

# 建立用過核子燃料中期貯存吊運作業事故分析模式

## 結案報告

中華民國九十三年十二月二十八日

# 建立用過核子燃料中期貯存吊運作業事故分析模式

吳晃昭

## 摘要

本報告中以有限元素分析程式 ABAQUS 建構一詳實的燃料棒於水中墜落並撞擊燃料池底的分析模式。分析中先以傳統流體力學計算燃料棒於水中墜落至燃料池底前，各過程中的速度，再以 ABAQUS 程式計算燃料棒於撞擊後之受力情況及行為變化。報告中分述燃料棒於燃料吊車靜止時及行進中墜落燃料池底的狀況。分析結果顯示無論燃料是靜止中或正常燃料吊運行進中於水中約五公尺高度墜落池底，並未發生燃料棒挫曲的現象，而且撞擊後鋁合金護套也能保持完整性，但是受力最嚴重的燃料棒下端塞則有局部永久變形的現象；此外，在護套與端塞和接觸周圍的材料在撞擊過程中也都處於材料降伏應力值以下，無破損之虞。

# 目 錄

	頁次
一、目的-----	1
二、背景-----	2
三、分析方法與分析對象-----	4
四、假設-----	7
五、分析軟體與分析模式建構-----	9
六、結果與討論-----	23
七、總結-----	56
八、參考文獻-----	57
附件-----	59

## 圖目錄

	頁次
圖 5.1 ABAQUS 程式組織及其相關程式模組 .....	17
圖 5.2 圓柱二維流場的黏滯力分析 .....	18
圖 5.3 圓柱體的黏滯係數曲線 .....	18
圖 5.5 燃料棒墜落有限元素分析模式 .....	20
圖 6.1 燃料棒墜落分析中的燃料行為觀察點 .....	29
圖 6.2 燃料棒水中垂直墜落時的衝擊力 .....	30
圖 6.3 燃料棒水中垂直墜落時的各處位移量 .....	31
圖 6.4 (a) 燃料棒水中垂直墜落時 a 點的速度 .....	32
圖 6.4 (b) 燃料棒水中垂直墜落時 b 點的速度 .....	32
圖 6.4 (c) 燃料棒水中垂直墜落時 c 點的速度 .....	33
圖 6.4 (d) 燃料棒水中垂直墜落時 d 點的速度 .....	33
圖 6.4 (e) 燃料棒水中垂直墜落時 e 點的速度 .....	34
圖 6.5 (a) 燃料棒水中垂直墜落時 a 點的應力變化 .....	35
圖 6.5 (b) 燃料棒水中垂直墜落時 b 點的應力變化 .....	35
圖 6.5 (c) 燃料棒水中垂直墜落時 c 點的應力變化 .....	36
圖 6.5 (d) 燃料棒水中垂直墜落時 d 點的應力變化 .....	36
圖 6.5 (e) 燃料棒水中垂直墜落時 e 點的應力變化 .....	37
圖 6.6 下端塞焊道周圍的觀察位置 .....	38
圖 6.7 (a) 燃料棒水中垂直墜落時下端塞焊道周圍護套 P.1 點的應力變化 .....	39
圖 6.7 (b) 燃料棒水中垂直墜落時下端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化 .....	39
圖 6.7 (c) 燃料棒水中垂直墜落時下端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化 .....	40
圖 6.8 上端塞焊道周圍的觀察位置 .....	41

圖 6.9 (a) 燃料棒水中垂直墜落時上端塞焊道周圍護套 P.1 點的應力變化	42
圖 6.9 (b) 燃料棒水中垂直墜落時上端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化.....	42
圖 6.9 (b) 燃料棒水中垂直墜落時上端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化.....	43
圖 6.10 燃料棒水中傾斜墜落時的衝擊力.....	44
圖 6.11 燃料棒水中傾斜墜落時的各處位移量.....	45
圖 6.12 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時 a 點的速度.....	46
圖 6.12 (b) 燃料棒水中傾斜墜落時 b 點的速度.....	46
圖 6.12 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時 c 點的速度.....	47
圖 6.12 (d) 燃料棒水中傾斜墜落時 d 點的速度.....	47
圖 6.12 (e) 燃料棒水中傾斜墜落時 e 點的速度.....	48
圖 6.13 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時 a 點的應力變化.....	49
圖 6.13 (b) 燃料棒水中傾斜墜落時 b 點的應力變化.....	49
圖 6.13 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時 c 點的應力變化.....	50
圖 6.13 (d) 燃料棒水中傾斜墜落時 d 點的應力變化.....	50
圖 6.13 (e) 燃料棒水中傾斜墜落時 e 點的應力變化.....	51
圖 6.14 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時下端塞焊道周圍護套 P.1 點的應力變化 .....	52
圖 6.14 (b) 燃料棒水中傾斜墜落時下端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化.....	52
圖 6.14 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時下端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化.....	53
圖 6.15 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時上端塞焊道周圍護套 P.1 點 的應力變化.....	54
圖 6.15 (b) 燃料棒水中傾斜時上端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化.....	54
圖 6.15 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時上端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化.....	55

## 一、目的

本文的目的在於計算用過沸水式燃料棒於中期貯存的燃料吊運工作中，因操作不慎或機件故障等原因造成燃料棒墜落於用過燃料貯存池的燃料行為。

燃料的墜落碰撞行為是一暫態且相當複雜的現象，本文中經由一些合理的保守性假設與有限元素的分析技巧，將燃料棒中的上、下端塞、燃料丸、護套及氣室彈簧元件連結成一完整的燃料棒分析計算模式，進而計算得到燃料墜落碰撞的過程中，燃料棒各部受力及行為變化，並嘗試藉由更加精簡而儘量不捨棄精確度的簡化方法，使計算模式獲得合理的簡化，以利日後建構完整的燃料束分析模式，藉以進一步瞭解日後中期貯存作業進行時，電廠中大量的燃料吊運工作中，不慎燃料墜落時所可能面對的問題。

## 二、背景

國際原子能總署(IAEA)於 1998 年舉辦的「Storage of Spent Fuel From Power Reactor」研討會中有一些共識，即未來幾十年，用過燃料貯存之最主要選擇方式為中期貯存，而貯存期間會較原預期為長，並且貯存設施必須具備貯放高燃耗用過燃料的能力。台灣電力公司(台電)金山及國聖電廠因長年運轉所產生的用過核燃料已造成電廠中的用過燃料池不敷使用的現象，為避免電廠因用過燃料填滿燃料池而影響電廠正常營運，將燃料池中之早期用過燃料取出並進行用過燃料乾式中期貯存已是台電公司當務之急的工作。

由燃料池取出的用過燃料將於池外進行用過燃料中期貯存作業，故在可預期的未來裏，金山及國聖電廠將有大量的用過燃料的吊運作業，為因應這些吊運作業對燃料所可能造成的衝擊，必須先行評估作業時可能的故及其對燃料的結構完整性的傷害程度，以確保燃料中期貯存後的再取出性。

民國八十三年，核能研究所曾對核燃料棒墜落碰撞建立一簡易的分析模式<sup>[1]</sup>以計算核燃料棒於空氣中垂直墜落並撞擊一剛性平面的情況，文中考慮一壓水式(PWR)燃料棒由三米高度自由落體碰撞剛性平面的一維分析，其模式中將燃料棒中的燃料丸視為單一質量，並考慮氣室彈簧的作用力。結果顯示，燃料丸於墜落的過程中，其對下端塞的瞬間衝擊力可能高達四萬牛頓，因瞬間的高衝擊力造成下端塞的大量塑性變形，但是護套本身所受的應力不大，使其仍保持彈性反應，也沒有挫曲(Buckling)變形的現象發生。因簡化模式無法分析局部挫曲的問題，但以垂直墜落的案例而言，護套上所受的力量主要來自自身的慣性與燃料丸的慣性關連性較小，故文中推斷應該不會有嚴重的局部挫曲，但燃料丸可能有破碎之虞。

九十二年，核能研究所對台電公司國聖廠一號機第十六燃料週期大修

期間的用過燃料滑落燃料池並撞擊燃料貯存架底板的案例進行分析計算<sup>[2]</sup>，所得結果與事件發生當時的現象相符。在燃料匣頂部Fastener對角處出現最大應力處與事發當時燃料匣頂部的破斷處相符，繫棒及燃料匣與各燃料元件間的相對運動亦與現場目視檢驗相符。計算結果中亦顯示，燃料護套的應力值都低於護套降伏應力，符合現場無燃料破損之檢測結果。雖然分析中所建構的是三維的分析模式，然而大體而言，該次的國聖廠一號機的燃料滑落事件乃發生於燃料貯存格架中，因狹窄的格架貯存孔位拘束燃料束的滑落行為，致使燃料滑落幾乎是一維的行為而不致於有太大的側向變形發生，所以燃料在水中約四公尺的高度滑落仍不足以出現挫曲的現象，在模式中針對這種預期而設定合理的拘束條件以簡化分析模式，並進而得到三維計算的目的。在簡化過程中將所有的燃料丸質量集中成一點質量，但該模式並不足以應用於燃料傾斜墜落或側向碰撞的案例分析，故對於燃料傾墜落及側向受力而造成燃料側彎的計算，勢必要將所有燃料丸質量按實分佈於整支護套當中，才足以反應燃料的動態行為。

無庸置疑地，以往的經驗對於這次的燃料棒墜落分析是有一定的幫助的。但是將一根燃料棒中數百顆燃料丸詳實描述於分析模式中，將造成龐大的運算負載與面臨難以預估的數值收斂性的問題。儘管如此，對於墜落的垂直負載中以 ABAQUS/Explicit 的暫態分析應可解決燃料碰撞的問題，而對於燃料棒側向受力的彎矩問題中以 ABAQUS/Standard 計算將面臨較大的挑戰。



### 三、分析方法與分析對象

#### 3.1 分析方法

用過燃料於水中墜落的行為分析包括墜落碰撞前的燃料速度及撞擊時的受力計算。燃料墜落時的速度計算將以傳統流體力學對於燃料下墜時的水流阻力作出保守性評估，並進而獲得燃料棒垂直及傾斜墜落的速度。其中在於垂直墜落時，將只考慮燃料棒橫斷面對於水流的阻力而忽略燃料棒軸向的水流黏滯力；傾斜墜落的情形將引用流體力學中流體流經圓柱斷面所引發的阻力的計算方法，以評估燃料棒墜落為過程中流體對於燃料棒的側向衝擊。流體對正在吊運行進中的燃料棒的側向衝擊將造成燃料棒與燃料池底面形成某一程度的傾斜夾角，故評估過程中均將側向衝擊與燃料速度所引發的燃料棒傾角一併考慮。

用過燃料墜落撞擊的受力計算工作。本文中引用目前工程中所廣泛使用的有限元素軟體 ABAQUS 6.3 來從事燃料碰撞的力學分析。利用 ABAQUS 建構燃料撞擊的分析模式，將燃料棒所有元件，包括上、下端塞、氣室彈簧，燃料丸及鋳合金護套逐一連結，而成為一完整燃料棒結構，並定義各元件間的接觸模式與邊界條件以儘可能地反應各元件在墜落撞擊前的相互關係，並經過一些合理的保守性假設而得到燃料墜落碰撞的分析結果。

#### 3.2 分析對象

在台電核能電廠中，因合一廠營運時間最長，並且早期的燃料池設計也不足以應付日積月累的電廠用過燃料的龐大需求，致使合一廠對於用過燃料中期貯存的迫切性大於其他國內電廠。

雖然目前的用過燃料乾式中期貯存都傾向於新舊燃料參雜存放，但在本文中依然以核一廠早期用過燃料為主要的考量。表 3.1 中所列為台電歷年

來所使用的燃料款式及數量<sup>[3]</sup>，當中奇異公司的燃料遠超過西門子公司的燃料；但以燃料型態區分，早期燃料棒以八乘八排列並附有兩支水榜的燃料為數最多，故分析工作以此種型態的燃料圍標的，其中奇異公司與西門子公司的產品各半，故無論是GE 8x8-2 或是SPC 8x8-2 的燃料皆可作為此次分析計算的對象。本文中最終選擇SPC 8x8-2 的燃料作為此次分析的對象。

表 3.1 核一廠各週期燃料供應商、燃料設計及新燃料數目<sup>[3]</sup>

週期	一 號 機			二 號 機		
	供應商	燃料型式	新燃料數目	供應商	燃料型式	新燃料數目
1	GE	GE6 8x8-1	408	GE	GE6 8x8-1	408
2	GE	GE6 8x8-2	144	GE	GE6 8x8-2	128
3	GE	GE6 8x8-2	112	GE	GE6 8x8-2	100
4	GE	GE6 8x8-2	64	GE	GE6 8x8-2	104
5	GE	GE6 8x8-2	112	GE	GE6 8x8-2	128
6	SPC	8x8-2	128	SPC	8x8-2	132
7	SPC	8x8-2	132	SPC	8x8-2	116
8	SPC	8x8-2	124	SPC	8x8-2	132
9	SPC	8x8-2	124	SPC	8x8-2	116
10	SPC	8x8-2	104	SPC	8x8-2	108
11	SPC	8x8-2	104	SPC	8x8-2	112
12	SPC	8x8-2	84	GE	GE9B	100
13	GE	GE9B	92	GE	GE9B	88
14	GE	GE9B	108	GE	GE9B	84
15	GE	GE9B	116	GE	GE9B	136
16	GE	GE9B GE12	120 4	GE	GE9B	116
17	GE	GE9B	140	GE	GE9B	144
18	GE	GE9B	132	GE	GE9B	132
19	GE	GE9B	148	FRA-ANP	ATRIUM-10	116
20	FRA-ANP	ATRIUM-10	116			
	合計			合計		
	<b>2616</b>			<b>2500</b>		

GE6 8x8-1：GE 公司之 8X8 無襯套型燃料，具一根水棒。

GE6 8x8-2：GE 公司之 8X8 無襯套型燃料，具二根水棒。

#### 四、假設

燃料墜落撞擊的過程中，材料的機械性質及元件間的耦合狀態常因不同的撞擊速度而異，若在分析模式中考慮這些高度非線性的現象常使得問題變得更為複雜，並且對瞭解撞擊現象無所助益。為了使分析工作得以進行而且確保所得結果具備參考性，一些合理的假設是解決碰撞問題中所常用的<sup>[4]</sup>。

- 4.1 一些與溫度有關的材料性質，如密度、柏森比，均以室溫 25°C 時的材料性質為基準。
- 4.2 與變形速度有關的材料性質，諸如材料的應力、應變等，在本報告中的鈳合金材料及二氧化鈾材料的變形行為都只遵循一相同的應力—應變曲線，該曲線為靜態負載的拉伸試驗所獲得。
- 4.3 分析模式中各元件材料的密度及柏森比在本報告中均視為常數，忽略衝擊過程中對於密度及柏森比的影響。
- 4.4 視燃料池底板為一剛體結構構物。假設衝擊過程中燃料池不吸收衝擊能量，衝擊能量只由燃料棒各元件吸收。
- 4.5 接觸元件的摩擦係數。考慮燃料墜落撞擊過程中的各元件間的摩擦行為符合庫倫摩擦的假設。分析模式中燃料丸與鈳合金間的摩擦係數設定為 0.2，端塞與護套間的鈳合金摩擦係數亦設為 0.2，燃料棒與剛性池底的摩擦係數則因其摩擦行為發生於水中，有異於燃料棒內部的乾摩擦行為，故採用較低的摩擦係數 0.05。
- 4.6 靜摩擦與動摩擦係數應隨著接觸元件的相對滑動速度而異，但本報告中將忽略此一現象，而視過程中的各元件間的靜摩擦及動摩擦係數為一定值。
- 4.7 燃料棒中各部位所填裝的燃料丸不同，靠近兩端的燃料丸為天然鈾的

二氧化鈾燃料丸，中段區域則是濃縮鈾的燃料丸，二者密度與體積有極小的差異。在本文中，考慮二者體積的差異性，但忽略了密度的微小差異；因為該密度的微小差異對整體燃料棒影響極微小，而體積的差異性對於燃料丸與護套的狹小間隙中的摩擦現象可能有若干影響。

## 五、分析軟體與分析模式建構

### 5.1 分析軟體

報告中採用ABAQUS 6.3<sup>[5]</sup>作為計算分析的工具。

ABAQUS為一基於有限元素方法的功能強大的工程模擬程式，其適用範圍涵概工程中簡易的線性問題至極富挑戰性的非線性問題。其除了能解決工程中常見的應力／位移的問題外，諸如熱傳、質量擴散、聲音、土壤力學及壓電分析(piezoelectric analysis)與電子零組件的熱流分析(coupled thermal-electrical analysis)也是ABAQUS所能解決的工程領域[6]。

ABAQUS 主要的分析模組包括 ABAQUS／Standard 及 ABAQUS／Explicit。其中 ABAQUS／Standard 為一通用的分析模組，廣泛地適用於線性及一般非線性的靜態、動態、熱傳與元件電響應(electrical response)等領域；ABAQUS／Explicit 則是一使用於動態有限元素的分析模組，此模組主要是用於暫態的動態事件的分析，諸如碰撞及爆破等問題；另外，於成型(forming)模擬中，也能透過改變元件的接觸條件而很有效率的解決高度非線性的問題。

程式中的前後處理(pre/post processing)功能則分屬於 ABAQUS／CAE 及 ABAQUS／Viewer，其中 ABAQUS／Viewer 為 ABAQUS／CAE 的一附屬項目。ABAQUS 程式的各個模組關係如圖 5.1，圖 5.1 中的 ABAQUS／Design，ABAQUS／Aqua...等模組是為因應使用者的等殊目的與需求而另行加入之模組。

工程中另一常用的分析軟體為ANSYS，其功能類似ABAQUS／Standard適合一般靜／動態的固體力學、熱傳等分析工作，但ANSYS尚不足以有解決碰撞及爆破等高度非線性的暫態問題，其彌補此方面能力

的方法是外加LS-DYNA程式，透過ANSYS介面與LS-DYNA連結，而形成 ANSYS / LS-DYNA，ANSYS / LS-DYNA 的功能與 ABAQUS / Explicit相同，都是針對解決高度非線性的暫態行為而撰寫的程式，二者廣為工程界所應用<sup>[4]</sup>。目前本組(核能研究所核子燃料及材料組)擁有 ABAQUS / Standard、ABAQUS / Explicit及ANSYS，已有足夠工具解決燃料墜落問題，另外亦迫於計畫經費有限，故不擬添購ANSYS / LS-DYNA程式進行燃料墜落的分析工作。

## 5.2 分析模式建構

本文的目的在於瞭解燃料於水中墜落時與燃料池底部撞擊後的燃料棒之行為。故在於燃料撞擊燃料池底部前的燃料墜落速度是解決碰撞行為前的首要工作。

### 5.2.1 燃料棒於水中墜落的速度評估

#### I 燃料棒垂直墜落

於參考文獻[2]中得知，燃料因於燃料池中的墜落行程短與表面積小等因素，造成燃料墜落時與流體的黏滯阻力很小而可以忽略。故燃料垂直墜落時，本文將只考慮燃料棒的橫斷面阻力對燃料棒墜落速度的影響。其結果如表 5.1 所示，燃料棒因浮力及流體阻力使燃料棒墜落的速度逐漸緩和下來。

#### II 燃料棒的傾斜墜落

燃料棒的傾斜墜落中，流場對於燃料墜落行的影響是比垂直墜落時複雜的。此時燃料棒因墜落時與流體間的相對速度造成流體對燃料棒的側向衝擊，本文針對這種現象引入參考文獻[7]與[8]中流體對圓柱結構橫向水流衝擊的影響。

考慮一相對於圓柱橫斷面直徑 $d$ 的流場速度為 $u_0$ ，示意圖 5.2 中所表示。因圖 5.2 中虛線內的控制體積(Control Volume)中的質量必須滿足質量不減定律，故可得

$$\int_{FR} \rho v_i n_i dS = 0 \quad (1)$$

其中 $v_i$ 為流體在邊界 $i$ 上的法線速度， $n_i$ 為控制體積於邊界 $i$ 上的法線向量。(1)式可改寫成

$$-\rho u_0 l + \dot{m} + \rho \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} u_w dy = 0 \quad (2)$$

其中 $l$ 為圓柱長度。

流場中的 $x$ 方向的動量(momentum)必須滿足

$$\int_{FR} [\rho n_i v_i u + n_x p - n_i \tau_{ix}] ds = 0 \quad (3)$$

(3)式中 $\tau_{ix}$ 為黏滯力，其中可將上游及下游邊界對 $\tau_{xx}$ 及兩側邊界的 $\tau_{xy}$ 視為零。則圓柱表面上的壓迫力及添滯力可以寫為

$$F_D \equiv \int_{cyl} [n_x p - n_i - n_i \tau_{ix}] ds \quad (4)$$

所以(3)式可改寫成

$$-\rho u_0^2 l + \dot{m} u_0 + \rho \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} u_w^2 dy + F_D = 0$$

將上式帶入(2)式中得到

$$F_D = \rho u_0^2 d \int_{-\frac{l}{2}}^{+\frac{l}{2}} \left[ \frac{u_w}{u_0} - \left( \frac{u_w}{u_0} \right)^2 \right] d \left( \frac{y}{d} \right) \quad (5)$$



此處，令圓柱長度  $l$  趨近於無窮大，並定義動量厚度(momentum thickness)成

$$\Theta = d \int_{-\infty}^{\infty} \left[ \frac{u_w}{u_0} - \left( \frac{u_w}{u_0} \right)^2 \right] d \left( \frac{y}{d} \right) \quad (6)$$

此動量厚度為一流體軌跡輪廓的積分，所以添滯力可寫成

$$F_D = \rho u_0^2 \Theta \quad (7)$$

將(7)式無因次化，(7)式除以流體衝擊圓柱橫斷面單位長度上的動能  $(\frac{1}{2} \rho u_0^2 \times 1 \times d)$ ，故(7)式可展開成一黏滯係數(drag coefficient)為

$$C_D = \frac{F_D}{\frac{1}{2} \rho u_0^2 d} = 2 \frac{\Theta}{d} \quad (8)$$

黏滯係數為雷諾數(Reynolds Number)的函數，其關係如圖 5.3。

將燃料行進中墜落燃料池的燃料棒視為一直徑 12.294 毫米及長度為 4150.97 毫米的剛性圓棒，重量為 41.68 牛頓，浮力為 4.77 牛頓，其示意圖表示於圖 5.4。

考慮圖 5.4 中燃料棒是由靜止狀態開始運動，故存在平衡關係式  $\sum M_A = \bar{I}\alpha + \sum \bar{m}ad$ ，故燃料棒水中運動過程的各個時間的傾斜角度與角加速度的關係<sup>[9]</sup>

$$(F_f - mg) \sin \theta + ma \cos \theta = \frac{2}{3} ml\alpha - F_D l$$

其中  $F_f$ ：燃料棒浮力

$m$ ：燃料棒質量

$g$ ：重力加速度

$a$ ：燃料棒行進的加速度

$\theta$ ：燃料棒傾斜角

$l$ ：燃料棒長度

$\alpha$ ：燃料棒角加速度

$F_D$ ：燃料棒側向阻力

以上燃料棒浮力、長度、質量及重力加速度及行進中加速度為已知的情況下；燃料棒的傾斜角度、角加速度及側向阻力則可經由微小時間增量(time increment)的逐步累進而獲得解決。當時間為零時，燃料棒呈靜止狀態，此時側向阻力及傾斜角均為零，當燃料棒吊掛處受一作用力而使燃料棒產生一角加速度 $\alpha$ ，經一時間增量 $\Delta t$ 後，燃料棒的位置變化至一新的 $\theta$ 的傾斜角位置；不斷地重複以上計算即可得知燃料棒水中墜落過程中每一時間的傾斜角度。由參考資料[10]及[11]中知核一廠到運燃料的最大速度為 0.1016 公尺/秒，若實際操中以等加速度狀態增加吊車行進速度，並於二秒內達到燃料最大吊運速度，之後燃料棒則以等速度行進。如此狀態下，燃料棒因故墜落燃料池底的速度及傾斜角變化如表 5.1 所示，當吊車達 0.1016 公尺/秒速度時，燃料棒的傾斜角約 0.8 度，當燃料棒以此傾斜角度墜落池底的過程中，其每一時間的水平與垂直速度如表 5.2 所列，當表 5.2 中燃料棒的垂直墜落距離達 5.086 公尺時，可由表中數據經由內差得知該時的燃料速度。

### 5.2.2 應力分析的建構

應力分析模式的建構工作主要是將各燃料棒元件的幾何形狀、材料性質及元件間的連結狀態與燃料墜落的各種條件描述成分析軟體

ABAQUS/Explicit 的輸入格式。如前所述。本文中的分析對象為 SPC 8 x8-2 的燃料棒，其幾何結構如附件所表示。對於此款燃料墜落的應力分析模式建構如圖 5.5

## I 元件定義

0. 燃料棒下端塞 (lower end cap)<sup>[12]</sup>— 為一階梯圓柱及圓錐的幾何形狀所組合而成的彈塑性元件。在墜落過程中是首先接觸地面的燃料棒元件。其材料為鋁合金。
1. 鋁合金護套(cladding)<sup>[13]</sup>— 長條形的空心圓柱的彈塑性體。在分析過程中，此元件為一殼元素(shell element)所構成，其長度為 4079.54 毫米，外徑及內徑各為 12.29 及 10.52 毫米。
2. 燃料棒上端塞 (upper end cap)<sup>[14]</sup>— 類似於下端塞的鋁合金彈塑性元件，以三維實體元素構成。
3. 燃料丸(pellet)<sup>[15] [16]</sup>— 沸水式燃料棒的燃料丸分佈情形並非整支燃料棒的燃料丸都是一成不變的。在靠近燃料棒兩側的燃料丸是天然鈾燃料丸，排列長度各約十五公分；其餘參與主要核反應的中間段的燃料丸為濃縮鈾燃料丸，其直徑較兩端的天然鈾燃料丸稍大，長度也有所不同，濃縮鈾燃料丸的直徑與長度各為 10.30 及 11.81 毫米，天然鈾燃料丸則為 10.27 與 13.97 毫米。濃縮鈾燃料丸的兩端均有碟形的凹面及微小的傾斜角設計，天然鈾燃料丸則無此設計。在分析模式中，將完全不考慮碟形的凹面及微小傾角幾何外形，但考慮不同位置燃料丸的直徑變化。分析模式中以三維元素建構各燃料丸
4. 氣室彈簧(plenum spring)<sup>[17]</sup>— 材質為英高鎳 (inconel) X-750。為一線徑 1.73 毫米圈構成外徑 10.16 毫米，長 332 毫米的壓縮彈簧。

氣室彈簧經壓縮後才置入鋁合金護套中，其工作長度為 254.5 毫米，彈簧力為 125.4 牛頓。分析模式中的三維元素已按結構物受單軸向拉伸或壓縮的特性建構彈簧的幾何結構及預應力狀態。

## II 元件連結

整個燃料棒中的各個元件間，只有上下端塞及鋁合金護套因焊接連結在一起而形成連續體，其餘各個燃料丸及氣室彈簧則各別獨立，只依元件間的接觸及摩擦條件維持與其他元件的關係，所以整個分析模式為一離散系統型態，元件間會因燃料碰擁過程而改變其相對關係。

元件的摩擦行為均假設符合庫倫摩擦的假設。而不同的元件間也存在不同的摩擦係數，燃料丸與鋁合金護套及下端塞間的摩擦為 0.2，護套與上、下端塞間的摩擦示為 0.2，燃料棒外部與地面的摩擦行為在於水中發生稱異於燃料棒內部的乾摩擦行為，故假設其摩擦係數為 0.05。所有燃料棒元件連結成一分析模式中，其接觸耦合 (contact pairs) 有下列幾種

燃料棒上端塞－鋁合金套護

燃料棒上端塞－氣室彈簧

氣室彈簧－鋁合金套護

燃料丸－鋁合金套護

燃料丸－燃料棒下端塞

燃料棒上端塞－燃料池地面

燃料棒下端塞－燃料池地面

鋁合金套護－燃料池地面

## IV 材料定義

鋁合金元件－燃料護套端塞<sup>[18]</sup>

楊氏係數 E : 1.2134E+05 MPa

柏森比  $\nu$  : 0.29

密度  $\rho$  : 6.49 g/cm<sup>3</sup>

降伏強度  $\sigma_y$  : 500 Mpa

塑性強度

塑性應力 $\sigma$ (MPa)	塑性應變 $\varepsilon$
597.1	0.00924366
684.9	0.02302606
714.2	0.03553569
725.2	0.04801174
729.5	0.06053204
730.9	0.07305187
730.9	0.08563298

二氧化鈾元件－燃料丸<sup>[19]</sup>

楊氏係數 E : 6.054E+06 Mpa

柏森比  $\nu$  : 0.316

密度  $\rho$  : 10.625 g/cm<sup>3</sup>

降伏強度  $\sigma_y$  : 1015 Mpa

剛性元件－燃料池地面

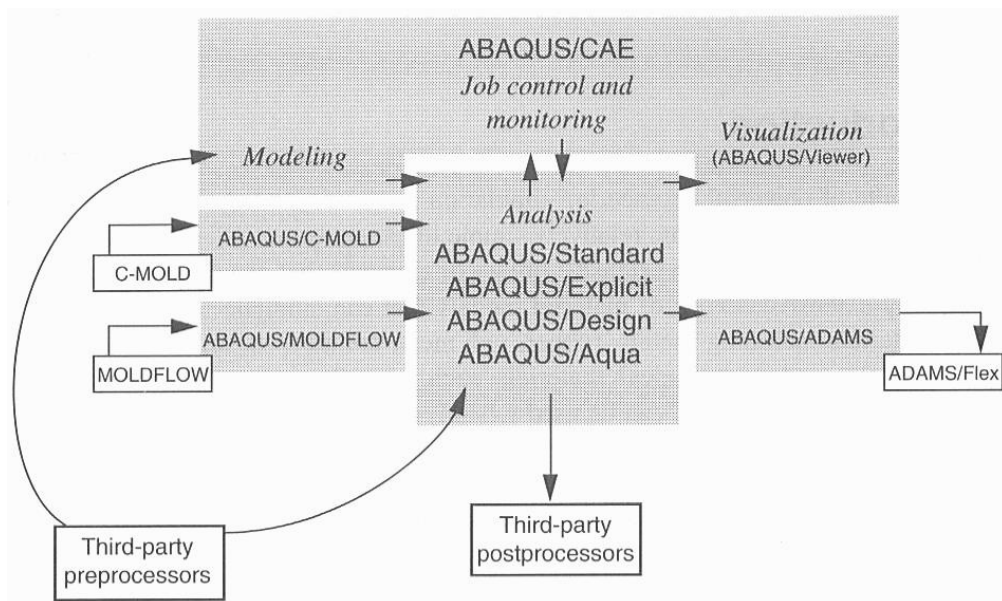


圖 5.1 ABAQUS 程式組織及其相關程式模組

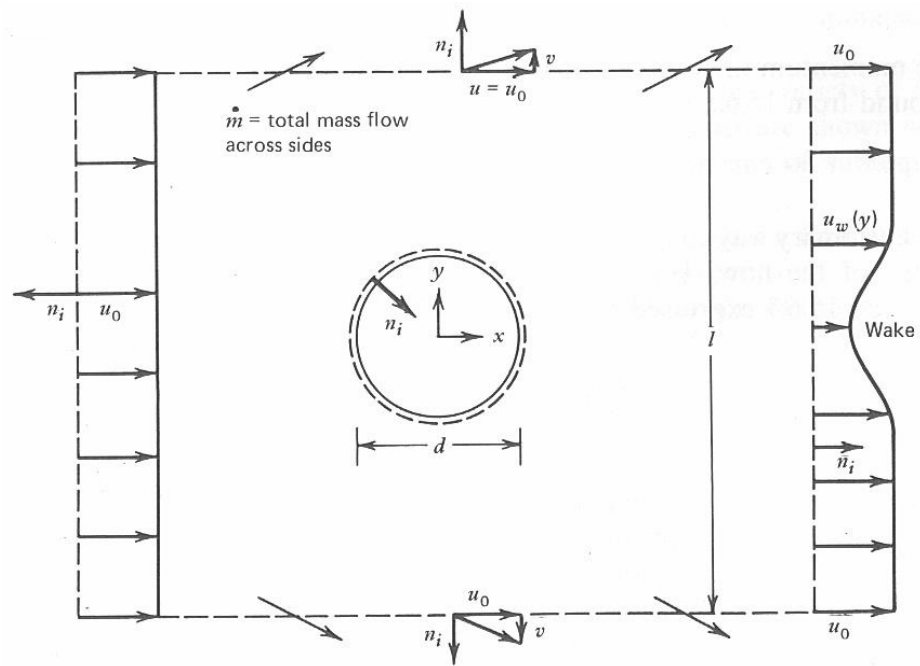


圖 5.2 圓柱二維流場的黏滯力分析

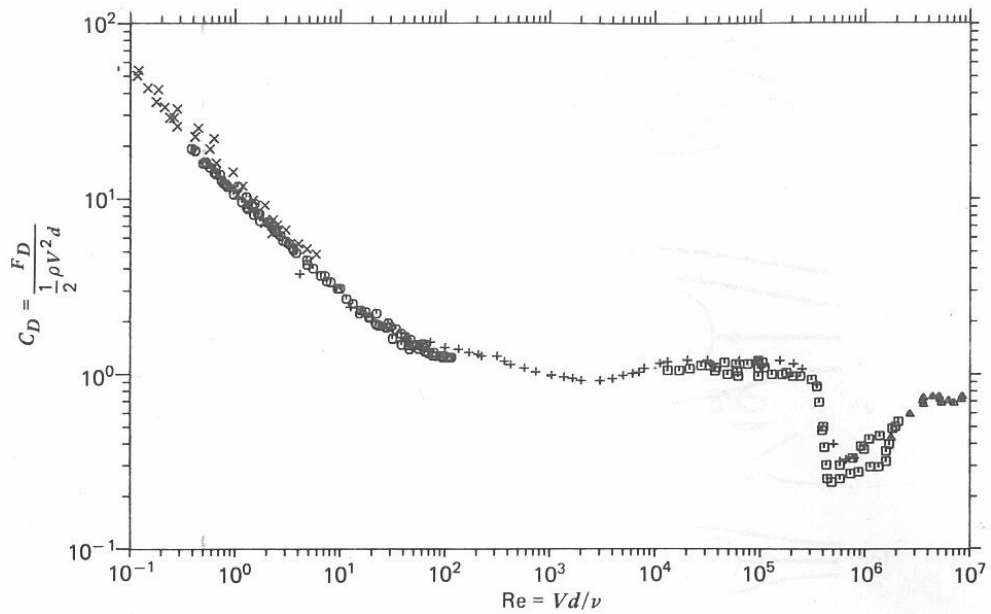


圖 5.3 圓柱體的黏滯係數曲線

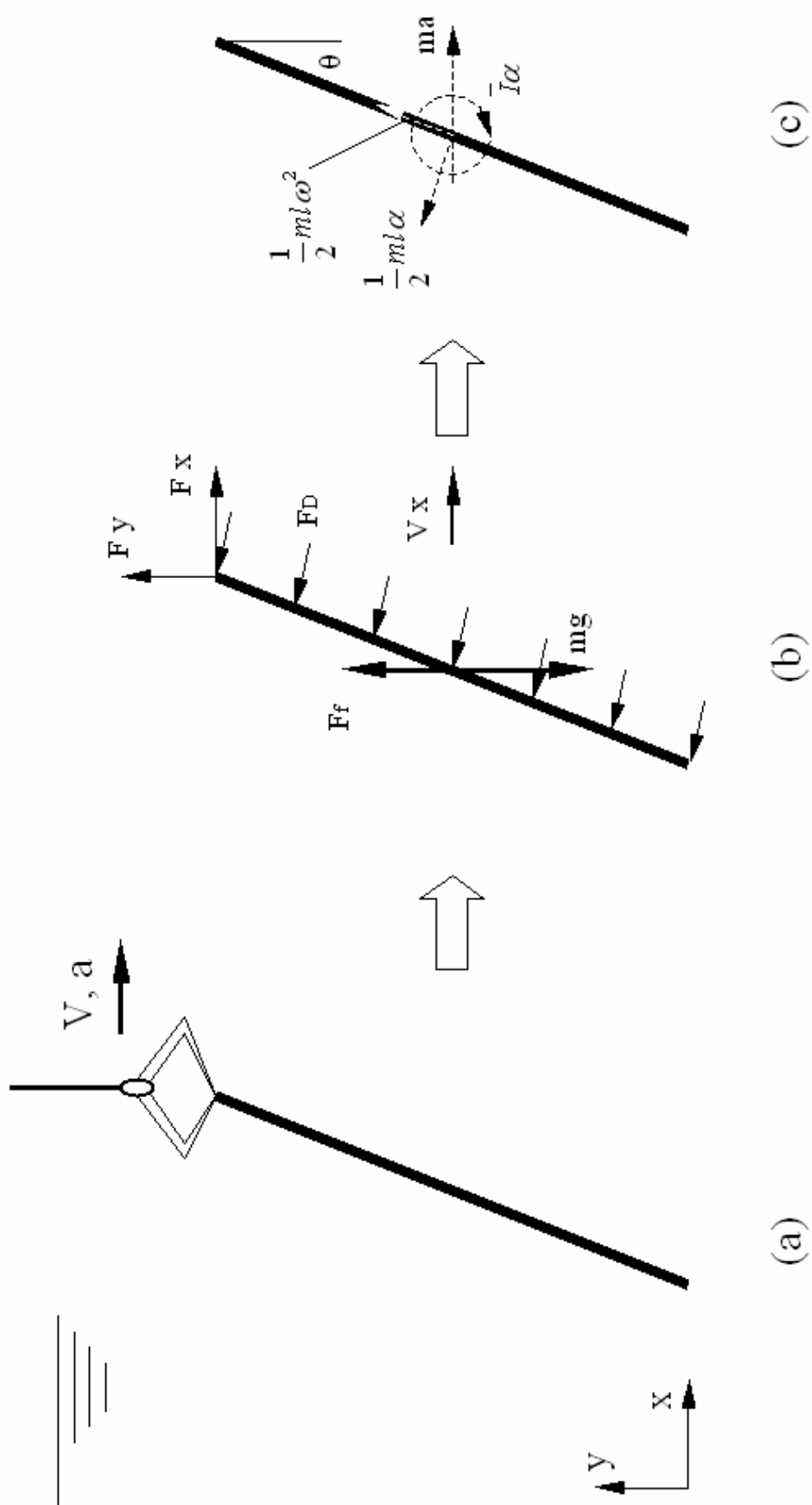


圖 5.4 燃料棒於水中行進之阻力計算簡易評估



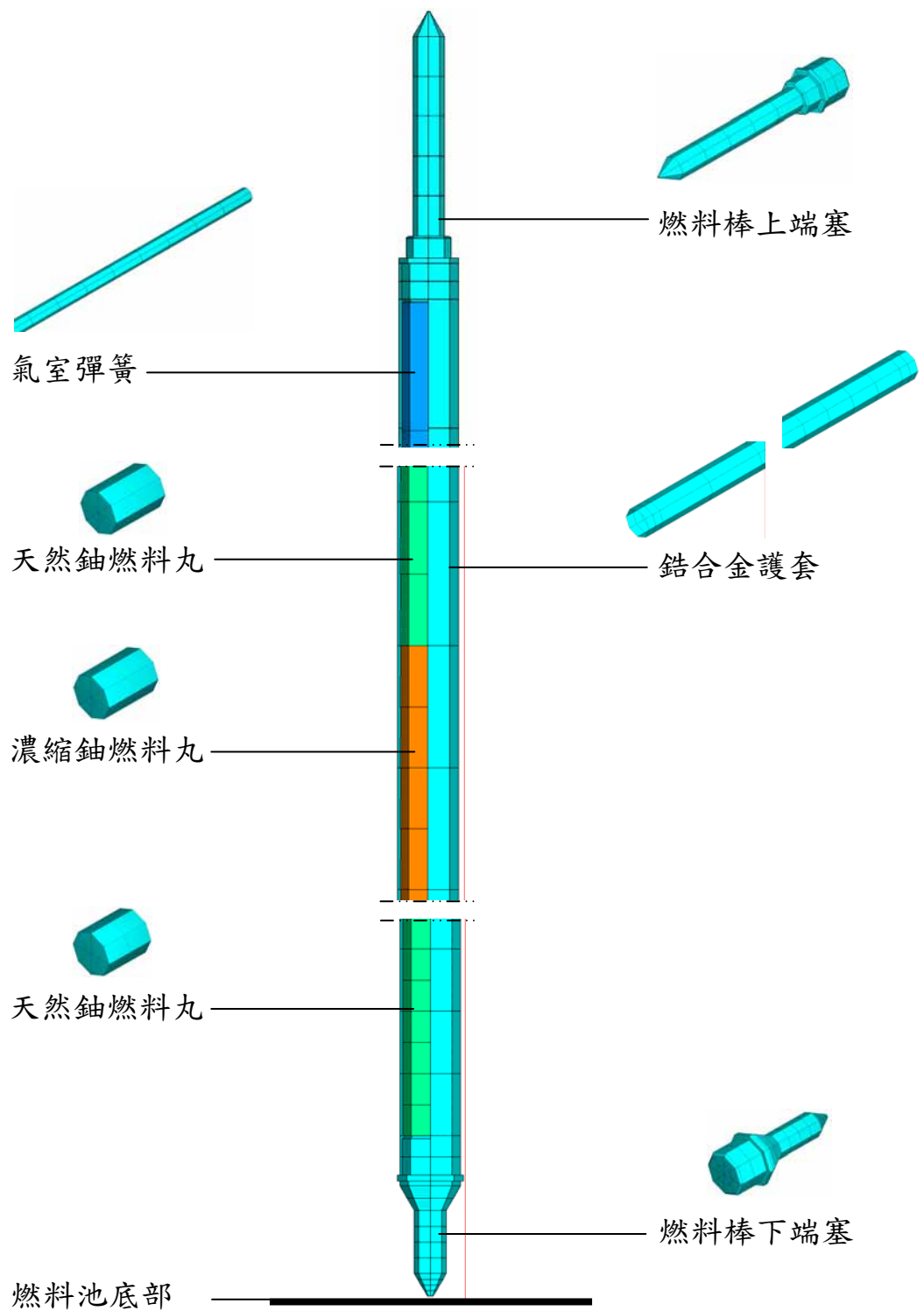


圖 5.5 燃料棒墜落有限元素分析模式

表 5.1 吊運中的燃料棒傾斜角計算結果

時間 (秒)	燃料棒中心速度(公尺/秒)		燃料棒傾斜角 (度)	吊車速度 (公尺/秒)
	水平方向	垂直方向		
0.1	0.00129	0.00000	0.00535	0.00508
0.2	0.00270	0.00000	0.02103	0.01016
0.3	0.00433	0.00001	0.04655	0.01524
0.4	0.00630	0.00002	0.08113	0.02032
0.5	0.00869	0.00004	0.12372	0.02540
0.6	0.01159	0.00006	0.17305	0.03048
0.7	0.01503	0.00008	0.22764	0.03556
0.8	0.01906	0.00011	0.28593	0.04064
0.9	0.02370	0.00013	0.34626	0.04572
1.0	0.02892	0.00016	0.40700	0.05080
1.1	0.03470	0.00017	0.46655	0.05588
1.2	0.04098	0.00018	0.52344	0.06096
1.3	0.04766	0.00018	0.57643	0.06604
1.4	0.05464	0.00018	0.62455	0.07112
1.5	0.06179	0.00017	0.66716	0.07620
1.6	0.06901	0.00015	0.70392	0.08128
1.7	0.07619	0.00013	0.73482	0.08636
1.8	0.08320	0.00011	0.76013	0.09144
1.9	0.08998	0.00009	0.78041	0.09652
2.0	0.09643	0.00007	0.79646	0.10160

表 5.2 燃料棒垂直與傾斜墜落速度計算結果

時間 (秒)	垂直墜落		傾斜墜落(0.79646 )			
	垂直速度 (公尺/秒)	垂直位移 (公尺)	水平速度 (公尺/秒)	水平位移 (公尺)	垂直速度 (公尺/秒)	垂直位移 (公尺)
0.05	-0.43413	-0.01129	0.09369	0.00475	-0.43310	-0.01127
0.10	-0.86773	-0.04427	0.09095	0.00936	-0.86360	-0.04413
0.15	-1.30027	-0.09890	0.08821	0.01384	-1.29097	-0.09844
0.20	-1.73122	-0.17514	0.08547	0.01818	-1.71473	-0.17403
0.25	-2.16006	-0.27286	0.08273	0.02238	-2.13441	-0.27070
0.30	-2.58628	-0.39195	0.07999	0.02645	-2.54954	-0.38824
0.35	-3.00938	-0.53228	0.07725	0.03038	-2.95970	-0.52641
0.40	-3.42889	-0.69367	0.07451	0.03417	-3.36447	-0.68495
0.45	-3.84434	-0.87594	0.07177	0.03782	-3.76345	-0.86358
0.50	-4.25528	-1.07886	0.06903	0.04134	-4.15630	-1.06200
0.55	-4.66128	-1.30220	0.06629	0.04472	-4.54267	-1.27990
0.60	-5.06195	-1.54571	0.06355	0.04796	-4.92225	-1.51694
0.65	-5.45691	-1.80910	0.06081	0.05107	-5.29476	-1.77278
0.70	-5.84579	-2.09208	0.05807	0.05404	-5.65994	-2.04706
0.75	-6.22827	-2.39434	0.05533	0.05687	-6.01757	-2.33940
0.80	-6.60404	-2.71555	0.05259	0.05957	-6.36745	-2.64942
0.85	-6.97284	-3.05537	0.04985	0.06212	-6.70939	-2.97674
0.90	-7.33440	-3.41345	0.04711	0.06454	-7.04327	-3.32094
0.95	-7.68851	-3.78941	0.04437	0.06683	-7.36896	-3.68162
1.00	-8.03497	-4.18287	0.04163	0.06898	-7.68636	-4.05837
1.05	-8.37361	-4.59346	0.03889	0.07099	-7.99542	-4.45078
1.10	-8.70429	-5.02077	0.03615	0.07286	-8.29607	-4.85842
1.15	-9.02690	-5.46441	0.03341	0.07460	-8.58831	-5.28088
1.20	-9.34134	-5.92396	0.03067	0.07619	-8.87213	-5.71773
1.25	-9.64755	-6.39902	0.02793	0.07766	-9.14755	-6.16856

## 六、結果與討論

燃料的墜落碰撞計算共有垂直墜落及傾斜墜落兩種計算結果。以下將以碰撞後的位移、速度及應力的變化，分別討論，並於上、下端塞及護套焊接點的局部應力亦有探討。

由於燃料棒屬於細長形結構物，極不易於同一圖表中描述其行為，故以圖 6.1 中將燃料棒中的幾個較具代表性的地方提出說明。圖 6.1 中 a 點為燃料下端塞的底部，即與地面碰撞的第一著點，b 點為燃料棒底部段的天然鈾與濃縮鈾交界處，c 點則為整支燃料棒的中點，d 點為燃料頂部天然鈾與氣室彈簧的交界處，e 點則是上端塞的頂部。觀察這些位置的移動狀態即可知道燃料棒於墜落後是否會發生挫曲現象。

### 6.1 垂直墜落碰撞

#### 6.1.1 燃料棒撞擊力

撞擊力是指燃料棒墜落燃料池地面時，對地面的衝擊力。圖 6.2 是燃料棒垂直墜落時燃料池地面所受的衝擊。圖中時間起始點為碰撞的時間起點，當燃料棒與池底接觸後，碰撞力迅速提升至 1.525 毫秒時達到峰值 28029 牛頓後，衝擊力隨即下滑；至 2.76 毫秒時衝擊力消失。該衝擊力曲線是經由許多保守性假設後計算而得，其中包括保守評估燃料滑落速度，及剛性燃料池底面的假設條件，故所得常較實際墜落的撞擊力大。

撞擊力的大小隨著撞擊條件而異，對剛性強大越大的物體撞擊則越容易產生高撞擊力，因撞擊時的反應時間明顯地縮短了。儘管撞擊力是隨撞擊條件而異，燃料墜落時具有一定的能量，當墜落撞擊某物時必定將能量釋放，圖 6.2 中曲線底下與時間軸所涵蓋的面積即是燃料棒的動量(momentum)。圖中碰擊後衝擊力迅速提升，主要是因為燃料

丸下墜而不斷向燃料下端塞累積、衝撞；衝擊力的消退則是因衝擊後燃料棒的回彈所造成，當燃料棒回彈而逐漸遠離地面，其衝擊力就越來越小，至 2.76 毫秒時，燃料棒完全離開地面，圖中顯示至 15 毫秒時，燃料棒尚未因重力場的作用而回落至地面。

通常碰撞行為的分析都是針對碰撞後的幾個毫秒內的碰撞行為逕行繼算，因為第一次的撞擊具有最大的能量釋放，決定物體損壞與否，之後的計算都只是為了得知某條件下的碰撞後，物體碰撞後的最終位置罷了。故本文中著重於第一次撞擊時的燃料行為的觀察。

### 6.1.2 燃料棒位移變化

圖 6.3 表示燃料垂直墜落時，相對於圖 6.1 中 a, b, c, d, e 各點的位移變化。圖中 a 為燃料下端塞底部材料的位移情形。當碰撞後下端塞底部材料受到整支燃料下墜的動能擠壓而緊貼於燃料池底面，故此時的下端塞底部材料不會出現垂直性位移，直到 2.76 毫秒後，因燃料棒回彈，才使該部位材料脫離燃料池底面。

當下端塞底部材料尚未脫離燃料池底部前，在 1.8 毫秒時，燃料棒上端塞的下墜位移量最大，達到 12.47 毫米，但是此時的護套管底部段的位移量也達 7.5 毫米，亦即護套管底部段以上的燃料護套只產生 5 毫米左右的變位量，至於護套管底部段以下材料產生 7.5 毫米的位移，其主因是撞擊後下端塞嚴重塑性變形的緣故。圖中 d 點與 e 點的位移曲線幾近重疊，表示兩點之間比較沒有相對運動的行為。

當下端塞於 2.76 毫秒脫離燃料池底部後，圖中各線段呈現位移來回振盪的現象，這是因為燃料棒為一彈塑性結構，其受力後各部材料運動狀態不同，並產生彈性波動的现象。此時的燃料棒上、下端塞間的距離幾乎維持於一定值，故下端塞於 2.76 毫秒脫離燃料池底部後，

燃料棒不可能產生挫曲的現象。

2.76 毫秒內下端塞尚未脫離燃料池底部前，燃料也不會發生挫曲，因扣除下端塞及護套底部端的位移後，只剩餘 5 毫米的變形量，顯示碰撞過程中，燃料棒不曾發生兩端突然快速接近的挫曲變形行為<sup>[21]</sup>。

### 6.1.3 燃料棒速度變化

圖 6.4 a ~ 6.4 e 中表示燃料棒各處的撞擊速度變化。A 圖中，下端塞的速度在零秒時，瞬間由往下的 8.750 公尺／秒的速度變化至零，其餘各點於視其距離碰撞位置的距離遠近而有不同的變化，大體而言，下端塞的材料在下端離開燃料池底部時才開始振盪，離下端塞較遠的材料，其速度的振盪較早，燃料棒中間段的振盪頻率較高；這種現象是因為相對於燃料棒兩端的自由端而言，中間段受到比較大的拘束，造成較高的振盪頻率。在圖中 15 毫秒的範圍中，不論是燃料棒中的那一個位置，其速度的振盪是一波比一波高，顯示在 15 毫秒內，燃料棒的碰撞回彈現象尚未停止，亦即燃料棒仍在上昇中，尚未開始回落地面。

### 6.1.4 燃料棒應力變化

圖 6.5 a ~ 6.5 e 中表示燃料棒垂直墜落時等效應力 von Mises 的應力變化情形。受照射後的鋳合金的降伏強度為 500 MPa，A 圖中的起始段顯示下端塞底部材料在碰撞初期就迅速超過材料的降伏應力值而進入塑性變形階段，達到 730 MPa 後即維持該應力狀態，一段時間後才其應力狀態才獲得紓解，並且於下端塞在 2.76 毫秒脫離燃料池底部後又緩步上昇的趨勢。圖中應力值超過 730 MPa 時，應力值即不再增加，此乃因為參考文獻[18]中的鋳合金的機械強度在拉伸試驗中 730 MPa 後即開始下降，直到材料破斷，而有限元素軟體在材料應力應變曲線

為負斜率時即無法支援，故對於材料的機械強度只能描述至其材料破段前的最大應力值，故分析模式中當材料變形超過材料極限強度時，其應力值都以極限強度計算的緣故。

圖 6.5 e 中所表示的是燃料上端塞頂部的應力狀態，因該位置為一自由端，故呈現不受力的狀態。值得注意的當燃料離開燃料池底部，燃料棒頂部及底部區段的鋳合金受力的峰值高於燃料棒中間段的材料，亦即圖 6.5 b 圖 6.5 d 中超過 2.76 毫秒時的峰值超過圖 6.5 c 中的峰值，而且有趣的是該應力峰值發生在燃料鋳合金護套運動速度的劇烈變化時段，對照圖 6.4 可知圖中速度曲線快速由正速度值變化至負速度值時即是應力曲線的登上應力峰值的時段，這表示燃料在碰撞回彈時，燃料因回彈過程中的短暫速度變化使護套受到暫態的拉伸。

對於上、下端塞與鋳合護套的焊接區附近材料的應力值變化的討論。考慮圖 6.6 中靠近下端塞的焊道處週邊的護套及下端塞的應力值，其結果如圖 6.7 a 至 6.7 c。由圖中可知護套所受的應力值不及下端塞，而下端塞於焊道內側的應力值高於外側，這是因為在墜落撞擊過程中下端塞內側承受剪力的關係。整個碰撞過程中下端塞的焊道附近的應力值都未超過鋳合金的降伏應力值，故焊道周圍仍維持彈性變形，並不損及燃料棒結構的完整性。圖 6.8 d 為碰撞 15 毫秒後的燃料下端塞的硬力分佈與變形量，其左下角小圖為下端塞變形前的形狀。

上端塞焊道附近材料的評估位置的選擇如圖 6.8 所示。圖中各位置的應力變化如圖 6.9 所列；結果顯示，無論上端塞或其接鄰的鋳合金護套的應力值都未超過降伏應力值，而且其值也比下端塞的焊道附近材料的應力值低。

## 6.2 傾斜墜落碰撞

### 6.2.1 撞擊力

圖 6.9 表示出燃料棒傾斜 0.8 度的斜角墜落池底的撞擊力變化情形。圖中因燃料棒與燃料池底面的摩擦力的非線性問題造成少數數據呈現大幅跳動的現象，這種不正常跳動的數據可視為數值分析中的雜訊，真正有意義的是比較平滑而具連續性的包絡線區域，那才是真正的燃料棒衝擊力。排除圖中不正常的跳動數據，燃料棒的最大衝擊力應該發生在 0.5 毫秒時的 20400 年頓。在撞擊發生後的 3 毫秒後衝擊力完全消失。

### 6.2.2 燃料棒位移變化

圖 6.10 中的位移變化圖中，值得注意的是圖中顯示下端塞的位移曲線在於 1.25 毫秒左右就已經脫離燃料池底面，其實那只是下端塞底面的中心點因燃料棒墜落時的側向速度與摩擦造成下端塞底部的扭轉，而將下端塞底面傾斜，使底部中心點離開燃料池底面，事實上下端塞側邊仍與池底面保持接觸。圖中曲線的振盪幅度比垂直墜落時小，其餘與垂直墜落時相近，過程中也不曾出現扭曲現象。

### 6.2.3 燃料棒速度變化

在 3 毫秒燃料離開燃料池底部前，燃料下端塞的速度因下端塞受摩擦力扭轉而出現速度曲線激烈振盪。當燃料離開池底面後則呈現穩定的週期性振盪行為，計算結果如圖 6.11。

### 6.2.4 燃料棒應力變化

在圖 6.12 a 中顯示燃料棒傾斜墜落時下端塞所受的應力是比垂直下墜時來得嚴峻的。在 15 毫秒的計算分析中有很長的時間是處於高於 730 MPa 以上的應力狀態。但是在下端塞以外的區域，圖 6.12 b 至 6.12 e 中的各個銲合金護套位置與上端塞的應力值都小於燃料垂直墜落的



案例。表示燃料傾斜墜落時，衝擊的能量有很多是由下端塞藉著塑性變形而消解，使得其餘元件的受力比垂直墜落時小。

燃料傾斜墜落時，造成燃料元件受到彎矩的影響，這一點是與垂直墜落有比較大的差異的地方。燃料墜落衝擊時，各元件承受壓應力，但因為彎矩作用的關係，使得彎矩產生的額外壓應力對原先的壓應力值有加成的效果；相對的，其所造成的張應則可減緩原先衝擊時的壓應力。其靠近上、下端塞焊道區域的應力值，取具加成應力效果的結果表示於圖 6.13 及 6.14 中，其中的應力值都遠小於鋁合金的降伏應力。

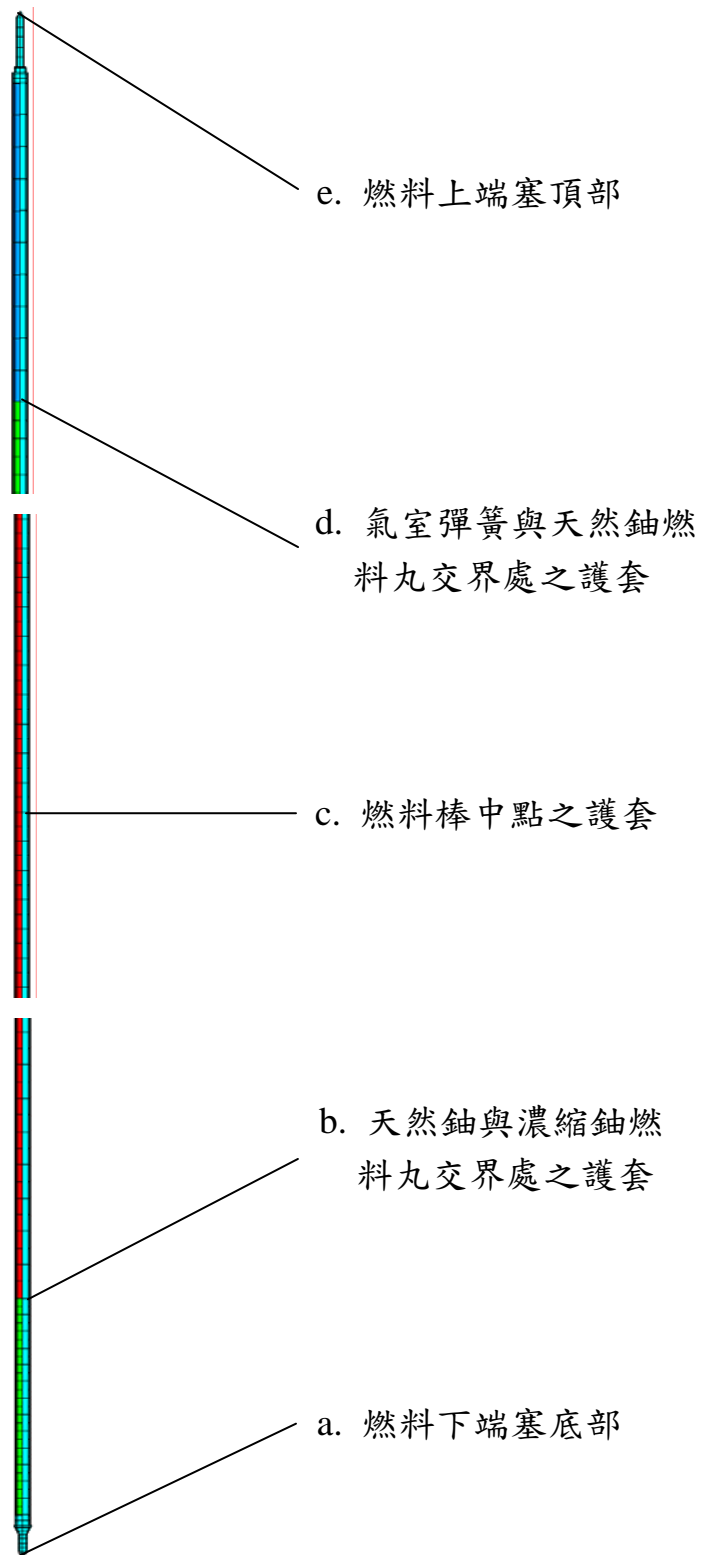


圖 6.1 燃料棒墜落分析中的燃料行為觀察點

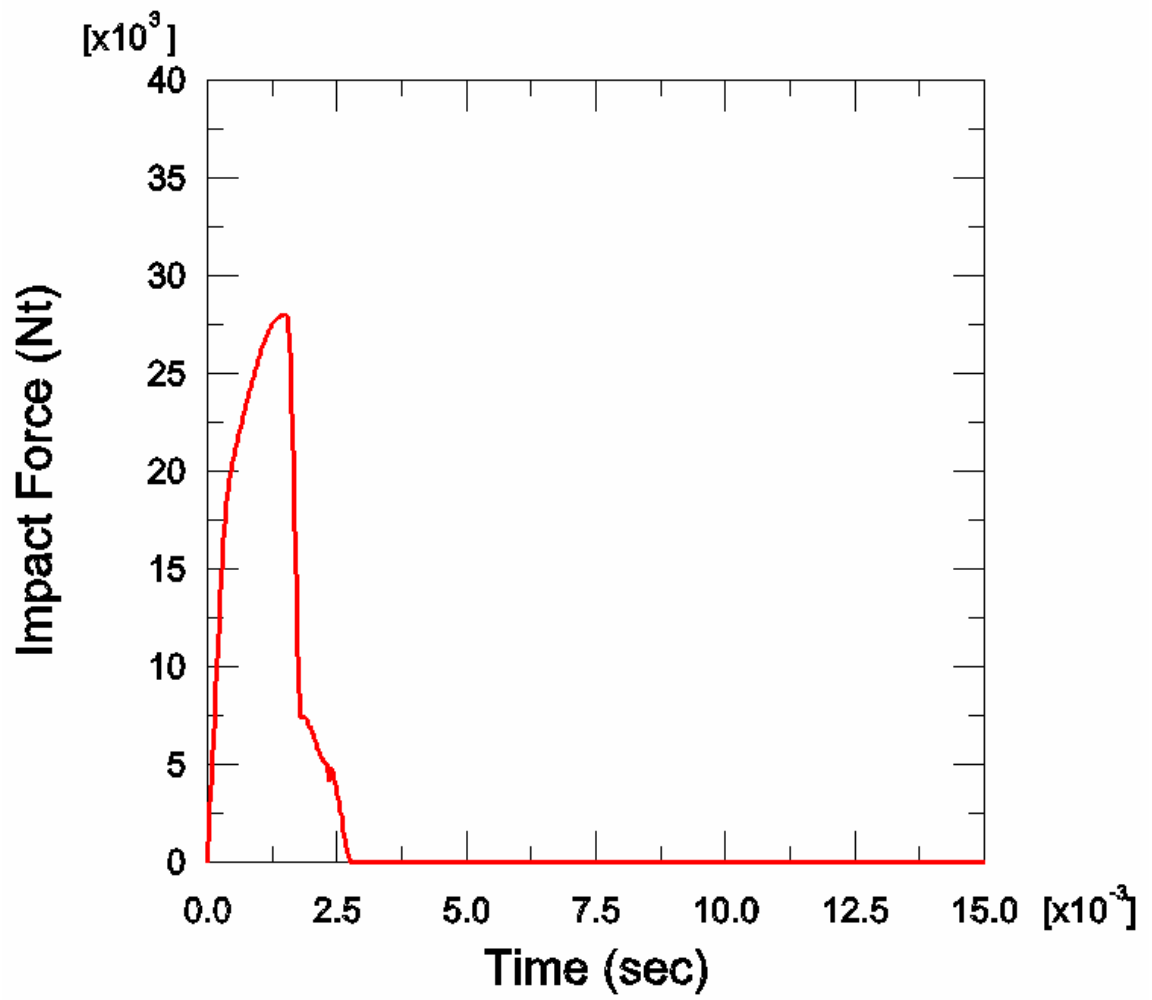


圖 6.2 燃料棒水中垂直墜落時的衝擊力

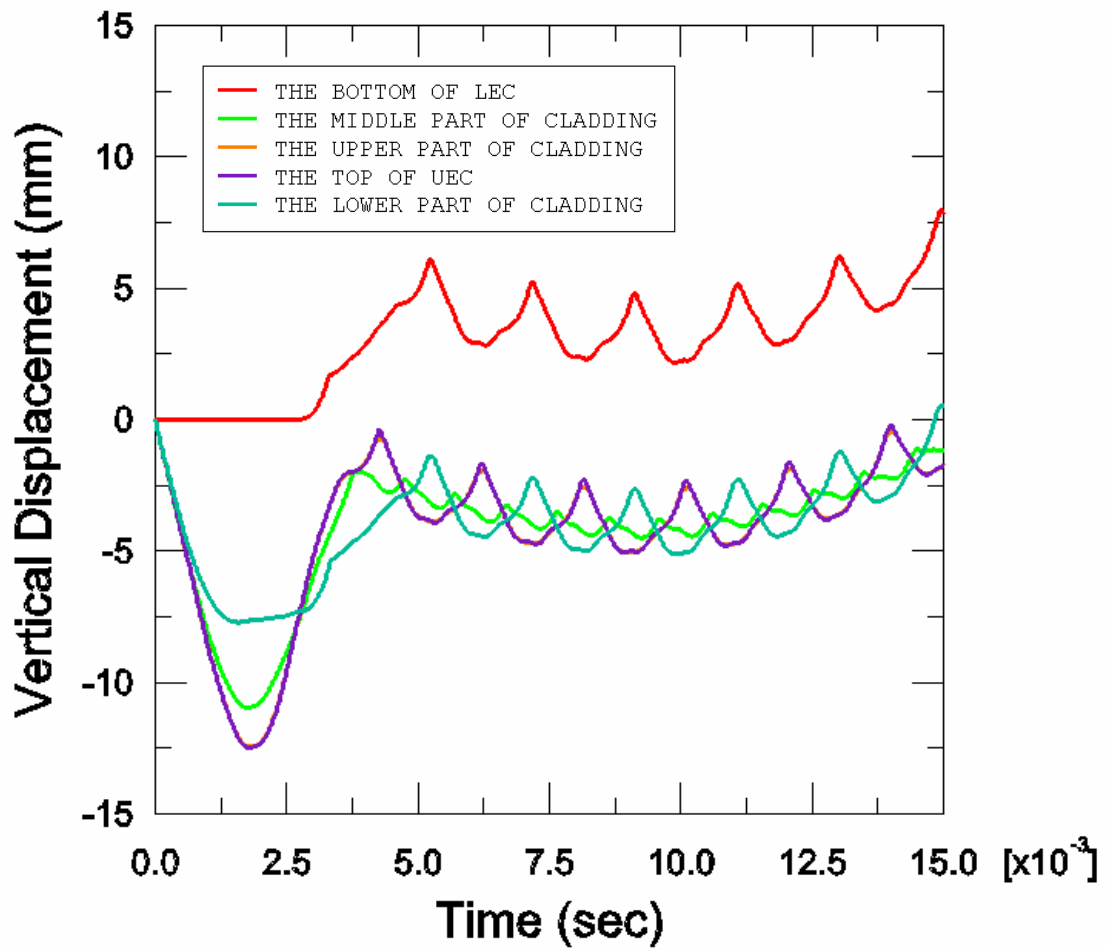


圖 6.3 燃料棒水中垂直墜落時的各處位移量

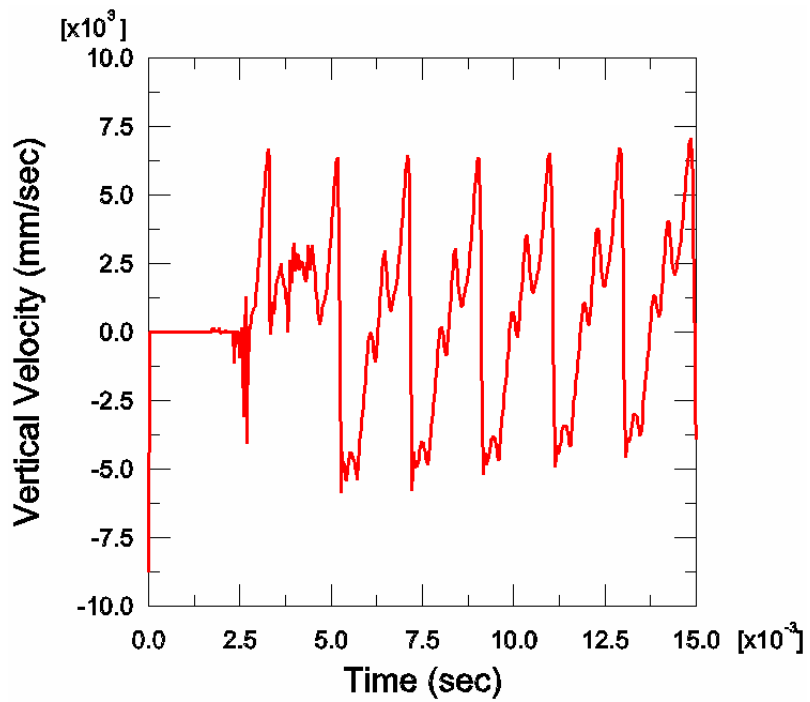


圖 6.4 (a) 燃料棒水中垂直墜落時 a 點的速度

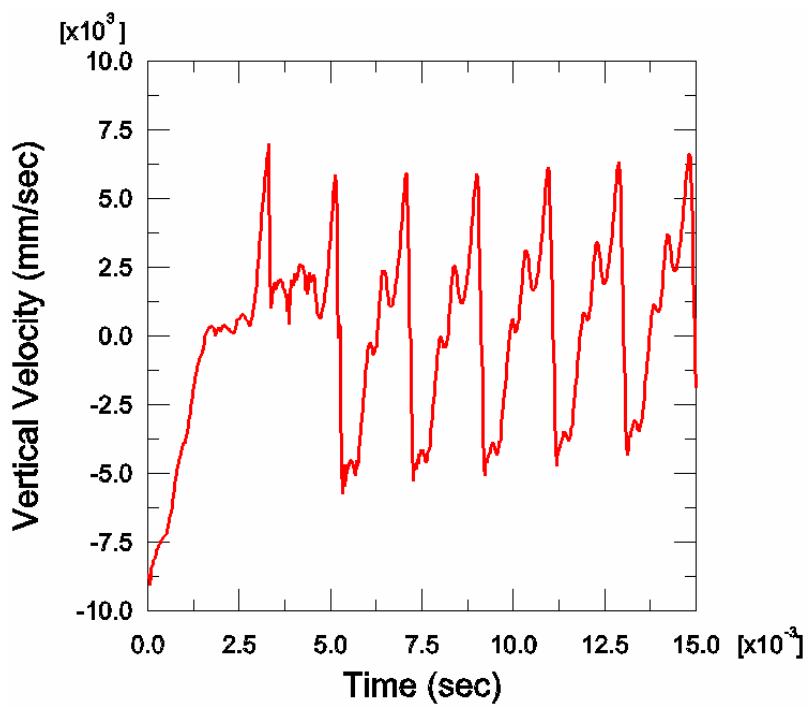


圖 6.4 (b) 燃料棒水中垂直墜落時 b 點的速度

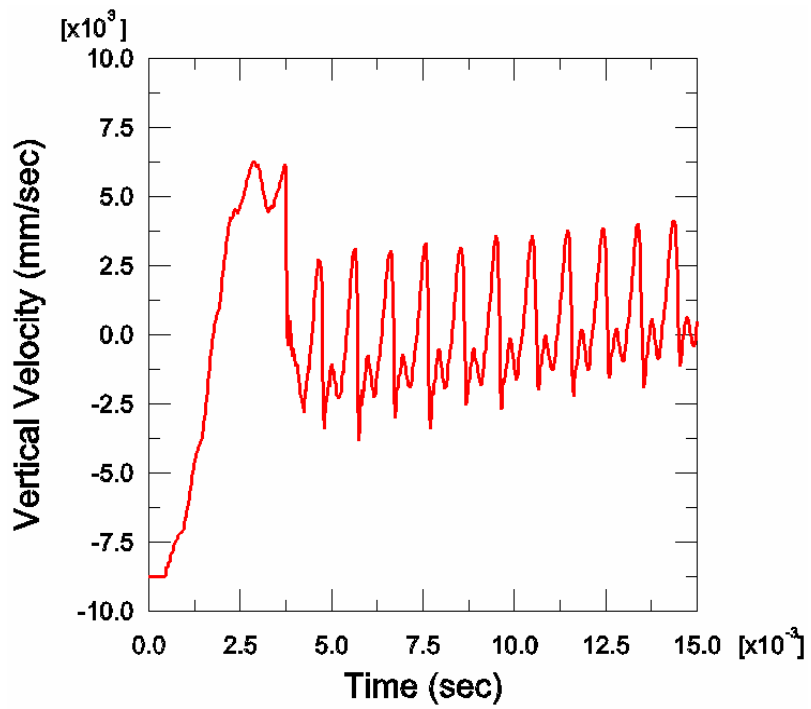


圖 6.4 (c) 燃料棒水中垂直墜落時 c 點的速度

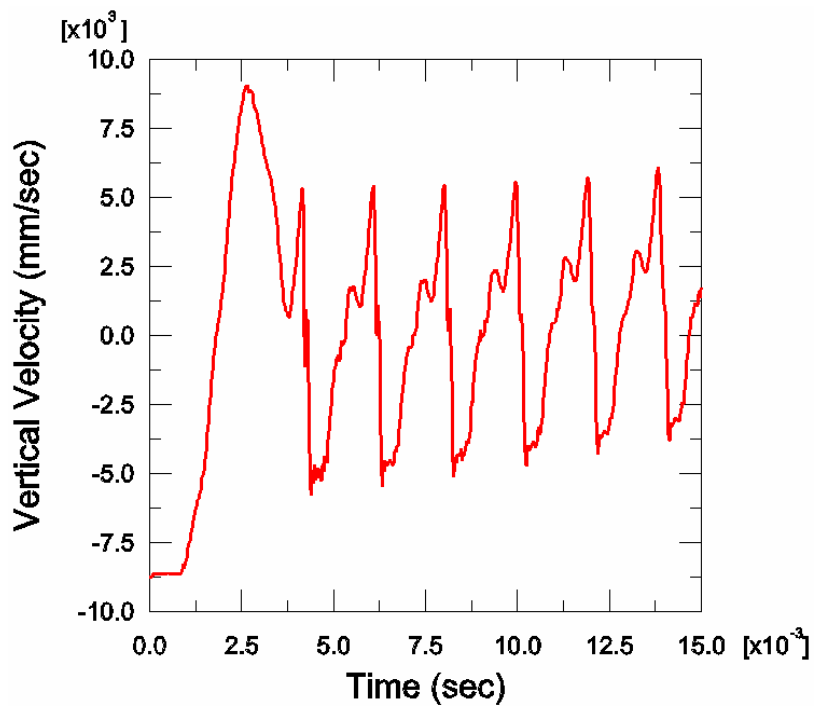


圖 6.4 (d) 燃料棒水中垂直墜落時 d 點的速度

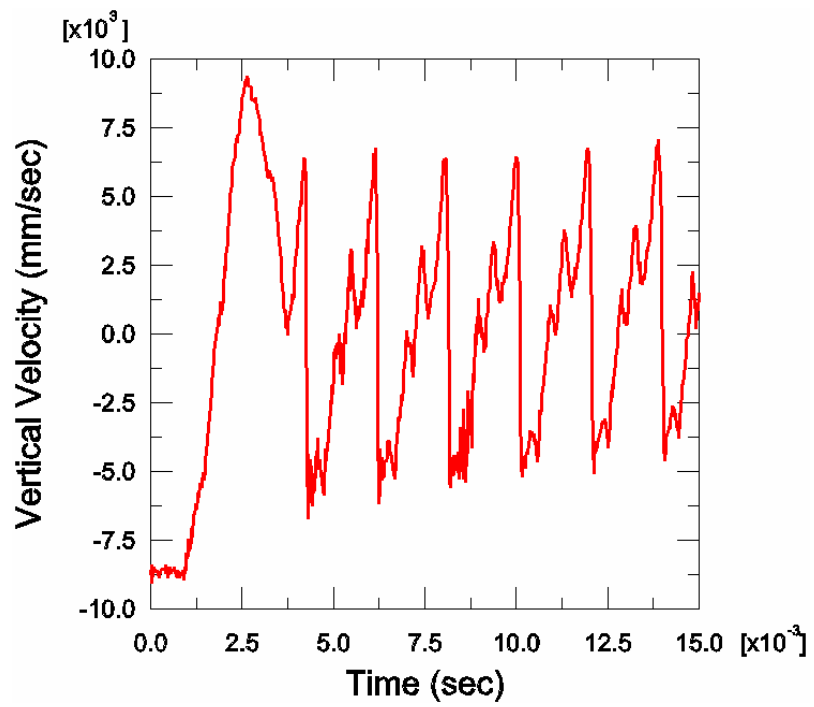


圖 6.4 (e) 燃料棒水中垂直墜落時 e 點的速度

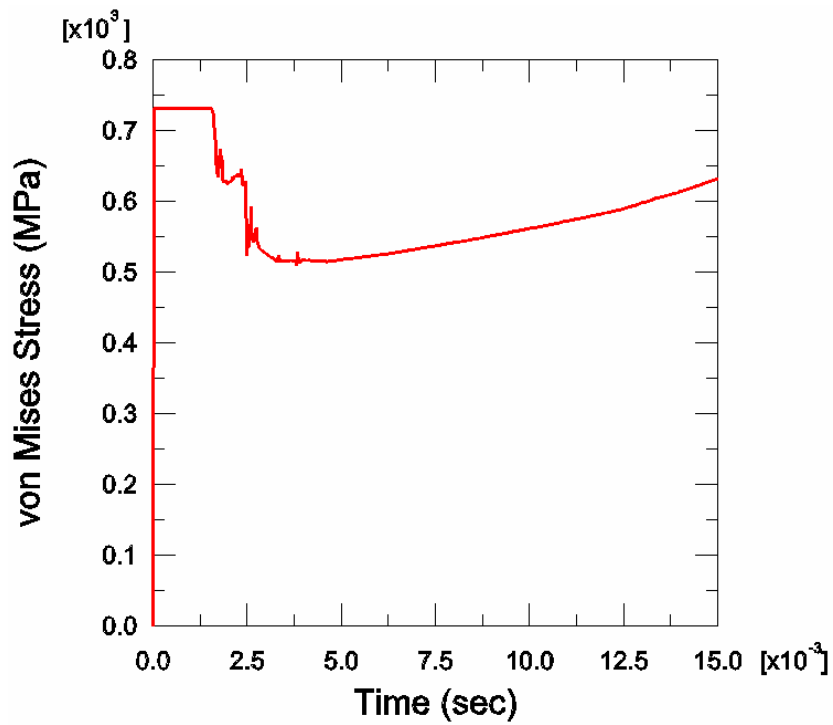


圖 6.5 (a) 燃料棒水中垂直墜落時 a 點的應力變化

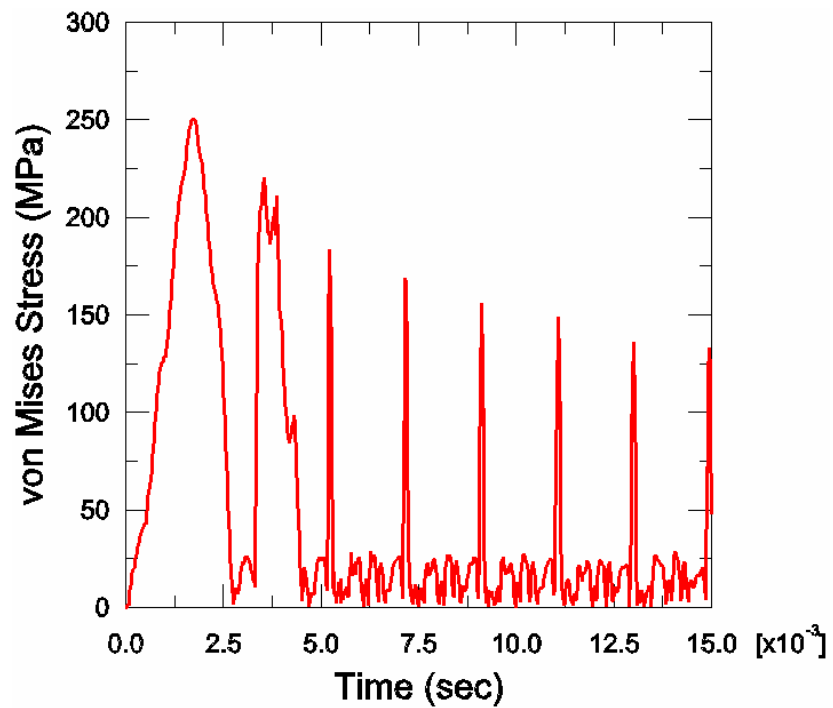


圖 6.5 (b) 燃料棒水中垂直墜落時 b 點的應力變化



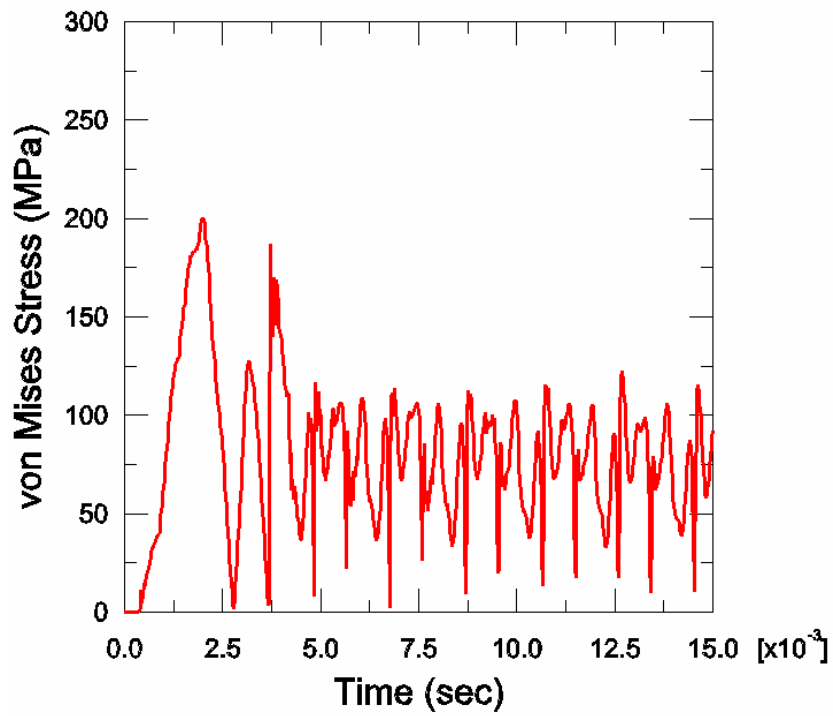


圖 6.5 (c) 燃料棒水中垂直墜落時 c 點的應力變化

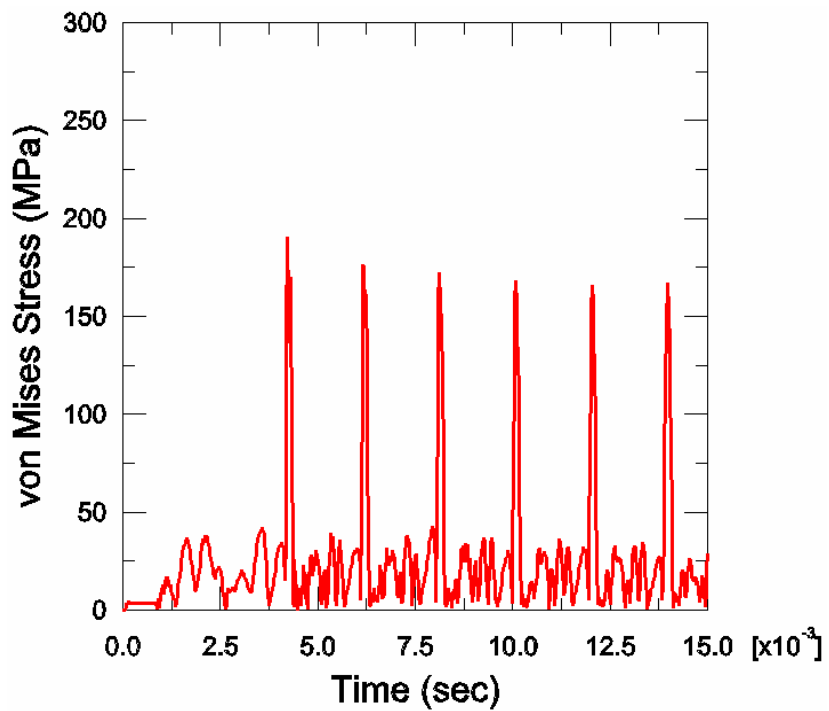


圖 6.5 (d) 燃料棒水中垂直墜落時 d 點的應力變化

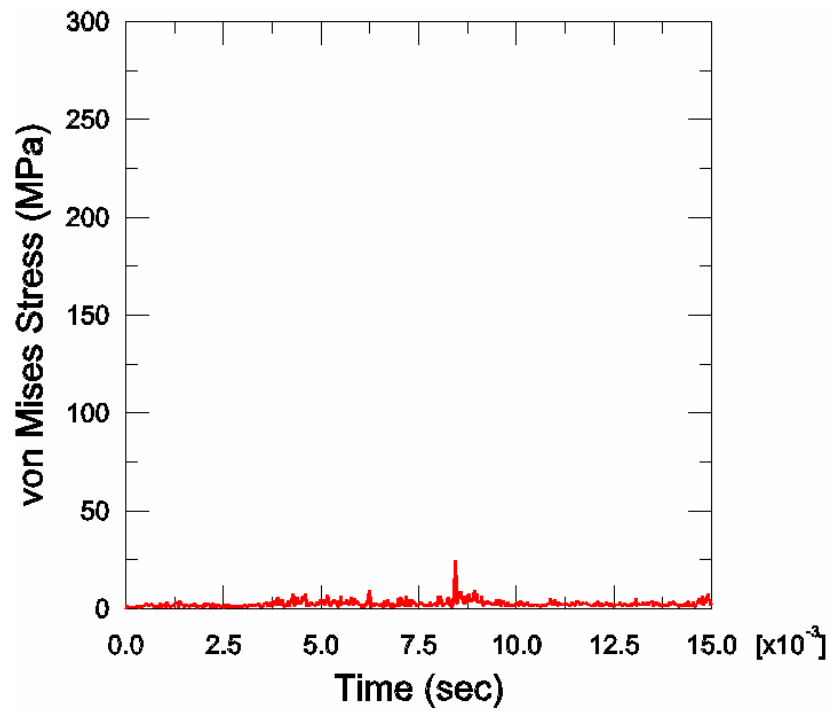


圖 6.5 (e) 燃料棒水中垂直墜落時 e 點的應力變化

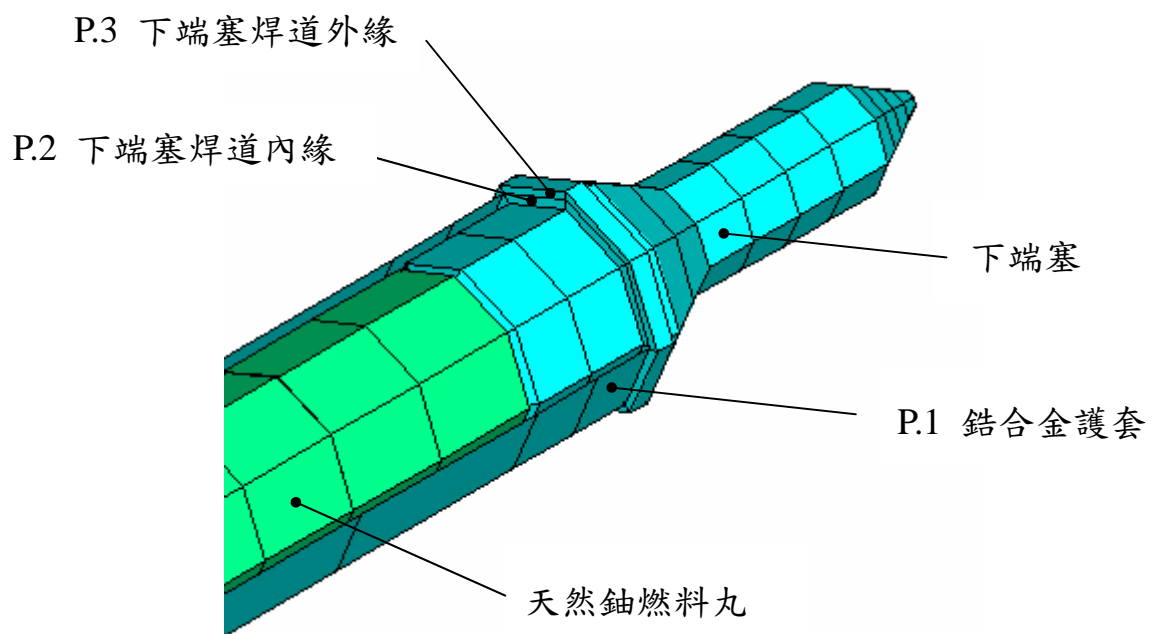


圖 6.6 下端塞焊道周圍的觀察位置

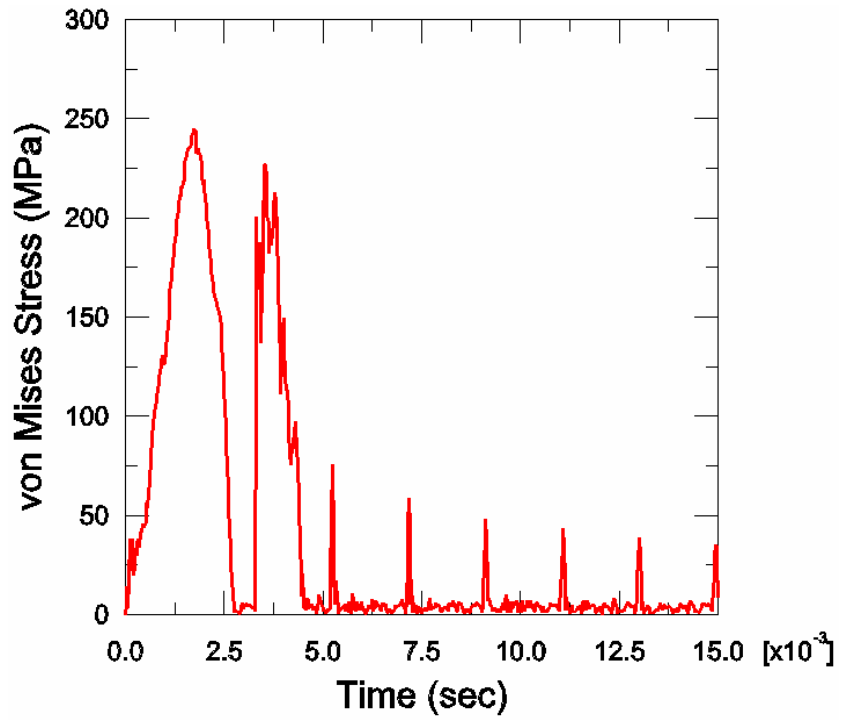


圖 6.7 (a) 燃料棒水中垂直墜落時下端塞焊道周圍護套 P.1 點的應力變化

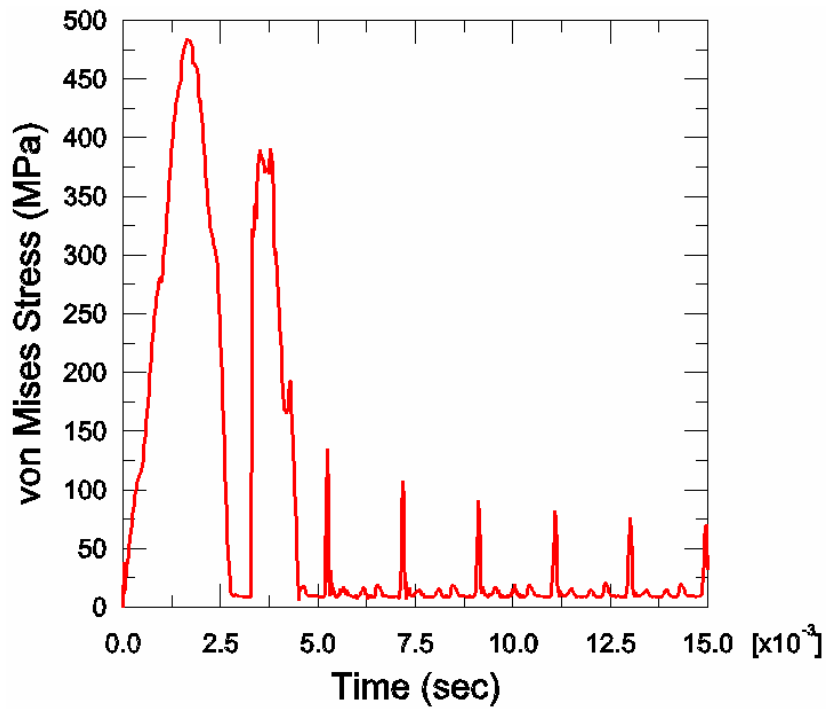


圖 6.7 (b) 燃料棒水中垂直墜落時下端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化

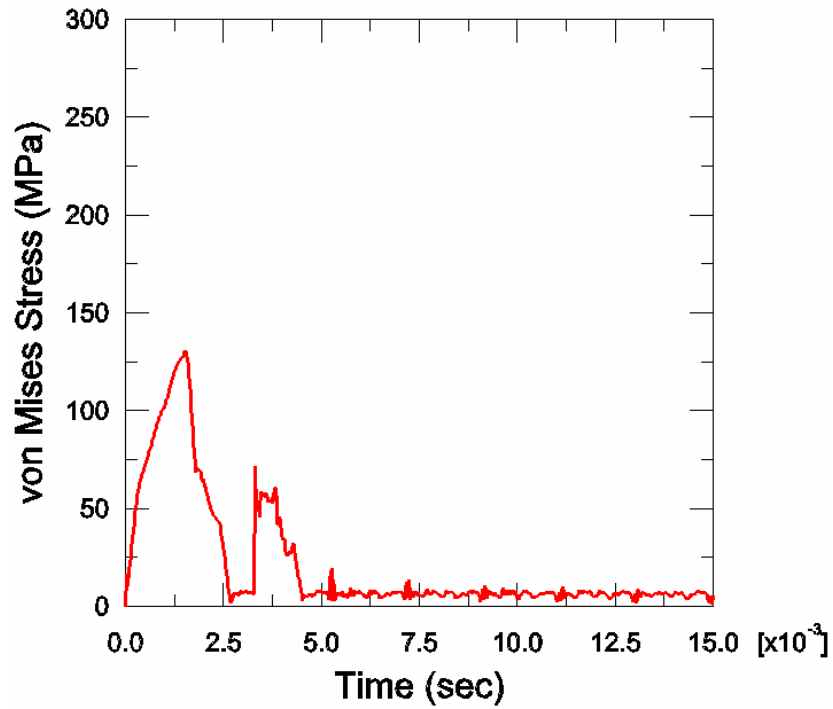


圖 6.7 (c) 燃料棒水中垂直墜落時下端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化

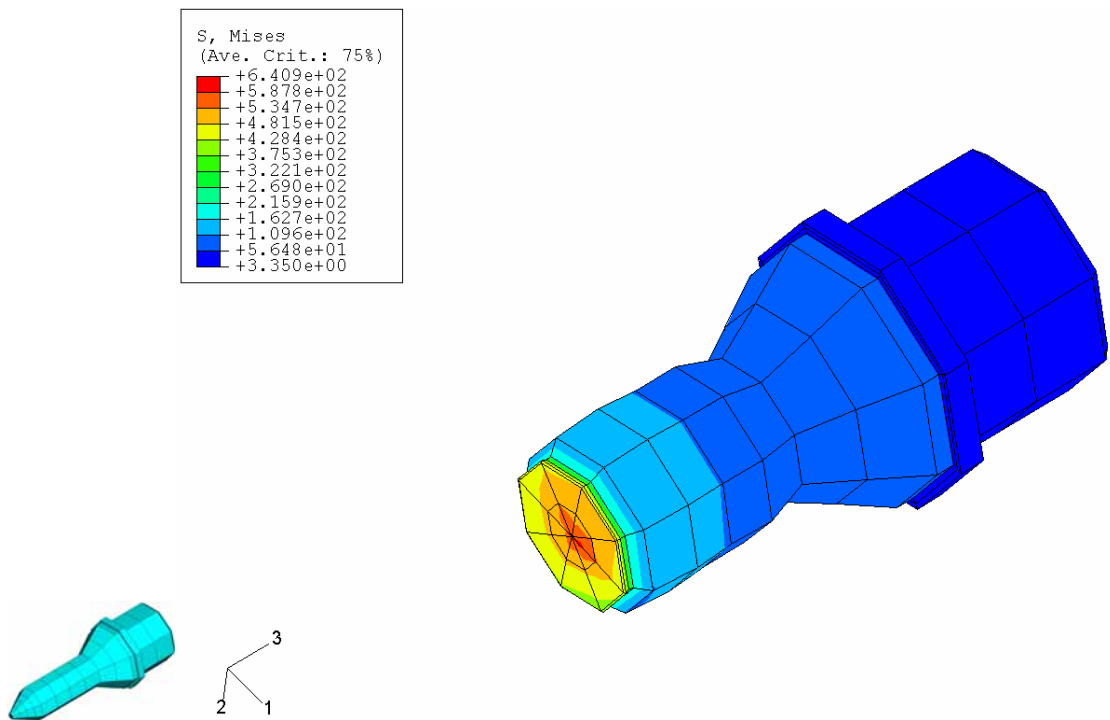


圖 6.7 (d) 燃料棒水中垂直墜落 15 毫秒後的下端塞應力分佈與變形情況

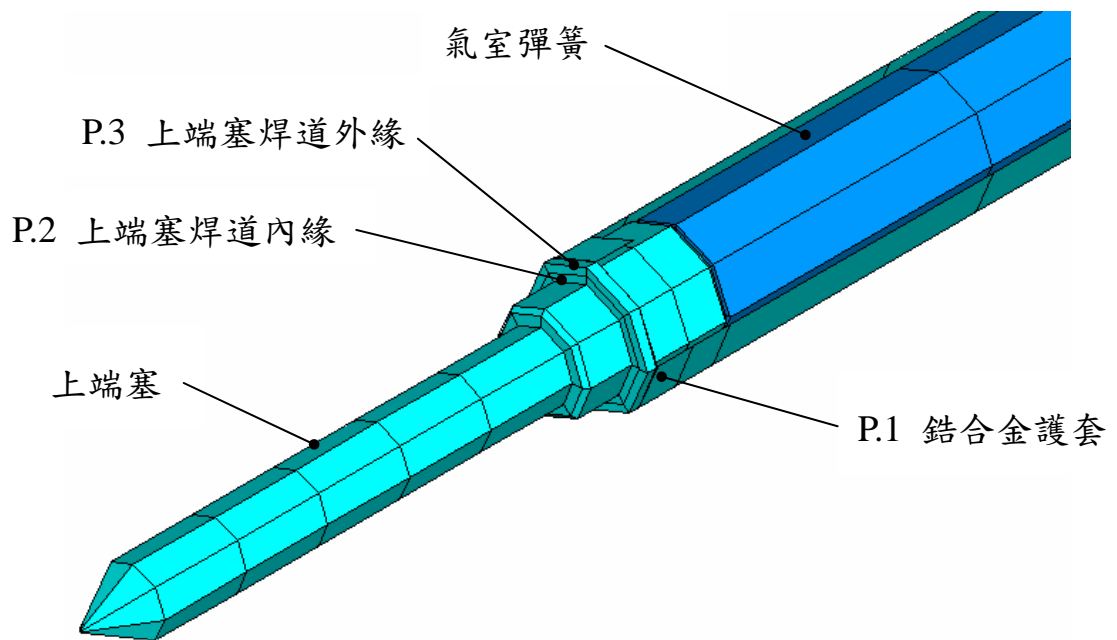


圖 6.8 上端塞焊道周圍的觀察位置

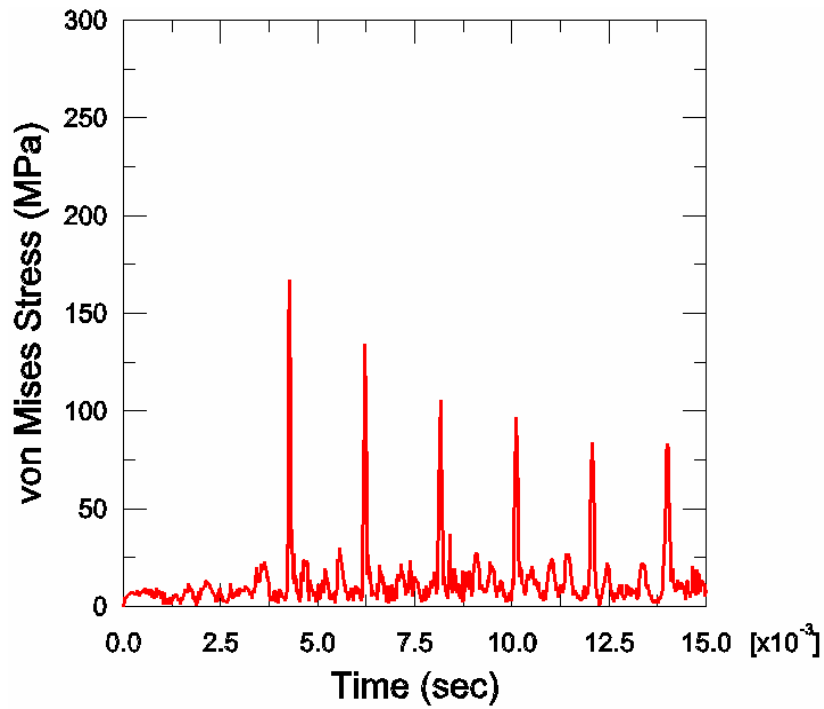


圖 6.9 (a) 燃料棒水中垂直墜落時上端塞焊道周圍護套 P.1 點的應力變化

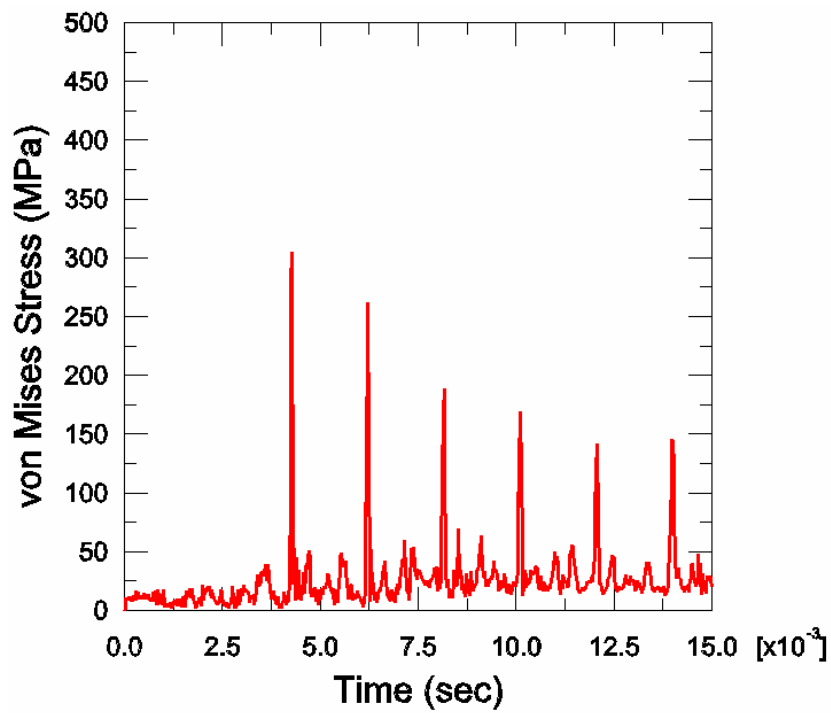


圖 6.9 (b) 燃料棒水中垂直墜落時上端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化

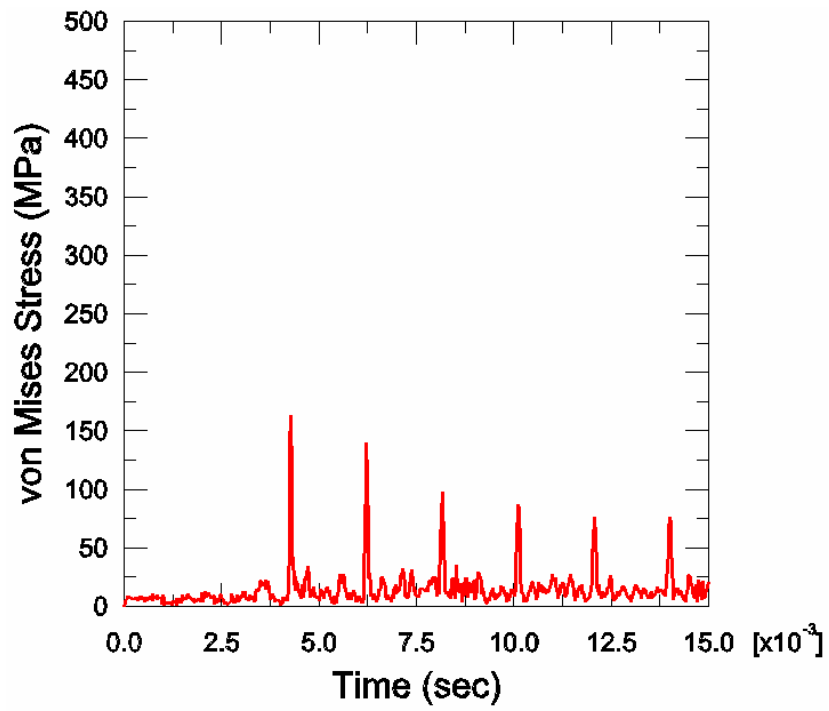


圖 6.9 (c) 燃料棒水中垂直墜落時上端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化



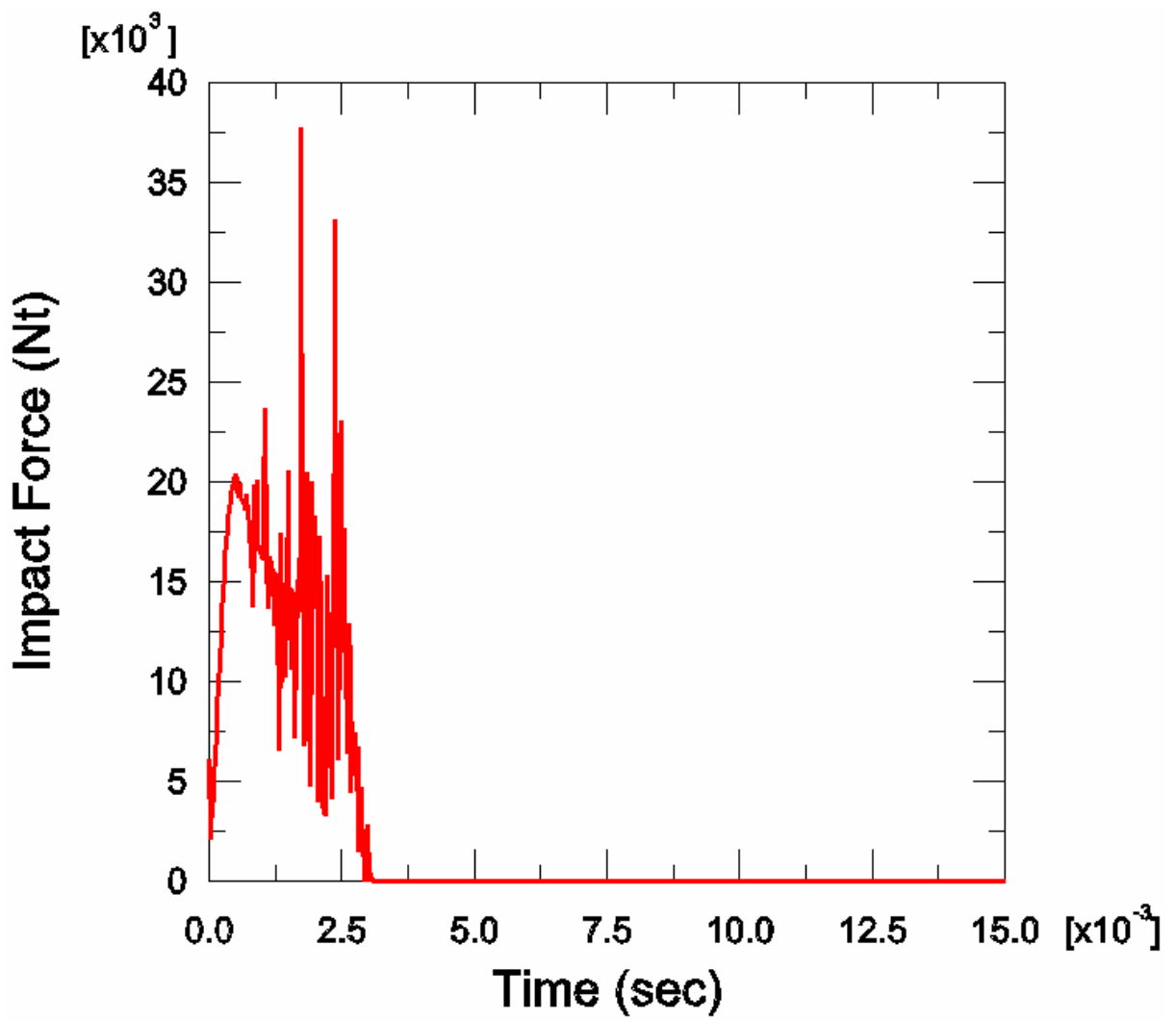


圖 6.10 燃料棒水中傾斜墜落時的衝擊力

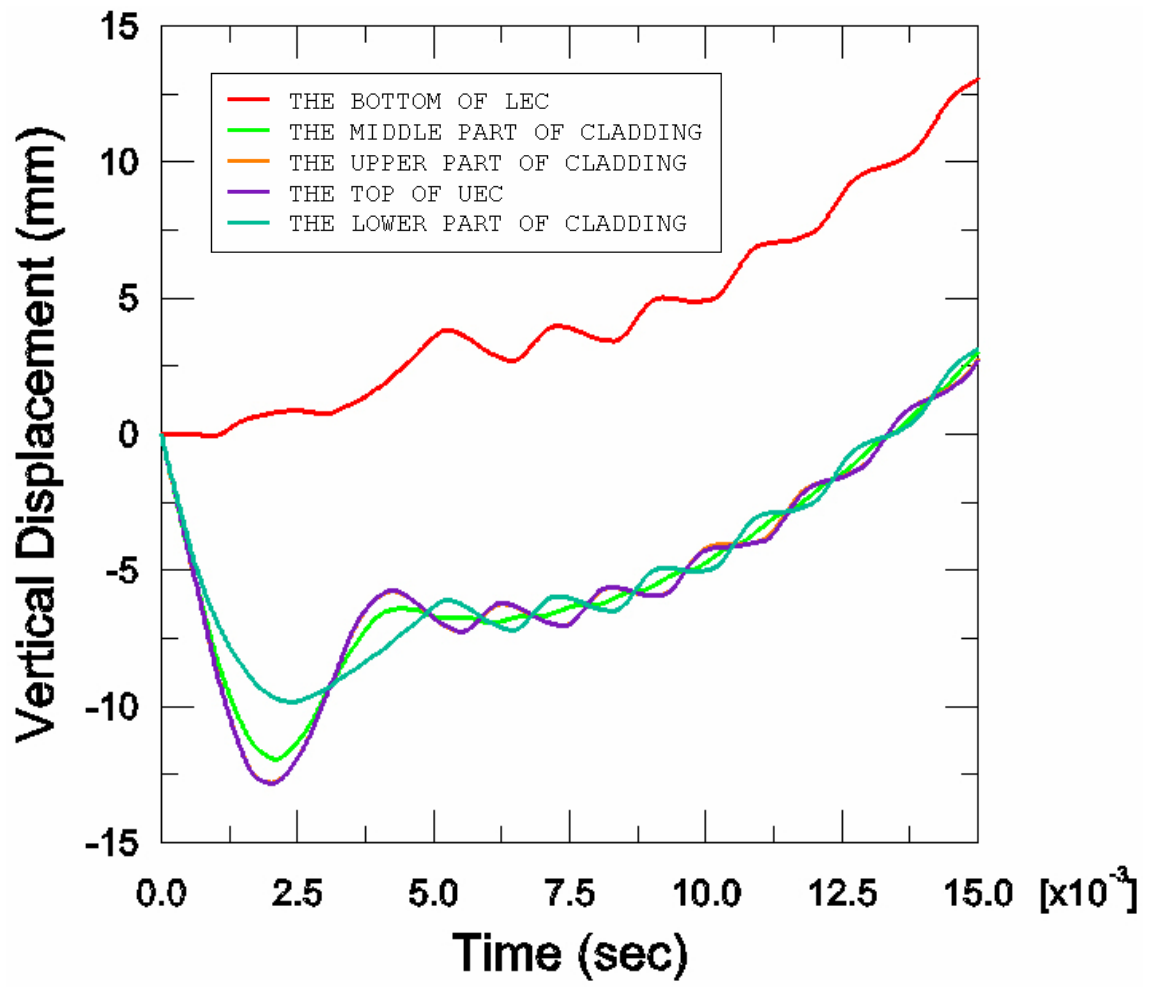


圖 6.11 燃料棒水中傾斜墜落時的各處位移量

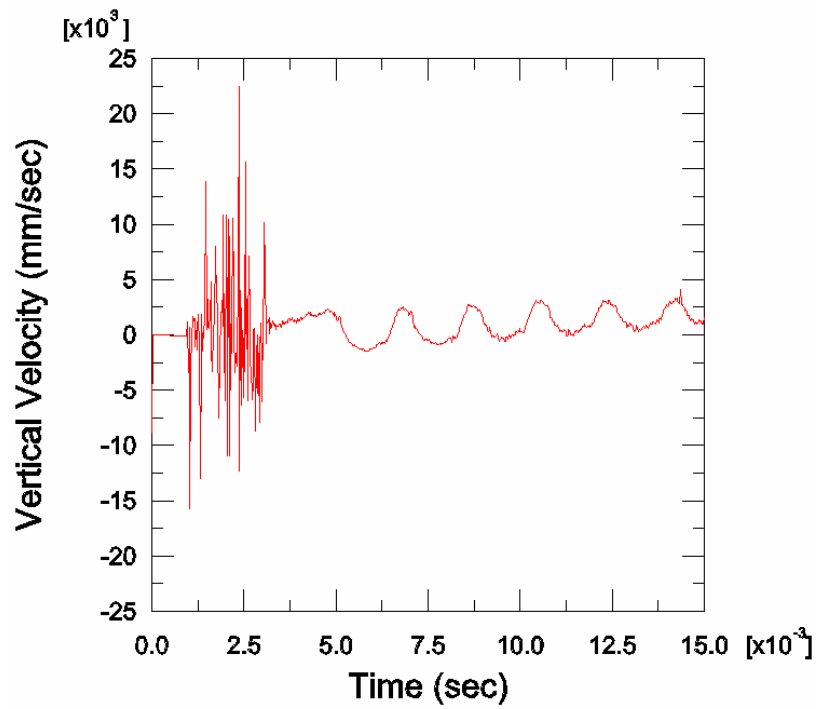


圖 6.12 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時 a 點的速度

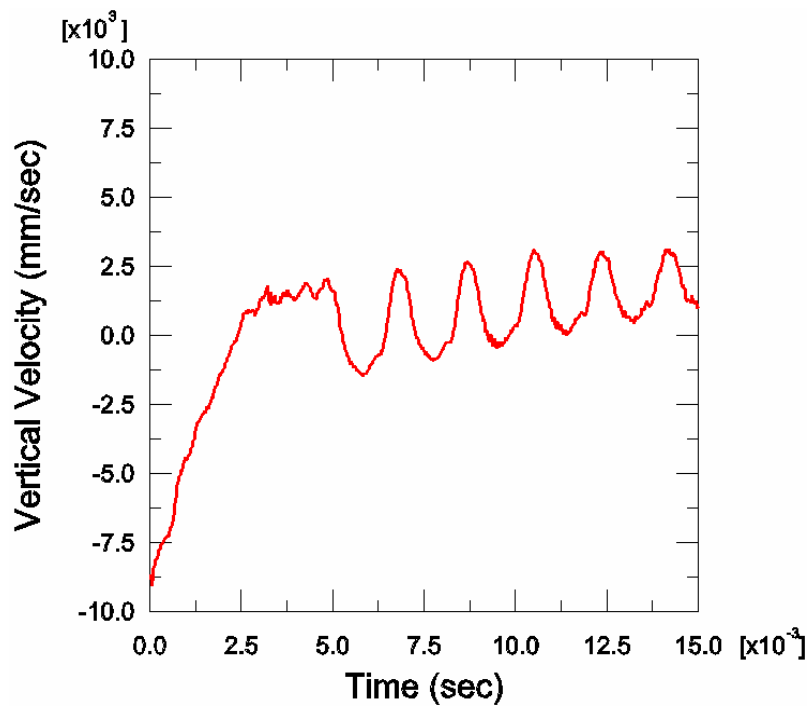


圖 6.12 (b) 燃料棒水中傾斜墜落時 b 點的速度

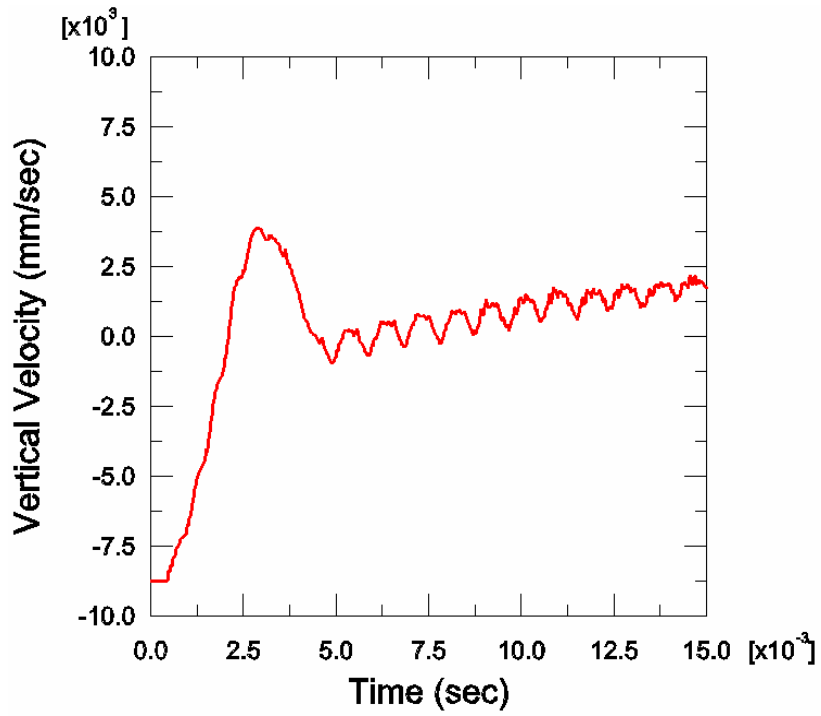


圖 6.12 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時 c 點的速度

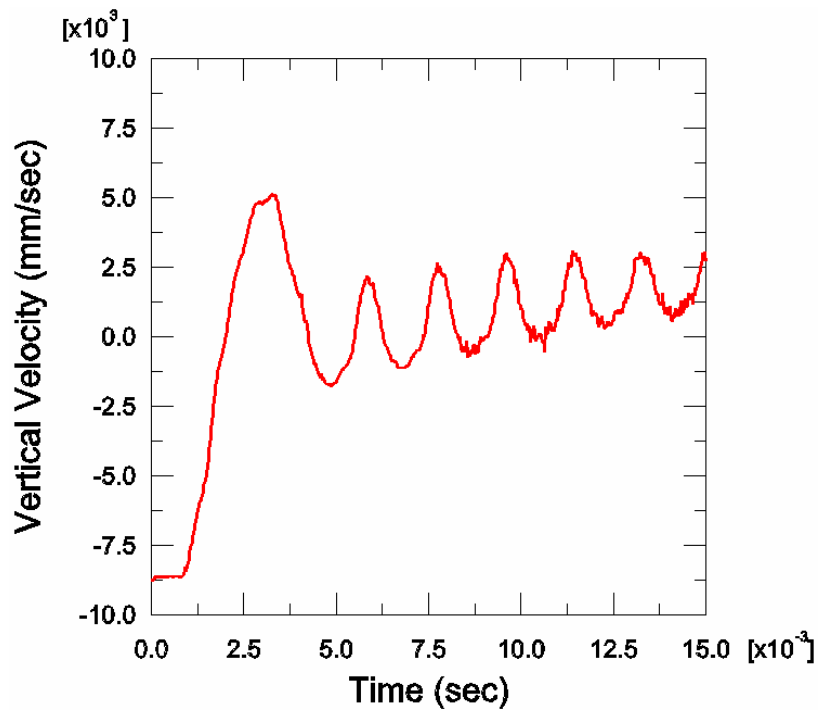


圖 6.12 (d) 燃料棒水中傾斜墜落時 d 點的速度

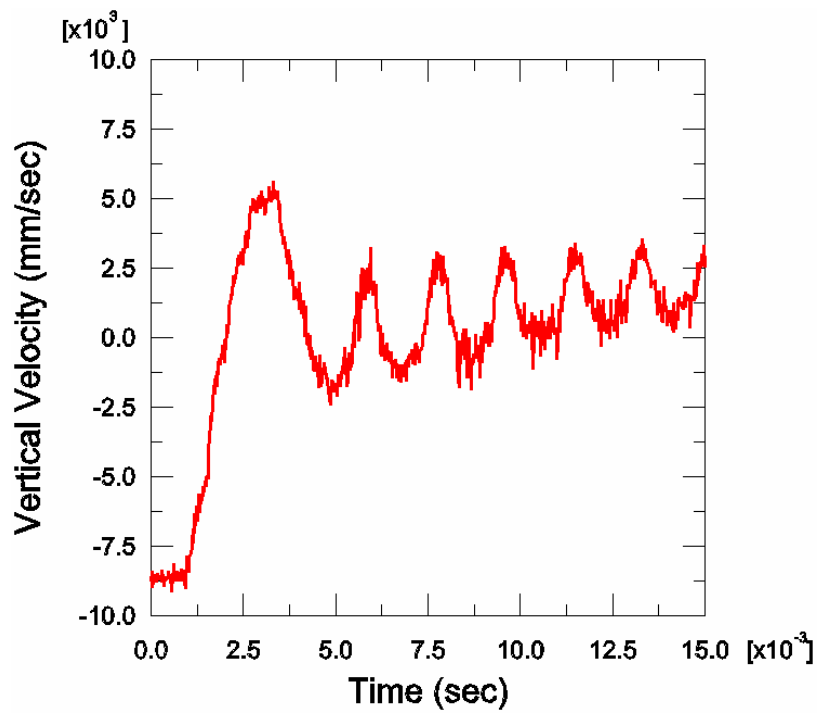


圖 6.12 (e) 燃料棒水中傾斜墜落時 e 點的速度

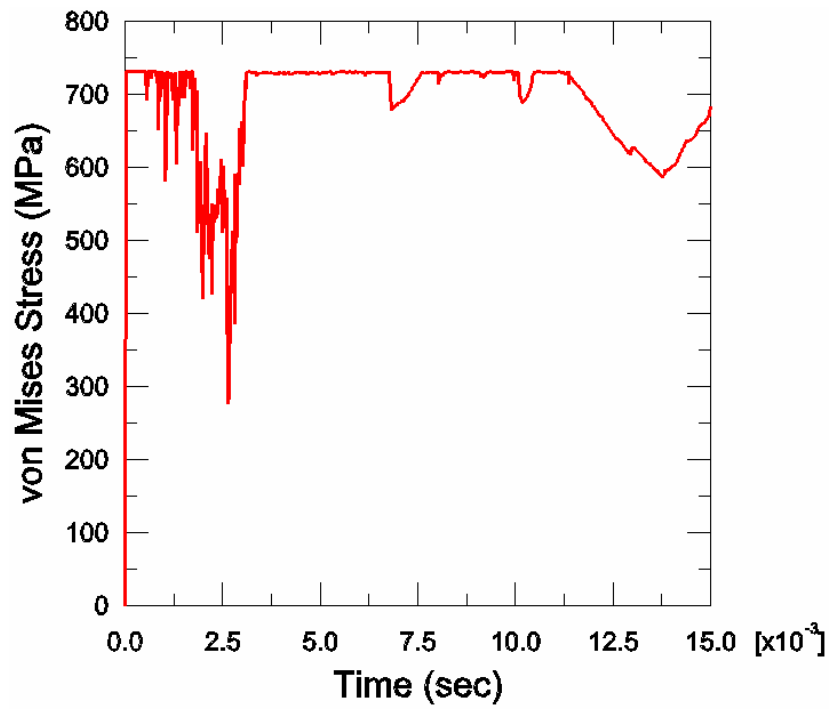


圖 6.13 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時 a 點的應力變化

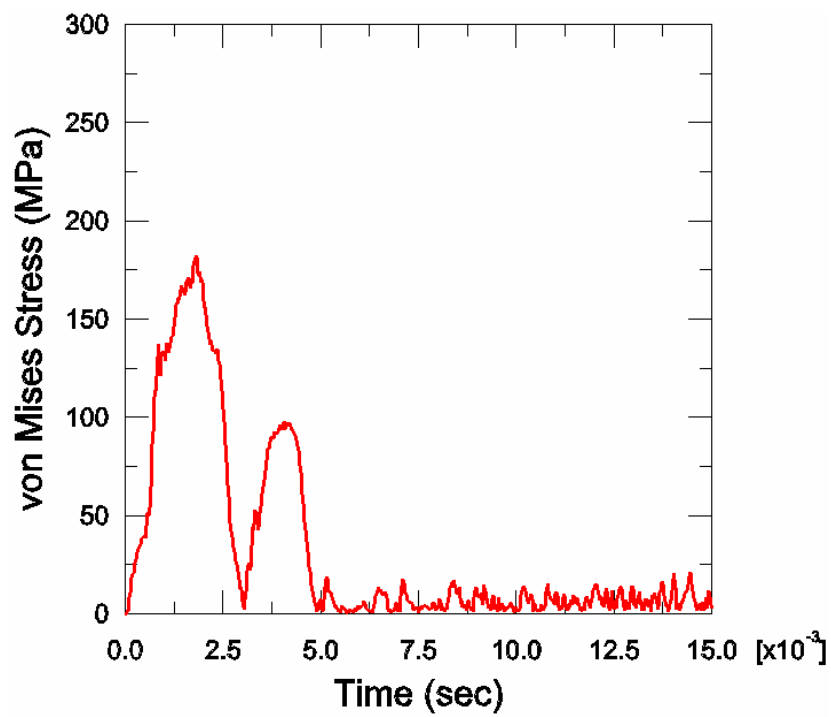


圖 6.13 (b) 燃料棒水中傾斜墜落時 b 點的應力變化

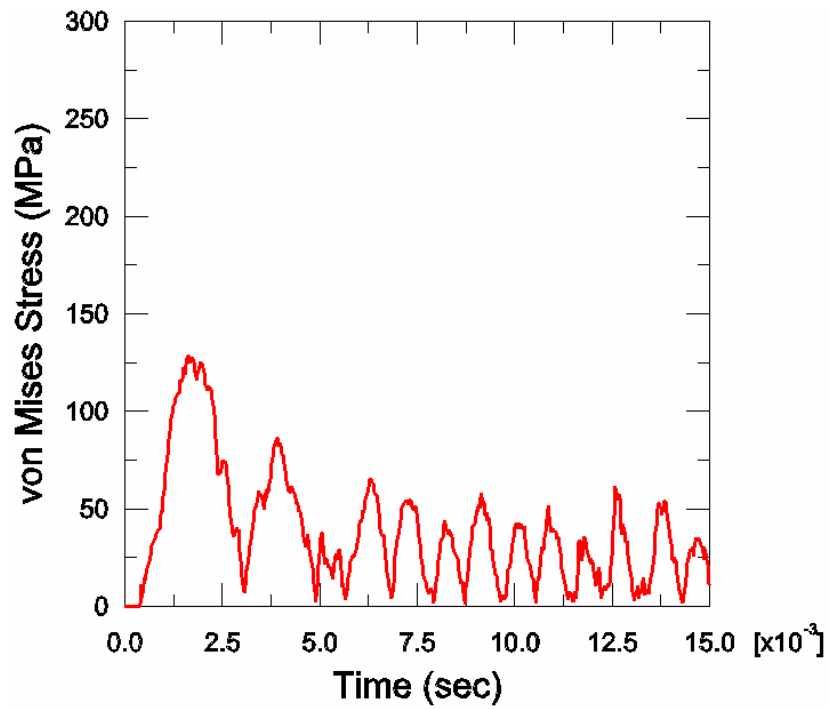


圖 6.13 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時 c 點的應力變化

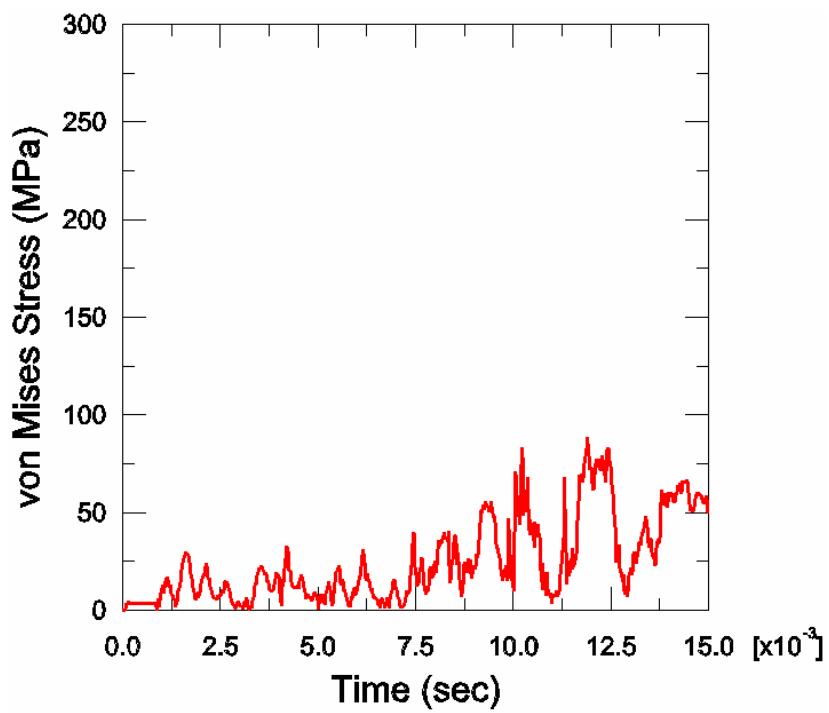


圖 6.13 (d) 燃料棒水中傾斜墜落時 d 點的應力變化

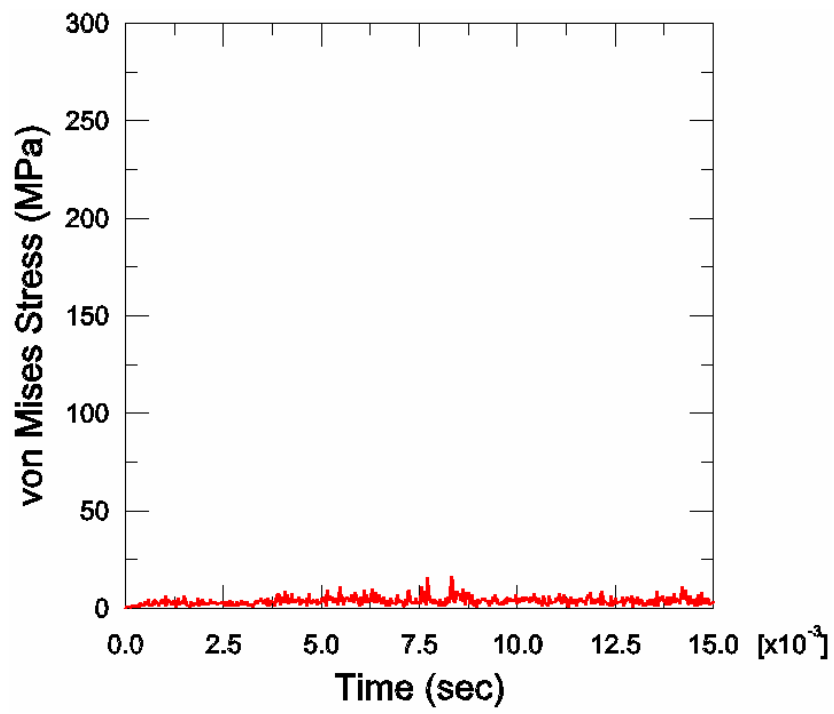


圖 6.13 (e) 燃料棒水中傾斜墜落時 e 點的應力變化



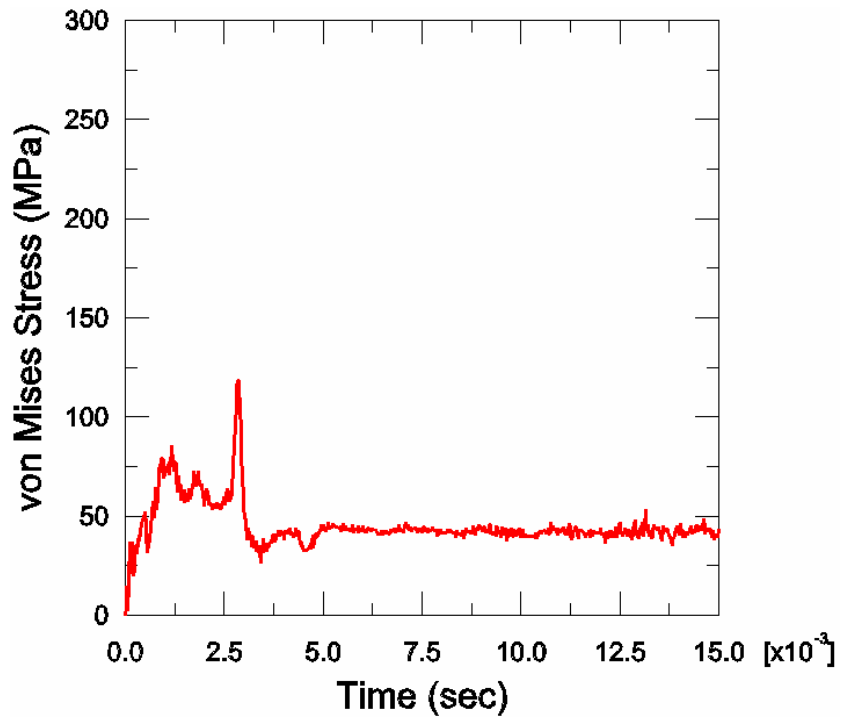


圖 6.14 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時下端塞焊道周圍護套 P.1 點的應力變化

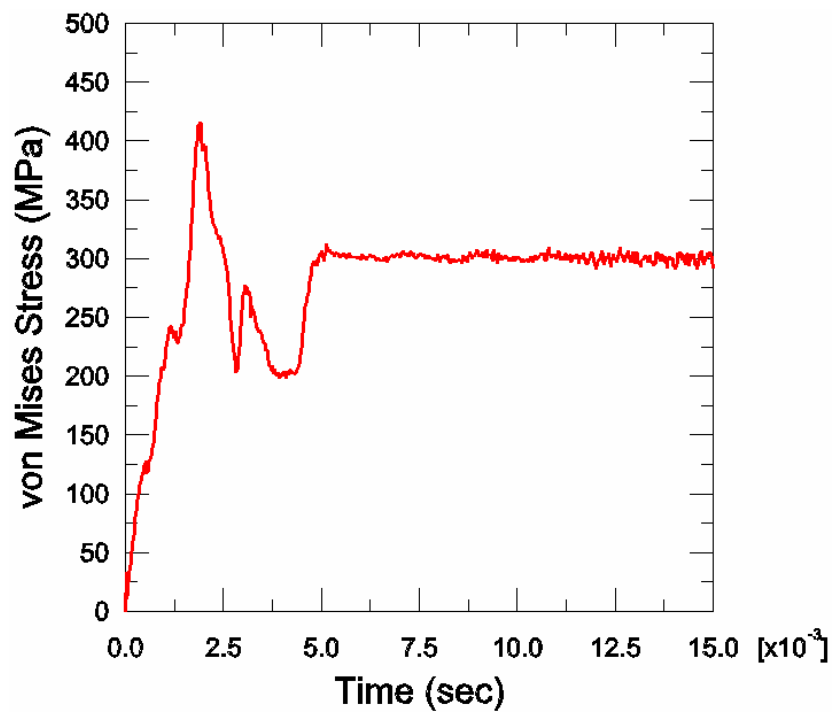


圖 6.14 (b) 燃料棒水中傾斜墜落時下端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化

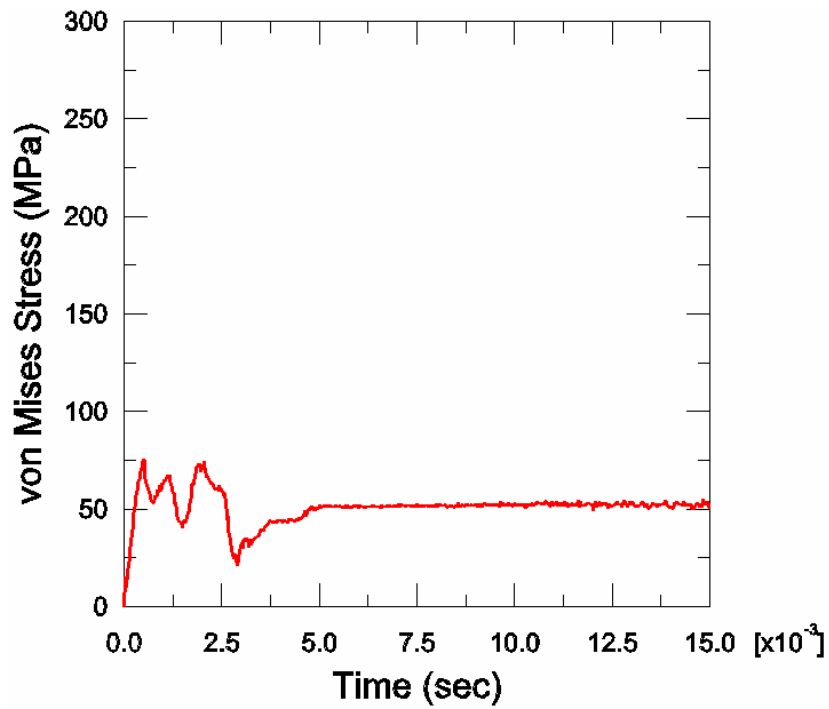


圖 6.14 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時下端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化

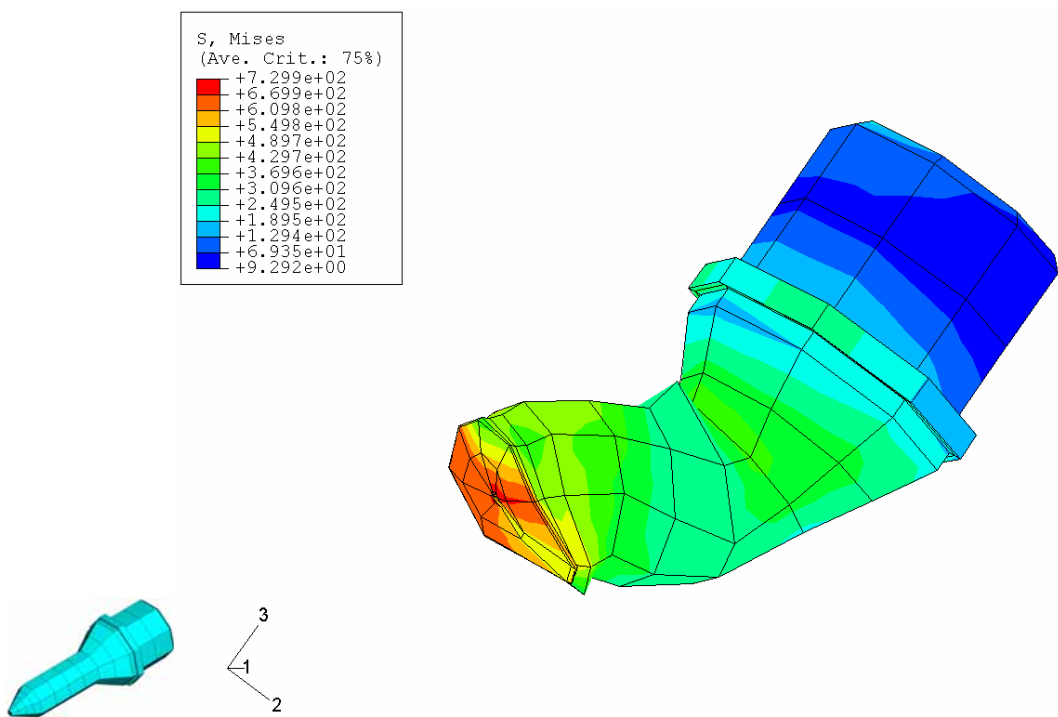


圖 6.14 (d) 燃料棒水中傾斜墜落 15 毫秒後的下端塞應力分佈與變形情況

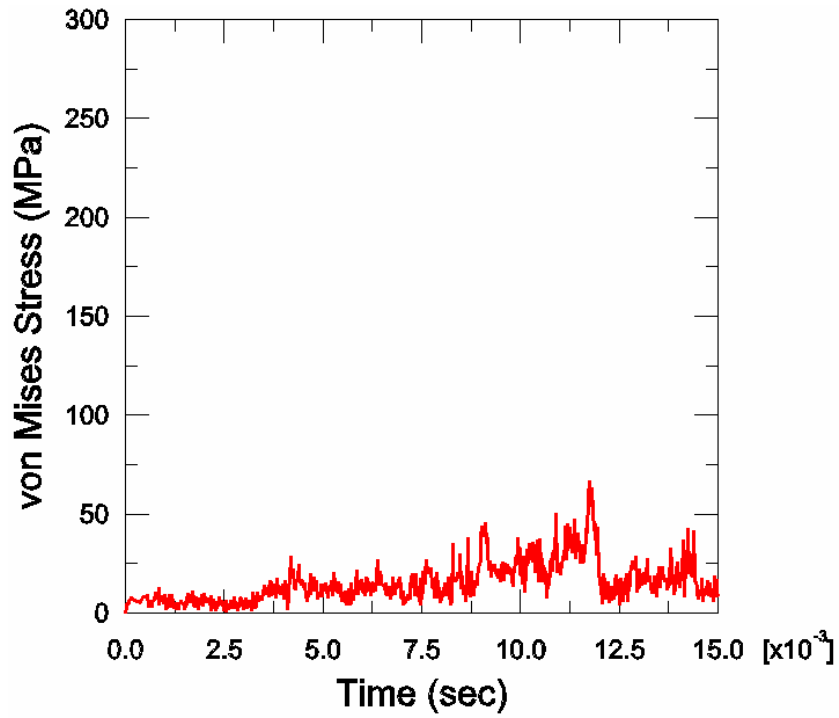


圖 6.15 (a) 燃料棒水中傾斜墜落時上端塞焊道周圍護套 P.1 點的應力變化

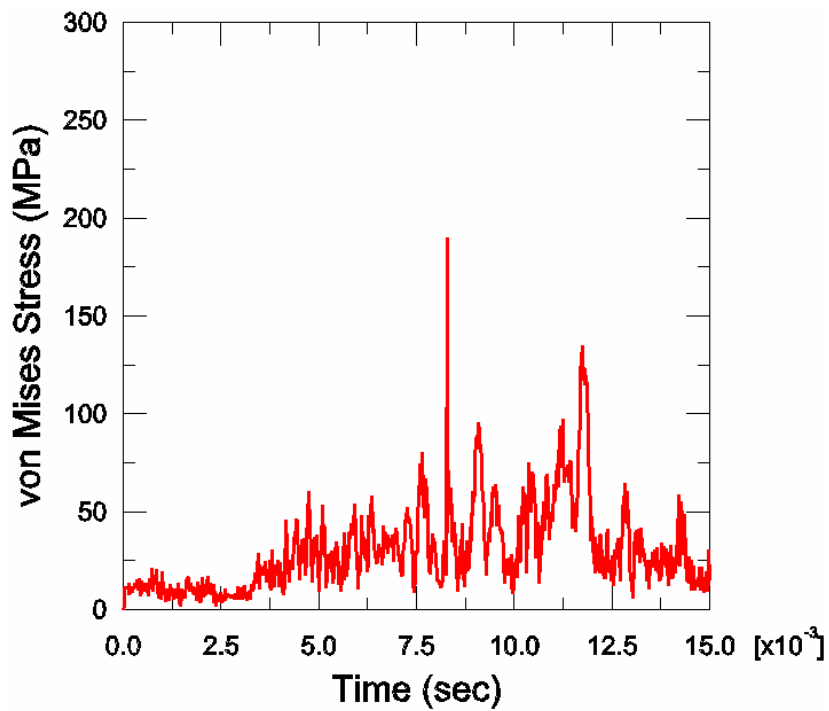


圖 6.15 (b) 燃料棒水中傾斜時上端塞焊道內緣 P.2 點的應力變化

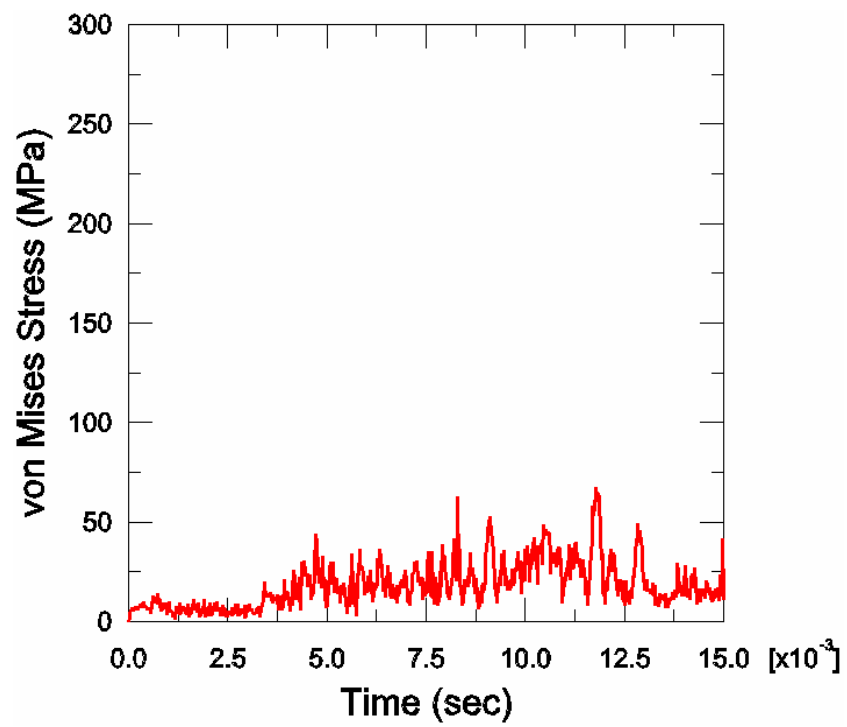


圖 6.15 (c) 燃料棒水中傾斜墜落時上端塞焊道外緣 P.3 點的應力變化

## 七、總結

基於以上分析計算的結果，以目前核一廠用過燃料的操作情況，無論在未來中期貯存燃料吊運工作中，燃料是處於靜止或是行進狀態中墜落燃料池底，燃料棒都不可能發生挫曲現象。

但是在於燃料棒墜落撞擊燃料池底面，將造成燃料棒下端塞永久塑性變形，傾斜墜落時，除造成燃料下端塞壓縮變形外，還產生彎曲變形現象。

對於比較敏感的燃料護套而言，很慶幸地在垂直或傾斜墜落中，護套都處於彈性狀態，但是在於下端塞焊道附近的材料應力狀態於撞擊初期其應力值很接近鋁合金的降伏點，若高於目前最高 5.086 公尺的墜落高度，則該處應力值即可能超出鋁合金材料的彈性區域。

未來中期貯存的燃料吊運以燃料束為單位，故若有墜落事故發生，也是透過燃料束底部繫板的衝擊變形後才傳遞至燃料棒的，所以在這種條件下又增加燃料棒墜落後的完整性餘裕，也就是以核一廠目前的燃料操作方式而言，即使燃料墜落池底，會造成燃料棒破損的可能性是很小的。所以未來對中期貯存燃料吊運事故的分析，應該是著重於燃料棒以外的零組件的分析計算，諸如上、下端板及燃料格架與燃料匣等元件的分析上，以確保用過燃料中期貯存燃料的完整性。

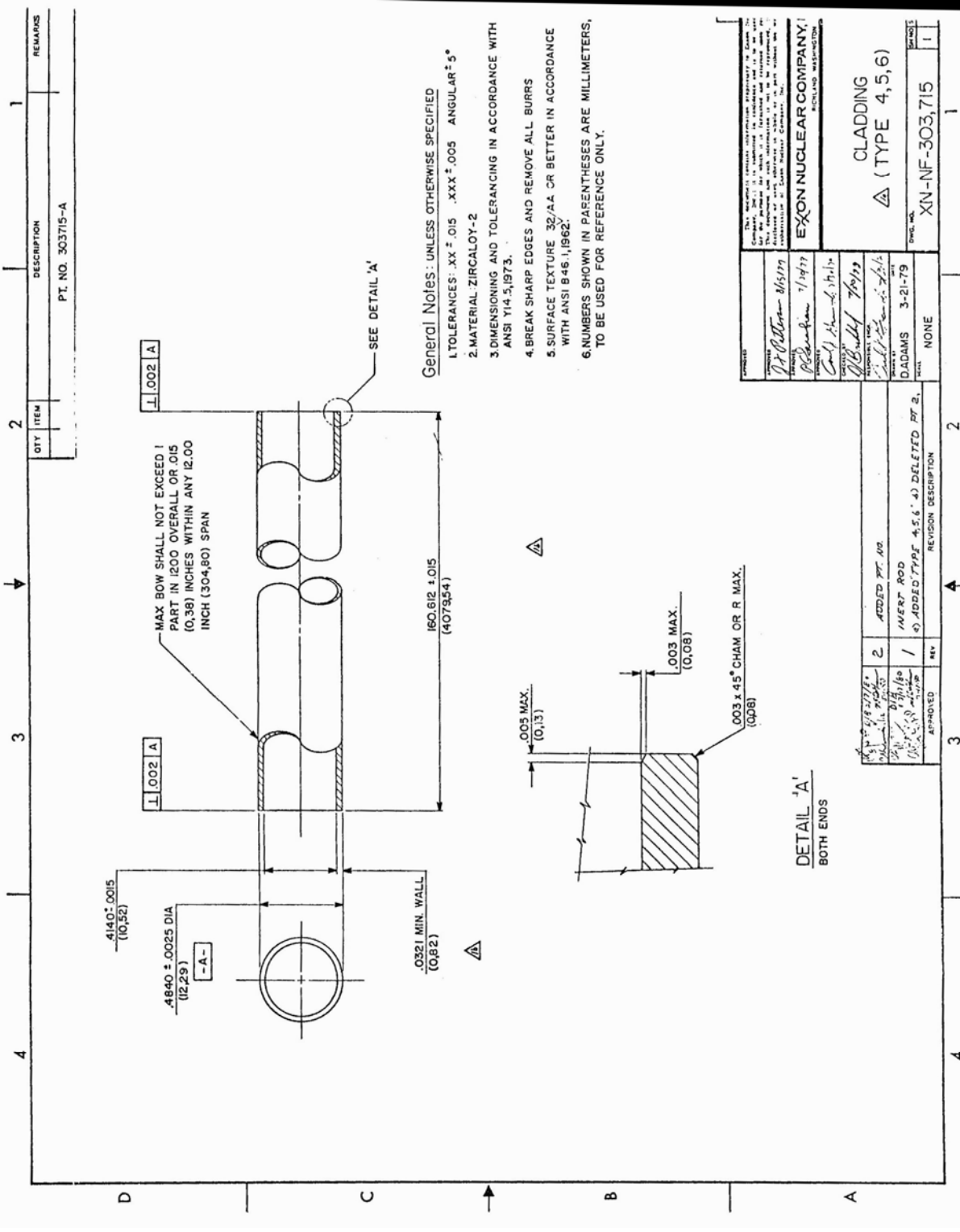
## 八、參考文獻

1. 潘犀明，”核燃料棒墜落碰撞分析”，核能研究所，INER-T1987，民國八十三年五月。
2. 吳晃昭、曾哲聰、鄭世中”沸水式燃料滑落事故分析”，核能學會 2003 年會及學術研討會 2003。
3. “台灣電力公司核能機組核燃料績效歷資料”，台灣電力公司核能發電處，民國九十三年一月二十日。
4. Cretan Mastilovic, “Vertical Drop of 21-PWR Waste Package on Unyielding Surface,” CAL-UDC-ME-000012 REVOO, DOE.
5. “ABAQUS/Explicit Users Manual V6.3,” HIBBITT, KAR LSSON & SORENSEN INC., 2002.
6. Alex E. Bond, etc., “Assessment of a Spent Fuel Disposal Canister,” AEA Technology, Harwell, UK, May 1997.
7. Ronald L. Panton, “Incompressible Flow”, John Wiley & Sons. Inc, 1984.
8. Ames, “Fluid Mechanics”, The Iowa University, 1979.
9. J. L. Meriam, L. G. Kraige, ”DYNAMICS”, John Wiley & Sons. Inc, 1987.
10. 台灣電力公司第一核能發電廠，”程序書變更通知單 No. 216 燃料更換”，2004。
11. 台灣電力公司第一核能發電廠，”程序書變更通知單 No. 221 燃料填換台操作規程”，2002。
12. “LOWER END CAP,” DWG. NO. XN-NF-303, 718, EXXON NUCLEAR COM. INC., 1979.
13. “CLADDING,” DWG. NO. XN-NF-303, 715, EXXON NUCLEAR COM. INC., 1979.

14. "STANDARD UPPER END CAP," DWG. NO. XN-NF-303, 717, EXXON NUCLEAR COM. INC., 1979.
15. "NATURAL URANIUM FUEL PELLETT," DWG. NO. NX-NF304, 062. EXXON NUCLEAR COM. INC., 1979.
16. "FUEL PELLETT," DWG. NO. XN-NF-304, 062, EXXON NUCLEAR COM. INC., 1979.
17. "FUEL ROD PLENUM SPRING," DWG. NO. XN-NF-303, 811, EXXON NUCLEAR COM. INC., 1979.
18. "FUEL CLADDING INTEGRITY AT HIGH BURNUPS", NFIR-III/EPRI, X103-05-10D, AUG. 1999.
19. "FEMAXI-III: A Computer Code for the Analysis of Thermal and Mechanical Behavior of Fuel Rods," JAERI, JAERI-1298, 1985
20. "Handbook of Wiggins and Huntington Alloy", Nicked Alloys International.
21. "Interim Staff Guidance-12", Spent Fuel Project Office, NRC. 2004 °

## 附件

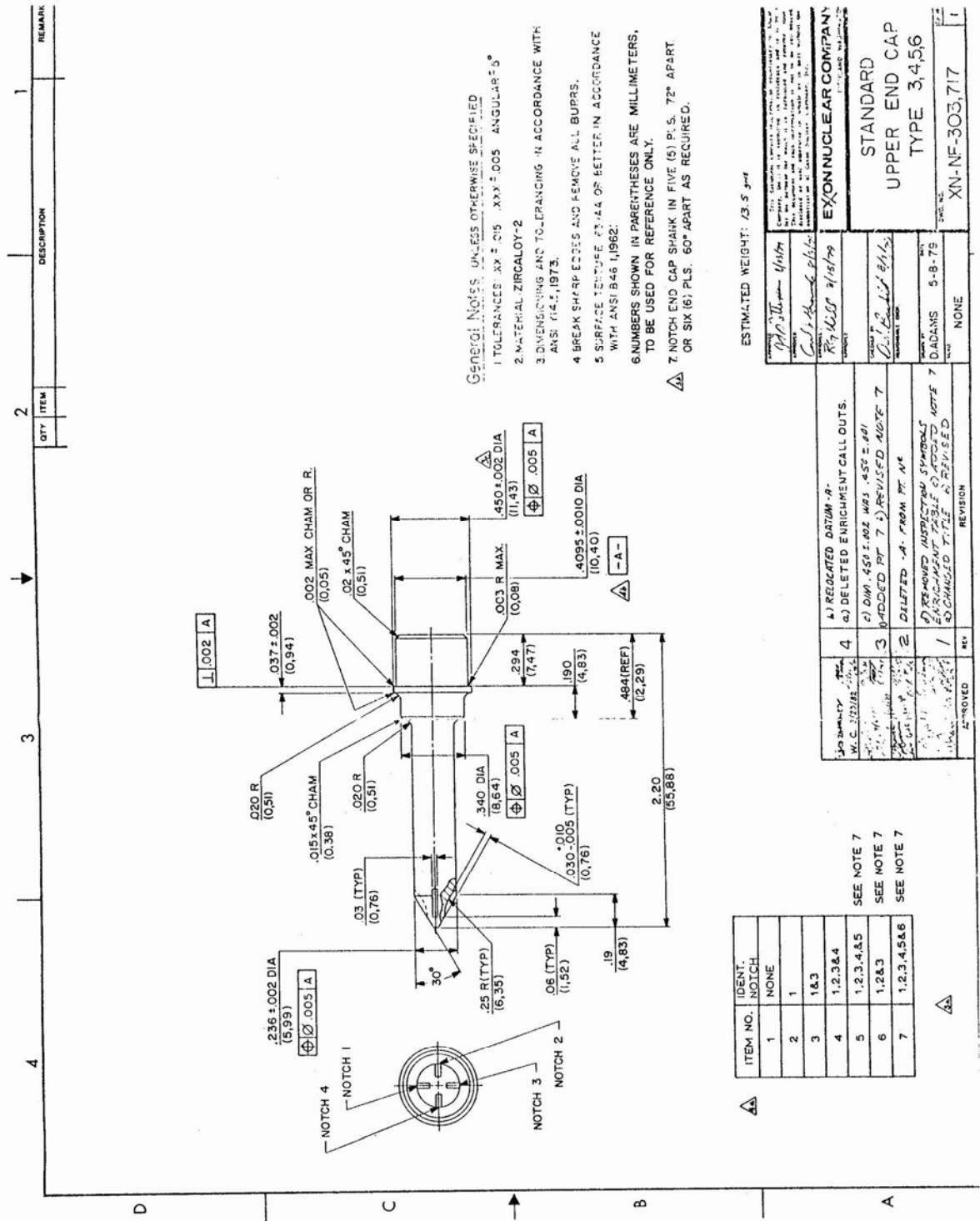




- General Notes: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED
1. TOLERANCES:  $xx \pm .015$   $.xxx \pm .005$  ANGULAR  $\pm 5^\circ$
  2. MATERIAL: ZIRCALOY-2
  3. DIMENSIONING AND TOLERANCING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5-1973.
  4. BREAK SHARP EDGES AND REMOVE ALL BURRS
  5. SURFACE TEXTURE: 32/AA OR BETTER IN ACCORDANCE WITH ANSI B 46.1-1962.
  6. NUMBERS SHOWN IN PARENTHESES ARE MILLIMETERS, TO BE USED FOR REFERENCE ONLY.

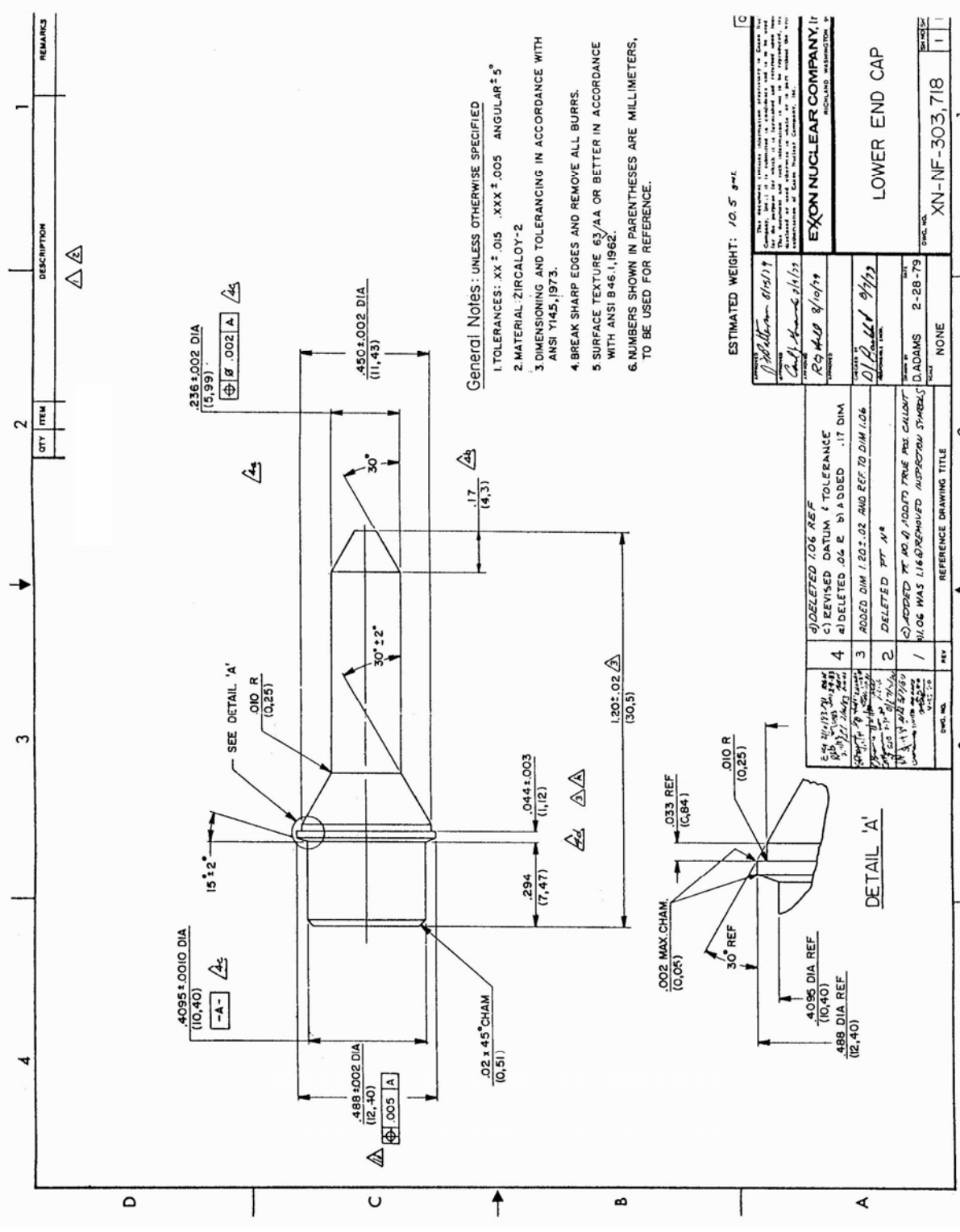
<small>THIS DRAWING IS THE PROPERTY OF EXON NUCLEAR COMPANY. IT IS TO BE USED ONLY FOR THE PROJECT AND FOR THE PURPOSES SPECIFIED HEREON. IT IS TO BE KEPT IN CONFIDENTIALITY AND NOT TO BE REPRODUCED OR TRANSMITTED IN ANY FORM OR BY ANY MEANS, ELECTRONIC OR MECHANICAL, INCLUDING PHOTOCOPYING, RECORDING, OR BY ANY INFORMATION STORAGE AND RETRIEVAL SYSTEM, WITHOUT THE WRITTEN PERMISSION OF EXON NUCLEAR COMPANY, INC.</small>	
EXON NUCLEAR COMPANY, ROSLAND, MASSACHUSETTS	
DESIGNED BY <i>J.P. Patton</i> 8/15/77	DATE 1/19/77
CHECKED BY <i>W. J. ...</i>	DATE 7/19/77
APPROVED BY <i>D. Adams</i>	DATE 3-21-79
PROJECT CLADDING Δ (TYPE 4, 5, 6)	
DRAWING NO. XN-NF-303,715	

REV	DESCRIPTION	DATE
1	ADDED TYPE 4, 5, 6 Δ DELETED PT. 2.	3-21-79
2	ADDED PT. NO	
3	INERT ROD	



General Notes, Unless Otherwise Specified

- TOLERANCES: XY ± .015 XXX ± .005 ANGULAR ± 5°
- MATERIAL: ZIRCALOY-2
- DIMENSIONING AND TOLERANCING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5, 1973.
- BREAK SHARP EDGES AND REMOVE ALL BURRS.
- SURFACE TEXTURE: R3.44 OR BETTER IN ACCORDANCE WITH ANSI B46.1, 1962.
- NUMBERS SHOWN IN PARENTHESES ARE MILLIMETERS, TO BE USED FOR REFERENCE ONLY.
- NOTCH END CAP SHAFT IN FIVE (5) P.L.S. 72° APART OR SIX (6) P.L.S. 60° APART AS REQUIRED.



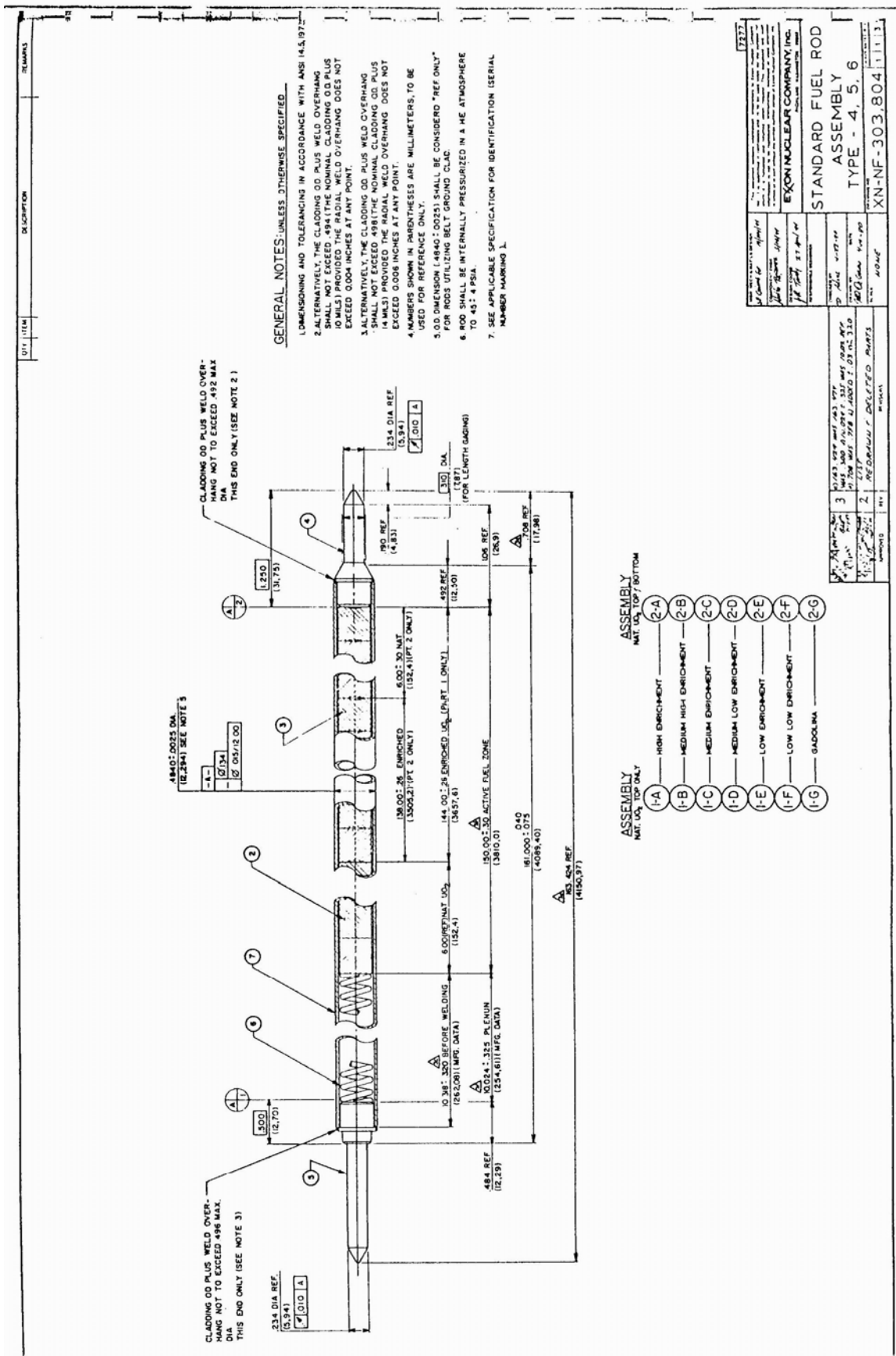
General Notes: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED

1. TOLERANCES: XX ± .015 .XXX ± .005 ANGULAR ± 5°
2. MATERIAL: ZIRCALOY-2
3. DIMENSIONING AND TOLERANCING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5-1973.
4. BREAK SHARP EDGES AND REMOVE ALL BURRS.
5. SURFACE TEXTURE 63/AA OR BETTER IN ACCORDANCE WITH ANSI B46.1-1962.
6. NUMBERS SHOWN IN PARENTHESES ARE MILLIMETERS, TO BE USED FOR REFERENCE.

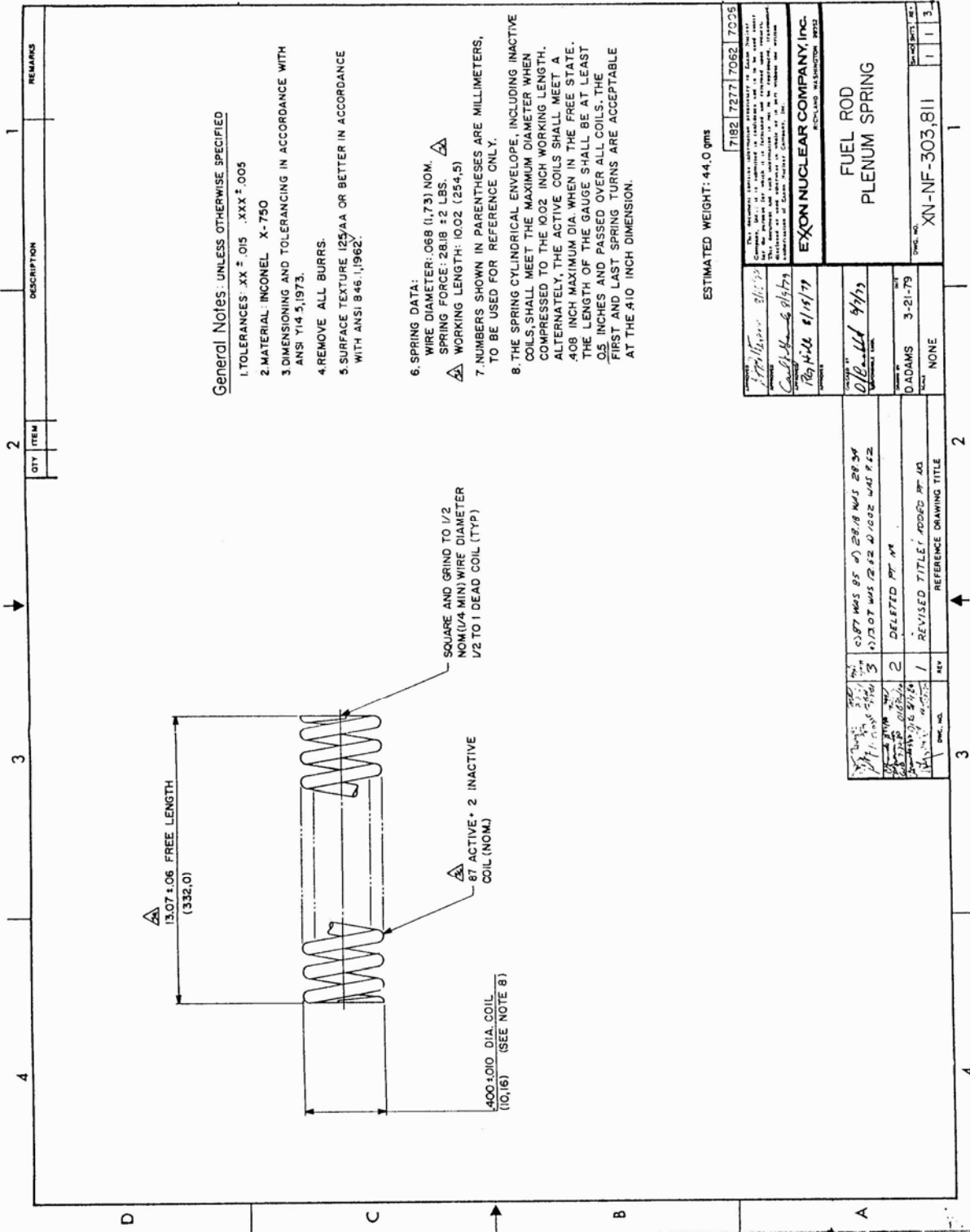
ESTIMATED WEIGHT: 10.5 gms.

DESIGNED BY R. H. HAY 8/10/79	DATE 8/10/79
CHECKED BY D. J. KELLY 8/10/79	DATE 8/10/79
APPROVED BY D. ADAMS 2-28-79	DATE 2-28-79
EXON NUCLEAR COMPANY, INC. HOLLAND, MISSISSIPPI	
LOWER END CAP	
Dwg. No. XN-NF-303,718	

REV	DESCRIPTION
1	ADDED REF. NO. 4, 10, 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17, 18, 19, 20, 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27, 28, 29, 30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60, 61, 62, 63, 64, 65, 66, 67, 68, 69, 70, 71, 72, 73, 74, 75, 76, 77, 78, 79, 80, 81, 82, 83, 84, 85, 86, 87, 88, 89, 90, 91, 92, 93, 94, 95, 96, 97, 98, 99, 100, 101, 102, 103, 104, 105, 106, 107, 108, 109, 110, 111, 112, 113, 114, 115, 116, 117, 118, 119, 120, 121, 122, 123, 124, 125, 126, 127, 128, 129, 130, 131, 132, 133, 134, 135, 136, 137, 138, 139, 140, 141, 142, 143, 144, 145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153, 154, 155, 156, 157, 158, 159, 160, 161, 162, 163, 164, 165, 166, 167, 168, 169, 170, 171, 172, 173, 174, 175, 176, 177, 178, 179, 180, 181, 182, 183, 184, 185, 186, 187, 188, 189, 190, 191, 192, 193, 194, 195, 196, 197, 198, 199, 200, 201, 202, 203, 204, 205, 206, 207, 208, 209, 210, 211, 212, 213, 214, 215, 216, 217, 218, 219, 220, 221, 222, 223, 224, 225, 226, 227, 228, 229, 230, 231, 232, 233, 234, 235, 236, 237, 238, 239, 240, 241, 242, 243, 244, 245, 246, 247, 248, 249, 250, 251, 252, 253, 254, 255, 256, 257, 258, 259, 260, 261, 262, 263, 264, 265, 266, 267, 268, 269, 270, 271, 272, 273, 274, 275, 276, 277, 278, 279, 280, 281, 282, 283, 284, 285, 286, 287, 288, 289, 290, 291, 292, 293, 294, 295, 296, 297, 298, 299, 300, 301, 302, 303, 304, 305, 306, 307, 308, 309, 310, 311, 312, 313, 314, 315, 316, 317, 318, 319, 320, 321, 322, 323, 324, 325, 326, 327, 328, 329, 330, 331, 332, 333, 334, 335, 336, 337, 338, 339, 340, 341, 342, 343, 344, 345, 346, 347, 348, 349, 350, 351, 352, 353, 354, 355, 356, 357, 358, 359, 360, 361, 362, 363, 364, 365, 366, 367, 368, 369, 370, 371, 372, 373, 374, 375, 376, 377, 378, 379, 380, 381, 382, 383, 384, 385, 386, 387, 388, 389, 390, 391, 392, 393, 394, 395, 396, 397, 398, 399, 400, 401, 402, 403, 404, 405, 406, 407, 408, 409, 410, 411, 412, 413, 414, 415, 416, 417, 418, 419, 420, 421, 422, 423, 424, 425, 426, 427, 428, 429, 430, 431, 432, 433, 434, 435, 436, 437, 438, 439, 440, 441, 442, 443, 444, 445, 446, 447, 448, 449, 450, 451, 452, 453, 454, 455, 456, 457, 458, 459, 460, 461, 462, 463, 464, 465, 466, 467, 468, 469, 470, 471, 472, 473, 474, 475, 476, 477, 478, 479, 480, 481, 482, 483, 484, 485, 486, 487, 488, 489, 490, 491, 492, 493, 494, 495, 496, 497, 498, 499, 500, 501, 502, 503, 504, 505, 506, 507, 508, 509, 510, 511, 512, 513, 514, 515, 516, 517, 518, 519, 520, 521, 522, 523, 524, 525, 526, 527, 528, 529, 530, 531, 532, 533, 534, 535, 536, 537, 538, 539, 540, 541, 542, 543, 544, 545, 546, 547, 548, 549, 550, 551, 552, 553, 554, 555, 556, 557, 558, 559, 560, 561, 562, 563, 564, 565, 566, 567, 568, 569, 570, 571, 572, 573, 574, 575, 576, 577, 578, 579, 580, 581, 582, 583, 584, 585, 586, 587, 588, 589, 590, 591, 592, 593, 594, 595, 596, 597, 598, 599, 600, 601, 602, 603, 604, 605, 606, 607, 608, 609, 610, 611, 612, 613, 614, 615, 616, 617, 618, 619, 620, 621, 622, 623, 624, 625, 626, 627, 628, 629, 630, 631, 632, 633, 634, 635, 636, 637, 638, 639, 640, 641, 642, 643, 644, 645, 646, 647, 648, 649, 650, 651, 652, 653, 654, 655, 656, 657, 658, 659, 660, 661, 662, 663, 664, 665, 666, 667, 668, 669, 670, 671, 672, 673, 674, 675, 676, 677, 678, 679, 680, 681, 682, 683, 684, 685, 686, 687, 688, 689, 690, 691, 692, 693, 694, 695, 696, 697, 698, 699, 700, 701, 702, 703, 704, 705, 706, 707, 708, 709, 710, 711, 712, 713, 714, 715, 716, 717, 718, 719, 720, 721, 722, 723, 724, 725, 726, 727, 728, 729, 730, 731, 732, 733, 734, 735, 736, 737, 738, 739, 740, 741, 742, 743, 744, 745, 746, 747, 748, 749, 750, 751, 752, 753, 754, 755, 756, 757, 758, 759, 760, 761, 762, 763, 764, 765, 766, 767, 768, 769, 770, 771, 772, 773, 774, 775, 776, 777, 778, 779, 780, 781, 782, 783, 784, 785, 786, 787, 788, 789, 790, 791, 792, 793, 794, 795, 796, 797, 798, 799, 800, 801, 802, 803, 804, 805, 806, 807, 808, 809, 810, 811, 812, 813, 814, 815, 816, 817, 818, 819, 820, 821, 822, 823, 824, 825, 826, 827, 828, 829, 830, 831, 832, 833, 834, 835, 836, 837, 838, 839, 840, 841, 842, 843, 844, 845, 846, 847, 848, 849, 850, 851, 852, 853, 854, 855, 856, 857, 858, 859, 860, 861, 862, 863, 864, 865, 866, 867, 868, 869, 870, 871, 872, 873, 874, 875, 876, 877, 878, 879, 880, 881, 882, 883, 884, 885, 886, 887, 888, 889, 890, 891, 892, 893, 894, 895, 896, 897, 898, 899, 900, 901, 902, 903, 904, 905, 906, 907, 908, 909, 910, 911, 912, 913, 914, 915, 916, 917, 918, 919, 920, 921, 922, 923, 924, 925, 926, 927, 928, 929, 930, 931, 932, 933, 934, 935, 936, 937, 938, 939, 940, 941, 942, 943, 944, 945, 946, 947, 948, 949, 950, 951, 952, 953, 954, 955, 956, 957, 958, 959, 960, 961, 962, 963, 964, 965, 966, 967, 968, 969, 970, 971, 972, 973, 974, 975, 976, 977, 978, 979, 980, 981, 982, 983, 984, 985, 986, 987, 988, 989, 990, 991, 992, 993, 994, 995, 996, 997, 998, 999, 1000



737	EXXON NUCLEAR COMPANY, INC.
STANDARD FUEL ROD ASSEMBLY	
TYPE - 4, 5, 6	
XN-NF-303,804	



**General Notes: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED**

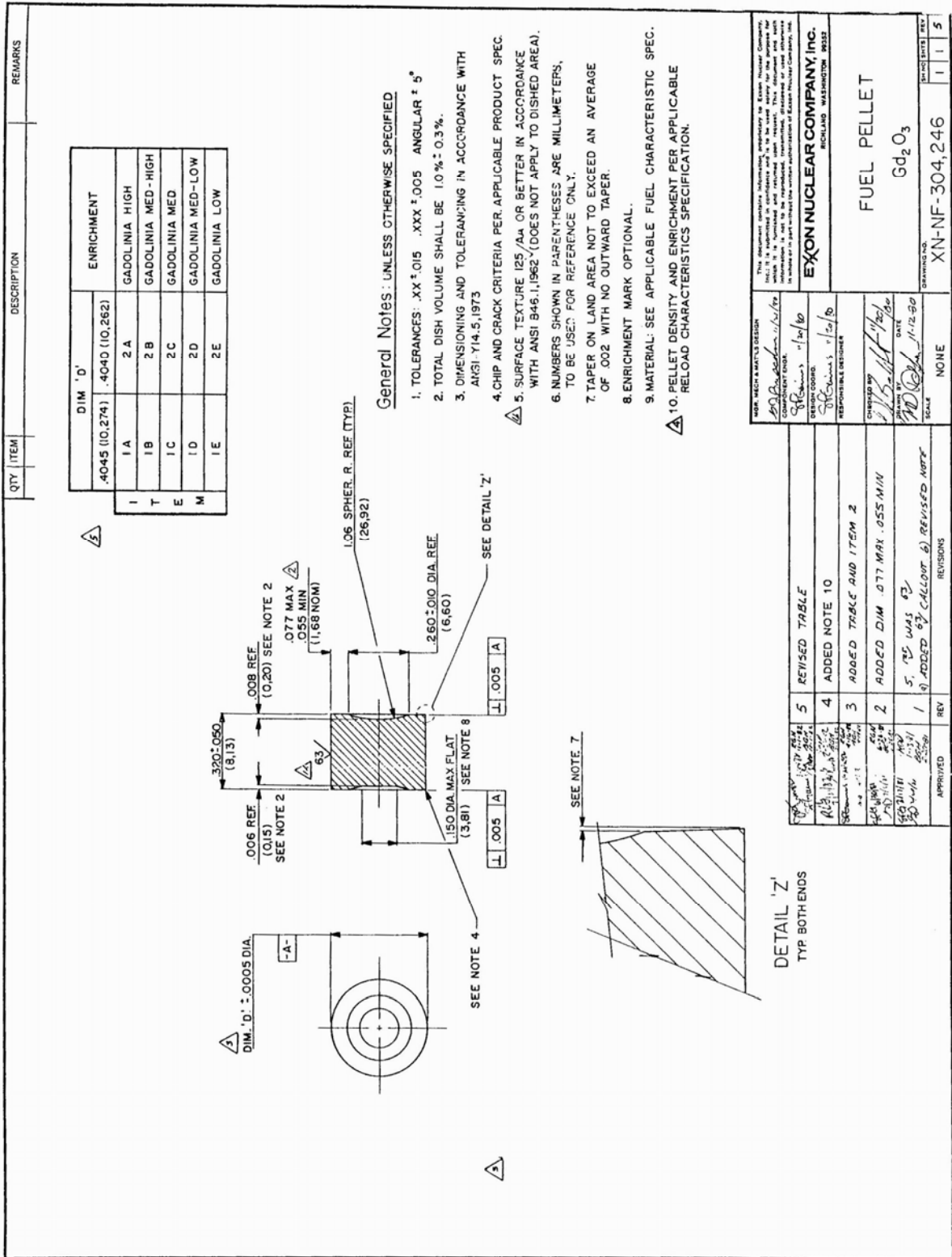
1. TOLERANCES: XX ± .015 .XXX ± .005
2. MATERIAL: INCONEL X-750
3. DIMENSIONING AND TOLERANCING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5-1973.
4. REMOVE ALL BURRS.
5. SURFACE TEXTURE (.25/AA OR BETTER IN ACCORDANCE WITH ANSI B46.1-1962).
6. SPRING DATA:  
 WIRE DIAMETER: .068 (1,73) NOM.  
 SPRING FORCE: 2818 ± 2 LBS.  
 SPRING LENGTH: 10.02 (254,5)  
 NUMBERS SHOWN IN PARENTHESES ARE MILLIMETERS, TO BE USED FOR REFERENCE ONLY.
7. THE SPRING CYLINDRICAL ENVELOPE, INCLUDING INACTIVE COILS, SHALL MEET THE MAXIMUM DIAMETER WHEN COMPRESSED TO THE 10.02 INCH WORKING LENGTH. ALTERNATELY, THE ACTIVE COILS SHALL MEET A .408 INCH MAXIMUM DIA. WHEN IN THE FREE STATE. THE LENGTH OF THE GAUGE SHALL BE AT LEAST .05 INCHES AND PASSED OVER ALL COILS. THE FIRST AND LAST SPRING TURNS ARE ACCEPTABLE AT THE .410 INCH DIMENSION.

ESTIMATED WEIGHT: 44.0 gms

7182	7277	7062	7035
EXON NUCLEAR COMPANY, INC. RICHLAND, WASHINGTON 99352			
FUEL ROD PLENUM SPRING			
DADAMS			3-21-79
NONE			NONE
DWG. NO.			XN-NF-303,811
REV.			1 1 3

QTY	ITEM	DESCRIPTION	REMARKS
		<p>General Notes UNLESS OTHERWISE SPECIFIED</p> <ol style="list-style-type: none"> <li>TOLERANCES XX ± .015 XXX ± .005 ANGULAR ± °</li> <li>TOTAL DISH VOLUME SHALL BE <math>1.0 \pm 0.3\%</math></li> <li>DIMENSIONING AND TOLERANCING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5, 1973.</li> <li>CHIP AND CRACK CRITERIA PER APPLICABLE PROD. SPEC.</li> <li>SURFACE TEXTURE 125 AA 32 BETTER IN ACCORDANCE WITH ANSI B46.1, 1962Z. (DOES NOT APPLY TO DISHED AREA) TO BE USED FOR REFERENCE ONLY.</li> <li>NUMBERS SHOWN IN PARENTHESSES ARE MILLIMETERS.</li> <li>TAPER ON LAND AREA NOT TO EXCEED AN AVERAGE OF .002 WITH NO INWARD TAPER PERMITTED.</li> <li>MATERIAL: PER RELOAD FUEL ASSEMBLY CHARACTERISTIC SPEC.</li> <li>ENRICHMENT MARK OPTIONAL.</li> </ol>	
		<p>1 — 'D' = .4055 — HIGH ENRICHMENT  2 — 'D' = .4045 —</p> <p>2A — MED ENRICHMENT  2B — MED-LOW ENRICHMENT  2C — LOW ENRICHMENT  2D — LOW-LOW ENRICHMENT  2E — GADOLINIA  2F — MED-HIGH</p>	
		<p>DETAIL - 'Z'</p>	
		<p>7006</p> <p>WORK SHEET FOR PRODUCTION</p> <p>G. BOSSERMAN 11-21-80</p> <p>COMPONENT FOR</p> <p>S. F. GRAMS 11-20-80</p> <p>J. F. GRAMS 11-20-80</p> <p>DESIGNED BY</p> <p>D. ROYALS 4-23-80</p> <p>DATE</p> <p>M. J. OGDEN 4-7-80</p> <p>SCALE</p> <p>NONE</p> <p>EXXON NUCLEAR COMPANY, INC.  RICHLAND, WASHINGTON 99112</p> <p>FUEL PELLET</p> <p>XN-NF-304,052</p> <p>REVISED 1 REVISION</p>	

QTY	ITEM	DESCRIPTION	REMARKS
		<p><b>General Notes: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED</b></p> <ol style="list-style-type: none"> <li>1. TOLERANCES: .XX ± .015 .XXX ± .005 ANGULAR ± 5°</li> <li>2. NO DISHING ALLOWED</li> <li>3. DIMENSIONING AND TOLERANCING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5, 1973</li> <li>4. CHIP AND CRACK CRITERIA PER APPLICABLE PRODUCT SPEC.</li> <li>5. SURFACE TEXTURE 63 μA OR BETTER IN ACCORDANCE WITH ANSI B46.1, 1962 * (DOES NOT APPLY TO DISHED AREA)</li> <li>6. NUMBERS SHOWN IN PARENTHESES ARE MILLIMETERS, TO BE USED FOR REFERENCE ONLY.</li> <li>7. THEORETICAL DENSITY 94.5 ± .15%</li> </ol>	
		<p><b>DETAIL - 'Z'</b></p>	
		<p>FOR INFORMATION ON THIS DRAWING, REFER TO THE DRAWING SPECIFICATIONS IN THE PROJECT MANUAL.</p> <p>EXON NUCLEAR COMPANY, INC.        12000 W. 120th Street, Omaha, NE 68148</p>	
		<p>DATE: 4/23/80        DRAWN BY: [Signature]        CHECKED BY: [Signature]        APPROVED BY: [Signature]</p>	
		<p>SCALE: NONE</p>	
		<p>PROJECT: XN-NF-304,062</p>	
		<p>REV: 1 / 1 / 0</p>	



QTY	ITEM	DESCRIPTION	REMARKS
-----	------	-------------	---------

DIM 'D'		ENRICHMENT
.4045 (10.274)	.4040 (10.262)	
I A	2 A	GADOLINIA HIGH
T B	2 B	GADOLINIA MED - HIGH
E C	2 C	GADOLINIA MED
M D	2 D	GADOLINIA MED-LOW
	2 E	GADOLINIA LOW

**General Notes: UNLESS OTHERWISE SPECIFIED**

- TOLERANCES: .XX ± .015 .XXX ± .005 ANGULAR ± 5°
- TOTAL DISH VOLUME SHALL BE 1.0% ± 0.3%.
- DIMENSIONING AND TOLERANCING IN ACCORDANCE WITH ANSI Y14.5, 1973
- CHIP AND CRACK CRITERIA PER APPLICABLE PRODUCT SPEC.
- SURFACE TEXTURE 125/4A OR BETTER IN ACCORDANCE WITH ANSI B46.1, 1962 (DOES NOT APPLY TO DISHED AREA).
- NUMBERS SHOWN IN PARENTHESES ARE MILLIMETERS, TO BE USED FOR REFERENCE ONLY.
- TAPER ON LAND AREA NOT TO EXCEED AN AVERAGE OF .002 WITH NO OUTWARD TAPER.
- ENRICHMENT MARK OPTIONAL.
- MATERIAL: SEE APPLICABLE FUEL CHARACTERISTIC SPEC.
- PELLET DENSITY AND ENRICHMENT PER APPLICABLE RELOAD CHARACTERISTICS SPECIFICATION.

EXON NUCLEAR COMPANY, INC.  
 RICHLAND WASHINGTON 20255  
 DRAWING NO. XN-NF-304,246  
 SHEET 1 OF 5  
 DATE 11-12-80  
 SCALE NONE  
 REVISIONS  
 5 REVISED TABLE  
 4 ADDED NOTE 10  
 3 ADDED TABLE AND ITEM 2  
 2 ADDED DIM .077 MAX .055 MIN  
 1 5, 7 WAS 8  
 9 ADDED 6) CALLOUT 6) REVISED NOTE