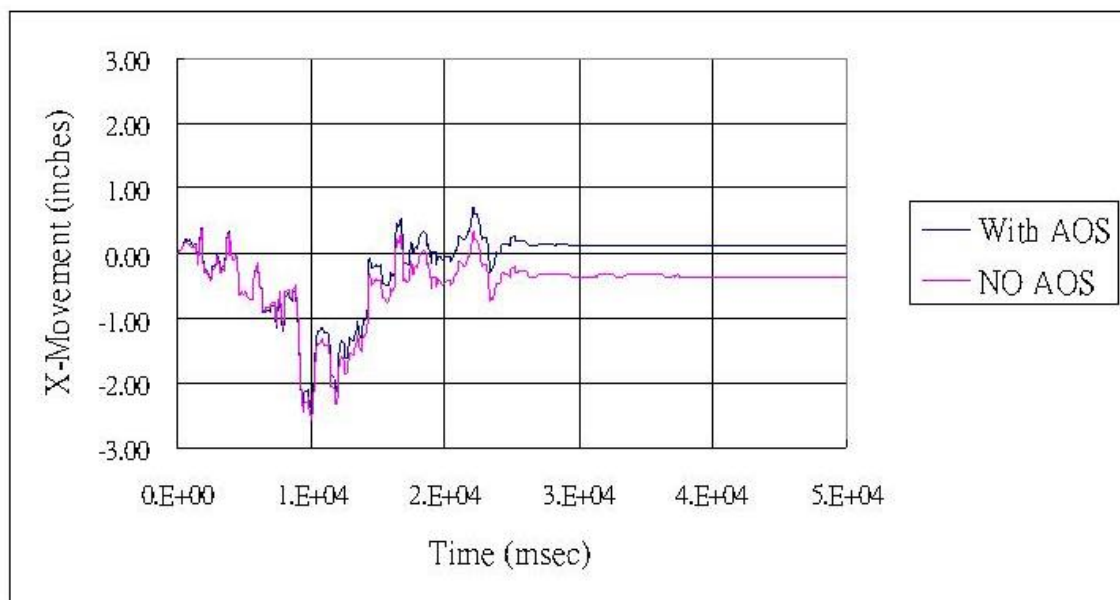
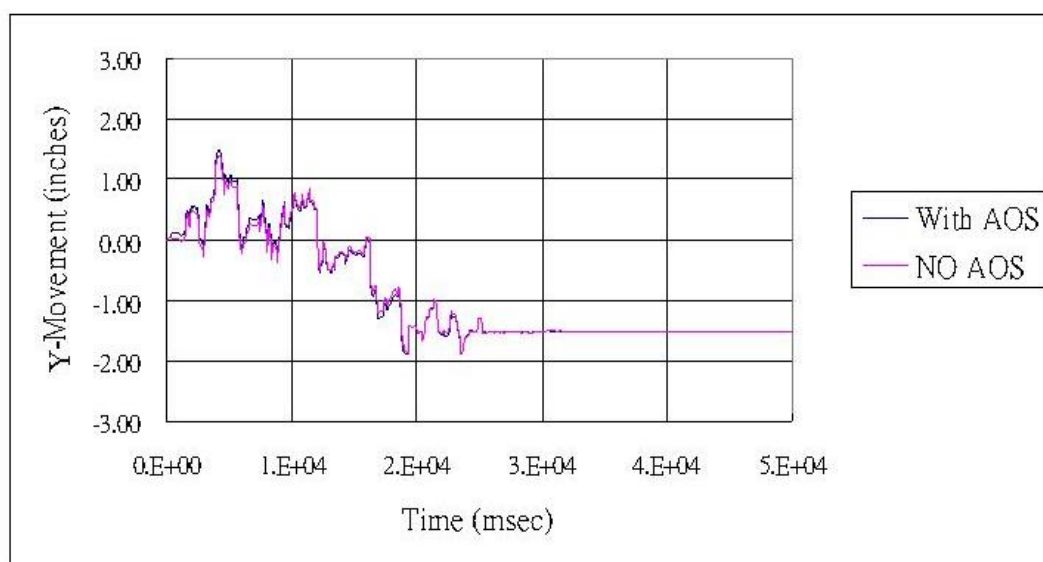


圖 6.6.E-19 無外加屏蔽情況下，混凝土護箱及混凝土基座相對移動位置之觀測點

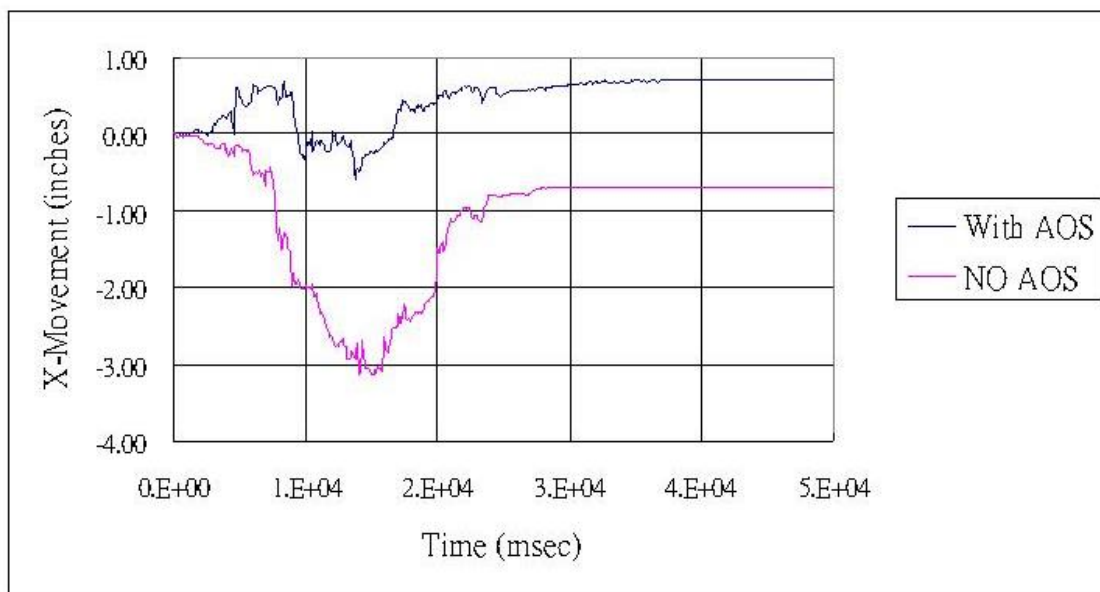


(a) 混凝土護箱相對於混凝土基座之 X 方向位移

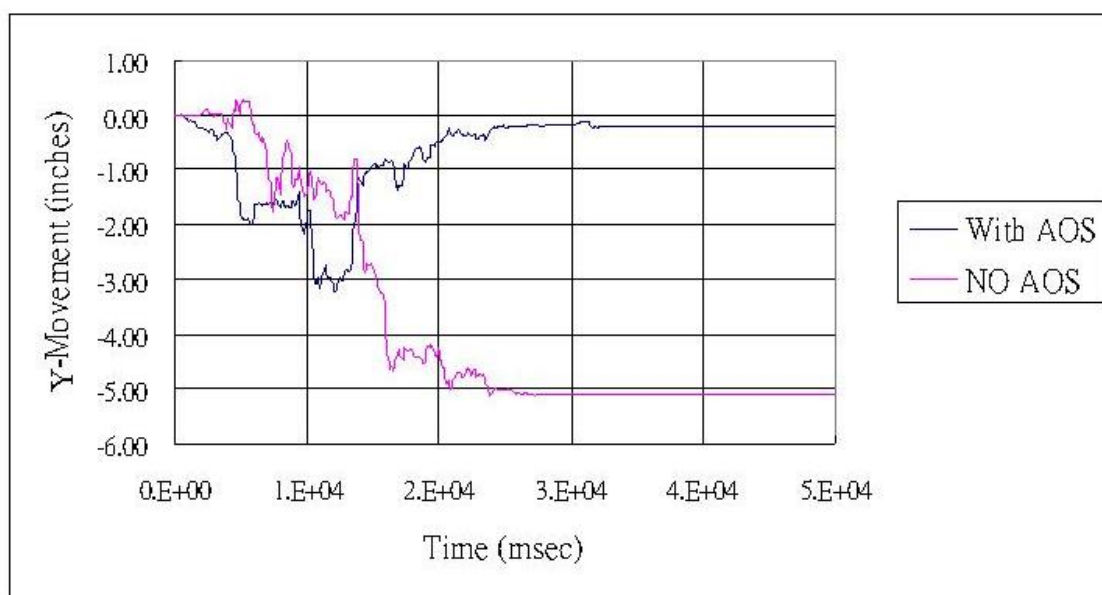


(b) 混凝土護箱相對於混凝土基座之 Y 方向位移

圖 6.6.E-20 摩擦係數 0.2，有及無外加屏蔽情況下，混凝土護箱相對於混凝土基座之位移



(a) 混凝土護箱相對於混凝土基座之 X 方向位移



(b) 混凝土護箱相對於混凝土基座之 Y 方向位移

圖 6.6.E-21 摩擦係數 0.8，有及無外加屏蔽情況下，混凝土護箱相對於混凝土基座之位移

表 6.6.E-1 SHAKE 91 輸入參數

	剪力波速 Cs(ft/s)	柏松比	Gmax(ksf)	W(kcf)
回填土層(1-2)	1142.0	0.47	5063	0.125
碎石層(3-7)	1142.0	0.47	5063	0.125
Tapu formation(8-)	1758.5	0.44	12196	0.127

剪力波速 Cs 值由 Gmax 與柏松比計算而得

表 6.6.E-2 SHAKE 91 輸出參數與 SASSI 輸入參數

	Cs(m/s)			Cp(m/s)			Cs 阻尼			Cp 阻尼		
	LB	BE	UB	LB	BE	UB	LB	BE	UB	LB	BE	UB
層 1	210	317	469	882	1333	1970	.026	.018	.012	.026	.018	.012
層 2	166	267	422	699	1124	1774	.054	.036	.025	.054	.036	.025
層 3	143	238	388	600	1000	1633	.083	.052	.034	.083	.052	.034
層 4	127	218	364	533	917	1529	.109	.068	.039	.100	.068	.039
層 5	111	201	344	468	846	1446	.132	.084	.047	.100	.084	.047
層 6	101	188	329	426	792	1385	.151	.099	.056	.100	.099	.056
層 7	94	178	316	396	749	1327	.163	.110	.064	.100	.100	.064
層 8	351	510	733	1072	1558	2239	.018	.015	.013	.018	.015	.013
層 9	349	509	731	1068	1554	2233	.019	.015	.013	.019	.015	.013
彈性半空間	349	509	731	1068	1554	2233	.019	.015	.013	.019	.015	.013

表 6.6.E-3 混凝土護箱之各項參數

參數	原設計護箱	外加屏蔽	合計
高度, cm(in.)	570.2(224.5)	602.7(237.3)	602.7(237.3)
外徑, cm(in.)	345.4(136.0)	420.5(165.6)	420.5(165.6)
內徑, cm(in.)	201.9(79.5)	350.5(138)	---
屏蔽厚, cm(in.)	71.8(28.3)	35(13.8)	106.8(42.1)
空桶重, kg(lb)	112,493(248,000)	81,160(178,923)	193,653(426,923)
滿載重, kg(lb)	146,785(323,600)	---	227,945(502,523)

表 6.6.E-4 在設定 VCC 重心水平加速度下避免傾倒之條件

VCC 重心水平加速度	0.5
頂部 RC 蓋板厚度(cm)	30
外加屏蔽底座所需直徑 D(m)	4.5
VCC 重(MT)	146.8
外加屏蔽重(MT)	81.2
全部重(MT)	228.0
方形基座淨距 L(m)	1.3
是否可行	可行

表 6.6.E-5 含外加屏蔽之混凝土護箱各項參數

	W(lbs)	Z(in)	W×Z	t or R(in)	H(in)	H(cm)	V(ft ³)
VCC滿筒	323600	115.70	37440520	68.00	224.49	570.20	—
外加屏蔽頂板	23,319	231.39	5395788	82.78	11.81	30.00	136.73
出氣口	-1,302	228.44	-297368.4	13.78	5.91	15.00	-3.69
外加上側屏蔽	33,150	194.88	6460220	13.78	61.22	155.50	232.78
外加中側屏蔽	34,452	133.66	4604742	13.78	61.22	155.50	232.78
外加下側屏蔽	34,452	72.44	2495586	13.78	61.22	155.50	232.78
外加圓基座屏蔽	1,541	39.86	61440.99	9.84	3.94	10.00	10.42
外加方基座屏蔽	52,009	18.94	985312.6	19.58	37.89	96.24	369.71
進氣口	-1,310	6.99	-9157.327	13.98	13.98	35.50	-8.85
合計	502,523	—	57137084	—	—	—	1215.2

表 6.6.E-6 地震衝擊下的工字樑與螺栓受力值

工 字 樑			
-	計算值(MPa)	容許應力(MPa)	安全餘裕
軸拉應力+彎矩應力	106.67	279.94	1.62
剪應力	17.86	167.96	8.41
螺 栓			
-	計算值(MPa)	容許應力(MPa)	安全餘裕
拉應力	186.03	248.22	0.33
剪應力	53.16	148.93	1.80

附錄 6.6.F 洪水分析計算

混凝土護箱設計為當洪水壓均勻地分佈其上，仍水平置於混凝土基座上。以古典流體力學分析護箱，視其為一剛體，並計算其阻力 F_D (drag force)。針對滑動及傾覆狀況安全係數採用 1.1，碳鋼及混凝土間摩擦係數為 0.35。在不考慮鋼內襯及外加屏蔽的狀況下：

混凝土護箱對洪水的阻擋能力，以其不含燃料之護箱分析。

$$F_b = \text{Volume}_{\text{concrete cask}} \times 62.4 \text{ lb/ft}^3 (\text{水的密度}) = 106,757 \text{ lb}$$

假設在水流穩定作用在一圓柱剛體上，混凝土護箱所受之總阻力 F_D ：

$$F_{D15} = (C_D)(\rho)(V^2)(A/2) = 32,625 \text{ lb} \quad [15]$$

C_D = 拖曳係數 (drag coefficient)，視雷諾數(Reynolds number) Re 而定。

當流速大於 6 ft/s 時， C_D 接近 0.7 [15]。

$$\rho = \text{水的密度} = 1.94 \text{ slug/ft}^3$$

$$D = \text{混凝土護箱外徑} (11.34 \text{ ft})$$

$$V = \text{洪水流速} = 15 \text{ ft/s}$$

$$A = \text{護箱垂直投影面積} = 213.55 \text{ ft}^2$$

若要使混凝土護箱傾覆，則阻力(drag force)與上述沈體重量對護箱底部邊緣產生之力矩無法達成平衡，則：

$$F_D \times (h/2) = (W_{\text{cask}} - F_b) \times r \quad \text{則 } F_D = 101,312 \text{ lb}$$

$$h = \text{混凝土護箱總高度} (225.98 \text{ in})$$

$$W_{\text{cask}} = \text{混凝土護箱總重量} (275,000 \text{ lb})$$

$$F_b = \text{浮力}$$

$$r = \text{混凝土護箱半徑} (5.67 \text{ ft})$$

由上二式可得使之傾覆的流速 V 為：

$$V = \sqrt{\frac{2F_D}{C_D \rho A}} = 25.2 \text{ ft/s} (7.7 \text{ m/s})$$

設計洪水流速(15 ft/s)遠小於此值故不會使之傾覆。

防止滑動之碳鋼底板與混凝土表面間最小摩擦係數 μ (安全係數為 1.1)：

$$\mu_{\min} = 1.1 F_{D15} / F_y = 0.21$$

$$F_y = \text{淹沒之混凝土護箱重} = W_{\text{cask}} - F_b$$

設計之碳鋼底板與混凝土表面間摩擦係數 0.35，遠大於此值(0.21)故不會滑動。

雖然混凝土護箱為巨積結構不受設計水壓影響，混凝土受阻力 F_D 所造成之應力分析如下：

$$F_{D15} = 32,625 \text{ lb}$$

$$D = 136.0 \text{ in (混凝土外徑)}$$

$$ID = 79.5 \text{ in (混凝土內徑)}$$

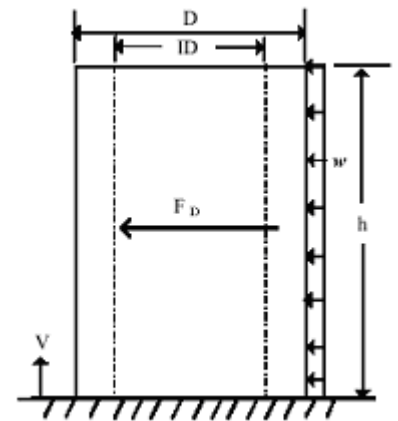
$$h = 225.98 \text{ in (護箱整體高度)}$$

$$I = \pi(D^4 - ID^4)/64 = 14.83 \times 10^6 \text{ in}^4 \text{ (慣性矩)}$$

$$S_{\text{outer}} = 2I/D = 218,088 \text{ in}^3 \text{ (外表面之剖面模數)}$$

$$w = F_D/h = 144.4 \text{ lbf/in}$$

$$M = w(h)^2 / 2 = 3.69 \times 10^6 \text{ in-lb (底面彎矩)}$$



其底部的最大應力為：

$$\sigma_v = M / S_{\text{outer}} \text{ (拉應力或壓應力)} \cong 20 \text{ psi (138 KPa)}$$

此應力分析已包含於組合負載應力分析中（含靜載重、活載重、熱載重及洪水造成載重），此組合負載應力小於其容許應力。

在考慮外加屏蔽的狀況下：

$$\text{浮力 } F_b = 181,888 \text{ lb}$$

$$\text{設計基準洪水流速阻力 } F_{D15} = 45,044 \text{ lb}$$

$$\text{阻力 } F_D = 194,795 \text{ lb}$$

可得使之傾覆的流速 $V = 29.7 \text{ ft/s (9.1 m/s)}$ ，設計洪水流速 15 ft/s 遠小於此值故不會使之傾覆。

防止滑動之碳鋼底板與混凝土表面間最小摩擦係數 μ (安全係數為 1.1)：

$$\mu_{\min} = 1.1 F_{D15} / F_y = 0.18$$

設計之碳鋼底板與混凝土表面間摩擦係數 0.35，混凝土與混凝土表面間摩擦係數大於碳鋼底板與混凝土表面間摩擦係數，遠大於此值 0.18 故不會滑動。

底部的最大應力為：

$$\sigma_v = M / S_{\text{outer}} \text{ (拉應力或壓應力)} \approx 20 \text{ psi}(138 \text{ KPa})$$

此應力分析已包含於組合負載應力分析中（含靜載重、活載重、熱載重及洪水造成載重），此組合負載應力小於其容許應力。

50 ft 深洪水作用在密封鋼筒及混凝土護箱上的水壓為 22 psi；保守起見，假設密封鋼筒內部壓力設為 0 psi，並以本章二、(六).2.(1)節所建立之 ANSYS 分析模式進行有限元素分析。其主薄膜應力(Pm)及主薄膜應力加彎區應力(Pm+Pb)分析結果如表 6.6.F-1 及表 6.6.F-2，應力皆在容許範圍內。

另外，在於洪水對於外加屏蔽衝擊後，在於混凝土護箱與外加屏蔽之間的混凝土間隔塊即受到推擠。因假設的洪水深度為 50 ft，故在遭逢洪水時的所有護箱元件皆已浸在洪水中，所以在計算間隔塊受洪水作用的安全餘裕時，不考慮混凝土間隔塊的溫度差。混凝土間隔塊之截面積為 93 in²(200 mm x 300 mm)，其安全餘裕計算如下。

$$MS = f_c' / (F_{D15} / A) - 1 = 4,000 / (45,044 / (4 \times 93)) - 1 = 32$$

其中

$$f_c' = \text{混凝土抗壓強度 (4,000 psi)}$$

$$F_{D15} = \text{混凝土間隔塊之所受外力(45,044 lb)}$$

$$A = \text{混凝土間隔塊之截面積}(4 \times 93 \text{ in}^2)$$

故在洪水速度為 15 ft/s 對外加屏蔽的衝擊，造成混凝土間隔塊受力時的安全餘裕為 32。

表 6.6.F-1 密封鋼筒增加外壓(22 psi)及無內壓(0 psi)時主要應力(P_m) (MPa)

截面位置 ¹	S _x	S _y	S _z	S _{xy}	S _{yz}	S _{xz}	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
1	-1.17	-14.97	-5.93	2.14	-0.21	-0.41	14.42	276.55	18.18
2	-10.07	9.45	12.14	2.07	-0.21	1.66	22.70	276.55	11.18
3	1.66	-4.42	18.70	-4.21	0.35	1.59	25.46	276.55	9.86
4	-0.14	-4.14	-8.14	0.00	0.00	-0.69	8.14	265.58	31.62
5	-0.14	-4.14	-8.07	0.00	0.00	-0.69	8.07	242.54	29.04
6	-0.14	-4.14	-8.07	0.00	0.00	-0.69	8.07	242.26	29.01
7	-0.14	-4.14	-8.07	0.00	0.00	-0.69	8.07	265.37	31.87
8	0.00	-3.31	-7.59	0.07	0.00	-0.69	7.66	276.55	35.11
9	-1.93	-1.10	-2.35	-0.83	0.07	-0.07	1.93	276.55	142.14
10	2.28	-0.55	-0.83	-0.55	0.07	-0.21	3.24	276.55	84.28
11	-1.93	0.69	-0.90	0.48	0.07	-0.07	2.76	276.55	99.20
12	0.48	-1.31	-1.66	-0.21	0.07	0.21	2.21	276.55	124.25
13	0.35	-2.07	-1.10	0.35	0.14	0.14	2.55	276.55	107.32
14	-2.35	-0.07	-2.42	-0.69	1.73	0.00	4.35	276.55	62.62
15	0.14	-0.07	0.14	0.00	-0.07	0.00	0.28	276.55	1001.00
16	-0.21	-0.14	-0.21	0.00	0.00	0.00	0.07	276.55	4007.00

⁽¹⁾ 應力截面定義詳見圖 6.6.C-8。

⁽²⁾ 材料容許應力參考 ASME Service Level D。

表 6.6.F-2 密封鋼筒增加外壓 151.8 KPa(22 psi)及無內壓時主要應力加彎曲應力($P_m + P_b$) (MPa)

截面位置 ¹	Sx	Sy	Sz	Sxy	Syz	Sxz	應力強度	容許應力 ²	安全餘裕
1	-11.45	-35.88	-1.38	0.14	-0.21	0.48	34.57	414.83	11.00
2	-4.97	68.72	31.05	4.83	-0.35	2.97	74.52	414.83	4.57
3	7.04	-96.39	-6.83	-5.38	0.41	-0.90	104.05	414.83	2.99
4	-0.07	-4.00	-8.21	0.00	0.00	-0.69	8.21	398.41	47.52
5	-0.07	-4.14	-8.21	0.00	0.00	-0.69	8.21	363.77	43.30
6	-0.07	-4.14	-8.21	0.00	0.00	-0.69	8.21	363.42	43.26
7	-0.07	-4.14	-8.21	0.00	0.00	-0.69	8.21	398.06	47.48
8	-0.21	-5.45	-8.14	-0.07	0.00	-0.69	8.07	414.83	50.38
9	-1.31	1.24	-1.45	1.24	0.07	0.07	3.59	414.83	114.62
10	3.38	0.07	-0.35	0.41	0.07	-0.28	3.80	414.83	108.31
11	-1.38	4.83	0.48	0.55	0.07	-0.14	6.35	414.83	64.35
12	3.80	0.48	-0.07	0.76	0.07	-0.28	4.07	414.83	100.90
13	3.04	-1.17	-0.14	0.41	0.14	0.28	4.28	414.83	95.97
14	-51.41	-2.28	-51.41	-0.62	1.73	0.00	49.27	414.83	7.42
15	3.59	0.07	3.59	0.00	-0.07	0.00	3.52	414.83	116.88
16	-2.00	-0.21	-2.00	0.00	0.00	0.00	1.73	414.83	239.48

⁽¹⁾ 應力截面定義詳見圖 6.2.6.3-4。

⁽²⁾ 材料容許應力參考 ASME Service Level D。

附錄 6.6.G 颱風與颱風投射物分析計算

混凝土護箱在颱風下之穩定性，是基於風壓力作用於混凝土護箱外殼的影響評估，評估方法則是參考 ANSI/ASCE 7-02[16]相關規範，以及利用自由穩定分析法為之。

評估中參考 NUREG-0800[17], Sec. 3.3.1 及 Sec. 3.3.2 計算風荷重；致於颱風投射物的負載評估則參考 NUREG-0800, Sec. 3.5.1.4 相關規範。混凝土護箱外殼受衝擊及所需之最小厚度評估，可參考美國 National Defense Research Committee (NDRC) [18]所發展之公式；衝擊深度計算可參考 EPRI Report NP-440[19]之試驗結果。混凝土護箱外殼局部剪力強度評估可參考 ACI 349-85, Sec. 6.6.11.2.1[20]相關規範，其抗剪能力則參考 ACI 349-85, Sec. 11.7。

分析結果顯示，颱風風壓不會造成混凝土護箱滑動或傾倒，所造成之混凝土應力亦在容許範圍內。混凝土壁及封板設計可抵抗颱風投射物之穿透，混凝土亦具備充足之剪力強度以抵抗高能量投射物之衝擊。

根據 NUREG-0800, Sec. 3.3.2 II.3.d.，分析颱風及投射物個別或其組合狀況，投射物之衝擊能量，最大能使護箱傾斜 3 度，但護箱之恢復力矩仍大於颱風之傾倒力矩，故結合颱風及投射物之衝擊能量，亦不會使混凝土護箱傾倒。

混凝土護箱之颱風荷重情況、混凝土護箱颱風投射物負載、混凝土護箱外殼局破壞分析(穿透投射物)、封板局部破壞(穿透投射物)、颱風投射物整體破壞(高能量投射物)、颱風及投射物組合負載(高能量投射物)及混凝土護箱外殼局部剪力強度(高能量投射物)之詳細計算如下。

分析時所需之基本參數為：

H = 護箱高度 = 225.98 in(574.0 cm)

D = 護箱外徑 = 136.0 in(345.4 cm)

ID = 護箱殼內徑 = 79.5 in(201.9 cm)

W_{VCC} = 內含密封鋼筒、提籃及燃料全載 = 285,000 lb(129,105 kg)

A_c = 護箱殼橫截面積 = 9,563 in²(61,697 cm²)

I_c = 護箱外殼慣性矩 = (14.83×10⁶ in⁴)

F_c' = 護箱外殼抗壓強度 = 4,000 psi(27.6 MPa)

G.1 混凝土護箱颱風荷重情況

參考 ANSI/ASCE 7-02 將颱風速度轉換成作用於護箱上之有效壓力，最大風壓力 q 可由下式決定：

$$q = (0.00256)K_z K_{zt} K_d V^2 \quad \text{psf}$$

其中

V = 颱風最大風速

$$= 360 \text{ mph (161 m/s) [32]。}$$

I = 用途係數

依 ASCE 7-02 之表 6-1，為該表中類別(category) II建物時，假設風速 $V > 100 \text{ mph}$ ，故保守取 $I = 1.0$ 。

K_z = 風壓地況係數(velocity pressure exposure coe.)

K_z 為風壓地況係數，為離地面 $Z \text{ ft}$ 高之風壓與標準風壓(地況 B 之狀況 1，離地 30 ft 以內)之比值。

依據 ASCE 7-02 之表 6-3 規定：

$$K_z = 2.01 [Z/Z_g]^{2/\alpha}; Z_g \geq Z \geq 15 \text{ ft}$$

$$K_z = 2.01 [5/Z_g]^{2/\alpha}; Z < 15 \text{ ft}$$

地況 B、C、D 相對於 3 s 平均風速之 α 值分別取為 7、9.5 與 11.5。

依 ASCE 7-02 之表 6-2，在懸崖(escarpment)型式之地況 D， $\alpha = 11.5$ ，

$$Z_g = 700 \text{ ft。}$$

K_{zt} = 地形係數

$$K_{zt} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2$$

參考 ASCE 7-02 之表 6-4，在懸崖型式之地況 D，保守取 $K_1 = 0.17$ ，

$$K_2 = 0.75, K_3 = 0.29, \text{ 代入上式得 } K_{zt} = (1 + 0.17 \times 0.75 \times 0.29)^2 = 1.075。$$

K_d = 風力方向因子

參考 ASCE 7-02 之表 6-4，取 $K_d=0.95$ 。

而結構物所受之風力 F_w 為：

$$F_w = q(z_{Af}) G C_f A_f$$

其中：

C_f = 風力係數

因高寬比 $H/D_0 = 225.98/136 = 1.66$ ， $H_1/D_1 = 237.28/165.56 = 1.43$ ，依據 ASCE 7-02 圖 6-19，採用 $C_f = 0.51$ 。

G = 普通建築物之陣風反應因子 (gust effect factor)

依據 ASCE 7-02 第 6.5.8.1 節，一般取 $G = 0.85$ 。

A_f = 與風向垂直之投影平面上的面積。

$q(z_{Af})$ = 面積 A_f 形心高度 z_{Af} 處之風壓。

混凝土護箱(VCC+TSC)之各項參數如下：

形心高度 $z_{Af} = H/2 = 225.98/2 = 112.99 \text{ ft} = 34.44 \text{ m}$

投影面積 $A_f = H \times D_0 = 225.98/12 \times 136/12 = 213 \text{ ft}^2 = 19.8 \text{ m}^2$

依據 ASCE 7-02 計算，取 $z = 225.98/12 = 18.83 \text{ ft}$

$K_z = 2.01[z/z_g]^{2/\alpha} = 2.01[18.83/700]^{2/11.5} = 1.07$

考量護箱尺寸遠小於颱風半徑，故速度壓力平均分佈於護箱上，又因混凝土護箱內外殼由通氣孔連通，故假設護箱內、外殼之風壓降相同。所有作用於護箱上之壓力為：

$$\begin{aligned}\text{風壓力 } q &= (0.00256) K_z K_{zt} K_d V^2 \\ &= 0.00256 \times 1.07 \times 1.075 \times 0.95 \times 1 \times 360^2 = 362.54 \text{ psf} = 1,772 \text{ kgf/m}^2\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}\text{總風力 } F_w \\ &= q G C_f A_f = 362.54 \times 0.85 \times 0.51 \times 213 = 30,636.92 \text{ lbs} = 13,909.16 \text{ kgf}\end{aligned}$$

傾倒分析：

$$\text{風傾倒彎矩 } M_w = F_w \times H/2 = 30,636.92 \times 225.98 \text{ in}/12 \times 1/2 = 2.88 \times 10^5 \text{ ft-lb}$$

$$\text{穩定彎矩 } M_s = W_{\text{cask}} \times D_o/2 = 1,725,866.67 \text{ ft-lb}$$

其中：

$$D_o = \text{護箱基座直徑} = 128.0 \text{ in}$$

$$W_{\text{cask}} = \text{內含密封鋼筒之護箱重量} = 323,600 \text{ lb}$$

除非是鎖固在地面上，依 ASCE 7-02 傾倒彎矩 $M_w \leq 2/3 M_s$ ，故安全餘裕

$$MS = M_s / M_w - 1 = (2/3)(1,725,866.67) / (2.88 \times 10^5) - 1 = 2.99$$

$$\text{需要的摩擦係數為 } F_w / W_{\text{cask}} = 30,636.92 / 323,600 = 0.1$$

已知鋼板與混凝土間之摩擦係數為 0.35[2]，故其安全餘裕為

$$MS = 0.35 / 0.1 - 1 = 2.5$$

由此知風壓不會產生護箱之傾倒及滑動。

颱風所造成之混凝土壓應力分析如下：

$$H = \text{混凝土護箱高度} = 225.98 \text{ in} = 5,740 \text{ mm}$$

$$D_o = \text{混凝土護箱外徑} = 136 \text{ in} = 3,454 \text{ mm}$$

$$D_i = \text{混凝土護箱內徑} = 79.5 \text{ in} = 2,019 \text{ mm}$$

$$A_c = \pi(D_o^2 - D_i^2)/4 = 9,557.96 \text{ in}^2 = 6,166,413 \text{ mm}^2$$

$$I_c = \pi(D_o^4 - D_i^4)/64 = 14,824,551.11 \text{ in}^4 = 6.17 \times 10^{12} \text{ mm}^4$$

$$\begin{aligned} \text{混凝土允許剪應力} &= V_{C \text{ allowable}} = 2\psi(fc')^{1/2}/LF \quad [\text{參考文獻 7.6, Section 11.3}] \\ &= (2)(0.85)(4,000)^{1/2}/1.0 \\ &= 107.52 \text{ psi} = 741,350.40 \text{ Pa} \end{aligned}$$

其中：

$$\psi = 0.85 \quad [\text{參考文獻 7.6, Section 9.3.2.3}]$$

$$LF = \text{負載因子(Load factor)} = 1.0$$

$$\text{已知風壓作用於護箱上之作用力為 } F_w = 30,636.92 \text{ lbs}$$

$$\text{風壓作用之最大力矩 } M_w = F_w \times H/2 = 3,461,666 \text{ in-lbs} = 391,203 \text{ N-m}$$

$$\text{風壓作用之最大彎矩應力 } f_b = M_w C / I_c = 15.88 \text{ psi} = 109,483 \text{ Pa}$$

$$\text{其中： } C = D_o/2 = 68 \text{ in} = 1,727 \text{ mm}$$

$$\begin{aligned} \text{混凝土允許最大壓應力 } f_{c \text{ allowable}} &= 0.80\psi(0.85fc')/LF \quad [\text{參考文獻 7.6, Eq. 10-2}] \\ &= (0.8)(0.7)(0.85)(4,000)/1.0 \\ &= 1,904 \text{ psi} = 13,128,080 \text{ Pa} \end{aligned}$$

$$\text{其中： } \psi = \text{強度折減因子(Strength Reduction Factor)} = 0.7$$

$$LF = \text{負載因子(load factor)} = 1.0$$

$$\text{實際風剪應力 } V_c = F_w / A_c = 3.21 \text{ psi} < V_{C \text{ allowable}} = 107.52 \text{ psi}$$

$$\text{實際靜荷重 } f_c = W_{VCC} / A_c = 33.84$$

$$\text{風壓作用之最大彎矩應力+靜荷重} = f_b + f_c = 49.72 \text{ psi}$$

$$< f_{c \text{ allowable}} = 1,904 \text{ psi}$$

壓應力計算包含於載重組合分析中，結合靜重、活負載、熱負載、颱風負載等計算之應力值皆小於容許應力。

G.2 混凝土護箱之颱風投射物負載

NUREG-0800, Sect. 3.5.1.4.III.4, Spectrum I 所定義的颱風投射物如下：

- (a) 高能量：重量 4,000 lb(1,812 kg)之物體，速度 126 mph(56 m/s)，撞擊面積為 20 ft² (1.86 m²)。
- (b) 穿透投射物：重量 280 lb(126.8 kg)之直徑 8 in(20.3 cm)剛性體，126 mph。
- (c) 1 in(2.54 cm)實心球：重量 0.15lb(0.068 kg)，126 mph。

投射物速度假設為颱風速 360 mph 之 35 %，其作用圖參考圖 6.6.G-1。

因進出氣口之設計，不會使實心球大小投射物接觸到密封鋼筒，且有結構上蓋及屏蔽上蓋保護，故密封鋼筒不需進行 1 in(2.54 cm)實心球碰撞分析。

G.3 混凝土護箱外殼局破壞分析(穿透投射物)

參考 NDRC[18]公式，混凝土護箱外殼穿透深度限制為 $x/2d \leq 2.0$ ，其中：

d = 投射物直徑 = 8 in(20.3 cm)

x = 投射物穿透深度 = $[4KNWd^{-0.8}(V/1000)^{1.8}]^{0.5}$

K = 決定於混凝土強度之係數 = $180/(f'_c)^{1/2} = 180/(4000)^{1/2} = 2.846$

N = 1.14 颱風投射物鼻部之形狀因子(shape factor)

W = 投射物重量 = 280 lb(126.8 kg)

V = 投射物速度 = 126 mph = 185 ft/s(56 m/s)

$x = [(4)(2.846)(1.14)(280)(8^{-0.8})(185/1000)^{1.8}]^{0.5} = 5.75 \text{ in (14.6 cm)}$

得 $x/2d = 5.75/(2)(8) = 0.359 < 2.0$

最小混凝土護箱外殼厚度應為投射物穿透深度 3 倍，即 17.25 in (43.8 cm)，實際之混凝土殼厚度為 28.25 in (71.8 cm)，遠大於要求厚度，故投射物不會穿透混凝土護箱外殼。

G.4 封板局部破壞分析(穿透投射物)

封板為 1.5 in(3.8 cm)厚之鋼板，當重量 280 lb(126.8 kg)，直徑 8 in(20.3 cm)之剛性體，以 126 mph 速度撞擊混凝土護箱封板，根據 Topical Report BC-TOP-9A, Rev. 2, Sec. 2.2[21]，公式 2-7, Ballistic Research Laboratories Formula，且 $K = 1$ 時，穿透深度為：

$$T = [0.5m_m V^2]^{2/3} / 672d = 0.523 \text{ in}(1.33 \text{ cm})$$

其中：

T = 穿透深度

m_m = 投射物質量 = $W/g = 280 \text{ lb} / 32.174 \text{ ft/s}^2 = 8.70 \text{ slugs}$

g = 地加速度 = 32.174 ft/s^2

BC-TOP-9A 建議板厚為穿透深度 1.25 倍以上，即 0.654 in(1.66 cm)，設計封板厚 1.5 in(3.8 cm)，故能抵抗穿透。

G.5 颱風投射物整體破壞分析(高能量投射物)

確保混凝土護箱在高能量颱風投射物撞擊時仍不會傾倒，投射物因變形造成之動量變化由以下之公式計算：

$$\int_{t_1}^{t_2} (F)(dt) = m_m(v_2 - v_1)$$

其中：

F = 衝擊力

m_m = 投射物質量 = $4,000 \text{ lb} / g = 124 \text{ slugs} / 12 = 10.4(\text{lb s}^2/\text{in})$

t_1 = 投射物衝擊初始時間

t_2 = 完成變形時間

v_1 = 投射物衝擊初始速度 = $126 \text{ mph} = 185 \text{ ft/s}(56.4 \text{ m/s})$

v_2 = 完成變形時之投射物速度

護箱角動量之改變如下：

$$\int_{t_1}^{t_2} M_c(dt) = \int_{t_1}^{t_2} (H)(F)(dt) = I_m(\omega_1 - \omega_2)$$

$$\text{代入得 } \int_{t_1}^{t_2} (F)(dt) = m_m(v_2 - v_1) = \frac{I_m(\omega_1 - \omega_2)}{H}$$

其中：

M_c = 衝擊力作用於護箱之彎矩

I_m = 質量慣性矩，護箱對旋轉基點(base rim)慣性矩

ω_1 = 時間 t_1 時之護箱角速度

ω_2 = 時間 t_2 時之護箱角速度

m_c = 護箱質量 = $W_c/g = 285,000/32.174$

$$= 8858.1 \text{ slugs}/12 = 738.2 \text{ lb s}^2/\text{in}$$

I_{mx} = 質量慣性矩，護箱由質量中心對 x 軸慣性矩

$$= 1/12(m_c)(3r^2 + H^2) \text{ (保守假設為一實體圓柱體)}$$

$$= (1/12)(738.2) [(3)(68.0)^2 + (225.88)^2] = 3.99 \times 10^6 \text{ lb-s}^2\text{-in}$$

$$I_m = I_{mx} + (m_c)(d_{CG})^2 = 3.99 \times 10^6 + (738.2)(126.23)^2 = 15.75 \times 10^6 \text{ lb-s}^2\text{-in.}$$

d_{CG} = 質量中心 CG 到旋轉基點之距離(如圖 6.6.G-1) = 126.23 in.

基於能量守恆，投射物之動量相當於作用在護箱上的角動量。

$$m_m(v_2 - v_1) = I_m(\omega_1 - \omega_2)/H$$

$$\text{當 } t_1 \text{ 時, } v_1 = 185 \text{ ft/s, } \omega_1 = 0 \text{ rad/s}$$

$$\text{當 } t_2 \text{ 時, } v_2 = 0 \text{ ft/s, 則}$$

$$(10.4)(v_2 - 185 \text{ ft/s} \times 12 \text{ in/ft}) = 15.75 \times 10^6 \text{ lb-s}^2\text{-in} (0 - \omega_2)/225.88$$

$$\text{當 } \omega_2 = 0.331 \text{ rad/s (當 } v_2 = 0 \text{ 時), 則}$$

回頭算 v_2

$$v_2 = 261.6 \times \omega_2 = (261.6)(0.331) = 86.6 \text{ in/s (220 cm/s)}$$

$$\text{從投射物衝擊點到護箱轉動點之距離為 } \sqrt{132^2 + 225.88^2} = 261.6 \text{ in (664.5}$$

cm)(如圖 6.6.G-1)，假設撞擊線垂直於此線。

在恢復期間之動量平衡

— $[m(V_f - V_2)] = I_m(\omega_f - \omega_2)/H$ ，則

$$-[10.4(0 - 86.6)] = 15.75 \times 10^6 \text{ lb-s}^2\text{-in} (\omega_f - 0.331)/225.88$$

$$\omega_f = 0.344 \text{ rad/s}$$

$$v_f = 0$$

$$v_2 = 86.6 \text{ in/s} (220 \text{ cm/s})$$

$$\omega_2 = 0.331 \text{ rad/s}$$

最終護箱之能量 E_k 為

$$E_k = (I_m)(\omega_f)^2 / (2) = (15.75 \times 10^6)(0.344)^2 / (2) = 9.32 \times 10^5 \text{ in-lbf}$$

當護箱重心轉動到轉點上方時，此時將會傾倒，此位置距離為 h_{PE} ，其位能之改變量 E_p 如下：

$$E_p = (W_{cask})(h_{PE}) = 285,000 \text{ lb} \times 17.43 \text{ in} = 4.97 \times 10^6 \text{ in-lbf}$$

投射物作用在護箱上之動能，小於護箱傾倒轉動之動能，故抵抗傾倒之安全餘裕為：

$$MS = \frac{0.67 \times 4.97 \times 10^6}{9.32 \times 10^5} - 1 = 2.57$$

G.6 颱風及投射物組合負載(高能投射物)

投射物作用於護箱之旋轉高度計算：

$$h_{KE} = E_k / W_c = 9.32 \times 10^5 \text{ in-lbf} / 285,000 \text{ lb} = 3.27 \text{ in} (8.3 \text{ cm})$$

$$\text{由 } \cos \beta = (h_{CG} + h_{KE}) / d_{CG} = \cos \beta = \{(108.8 + 3.27) / 126.23 = 0.8878\}$$

$$\text{得 } \beta = 27.4 \text{ deg} ;$$

$$\text{由 } \cos \alpha = 108.8 / 126.23 = 0.8619, \text{ 得}$$

$$\alpha = 30.5 \text{ deg} ;$$

$$\text{由 } e = d_{CG} \sin \beta, \text{ 得}$$

$$e = 126.23 \sin 27.4 = 58.1 \text{ in} (147.6 \text{ cm})$$

$$\text{當護箱衝擊後之旋轉角度} = \alpha - \beta = 30.5 - 27.4 = 3.1 \text{ deg}$$

衝擊後之重力恢復彎矩為：

$$(W_c)(e)$$

$$= 285,000 \text{ lb} \times 58.1 \text{ in} / 12$$

$$= 1.38 \times 10^6 \text{ ft-lb} \gg \text{ 颱風力矩} = 3.40 \times 10^5 \text{ ft-lb}$$

故結合颱風效應及投射物衝擊作用下，護箱不會傾倒。考量傾倒彎矩不能超過 2/3 倍之恢復彎矩，則安全餘裕為：

$$MS = \frac{0.67 * 1.38 * 10^6}{3.4 * 10^5} - 1 = 1.72$$

G.7 混凝土殼局部剪力強度(高能投射物)

根據 ACI 349-85, Sec. 11.11.2.1，評估高能量之颱風投射物衝擊混凝土護箱外殼頂部之剪力強度是否充足。

此高動能之撞擊為 4,000 lb (1,812 kg)，126 mph，撞擊面 20 ft² (1.86 m²)。

參考 BC-TOP-9A 所得衝擊力為：

$$F = 0.625(v)(W_M) \\ = 0.625(185 \text{ ft/s})(4,000 \text{ lb}) = 462.5 \text{ kips}$$

$$F_u = LF \times F = 1.1 \times 462.5 = 508.8 \text{ kips}$$

假設撞擊面積為水平：垂直=2：1 之長方形，則抵抗混凝土穿透剪力所需之高能量投射物接觸面積計算如下：

先計算出撞擊造成之剪力：

$$V_c = (2 + 4/\beta_c) (f_c')^{1/2} b_o d, \text{ 其中 } \beta_c = 2/1 = 2, \text{ 則}$$

$$V_c = 4 (f_c')^{1/2} b_o d$$

$$d = 28.25 \text{ in} - 3.25 \text{ in} = 25 \text{ in} (63.5 \text{ cm})$$

$$(f_c')^{1/2} = 63.24 \text{ psi}, \text{ 當 } f_c' = 4,000 \text{ psi} (280 \text{ kg/cm})$$

b_o = 距投射物接觸面 $d/2$ 處，貫穿剪力面積之周長

$$b_o = (2b + 25) + 2(b + 12.5) = 4b + 50$$

$$V_u = \Phi(V_c + V_s), \text{ 假設無鋼筋剪力，則 } V_s = 0$$

$$V_u = \Phi V_c = \Phi 4 (f_c')^{1/2} b_o d = (0.85)(4)(63.24)(4b + 50)(25) = 21,501 b + 268,770.$$

設 $V_u = F_u$ ，解 b 得：

$$508.8 \times 1000 = 21,501 b + 268,770$$

$$b = 11.12 \text{ inches (分析用 } 1.0 \text{ ft)}$$

需求衝擊面積 = $2b \times b = 2 \times 1 \times 1 = 2.0 \text{ sq ft} < 20.0 \text{ sq ft}$ (實際衝擊面積)，

故混凝土有充分之剪力強度抵抗高能量投射物衝擊。

G.8 颱風作用力對混凝土間隔塊的影響評估

因考量外加屏蔽尺寸遠小於颱風半徑，故速度壓力平均分佈於外加屏蔽上。參考 ASCE 7-02 之規定計算所有作用於外加屏蔽上之壓力為：

$$\begin{aligned}F_w &= q \times G \times C_f \times A_f \\&= 365.93 \times 0.85 \times 0.51 \times 272.81 = 43,276.03 \text{ lbs} = 19,647.32 \text{ kgf}\end{aligned}$$

其中：

$$\begin{aligned}q &= \text{有效速度壓力} = (0.00256)K_z K_{zt} K_d V^2 \\&= 0.00256 \times 1.08 \times 1.075 \times 0.95 \times 1 \times 360^2 = 365.93 \text{ psf} = 1,788 \text{ kgf/m}^2\end{aligned}$$

$$K_z = \text{為風壓地況係數} = 2.01[z/z_g]^{2/\alpha}$$

$$= 2.01[18.83/700]^{2/11.5} = 1.07。 \text{依據 ASCE 7-02 之表 6-3 規定。}$$

$$K_{zt} = \text{地形係數} = (1 + K_1 K_2 K_3)^2 = (1 + 0.17 \times 0.75 \times 0.29)^2 = 1.075。 \text{參考}$$

ASCE 7-02 之表 6-4，在懸崖型式之地況 D，保守取 $K_1 = 0.17$ ，

$$K_2 = 0.75, K_3 = 0.29。$$

$$K_d = \text{風力方向因子} = 0.95。 \text{參考 ASCE 7-02 之表 6-4。}$$

$$I = \text{用途係數} = 1.0。 \text{依 ASCE 7-02 之表 6-1，為該表中類別(Category)}$$

II 建物時，假設風速 $V > 100 \text{ mph}$ ，故保守取 $I = 1.0$ 。

$$V = \text{颱風最大風速} = 360 \text{ mph}$$

$$C_f = \text{力量係數(Force Coefficient)} = 0.51 \text{ (因 } h/D = 19.8 \text{ ft}/13.8 \text{ ft} = 1.43，$$

依據 ASCE 7-02 圖 6-19，採用 $C_f = 0.51$ 。)

$$A_f = \text{護箱投射面積} = (237.28 \text{ in} \times 165.56 \text{ in})/144 = 272.81 \text{ ft}^2 (28.34 \text{ m}^2)$$

$$G = \text{常數} = 0.85$$

在於護箱進氣口半堵塞時，ANSYS 計算所得混凝土護箱外表面與外加屏蔽內表面的 1 in 間距間的最大溫差為 44.8°F，混凝土護箱外表面與外加屏蔽內表面溫度各為 209.1°F 與 164.3°F。而混凝土間隔塊之截面積為 93 in² (200 mm x 300 mm)。故颱風時之混凝土間隔塊的負載組合為颱風負載與熱負載的組合。

$$\begin{aligned}
 MS &= f'_c / (F_w / A + E \alpha \delta T) - 1 \\
 &= 4,000 / (43,276.03 / (4 \times 93) + 3.38 \times 10^6 \times 5.5 \times 10^{-6} \times 44.8) - 1 \\
 &= 3.2
 \end{aligned}$$

其中

f'_c = 混凝土抗壓強度 (4,000 psi)

P = 混凝土間隔塊之所受外力

A = 混凝土間隔塊之截面積 ($4 \times 93 \text{ in}^2$)

E = 混凝土楊氏係數 ($3.38 \times 10^6 \text{ psi}$)

α = 混凝土熱膨脹係數 ($5.5 \times 10^{-6} \text{ in/in/}^\circ\text{F}$)

δT = 混凝土護箱外表面與外加屏蔽內表面的溫差 (44.8°F)

故在颱風速度為 360 mph 對外加屏蔽的衝擊，造成混凝土間隔塊受力時的安全餘裕為 2.08。

G.9 核一廠風力發電機組葉片破斷彈射貯存設施評估

核一廠週邊的風力發電機在運轉及颱風狀況下的葉片破斷，對用過核子燃料乾式貯存設施的安全並不會造成威脅。因乾式貯存場址的所在位置遠在風力發電機葉片破斷後的彈射範圍之外；經分析，各種條件下的葉片破斷最大彈射距離為 191.94 m，而最接近貯存場址的風力發電機距離為 715 m，故風力發電機葉片破斷並不會對貯存設施造成影響。另外，因發電機組織葉片是強化玻璃纖維(FRP)所製成，其動量遠小於 NUREG-0800 中之 1,816 kg 物體以 56 m/s 速度衝撞貯存設施之分析案例，故風力發電機組葉片強度，尚難以對乾式貯存設施之結構強度(強化混凝土及金屬)造成損害。

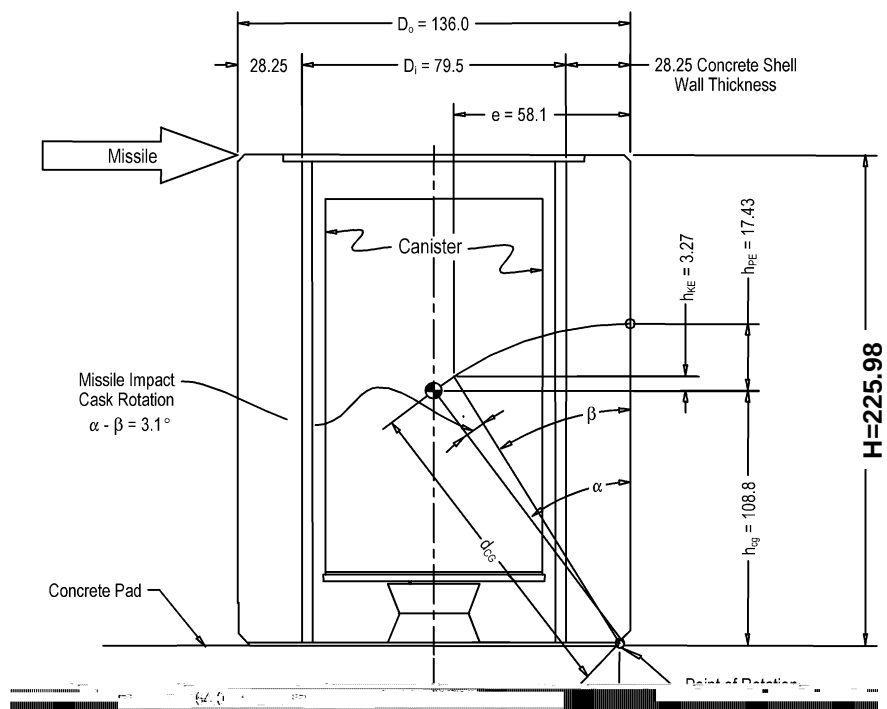


圖 6.6.G-1 使用在颱風評估之主要尺寸及力矩臂

附錄 6.6.H 飛機撞擊機率分析計算

核一廠核子燃料自商轉以後一直暫存於燃料池中，隨著燃料週期的增加，燃料池的容量已經逐漸不敷使用。由於最終處置方式尚未定案，為了讓電廠未來能順利運轉，用過核子燃料必須有一個適當的中期貯存方式。核一廠經審慎評估後決定在廠內設置乾式貯存設施，解決用過核子燃料貯存的問題。

乾式貯存設施在美國已經進行多年的研究，為用過核子燃料在取得可行最終處置方案前之最佳暫貯選擇。NRC 報告 NUREG-1567[22]為用過核子燃料乾式貯存設施的標準審查程序，要求必須評估設施鄰近機場飛行器撞擊的可能危害。本評估採用 NUREG-0800[17]報告的評估流程，針對飛機撞擊可能對貯存設施造成的風險進行討論，並確認乾式貯存設施受飛機撞擊的機率符合相關規範。

以下將敘述場址受到飛機撞擊之機率評估方式、台灣地區軍用及民用之固定翼飛機及直昇機機場及乾式貯存設施場址特性相關資料，並對設置場址受到飛機撞擊之機率進行評估。

分析方法

NUREG-1567 報告中並未針對乾式貯存設施受飛行器撞擊危害提供一套完整的分析或審查程序，業界一般採用 NUREG-0800 的分析程序來進行評估。NUREG-0800 報告為核電廠安全分析的標準審查程序，在 3.5.1.6 節中針對飛行器危害分析提出一套完整的評估流程，茲將此流程整理如圖 6.6.H-1 所示。依據 10CFR 100.20 的規定，核電廠設置時必須評估對個人及社會所產生的風險，超過 10CFR100 規定的輻射曝露事件的發生機率必須小於 10^{-7} 次/年。因此，在 NUREG-0800 報告中以 10^{-7} 次/年做為核電廠設置地點受飛機撞擊機率的接受標準。由於乾式貯存設施受飛機撞擊所造成的輻射危害遠較核電廠為低，因此 NRC 將乾式貯存設施設置地點受飛機撞擊機率的接受標準可修正為 10^{-6} 次/年[24]。但為保守起見，本評估仍以 10^{-7} 次/年做為第一階段的篩濾基準。

如圖 6.6.H-1 所示，設置地點受飛機撞擊之機率評估大致上可分為三階段，第一階段為篩濾分析，只討論場址與機場及航道的距離，若距離符合規範，則可判定其受飛機撞擊機率小於 10^{-7} 次/年；若不符合規範，則進行第二階段的詳細評估，此時必須依據各種可能的撞擊模式，分析並加總設置場址受飛機撞擊之機率，以確認機率小於 10^{-7} 次/年；若評估結果超過接受標準，則必須進一步進行第三階段風險分析，根據飛行器的重量、速度及設施的設計參數等，來討論分析輻射外釋的危害是否能滿足 10 CFR100 法規的要求；如無法達成，則必須修改設計或另擇場址。

第一階段評估只討論場址與機場及航道的距離，若場址與機場距離夠遠，並且遠離航道，被飛機撞擊的機率便會降低，即若設置場址與機場及航道的距離符合 NRC 訂定的規範，設置場址被飛機撞擊機率可判定為低於 10^{-7} 次/年，即為可接受之貯存場設置地點。此階段之設置場址評估及審查規範，主要為以下三點限制：

1. 距離限制

若機場距離設置地點很近，飛機起降對設置地點造成的風險較大，則可接受的起降架次較少；若機場距離設置地點較遠，對設置地點造成的風險也相對降低，因此可以接受的起降架次也較多。NRC 訂定的距離設置規範如下：設置地點到機場的距離(D)若在 8.05~16.09 km 內，則此機場年飛行次數需少於 $193D^2$ ；若設置地點到機場的距離(D)超過 16.09 km，且此機場年飛行次數要少於 $386D^2$ ；若設置地點到機場的距離小於 8.05 km，則需直接進入第二階段，而評估飛機事故發生後，造成設置地點輻射外洩的機率。

2. 航道限制

飛行航線包括國際航線(federal airway)、等待航線(holding pattern)、進離場航線(approach pattern)，飛行航線與設置地點的距離直接影響到飛機對設置地點的可能撞擊機率，飛行航線愈靠近設置地點，可能撞擊機率愈高，因此 NRC 規定飛行航線與設置地點最近距離需維持在 3.22 km 以上。

3. 軍事訓練限制

軍用機場的起降架次一般而言遠低於民間機場，但軍事訓練路線不同於民航路線，對設置場址的危害需另行評估。軍事訓練路線的邊界到設置場址

至少需距離 8.05 km，此限制也包含初級訓練路線(low-level training routes)；但是若該路線之年飛行次數大於 1,000 次，或為執行緊急特殊行動的路線(例如轟炸練習)，則需另外評估。

設置地點與飛機場及航道的距離需完全符合第一階段之三項規範，才可將設置場址被撞擊的風險視為 10^{-7} 次/年以下，反之，則需進行第二階段評估，更詳細分析撞擊機率。

若需進行第二階段評估，則需蒐集更詳細的資料，用以計算飛機在各種情況下對設置場址的撞擊機率，評估時應分別討論飛機在飛行時、降落時、特殊飛行狀況及等待航線的撞擊機率：

1. 飛行時撞擊機率分析

假設一架飛機在飛行過程中，有一固定的墜機率(C)，墜機率直接影響到設置場址受飛機撞擊機率(P_{FA})，墜機率高，場址受飛機撞擊機率就大；另外，飛行次數多對撞擊率有加乘效果，飛行次數多，場址受撞擊的機率就會增加；設置地點也與撞擊機率有關，設置地點的面積愈大，受撞擊機率愈高；而航道寬度表示飛機飛行方向與場址的垂直距離，距離愈遠，飛機偏離航道撞擊場址的機率愈低。飛行時撞擊機率計算公式如下：

$$P_{FA} = C \times N \times A / w$$

C：飛行過程中，每 km 的墜機率(/km)

w：航道寬度(若設置地點在航道外，航道寬度則視為原航道寬度加上兩倍的航道邊界到場址的距離)(km)

N：單一航線中，每年飛行之次數(/y)

A：場址面積(km^2)

計算風險時通常使用較保守的參數，求得較保守之撞擊機率；如設置地點面積以電廠面積代替場址面積，故求得之可能撞擊機率偏高。而撞擊率(C)以商用飛機為例，一般引用美國常用值 2.48×10^{-10} (/km)。計算撞擊機率時，若該航線每天最多飛行次數超過 100 次，則不適用上述公式，因飛行次數過高時，發生飛安意外的機率會大幅增加，所以需運用更詳盡的分析方法來求撞擊機率。

2. 降落時撞擊機率分析

飛機降落時對設置地點造成之風險，主要來自不當操作或機械故障，導致降落時偏離降落跑道或衝出跑道，不同種類飛機的衝力及撞擊力道不同，需分開計算；撞擊機率與飛行次數也有關，飛行次數愈多，撞擊機率愈高；另外設置場址是否位於跑道延伸處，或者是設置場址與飛機行進方向所涵蓋範圍也與撞擊機率有關，涵蓋的範圍愈大，受撞擊機率愈高；由此可知飛機降落時的撞擊機率與飛機種類、飛行次數、降落方向及設置場址面積有關，計算時需涵蓋民間及軍事用途之固定翼飛機機場及直昇機機場。其計算公式如下：

$$P_A = \sum_{i=1}^L \sum_{j=1}^M C_j N_{ij} A_j$$

M：飛機種類

L：飛行航道數

C_j ：第 j 種飛機，每一平方 km 飛行的飛機墜機率($1/\text{km}^2\text{-y}$)

N_{ij} ：第 j 種飛機沿著第 i 條航道的飛行次數

A_j ：第 j 種飛機的有效影響設置地點的面積 (km^2)

各種飛機的可能墜機率不同，表 6.6.H-1 為美國軍方及民間飛機墜率調查資料。飛機種類分為一般載客載貨飛機(U.S. air carrier)、短程飛行用或私人使用之小型飛機(general aviation)、美國海軍或艦隊用飛機、美國空軍飛行器；一般而言距離跑道盡頭愈遠，被撞擊機率愈小。

3. 特殊情形之撞擊機率分析

特殊情形包括民間及軍事特殊飛航情況，民間特殊飛航事件如飛機因天候或人為因素改變原航道或選擇其他機場降落，軍事特殊飛航事件如進行攻擊任務。計算時需詳細了解各事件中，飛機對設置地點的墜機率，以每架飛機每年每單位面積的飛機墜機率來評估置設地點之飛機撞擊機率(P_M)。計算公式如下：

$$P_M = C \times A$$

C：每架飛機每年每平方 km 對設置地點的飛機墜機率(/km²-y)

A：設置地點面積(km²)

飛機飛行次數多則飛機撞擊風險提高，若軍用飛機飛行次數超過第一階段評估之可以接受起降次數，則必須進行風險評估；但若是更改航線或以其他方式降低設置場址受飛機撞擊的機率，則不需進行風險評估；如美國軍方就曾有訓練路線因鄰近核電廠而改變其規劃路線的先例。

4. 等待航線之撞擊機率分析

等待航線係指飛機在特定高度以一個類似環形跑道的飛行航線繞行，在該飛行航線上至少會有一個無線電頻道，指引飛機沿著等待航線盤旋，直至接獲降落指示或繼續航行指示。NRC 對等待航線的限制與對飛行航道限制相同(見第一階段規範 2. 航道限制)，若等待航線與設置地點的距離大於 3.22 km，則認為飛機對設置地點撞擊機率很小，不需納入考慮；反之則需將等待航線的交通量納入計算，計算方法參考前述公式(第二階段 1. 飛行時撞擊機率分析)。

計算設置地點面積時，可排除設置地點範圍內不屬於電廠實際使用面積的區域，如電廠內的水體(河川)或其他地形結構，只需討論實際使用之電廠面積。以實際使用之電廠面積計算飛機在飛行時、降落時、特殊情形及等待航線對設置場址的撞擊機率，累加後即可得到該設置地點受飛機撞擊的機率。

資料蒐集與計算

本報告參考 NRC 訂定的設置場址受飛機撞擊機率的評估方法，蒐集台灣地區軍用及民用之固定翼飛機及直昇機機場相關資料，並整理於報告之附件中。固定翼機場相關資料係參考民航局提供固定翼機場特性現況分析表，如表 6.6.H-2。台灣固定翼機場可分為北、中、南、東及離島五區域，北部共有桃園機場、松山機場、桃園基地、龍岡基地、龍潭基地及新竹基地等六座機

場，其中桃園機場為民用機場，松山機場為軍民合用機場，其他為軍用機場，距離核一廠最近的為松山機場。

目前台灣地區之直昇機機場多附設於固定翼機場內，如松山、中正、台中、嘉義、台南、高雄、屏東、花蓮、台東、馬祖、金門、馬公、望安、七美、蘭嶼及綠島，均備有直昇機停機坪；另外，在南投縣之米堤、嘉義縣之竹崎及連江縣之東引、東莒、西莒等地，則設有五座直昇機飛行場，共計有二十一處可供直昇機起降；直昇機機場分佈如圖 6.6.H-2[26]，圖中松山機場為距離核一廠最近之直昇機機場。

根據所蒐集的資料，可知松山機場為距離核一廠最近之固定翼及直昇機機場；本報告調查松山機場與核一廠之距離及其飛機起降架次，用以進行第一階段評估。由地圖量測可知核一廠與松山機場距離為 24.75 km，其相對位置及距離如圖 6.6.H-3 所示。參考 NRC 訂定之設置地點規範，核一廠與松山機場距離超過 16.09 km，則此機場年飛行次數需少於 $386D^2$ ，即每年需少於 236,449 次。

經正式發函民航局取得資料[27]，得知松山機場歷年起降架次如圖 6.6.H-4。此資料包括民用及軍用固定翼飛機及直昇機一年起降總次數，松山機場之年起降架次於 80 年以前皆不到 90,000 次，而 82 年以後則維持在 120,000 次以上；飛機起降架次在 85 年左右最高為 207,742 次，但近年來有持續下降之趨勢。本報告以松山機場近十年起降資料保守估計，松山機場近十年平均起降架次為 171,832 次，NRC 規範計算之容許起降架次為 236,449 次，松山機場平均起降架次低於 NRC 設置規範，且松山機場歷年最高起降次數亦在設置規範的範圍內。

桃園機場為距離核一廠次近的機場，依 NRC 規範計算，容許起降架次與距離的平方成正比，因此，距離愈遠容許起降架次呈平方比例增加。桃園機場與核一廠之直線距離約為 42.87 km，如圖 6.6.H-5 所示，容許之年起降架次為 709,400 次。依桃園機場近十年之起降資料[28](如圖 6.6.H-6)，近十年固定翼及直昇機平均起降架次為 128,536 次，起降架次有逐年增加的趨勢，95 年起降架次最高，為 157,702 次，但亦遠低於 NRC 訂定之容許起降架次(709,400 次)。

松山機場為距離核一廠最近之軍用及民用機場，又為起降次數最多之機場；而桃園機場為國際機場，起降架次僅次於松山機場，為距核一廠次近的機場，計算松山機場及桃園機場之起降架次均在 NRC 規範內，由於其他機場距離核一廠更遠，且起降架次較少，因此，可知其他機場對核一廠的容許起降架次必然符合 NRC 之規範值。

有關飛機之飛行航線則依固定翼及直昇機之航路分別討論。固定翼分為國內及國際航線，國內航線參考民航局提供之松山機場進離場航圖，討論核一廠附近飛行航道對核一廠的影響。已知松山機場主要航線包括台中、台南、高雄、屏東、花蓮、台東、金門、馬公、北竿、南竿等 11 條航線。松山機場各航線進離場如圖 6.6.H-7[29]所示，圖中 OFFSET LDA 為航線終點，即松山機場位置，由圖可看出該航線是由平溪往機場方向，於松山機場降落，若無法即時於松山機場降落。則繼續向西飛至林口方向盤旋，等待適當時機再降落，由圖可看出進離場方向為東西向，而核一廠在松山機場北方，非飛機進離場行進之方向，因此不受飛機進離場撞擊影響。圖中亦可發現核一廠、核二廠及核四廠皆有畫定限航區，以核一廠為中心所訂定之限航區標示為 RC(R)-46，限制半徑為 3.7 km，限航區內限制各種飛行器於任何時間皆不得進入。根據 NRC 之設置規範，貯存場設置地點需與國際航線、等待航線、即將抵達區域的邊界距 3.22 km 以上，核一廠限航區為 3.7 km，已符合 NRC 所訂定之地點設置規範。

國際航線資料參考民航局台北飛航情報區航路圖，如圖 6.6.H-8[30]。台北飛航情報區內設有八個雷達站，最北方為大屯山站，大屯山站負責引導的航路與核一廠距離最接近；大屯山站引導五條國際航路及三條國內航路。

國內航路已於先前討論過，在此不再贅述。國際航線由數個方向飛經松山機場附近，再轉往其他航線；其中 B-576 航線看似與核一廠距離很接近，但因核一廠設有限航區，限航區管制飛機飛經過之時間及空間，且 B-576 航線位於核一廠的北方，而貯存場位於核一廠的南方，因此貯存場與所有航線的距離必大於限航區半徑(3.7 km)，可符合 NRC 所訂定之地點設置規範(3.22 km)。

輕型航空器指真空速每小時未逾 150 哩及總重量未逾 12,500 lbs 之航空器，如直昇機。輕型航空器實施目視飛航，按目視飛航走廊行駛，行駛時應避開各限航區或機場航線區域範圍，輕型航空器目視走廊如圖 6.6.H-9[31]所示。圖中包含松山機場、桃園機場及新竹機場三個機場航線區域及數個限航區；距離核一廠最近路段為 C1、C2 及 C10；各路段經過點包括基隆、三貂角、蘇澳、宜蘭、鶯歌、新店、坪林、中壢、楊梅、新竹等地，其中距離核一廠最近點為基隆，直線距離約為 20 km，航空器飛行高度低於 610 m(2,000 ft)，核一廠與飛行走廊相距甚遠且核一廠為限航區，因此輕型航空器對核一廠的影響可忽略不計。

超輕型載具空域資料參考交通部民航局超輕型載具管制規範，台灣地區超輕型載具飛行空域分為不老溫泉、南華賽嘉、雲林、濁水溪、二林、八斗子、苗栗、南投、宜蘭、花東地區、樹林柑園、蘭陽溪等十二處。北部超輕型載具飛行空域範圍如附件六，所有空域中以八斗子空域範圍與核一廠最接近。八斗子空域範圍北面自尖山子鼻，西向至後寮，往南至八斗國小，沿海岸東南向至九份國小，往東至南子吝山，西北向至蕃子澳，向西至尖山子鼻之連線範圍內，位置如圖 6.6.H-10 所示。八斗子空域與核一廠最近距離約 24 km，直昇機的飛行高度低於 152 m(500 ft)，由此可知超輕型載具飛行區域距核一廠甚遠，又其飛行高度低，本身對核一廠的影響即可忽略不計。

松山機場之軍機以運輸補給及後方支援為主，其勤務執行亦需遵守民航局之飛航管制與限航區之規範。依其起降架次配合民用飛機起降情況，以距離限制進行評估，評估方式如前所述。另外，其他台灣北部軍機場之軍事訓練路線亦集中在新竹、苗栗地區，距離核一廠甚遠，可不納入考慮。

結果

經由機場位置、飛行航線及軍、民用飛機起降數據等資料評估後，可知核一廠與松山機場距離大於 24 km，與中正國際機場距離 42 km，以 NRC 訂定之場址設置規範公式，計算得容許起降架次(松山機場 236,449 次及桃園機

場 709,400 次)，均較近十年之年平均起降架次(松山機場 171,832 次及桃園機場 116,862 次)高出許多，亦比歷年最大值(松山機場 207,742 次及桃園機場 148,938 次)為高。松山機場起降架次近年來有下降趨勢，但仍無法得知未來起降架次是否會超過容許值；若保守假設所有航道中均飛經場址，以類似 NRC 第二階段規範粗估飛經核一廠最高飛行次數：

$$P_{FA}=C \times N \times A/w$$

墜機率為 $2.48E-10$ ，貯存場面積 $2,000 \text{ m}^2$ ，飛機航道寬度 18.52 km，撞擊機率以 10^{-7} 次/年回推航道最大飛行次數，初估為每年 370 萬架次左右。以松山機場現有腹地，不論任何因素，應無可能自 94 年之 11 萬架次左右增加至上述之 370 萬架次。松山機場起降架次近年來有下降趨勢，因此，預估數年後起降次數仍在可接受程度內；桃園機場起降架次逐年成長，但與容許起降架次仍差距甚遠，因此，預估未來起降架次仍不會超過容許起降架次。

航道部份，因核一廠被畫定在限航區之內，各類飛行器之飛行航道皆需距離核一廠 3.7 km 以上，不論是固定翼或直昇機，國際航線或國內航線，皆需避開核一廠飛行，因此，可知核一廠符合 NRC 所訂定之地點設置規範(與航道距 3.22 km)。

經由機場位置、飛行航線及軍、民用飛機起降數據等資料評估，即可知道在核一廠內設置貯存場可符合 NRC 訂定之地點設置規範，即表示該地點受飛機撞擊之年發生機率小於 10^{-7} 。

經由第一階段資料評估，即可斷定核一廠受飛機撞擊機率小於 10^{-7} ，故不需進行第二階段評估。

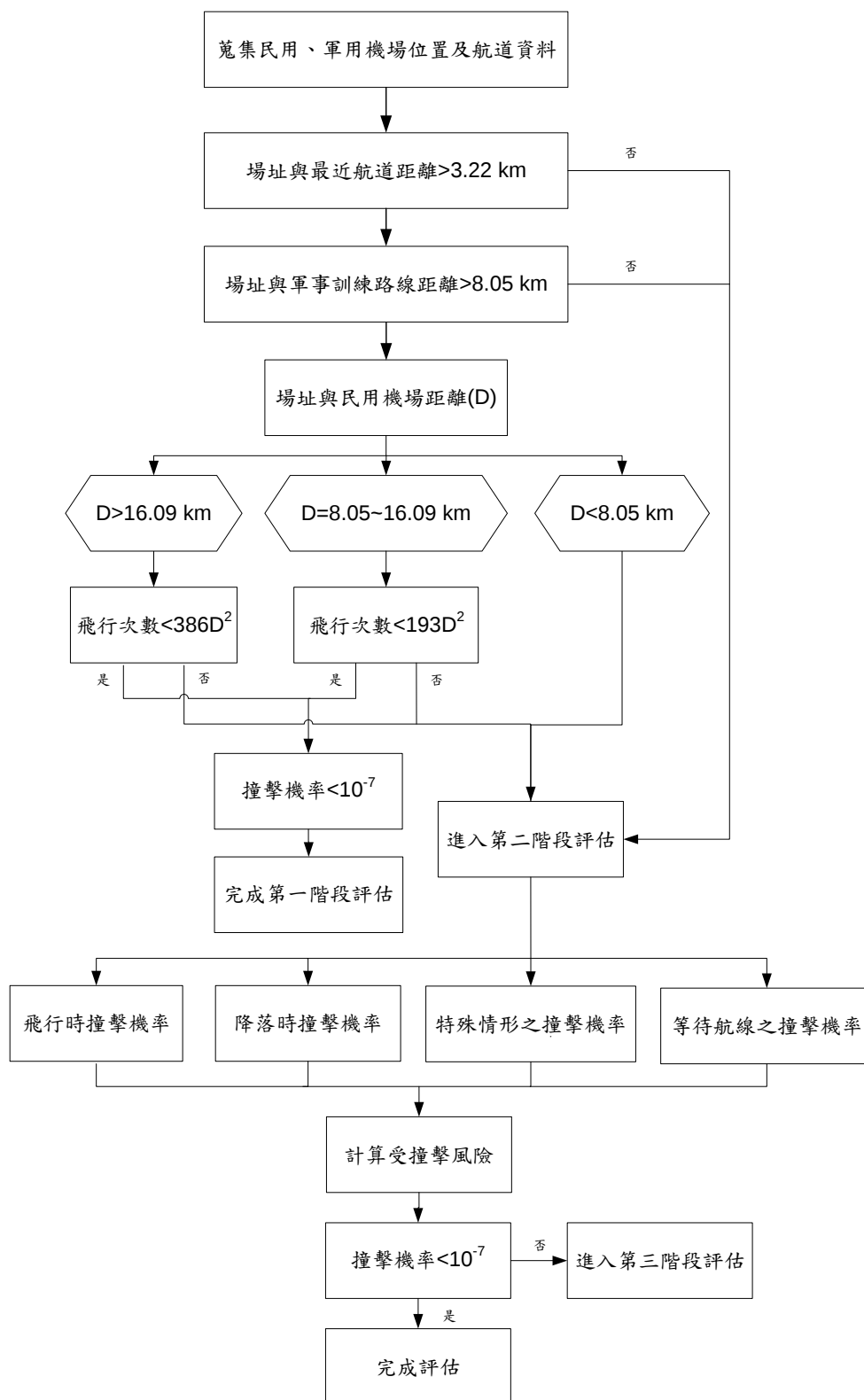


圖 6.6.H-1 飛機撞擊機率計算流程圖

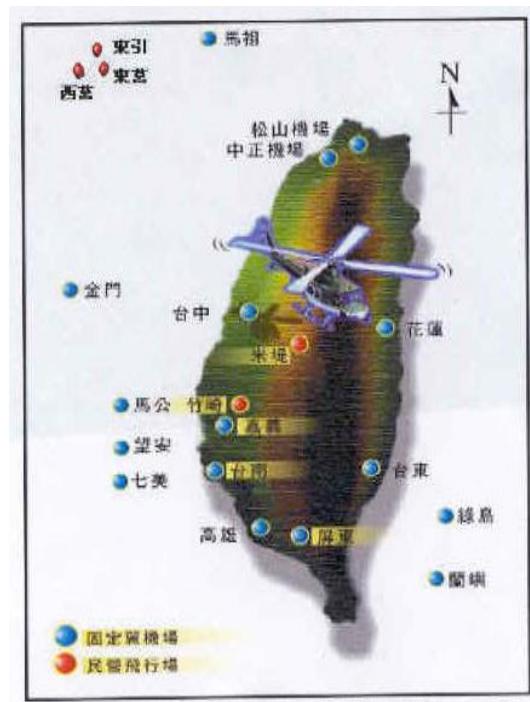


圖 6.6.H-2 台灣地區直昇機機場分佈圖



圖 6.6.H-3 核一廠與松山機場相對位置與距離

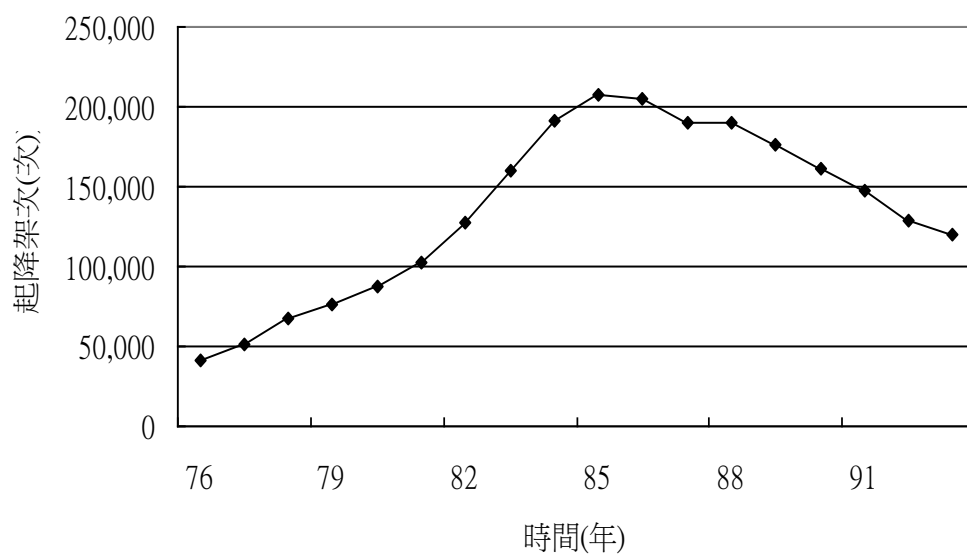


圖 6.6.H-4 松山機場歷年飛機起降架次



圖 6.6.H-5 核一廠與桃園機場相對位置與距離

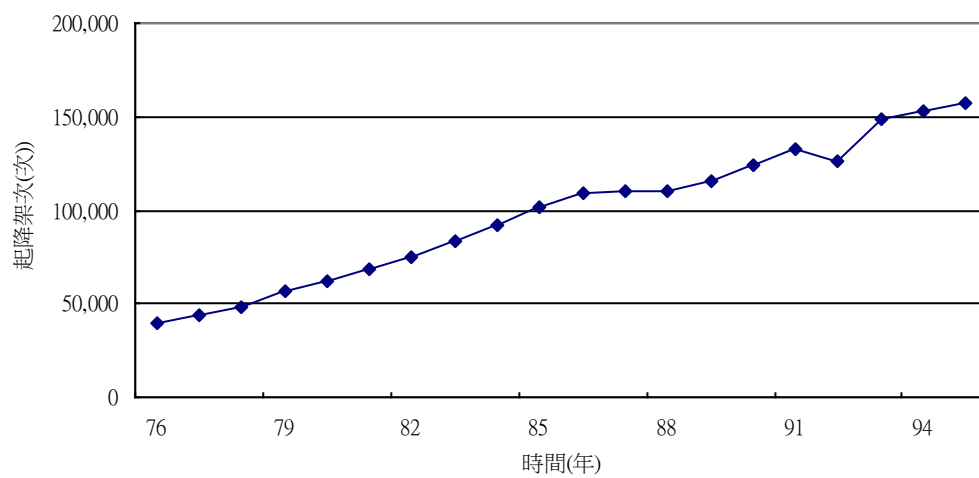


圖 6.6.H-6 桃園機場歷年起降架次

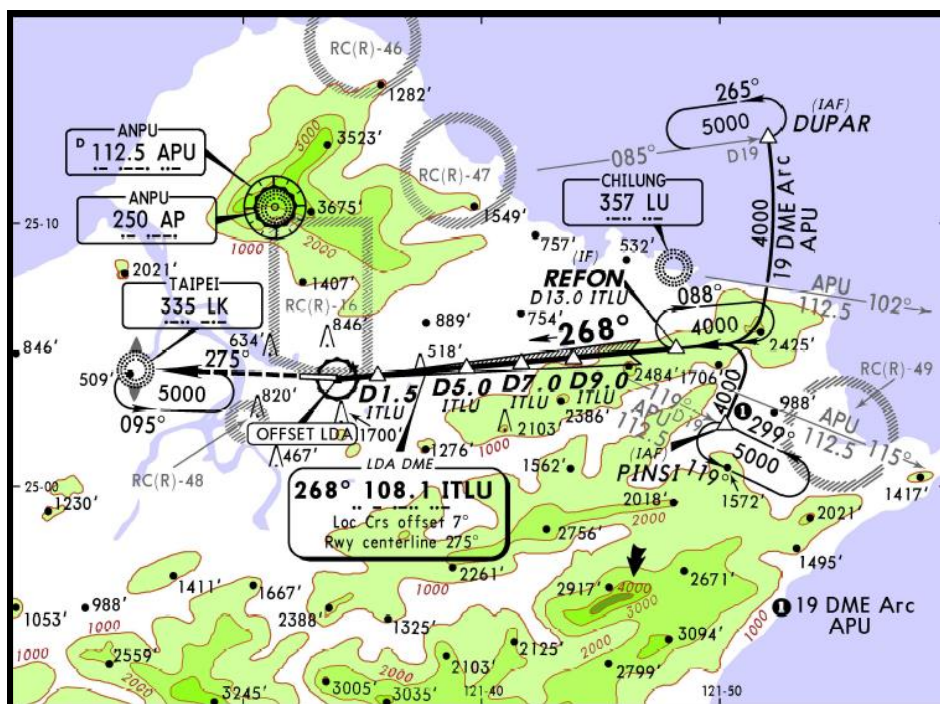


圖 6.6.H-7 松山機場進場航線圖

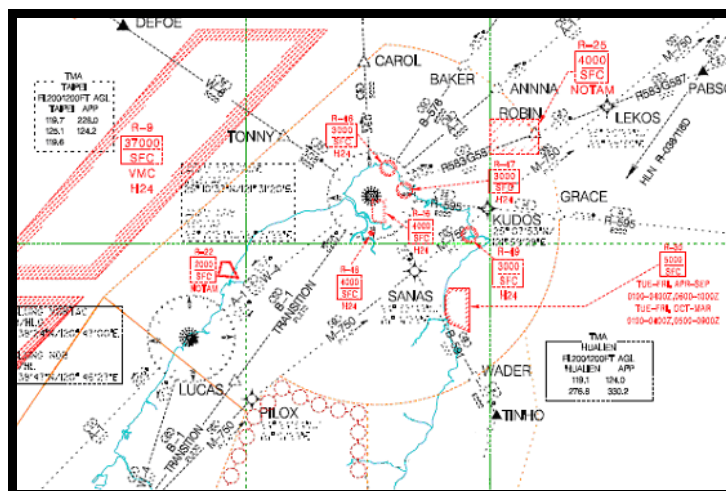
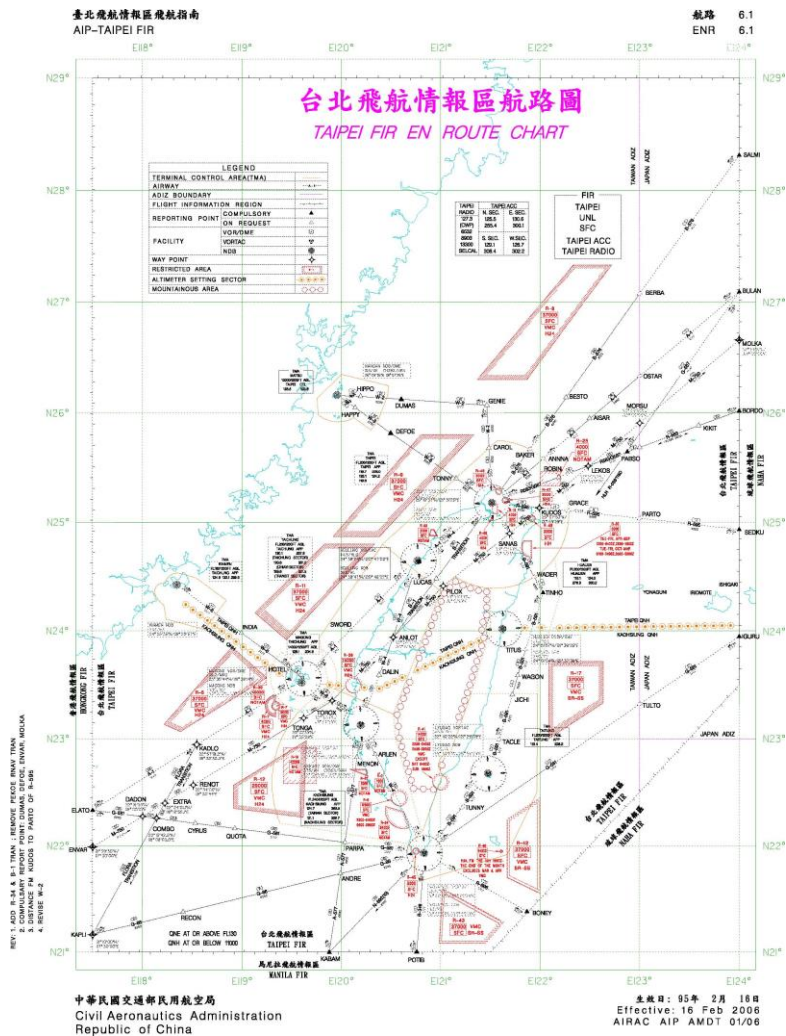


圖 6.6.H-8 台北飛航情報區航路圖

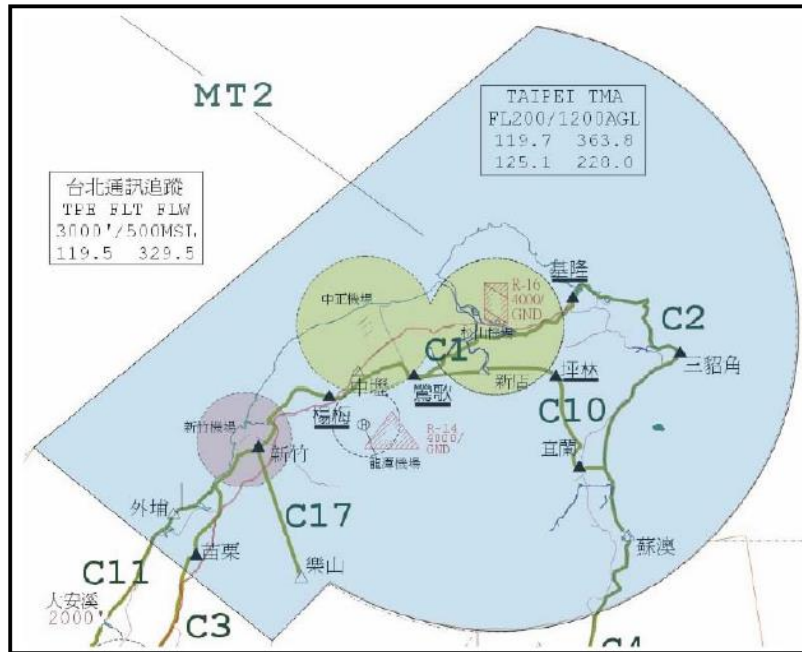


圖 6.6.H-9 輕型航空器目視走廊

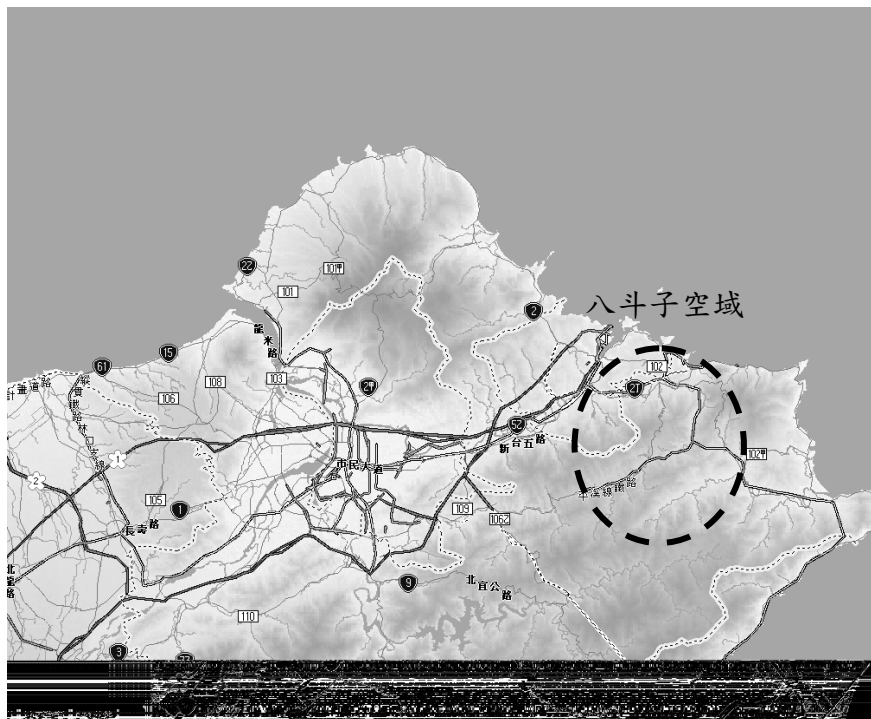


圖 6.6.H-10 超輕型載具飛行空域(八斗子空域)

表 6.6.H-1 美國軍方及民間飛機墜機率(C)

從跑道盡頭延伸的距離(km)	每次飛行所發生的飛機墜機率($\times 10^8 \text{ km}^2$)			
	一般飛機	小型飛機	美國海軍/艦隊	美國空軍
1.6	6.44	32.39	3.20	2.20
3.2	1.54	5.78	0.42	0.89
4.8	0.37	2.39	0.13	0.42
6.4	0.26	1.47	0.12	0.16
8.0	0.10	0.46	0.08	0.15
9.7	0.00	NA	NA	NA
11.3	0.00	NA	NA	NA
12.9	0.00	NA	NA	NA
14.5	0.05	NA	NA	NA
16.1	0.05	NA	NA	NA

參考資料：U.S. NRC, "Processing Applications for Early Site Permits"

表 6.6.H-2 台灣地區固定翼機場特性現況分析

機場區域 機場特性		台灣本島機場				離島機場
		北部區域	中部區域	南部區域	東部區域	
國際機場	民用機場	中正國際機場	—	高雄國際機場	—	—
國內機場	軍民合用	台北松山	台中清泉崗	嘉義、台南 屏東恆春	台東豐年 花蓮	馬公
	民用機場	—	—	恆春	—	金門 馬祖北竿 馬祖南竿 綠島、蘭嶼 望安、七美
其他	軍用機場	桃園基地 龍岡基地 龍潭基地 新竹基地	新社基地 水湳基地	歸仁基地 岡山基地 左營基地	宜蘭基地 台東志航基地 花蓮佳山基地	—
機場數量		6	3	8	5	8

備註： 1.高雄國際機場兼營國內線。
 2.新竹機場於 87 年 1 月 1 日開航，87 年 9 月 1 日停航。
 3.馬祖南竿機場 92 年 1 月 23 日正式營運。
 4.恆春機場 93 年 1 月 11 日正式營運。
 5.台中水湳機場民航站於 93 年 3 月 6 日遷移至清泉崗機場營運。

附錄 6.6.I 燃料底部撞擊評估

分析方法

分析方法是使用 ANSYS 9.0 有限元素分析程式之挫屈模態分析，計算護套與燃料丸組合後之燃料棒，在墜落時的第一挫屈模態的臨界挫屈加速度，另計算護套端部墜落分析做為比對之用。燃料棒在垂直方向於燃料束底座處受到束制，而在水平方向於燃料束格架(Spacer Grid)處受到束制。

因核一廠乾式貯存設施之垂直衝擊負載設計為 60 g，分析中保守假設所有衝擊負載完全傳遞至密封鋼筒中之用過核子燃料，故將分析所得之臨界挫屈負載與 60 g 負載做比較，假如臨界挫屈負載之值大於 60 g，那麼燃料棒在混凝土護箱 61 cm(24 in)端部墜落時不會發生挫屈，此方法不考慮 DLF，是較為保守之分析方法。此處使用 ANSYS 9.0 建立模型及執行分析。使用 BEAM3 二維彈性樑元素建構模型，見圖 6.6.I-1 為一典型有限元素模型。

核一廠乾式貯存的燃料型式列於表 6.6.I-1，這些燃料涵蓋所有可能的燃料棒之長度、直徑及護套厚度。其中護套挫屈分析選用 GE 9×9 燃料束，因此款燃料具較細之直徑，其挫屈計算可涵蓋其餘款式之燃料，在 INER-HPS 系統可貯存燃料中為最保守。

挫屈分析結果

護套含燃料丸及護套本身之挫屈分析結果之數據詳表 6.6.I-2，各型式之燃料棒分析圖如圖 6.6.I-2 至 6.6.I-4。

所有型式之第一挫屈模態所對應的臨界挫屈加速度皆大於 60 g。因此，所有要貯存之燃料棒受端部墜落時皆不會發生燃料挫屈。

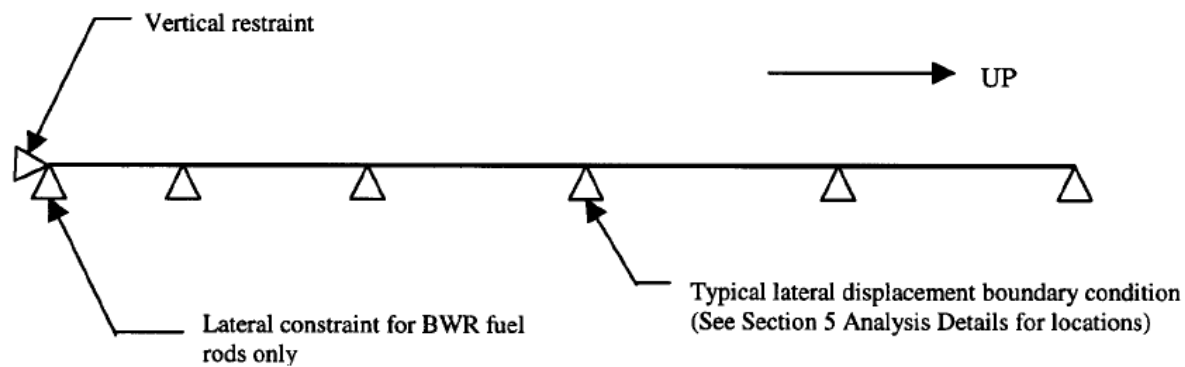


圖 6.6.I-1 燃料棒水平向束制式意圖

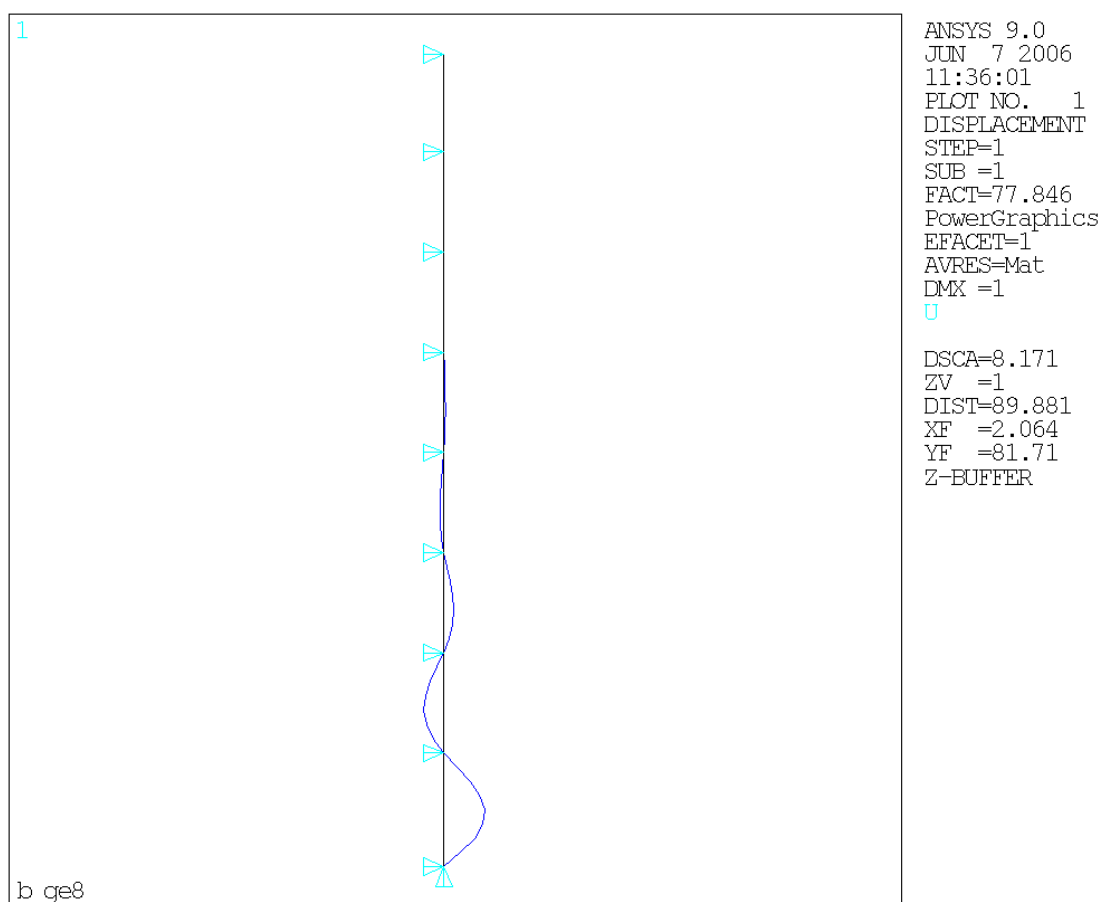


圖 6.6.I-2 GE 8×8 燃料棒組件第一模態挫屈圖

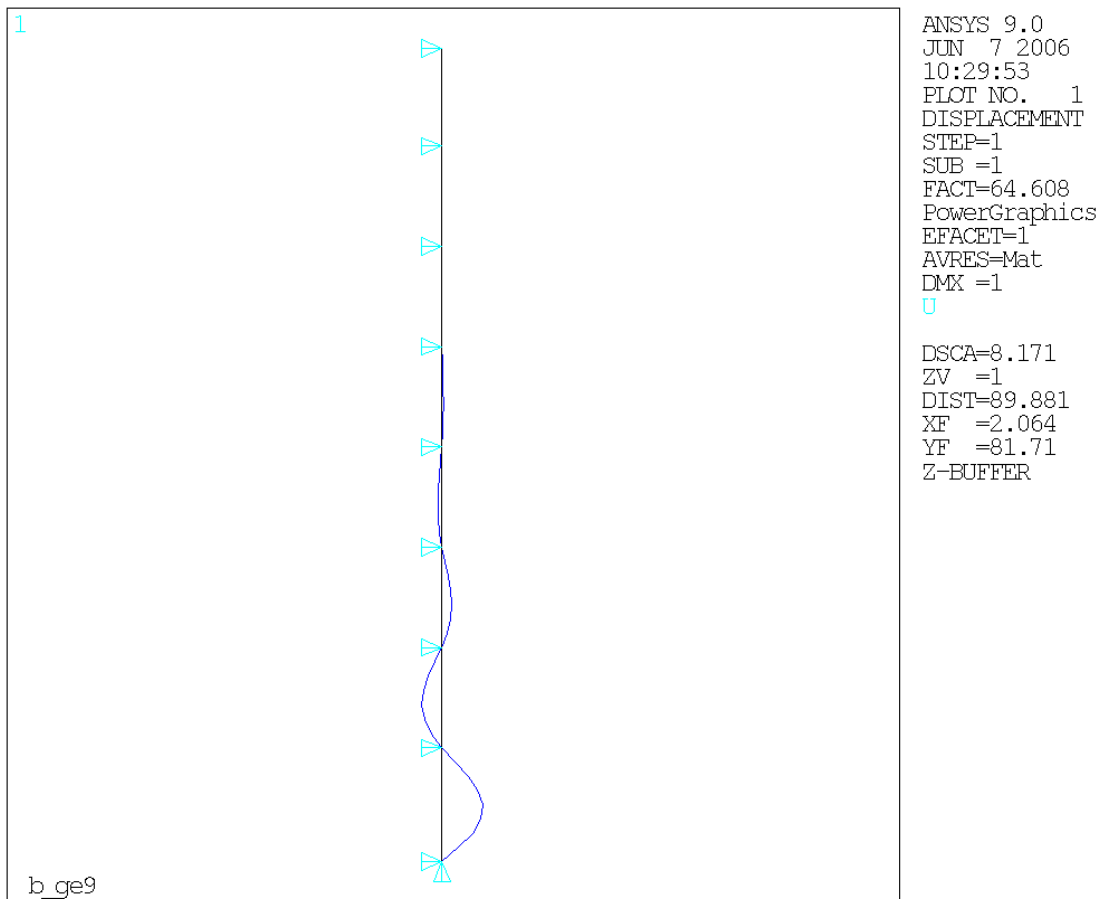


圖 6.6.I-3 GE 9×9 燃料棒組件第一模態挫屈圖

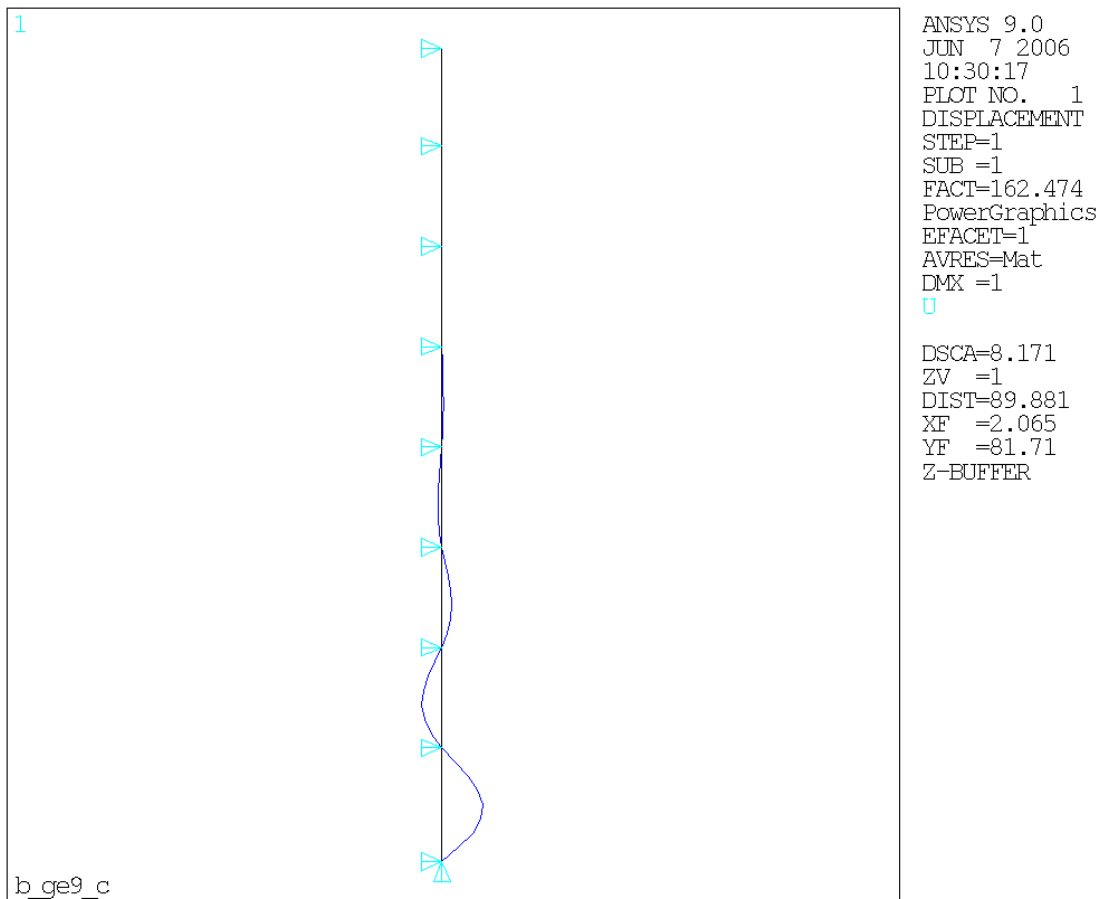


圖 6.6.I-4 GE 9×9 燃料護套第一模態挫屈圖

表 6.6.I-1 INER-HPS 燃料棒型式

型式	護套直徑(cm)	護套厚度(cm)	燃料丸直徑(cm)	燃料棒長度(cm)
GE 8×8	1.23	0.08	1.04	415.09
SPC 8×8	1.23	0.08	1.04	415.09
GE9B 8×8	1.23	0.08	1.04	415.09
GE 9×9	1.12	0.07	0.96	415.09

表 6.6.I-2 INER-HPS 燃料棒第一模態挫屈負載 g 值

型式	挫屈負載g值
GE 8×8	77.8
GE 9×9	64.6
GE 9×9 護套	162.5