

行政院原子能委員會  
委託研究計畫論文報告

用過核燃料中期貯存設施之  
結構安全獨立驗算模式

Independent verification model on  
the structural safety analysis of  
interim spent fuel storage facility

計畫編號：912002FCMA002

執行單位：核能研究所

計畫主持人：陳建忠

聯絡電話：(03)471-1400#6162

E-mail address：jjchen@iner.gov.tw

報告日期：中華民國九十二年四月七日

## 壹、緣起與目的

鑒於國內三座核能電廠用過燃料池的空間設計，並不足以完全貯放營運期間所產生的用過核燃料，據現有貯放空間估計，核一、二廠的用過燃料池，將分別於民國 97、98 年及民國 98、99 年用罄[1]。屆時核一、二廠仍將可能因受限於用過燃料池的貯放空間不足，而被迫停止運轉。因此，為解除因燃料池空間不足所可能造成的運轉限制，及早規劃用過燃料的處理，就更顯出其重要性。

為配合核一、二廠用過核燃料乾式貯存的需求，台電公司早於民國 74 年起，即開始規劃中期貯存設施的興建，並自 78 年起進行「核一、二廠用過核燃料中期貯存可行性評估研究」。經評估後認為，目前已廣為使用的混凝土模組、混凝土護箱、混凝土窖、金屬護箱等四種乾式貯存的方法，均符合我國台電公司之安全需求。然考量貯放設施廠址、空間的限制及由於 Transnuclear West 公司(TN West, Inc.)所設計的標準化用過燃料獨立貯存設施(Independent Spent Fuel Storage Installation, ISFSI )-核能水平貯存模組(Nuclear Horizontal Modular Storage) [2]，已獲得美國核管會(USNRC)的認可，其設計很有可能被台電公司選用作為核一廠之用過燃料中期貯存設施。因此，原子能委員會放射性物料管理局（以下簡稱物管局）要求原子能委員會核能研究所（以下簡稱核研所）先以 Transnuclear West 公司的標準化設計為目標，執行「用過核燃料中期貯存設施之結構安全獨立驗算模式」計畫的獨立驗證分析模式之建立。本計畫即是依據物管局要求以 NUHOMS<sup>®</sup>的標準化用過核燃料獨立乾式貯存設施為目標，針對用過核燃料中期貯存設施的主要結構-橫置式混凝土護箱及乾式屏蔽罐，進行結構安全分析獨立驗算模式的建立。

NUHOMS<sup>®</sup>標準化用過核燃料貯存設施操作程序是將裝載用過燃

料的乾式屏蔽罐放在運送罐內，然後經洩水、乾燥、焊接密封乾式屏蔽罐並回填氬氣，再將運送罐運送到水平貯存模組，經由運送罐與水平貯存模組對心的程序，以液壓方式將屏蔽罐推入提供保護與屏蔽功能的鋼筋混凝土製水平貯存模組中進行中期貯存。屏蔽罐所產生的衰變熱與水平貯存模組所受的日照熱則以被動式的自然對流方式移除。

依據 NUREG-1536 [3]的要求，乾式屏蔽罐、水平貯存模組為貯存設施中最主要的兩個貯存結構，亦為安全等級中最重要的部份。本分析報告是以 NUHOMS<sup>®</sup>標準化用過核燃料獨立乾式貯存設施為基礎，執行放置沸水式用過核燃料的獨立乾式貯存設施(NUHOMS<sup>®</sup>-52B)的主要貯放結構－水平貯存模組與乾式屏蔽罐的結構安全分析。

## 貳、研究方法與過程

對於 NUHOMS<sup>®</sup>的標準化用過核燃料中期貯存設施主要貯存結構的結構安全分析獨立驗算模式建立，分析工具使用 ANSYS [4]通用有限元素分析軟體，其各項分析工作如下所述：

### 一、水平貯存模組分析

NUHOMS<sup>®</sup>-52B 中期貯存設施之水平貯存模組(Horizontal Storage Module, HSM)是以鋼筋混凝土(reinforced concrete)及結構鋼(structural steel)建構而成，一個水平貯存模組僅能放置一個乾式屏蔽罐。鋼筋混凝土製水平貯存模組除可避免其內部的乾式屏蔽罐遭受外力破壞外，亦可有效阻隔自乾式屏蔽罐內部所放射出的中子及伽馬射線(gamma ray)，降低水平貯存模組外面的輻射劑量，如此可保護水平貯存模組外面的操作人員、生物以及環境的安全。

用過核燃料貯存設施可彈性地採單一獨立方式排列或採陣列方式排列，依貯存場的需要及經濟的考量而定。為了防禦投射物的襲擊，

於水平貯存模組兩側均裝設有一 24 吋厚的端屏蔽牆(end shielding wall)，且後方亦有一 24 吋厚的後屏蔽牆(rear shielding wall)予以保護。

水平貯存模組其長×寬×高為 6 m × 2.9 m × 4.6 m (238 in × 116 in × 180 in) [2]，如圖 1 所示。根據 10 CFR72.3 [5]的規定，因為水平貯存模組提供了乾式屏蔽罐防護和屏蔽的功能，故水平貯存模組屬於重要安全組件，必須依照 10CFR72.122 [5]和 ANSI-57.9 [6]的規定，在設計及分析時考慮各項操作條件(如壓力、溫度)及嚴苛的自然現象(如地震、洪水)等所造成的負荷。

為保證用過核燃料中期貯存設施的營運安全，水平貯存模組各牆面的厚度除必須滿足輻射屏蔽防護安全的最小厚度需求外，尚須滿足水平貯存模組在營運期間承受所有可能發生負荷的最小厚度需求。本文對鋼筋混凝土製水平貯存模組的結構強度採用 ACI 349-85 [7]極限強度設計法(ultimate strength design)進行設計與分析，負載組合則依據 ANSI 57.9 [6]規定進行。

對於諸如風力吹襲、地震搖晃、洪水沖擊以及投射物撞擊等每一種假設性意外負荷，均必須分析是否會使得單一自由站立的水平貯存模組產生翻覆或滑動，並且事先做好防護措施，以確保水平貯存模組營運時的安全。水平貯存模組在各項負荷作用下的分析如下所述：

### (1)靜載重分析

水平貯存模組的靜載重主要為來自於各牆面水泥本身的自重和乾式屏蔽罐及乾式屏蔽罐支撐結構的重量。而乾式屏蔽罐的重量為 33990 kg，乾式屏蔽罐支撐結構的重量為 1591 kg。

### (2)活載重分析

活載重有可能為積雪負荷或人為所造成的活動性負荷，為求保守，於設計時，假設水平貯存模組的頂部投射面承受 9.58 kN/m<sup>2</sup> (200

lb/ft<sup>2</sup>)的均佈活載重。

### (3)熱力分析

由於水平貯存模組在貯存期間會受到來自於內部用過核燃料棒所散發出來的衰變熱及水平貯存模組外面的日照熱的作用，使水平貯存模組內部的溫度升高，牆面受熱扭曲變形而產生熱應力。水平貯存模組於設計時，必須考慮水平貯存模組在正常操作、異常操作以及假設性意外事故等不同熱力負荷作用下所形成的熱應力，以確保水平貯存模組營運時的安全。

### (4)水平貯存模組風壓分析

依據 10CFR 72.122 (b)(2)，水平貯存模組的設計強度必須可以抵抗龍捲風(tornado)負荷。台灣地區並無龍捲風現象，但季節性的颱風(typhoon)其風力相當地大，設計時必須加以考慮。依據核一廠 FSAR [10]第 3.3 節，水平貯存模組貯放地區設計風速(design wind speed)為 60 m/sec (134.22 mph)。

### (5)投射物分析

依據 NUREG-0800 [12]，為了防禦投射物的撞擊，水平貯存模組各牆面的厚度必須設計成足以承受投射物撞擊。水平貯存模組所考慮的投射物撞擊負荷包含下列三種情況：

- a. 127 kg (280 磅)重、直徑 20.32 cm(8 吋)的鈍物撞擊水平貯存模組，撞擊速度為 56.39 m/sec (185 ft/sec)。
- b. 1814 kg (4000 磅)重的汽車撞擊水平貯存模組，撞擊面積為 1.858 m<sup>2</sup>(20 ft<sup>2</sup>)，撞擊速度為 59.44 m/sec (195 ft/sec)。
- c. 直徑 2.54 cm(1 吋)的實心鋼球撞擊水平貯存模組，撞擊速度為 59.44 m/sec (195 ft/sec)。

### (6)洪水分析

依核一廠 FSAR [10]第 3.4 節，核一廠地區高出洪水線 4 ft，中期貯存設施位置也位於洪水線高度以上，因此水平貯存模組的設計並不用考慮洪水負荷。但考慮中期貯存設施的未來通用性，本分析仍依照 NUHOMS<sup>®</sup>的 FSAR [7]，考慮水平貯存模組承受靜水壓(static head of water) 50 ft 且最大流速為 15 ft/sec 的設計基準洪水負荷 (design basis flooding load)。依據 ANSI A58.1 [11]可得 HSM 各牆面所承受的風壓值。

#### (7)地震分析

對於 NUHOMS<sup>®</sup>-52B 用過核燃料中期貯存設施的地震分析，本文考慮單一自由站立的水平貯存模組在受到設計基準地震作用。根據 NRC Reg. Guide 1.61 [13]，乾式屏蔽罐的阻尼值使用 3%，乾式屏蔽罐支撐結構的阻尼值使用 7%，水平貯存模組的阻尼值使用 7%。依據 NRC Reg. Guide 1.60 [14]，地震力作用大小在水平方向為一倍的設計基準地震且在垂直方向為三分之二倍的設計基準地震。對於結構系統在設計地震頻譜下的反應值(response)，本文使用 SRSS (Square Root of the Sum of the Squares)方法加以組合。經由分析，水平貯存模組在地震作用下，其分析結果如圖 2 所示。

水平貯存模組的負載組合依據 ANSI 57.9 的規定，各牆面的剪力及彎矩值經由載組合後的結果列示於表 1。由表 1 的結果可知，組合後的剪力值及彎矩值均小於極限剪力容量及極限彎矩容量，顯示水平貯存模組的結構強度在承受上述各項嚴苛的設計負荷下是沒有問題的，故水平貯存模組的結構強度符合法規的設計要求。

## 二、乾式屏蔽罐分析

乾式屏蔽罐(Dry Shielded Canister, DSC)置於水平貯存模組內兩條張開角度為 $\pm 30^\circ$ 的乾式屏蔽罐支撐結構(DSC Support Structure)上。乾式屏蔽罐主要是由一個罐型外殼(canister shell)及上/下兩端各兩片內、外封板(inner, outer cover plate)所焊接而成的圓柱形容器。總長度 4.97 m (196 in)，罐型外殼外徑 1.71 m (67.25 in)，厚度 16 mm (0.625 in)。如圖 3 所示。

乾式屏蔽罐罐型外殼、上/下端內外封板以及相關焊接部份構成燃料元件的壓力維持包封邊界，屬於壓力邊界組件(pressure boundary component)，乾式屏蔽罐壓力邊界組件使用 ASME SA240 Type 304 不鏽鋼製造，因關係用過核燃料貯存時的安全，屬於核能一級組件，必須依照 1998 年 ASME B&PV Code, Section III, Division 1, Subsection NB Code [8] (對於 Service Level A、B、C 和測試條件)和 Section III, Division 1, Appendices, Appendix F [9] (對於 Service Level D)進行設計與分析。

依照 10CFR72.122 及 ANSI-57.9 的規定在設計及分析時，必須考慮各項操作條件(溫度、壓力等)及嚴苛的自然現象(地震、洪水等)所引發的負荷，以使結構具備足夠的強度抵抗各種營運負荷，並在承受各種負荷時都能發揮其應有的功能。乾式屏蔽罐壓力邊界組件在各種營運條件下所承受的負荷可敘述如下：

### (1) 靜載重負荷

乾式屏蔽罐的靜載重分析可分為兩種型式：垂直式及水平式靜載重。當運送罐在吊運、乾燥及密封期間，位於運送罐內部的乾式屏蔽罐呈垂直狀態，為垂直式靜載重；而乾式屏蔽罐置放於運送罐

及水平貯存模組內部時，呈水平橫置狀態，為水平式靜載重。

## (2)熱力負荷

由 NUHOMS<sup>®</sup> FSAR [2]第 8.1.3.2.2 節 NUHOMS<sup>®</sup>-52B 乾式屏蔽罐位於水平貯存模組內部所做的熱力分析可知，在環境溫度為 70°F 的正常營運條件下，乾式屏蔽罐罐型外殼下方最大溫度為 93.89°C，中間為 120°C，上方為 141.11°C；在環境溫度為 125°F 的異常營運條件下，乾式屏蔽罐罐型外殼下方最大溫度為 121.67°C，中間為 150.56°C，上方為 173.89°C；在環境溫度為 125°F 的假設性意外事故條件下，乾式屏蔽罐罐型外殼下方最大溫度為 337.22°C，中間為 337.22°C，上方為 337.22°C。

## (3)壓力負荷

乾式屏蔽罐所承受的最大內壓在正常操作狀態下為 6.4 psig，異常操作狀態下為 8.1 psig，假設性意外事故狀態下則為 31.1 psig [2]。為求保守起見，將正常營運階段(service level A)的設計壓力設定為 8 psig，設計溫度設定為 70°F；異常營運階段(service level B)的設計壓力設定為 11 psig，設計溫度設定為 125°F；緊急意外事故營運階段(service level C)的設計壓力設定為 41 psig，設計溫度設定為 125°F；失效意外事故營運階段(service level D)的設計壓力設定為 60 psig，設計溫度設定為 125°F；而乾式屏蔽罐水壓測試的測試壓力設定為 12 psig，測試水壓溫度設定為 100°F [2]；乾式屏蔽罐壓力邊界組件在進行壓力測試時，因呈垂直放置狀態，乾式屏蔽罐底部的壓力必須考慮因靜水壓所帶來的額外壓力負荷。為了方便設計，乾式屏蔽罐於設計之初，概定承受 9 psig 的設計壓力，設計溫度設定則為 125°F。乾式屏蔽罐壓力邊界組件的營運階段 D 狀況係假設乾式屏蔽罐壓力邊界組件的第一道密封元件(內封板)發生破壞，壓力已到達第二道壓



力密封元件(外封板)，故營運階段 D 的內壓力係作用於乾式屏蔽罐內部及上/下端外封板內側。

#### (4)地震負荷

因為乾式屏蔽罐於地震分析時，其動態效應如同大直徑的管路系統(large diameter piping system)，所以可依照 NRC Regulatory Guide 1.61 Table 1 [13]，適用"設備和大直徑管路系統"一章的規定。於此，對於安全停機地震(Safe Shutdown Earthquake, SSE)，乾式屏蔽罐的阻尼值(damping value)可以取為 3%，而水平貯存模組為 7%。乾式屏蔽罐地震分析結果如圖 4 所示。

#### (5)洪水負荷

本文依照 NUHOMS<sup>®</sup>的 FSAR [2]，考慮乾式屏蔽罐承受靜水壓(static head of water) 50 ft 且最大流速為 15 ft/sec 的設計基準洪水負荷(design basis flooding load)。

將乾式屏蔽罐壓力邊界組件各負載分析所得到的結果，依設計規範進行負載組合，可得到在設計、營運及測試階段下的負載組合結果如表 2 所示。經由應力限值比對，可知乾式屏蔽罐壓力邊界在各種負荷作用下所產生的應力值均小於法規所指定的應力限值，顯示乾式屏蔽罐壓力邊界組件在承受各項負荷作用下是沒有問題的，乾式屏蔽罐壓力邊界組件的結構強度符合法規的設計要求。

### 參、主要發現與結論

對於用過核燃料中期儲存設施結構安全性評估，經考慮各種可能發生的負荷後，各項分析結果如下所示：

一、在各項負荷作用下，經由分析，水平貯存模組各牆面的剪力及彎

矩值均小於 ACI 349-85 所容許的極限剪力及極限彎矩容量，顯示水平貯存模組在承受各項嚴苛的設計負荷作用下是沒有問題的。所以，水平貯存模組的結構強度符合法規的設計要求。

- 二、考慮單一自由站立，且兩側具有端屏蔽牆及後側具有後屏蔽牆的水平貯存模組，在洪水、風力、地震及投射物等各種假設性意外事故負荷作用下，經由分析，因各項負荷對水平貯存模組所產生的翻覆力矩及滑動推動力均小於水平貯存模組本身的穩定力矩及摩擦滑動阻力，所以水平貯存模組不會有翻覆及滑動的情況發生。
- 三、在正常操作、異常操作及假設性意外事故負荷作用下，乾式屏蔽罐壓力邊界組件的應力值均小於 ASME NB 法規所指定的應力限值，顯示乾式屏蔽罐壓力邊界組件在承受各項嚴苛的設計負荷作用下是沒有問題的。所以，乾式屏蔽罐壓力邊界組件的結構強度符合法規的設計要求。
- 四、本項分析是以 NUHOMS<sup>®</sup> 標準化設計之 NUHOMS<sup>®</sup>-52B 為目標，並完成各項分析程序的建立與分析工作的執行。未來配合委託單位進行台電公司的中期貯存設施結構獨立驗證時，可相當程度簡化所需的分析時程。
- 五、本計畫受限於分析時程與分析所需工具的不同，無法將運送罐的分析包含於本項計畫中，未來仍可配合相關需求進行必要的分析。

#### 肆、參考資料

- [1] 物管局網站, "<http://www.fcma.aec.gov.tw/nswfrm.htm>", July 1, 2002.
- [2] Transnuclear West, Inc., "Final Safety Analysis Report for the Standardized NUHOMS® Horizontal Modular Storage System for Irradiated Nuclear Fuel", August 2000.
- [3] USNRC, NUREG-1536, "Standard Review Plan for Dry Cask Storage Systems", Office of Nuclear Material Safety and Safeguards, Jan. 1997.
- [4] ANSYS Inc, "ANSYS" Ver 5.7, Nov. 2000.
- [5] U.S. Government, "Licensing Requirements for the Storage of Spent Fuel in an Independent Spent Fuel Storage Installation (ISFSI)", Title 10 Code of Federal Regulations, Part 72, Office of the Federal Register, Washington, D.C.
- [6] American National Standard, "Design Criteria for an Independent Spent Fuel Storage Installation (Dry Storage Type)," ANSI/ANS 57.9-1992, American Nuclear Society, La Grange Park, Illinois, 1992.
- [7] American Concrete Institute, "Code Requirements for Nuclear Safety Related Concrete Structures and Commentary", ACI 349-85 and ACI 349R-85, American Concrete Institute, Detroit, MI, 1980.
- [8] "ASME B&PV CODE", Section III, Division 1, Subsection NB, 1998.
- [9] "ASME B&PV CODE", Section III, Division 1, Appendices, 1998.
- [10] Taiwan Power Company, "Final Safety Analysis Report, CHINSHAN nuclear power station, Unit 1 & 2", 1986.
- [11] American National Standard, "Building Code Requirements for Minimum Design Loads in Buildings and Other Structures," ANSI/A58.1-1982, American National Standards Institute, Inc. New York, New York, 1982.
- [12] U. S. Nuclear Regulatory Commission, "Barrier Design Procedures," Standard Review Plan NUREG-0800, 3.5.3 (Formerly NUREG-75 / 087) Revision 1, July 1981.
- [13] U.S. Atomic Energy Commission, "Damping Values for Seismic Design of Nuclear Power Plants," Regulatory Guide 1.61, October 1973.
- [14] U.S. Atomic Energy Commission, "Design Response Spectra for Seismic Design of Nuclear Power Plants," Regulatory Guide 1.60, Revision 1, 1973.

表 1 HSM 負載組合結果

HSM 結構截面	力量分量	HSM 內部力 (N/m, N-m/m)							
		LC1	LC2	LC3	LC4	LC5	LC6	Allowable	Results
Front Wall	Shear	121.8	361.58	57875	1755.6	84.685	93.809	5.92E+5	PASS
	Moment	164.58	74991	60682	67230	64789	289009	3.48E+5	PASS
Rear Wall	Shear	39.208	161.5	13357	1698.3	27.449	33.948	2.11E+5	PASS
	Moment	90.652	17977	13789	23132	22571	83071	1.44E+5	PASS
Left Side Wall	Shear	591.39	22580	26568	20348	21128	51818	3.40E+5	PASS
	Moment	1990.9	4238.2	4042.2	20365	1355.2	1355.2	2.62E+5	PASS
Right Side Wall	Shear	591.39	22580	109508	20348	21128	51818	3.40E+5	PASS
	Moment	1990.9	4238.2	20685	20365	1355.2	1355.2	2.62E+5	PASS
Roof Slab	Shear	2296	1910.9	83770	1640	1640.5	1644.8	7.16E+5	PASS
	Moment	3398.7	95179	77570	73297	84627	278257	7.51E+5	PASS
Floor Slab	Shear	402.19	10122	59359	7938.6	11347	5360.6	2.13E+5	PASS
	Moment	5031.7	14203	12736	11773	16983	63563	8.27E+5	PASS

表 2 DSC 負載組合結果 - 設計階段

Load Case	DS1		Pm (MPa)	Pm+Pb (MPa)	Result
	Pm (MPa)	Pm+Pb (MPa)			
BOC1	0.32	0.72	137.97	206.95	PASS
BIC1	0.24	0.25	137.97	206.95	PASS
TOC1	0.17	0.18	137.97	206.95	PASS
TIC1	0.18	0.20	137.97	206.95	PASS
BS1 (wld.)	1.20	1.23	82.78	124.17	PASS
BS2 (wld.)	1.24	2.17	82.78	124.17	PASS
BS3	4.77	4.93	137.97	206.95	PASS
BS4 (wld.)	0.91	1.19	82.78	124.17	PASS
BS5 (wld.)	0.84	1.08	82.78	124.17	PASS
TS1 (wld.)	0.21	0.22	82.78	124.17	PASS
TS2 (wld.)	0.44	1.41	82.78	124.17	PASS
TS3	3.42	3.50	137.97	206.95	PASS
TS4 (wld.)	0.16	0.45	82.78	124.17	PASS
TS5 (wld.)	0.13	0.34	82.78	124.17	PASS

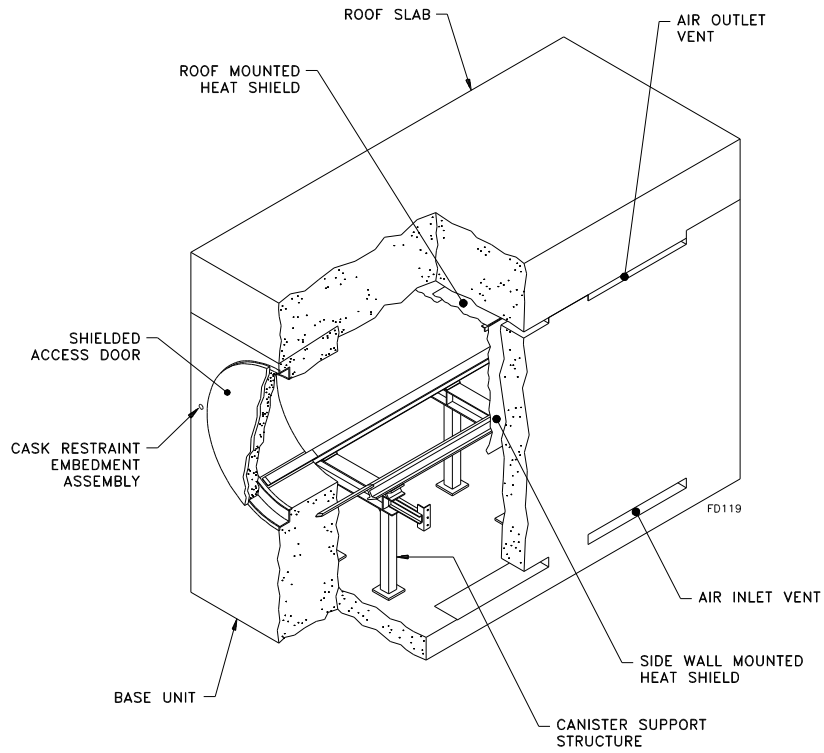


圖 1 NUHOMS® -52B 水平貯存模組

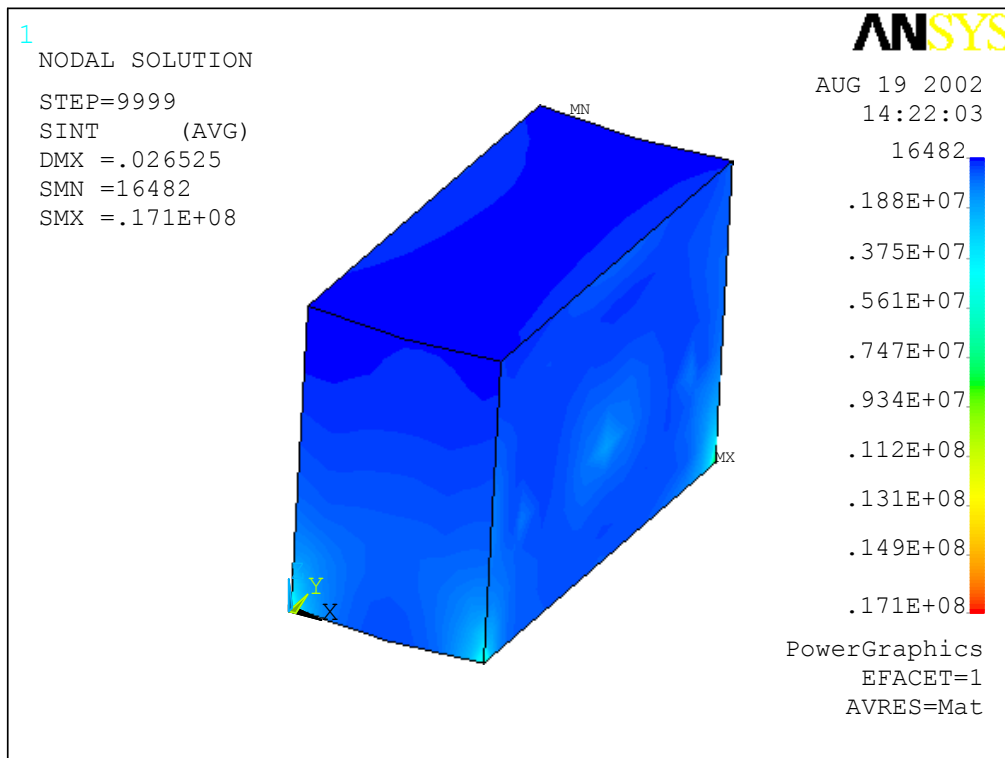


圖 2 HSM 地震分析 - 應力分佈圖(單位：Pa)

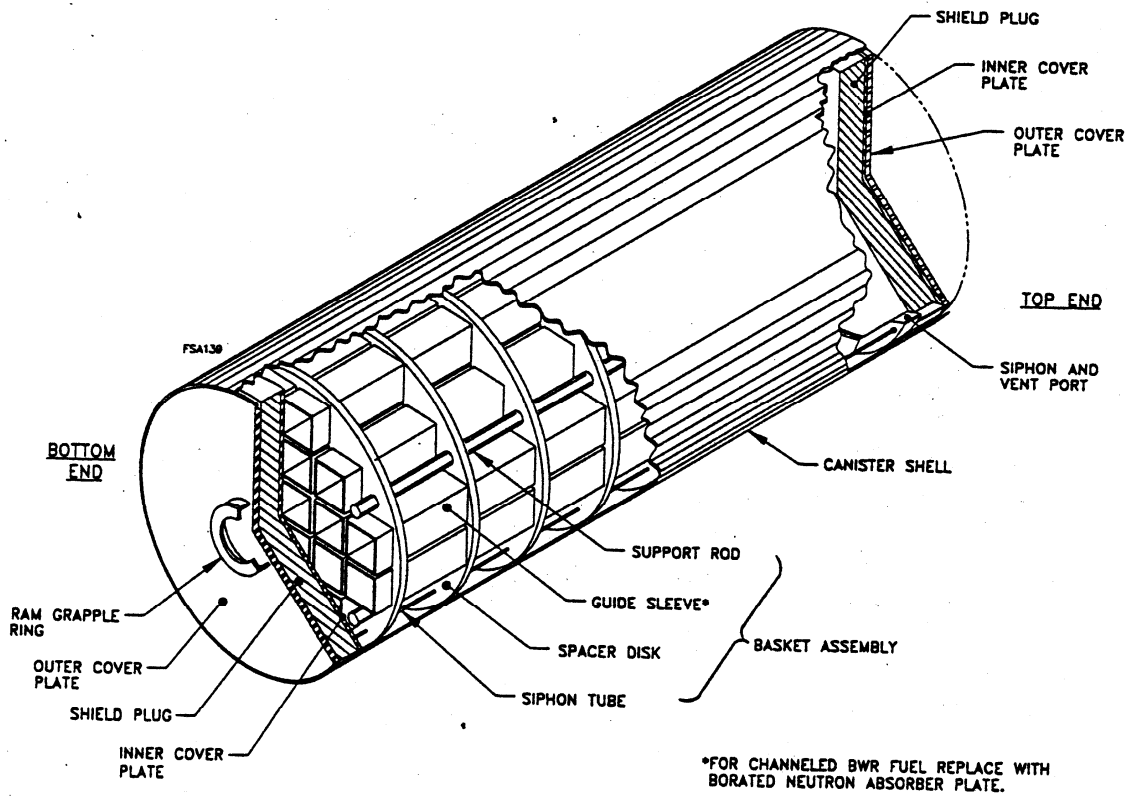


圖 3 NUHOMS®-52B DSC 整體結構圖

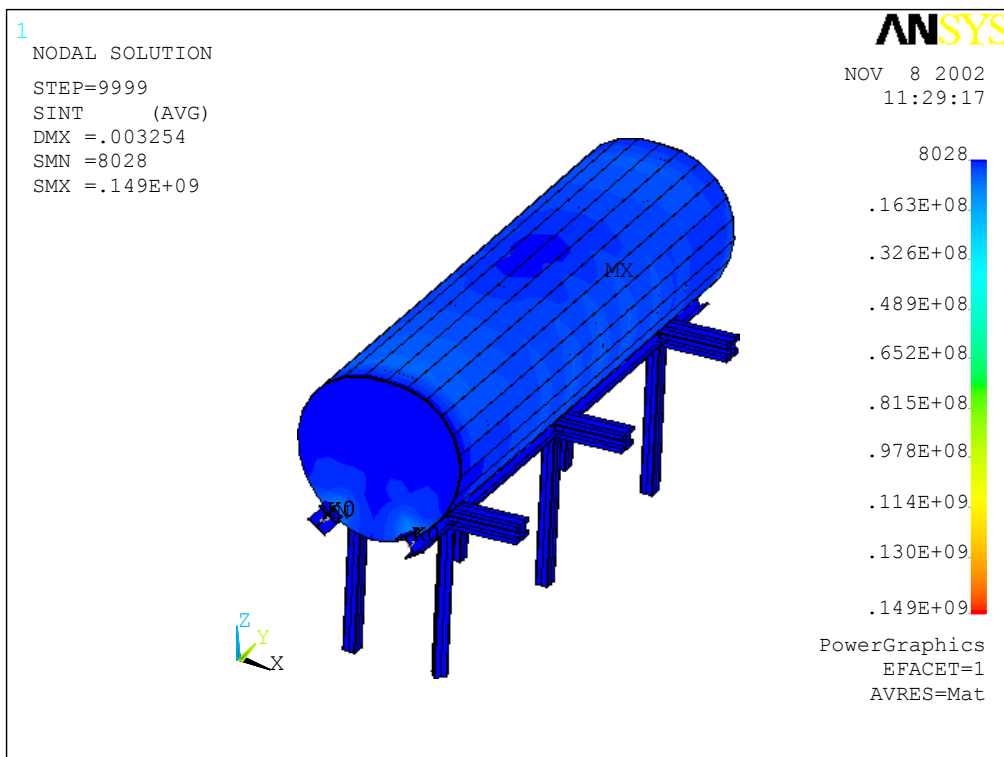


圖 4 DSC 地震分析 - 應力分佈圖(單位：Pa)