

(口)A 付属資料 3

模擬燃料集合体の代表性についての検討

1. はじめに

本付属資料では、本輸送容器の収納物である燃料集合体と落下試験時の模擬燃料集合体を比較し、落下試験評価の代表性を説明する。特に、CTU に対する落下試験時に模擬燃料棒の下部端栓溶接部に発生した亀裂についての発生メカニズムを考察し、集合体の構造の違いから NFI 製燃料を落下させた場合の亀裂の大きさは模擬燃料集合体より小さくなることを確認する。

2. 燃料集合体および模擬燃料集合体の基本構造について

燃料集合体と模擬燃料集合体の仕様を表(口)A 付 3- 1 に示す。なお、模擬燃料集合体の重量に関しては、各落下試験に用いられた計 5 体の模擬燃料集合体の中で、最も重量が小さいものを記載する。燃料集合体及び模擬燃料集合体の構造図を図(口)A 付 3- 1～図(口)A 付 3- 5 に示す。また、燃料集合体及び模擬燃料集合体の下部ノズルの概略図を図(口)A 付 3- 6、図(口)A 付 3- 7 に示す。

模擬燃料集合体は燃料集合体と比べて全長が長く、集合体長さは約 mm、燃料棒長さは約 mm 長くなっている。集合体長さの違いにより支持格子数が多くなっており、支持格子間距離（最大値）は模擬燃料集合体の方が小さくなっている。

下部ノズルの長さは模擬燃料集合体が燃料集合体の約 2 倍あり、図(口)A 付 3- 6 および図(口)A 付 3- 7 に示すように下部ノズルの脚部が模擬燃料集合体は長くなっている。

燃料集合体の設計最大重量および模擬燃料集合体の最小重量を比較した結果、模擬燃料集合体の方が 17×17 型タイプ 57 より kg 重かった。

被覆管肉厚は模擬燃料集合体と 17×17 型タイプ 57 でほぼ同等であった。下部端栓長さは模擬燃料集合体の方が長く、燃料棒端部から下部端栓溶接部までの長さは約 mm 長くなっている。

燃料棒重量は、模擬燃料集合体と比較して 14×14 型の方が重くなっている。

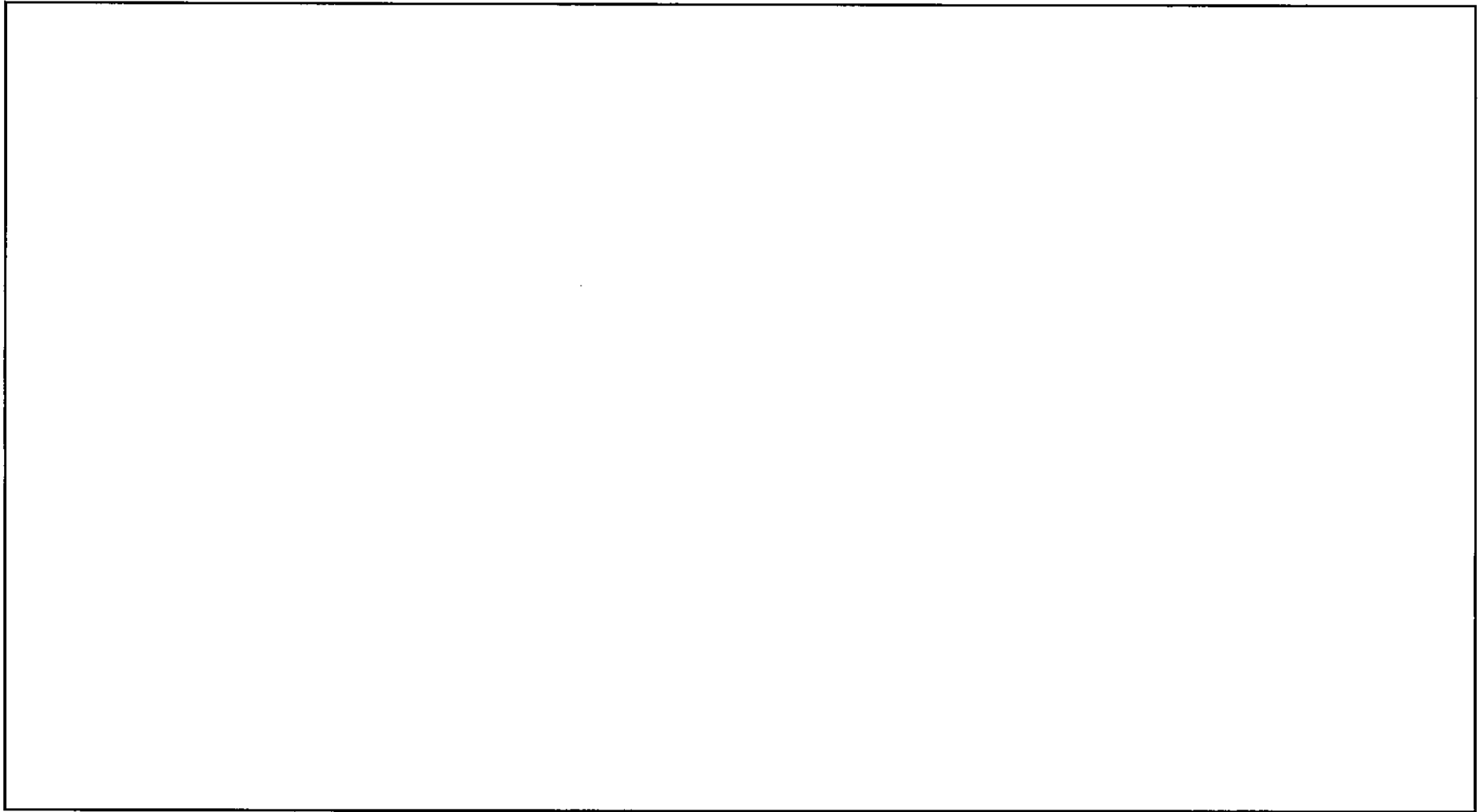
表(口)A付 3-1 燃料集合体仕様

型式	燃料集合体				模擬燃料集合体				
	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57					
燃料集合体外寸 (mm)	197	214	214	214					
燃料集合体長さ (mm)	4,057	4,057	4,055	4,055					
支持格子数	7 もしくは 8	7	9	9					
支持格子間距離 の最大値(mm)									
下部ノズル長さ (mm)									
集合体重量 ^{※1} (kg)									
燃料棒長さ(mm)	3,856 もしくは 3,866	3,856 もし くは 3,866	3,852	3,852 もしく は 3,862					
被覆管肉厚(mm)	0.66	0.66	0.64	0.57					
下部端栓長さ ^{※2} (mm)									
燃料棒重量 ^{※3} (kg)									

※1 燃料集合体は設計上の最大重量、模擬燃料集合体は各落下試験に用いられた計 5 体の模
擬燃料集合体の中の最小重量を記載

※2 下部端栓端部から端栓溶接部までの長さを記載

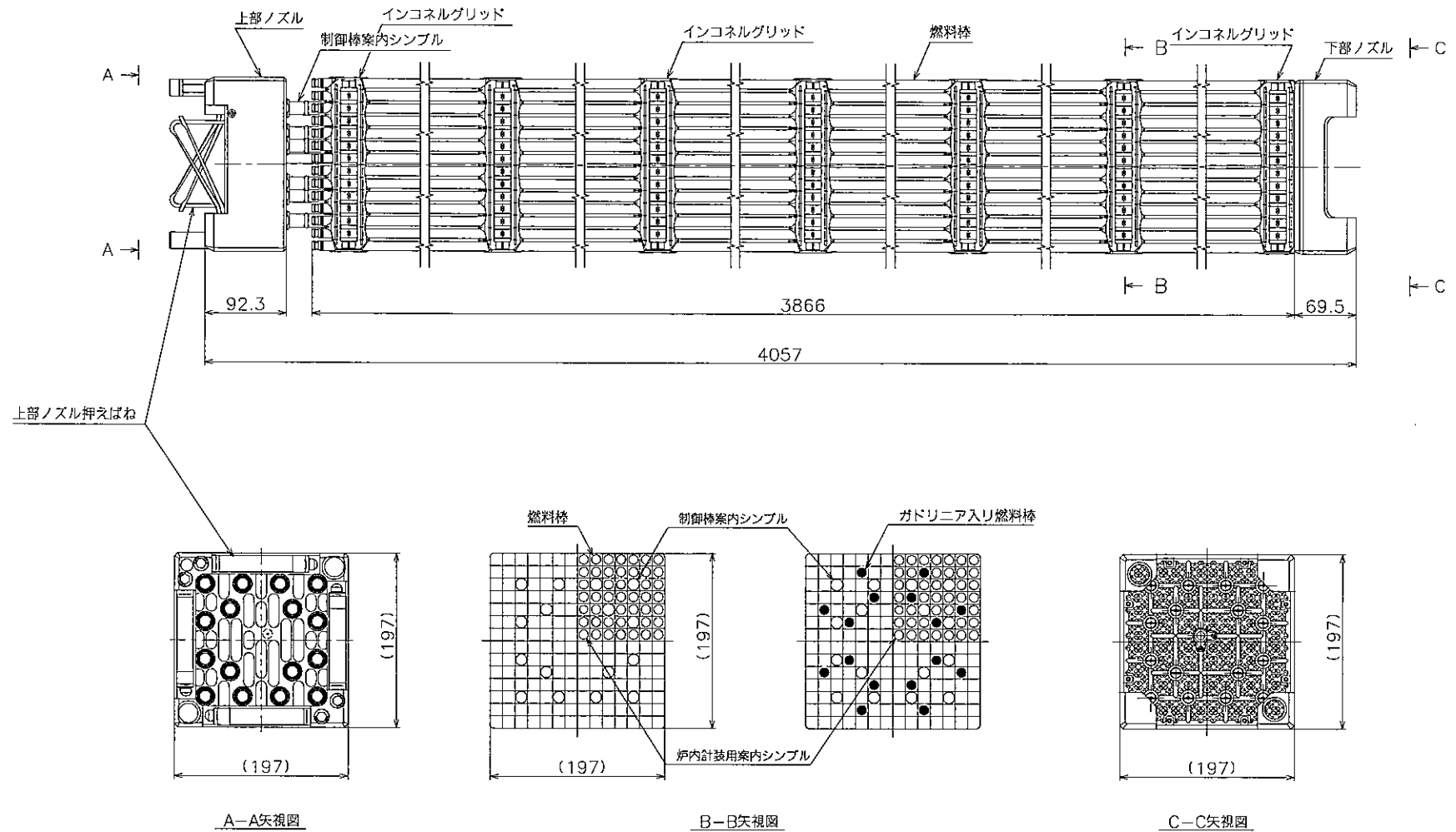
※3 二酸化ウラン燃料棒の重量を記載



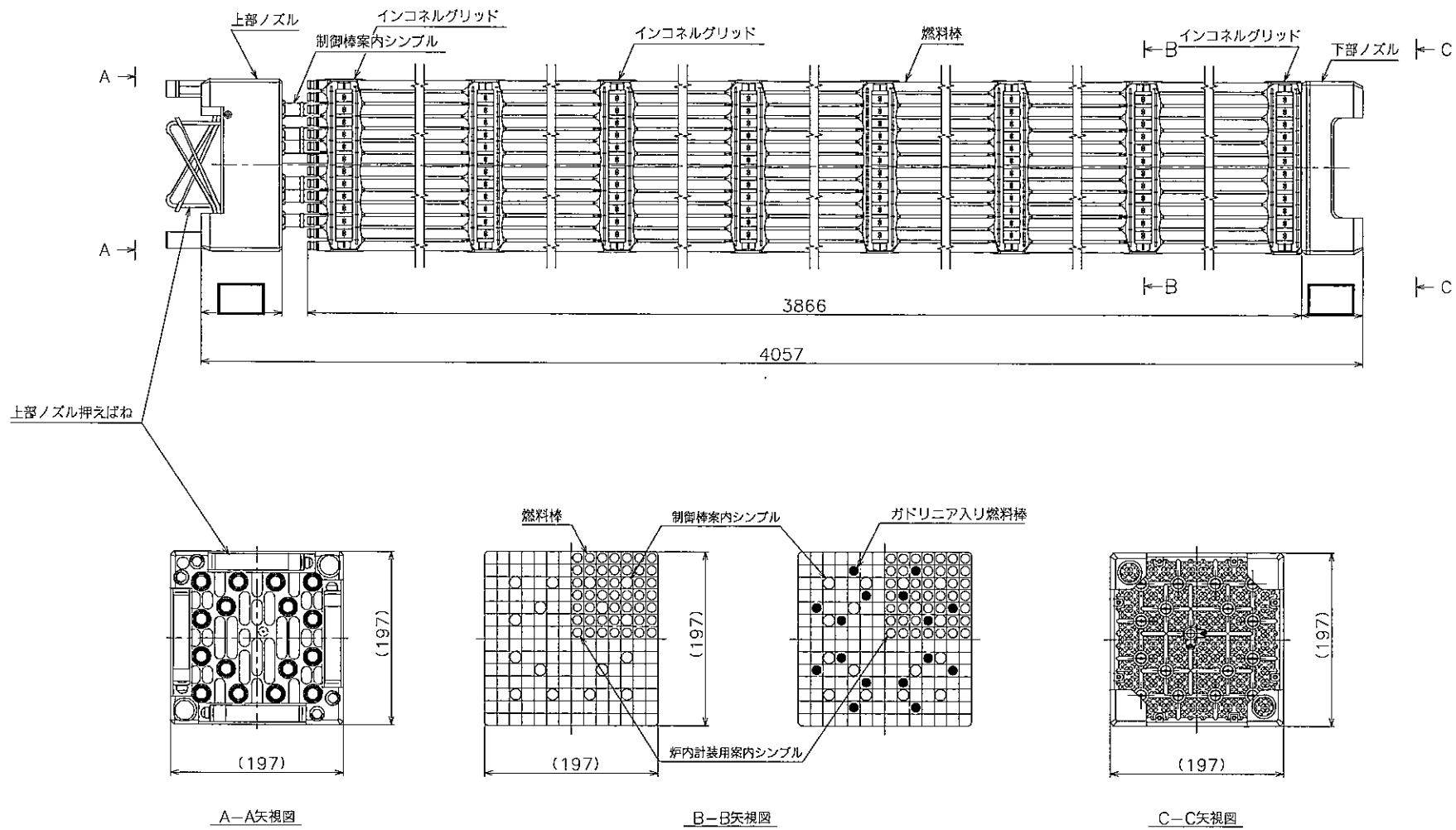
図(口)A付 3-1 17×17 型模擬燃料集合体構造図

※実際の落下試験に用いられた模擬燃料集合体には制御棒集合体は挿入されていないが、本図面では挿入された状態を描画している。

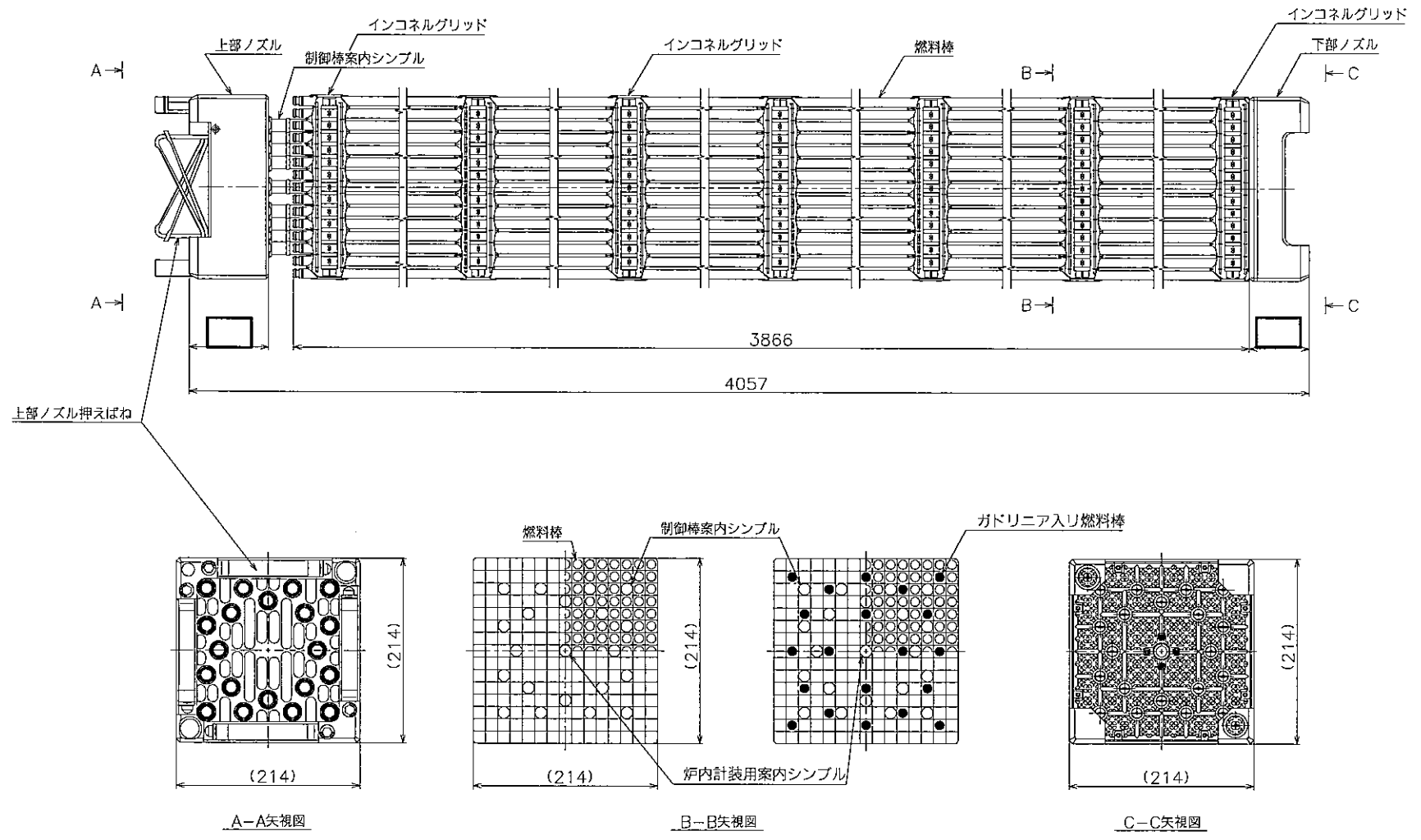
(口)A付属 3-5



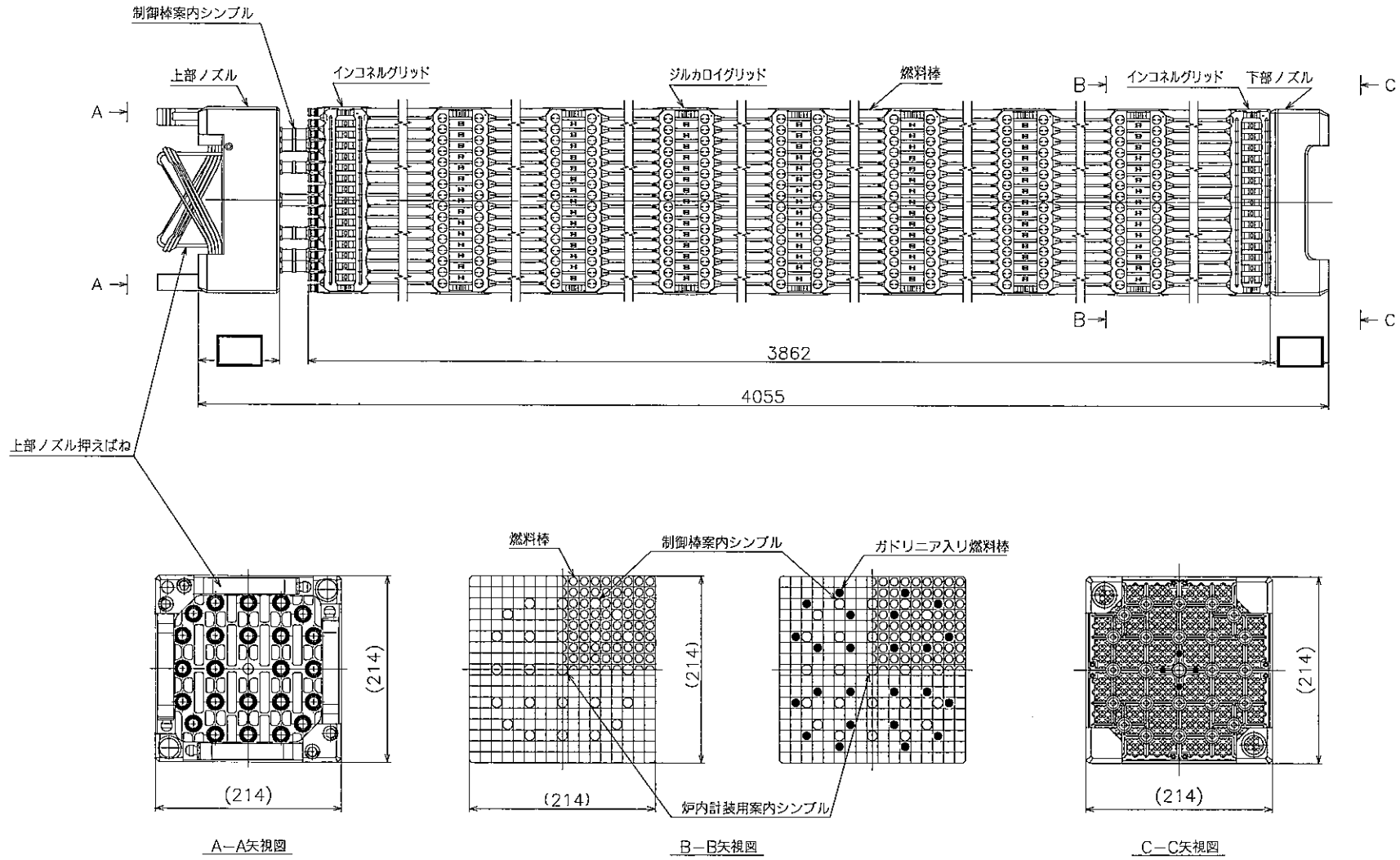
図(口)A付 3-2 14×14-7グリッド型燃料集合体構造図



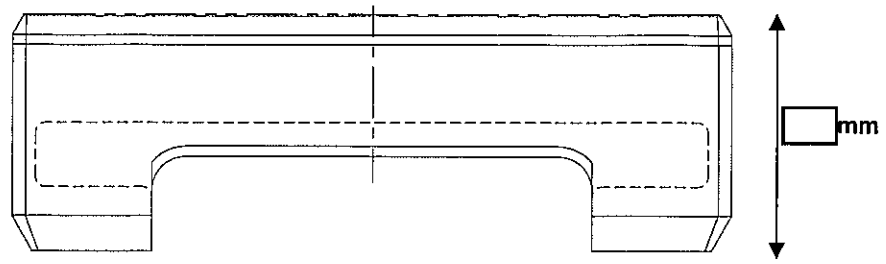
図(ロ)A付 3-3 14×14-8グリッド型燃料集合体構造図



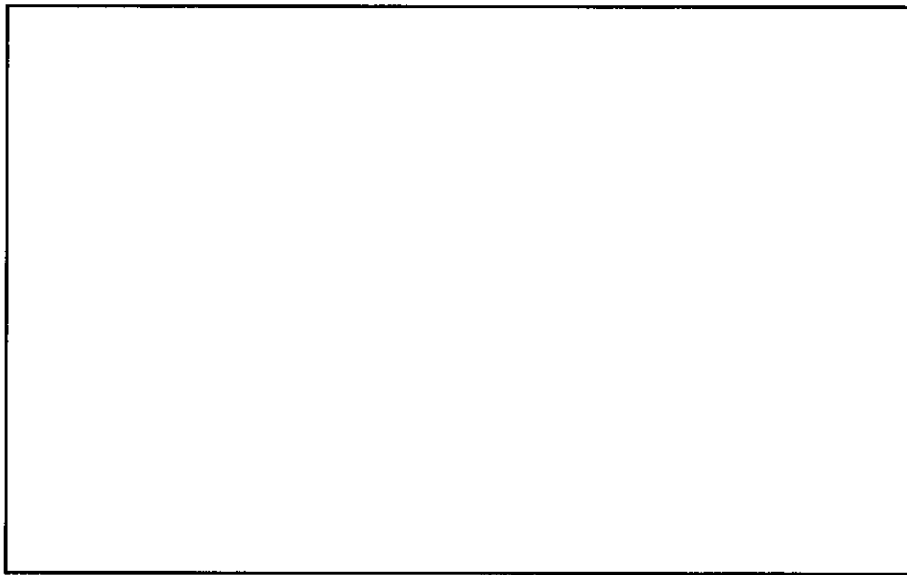
図(口)A付 3-4 15×15型燃料集合体構造図



図(口)A付 3-5 17×17型燃料集合体構造図



図(口)A 付 3-6 17×17 型タイプ 57 の下部ノズル概略図



図(口)A 付 3-7 模擬燃料集合体の下部ノズル概略図

3. 燃料集合体と模擬燃料集合体の材質について

燃料集合体と模擬燃料集合体の材質を表(ロ)A付 3-2 に示す。

密封境界である被覆管は、燃料集合体はジルカロイ-4 被覆管と NDA 被覆管、模擬燃料集合体は [] 被覆管である。各合金の組成を表(ロ)A付 3-3 に示す。いずれの合金もジルコニウムを母材とした合金となっている。被覆管の引張試験結果を図(ロ)A付 3-8～図(ロ)A付 3-10 に示す。 [] がわかる。

また燃料集合体の骨子を形成する部材は、制御棒案内管、計装用案内管、支持格子、上部ノズル、下部ノズルである。

制御棒案内管および計装用案内管は、燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] [] であり、同等の機械特性をもつ。最上部支持格子、最下部支持格子および P グリッドは、燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] である。中間部支持格子の材質は、 [] [] と [] 合金の 2 種類存在し、それらの機械特性は大きく異なる。機械特性は [] [] の方が低い¹ことから、模擬燃料集合体は保守的な設計になっているといえる。上部ノズルおよび下部ノズルは、燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] である。

¹ 室温の耐力規格値は、インコネルが 1034 MPa (AMS5596)、ジルカロイ-4 が 300MPa (ASTM B352 R60804)。

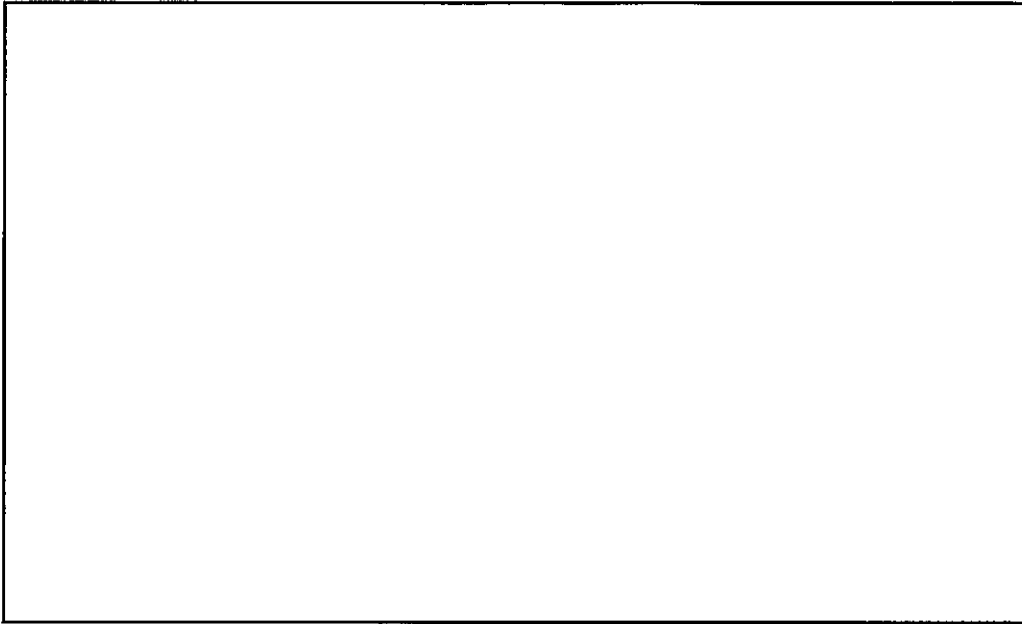
表(ロ)A付3-2 燃料集合体の材質一覧

型式	燃料集合体				模擬燃料集合体
	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57	
被覆管	ジルカロイ-4 被覆管 もしくは NDA 被覆管	ジルカロイ-4 被覆管 もしくは NDA 被覆管	ジルカロイ-4 被覆管	ジルカロイ-4 被覆管 もしくは NDA 被覆管	
制御棒案内管 計装用案内管	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	ジルカロイ-4	
中間支持格子	インコネル	インコネル	インコネル	インコネル もしくは ジルカロイ-4	
最上部支持格子 最下部支持格子 P-グリッド※	インコネル	インコネル	インコネル	インコネル	
上部ノズル 下部ノズル	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	ステンレス鋼	
ペレット	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	二酸化ウラン 又は Gd 入り二酸化ウラン	

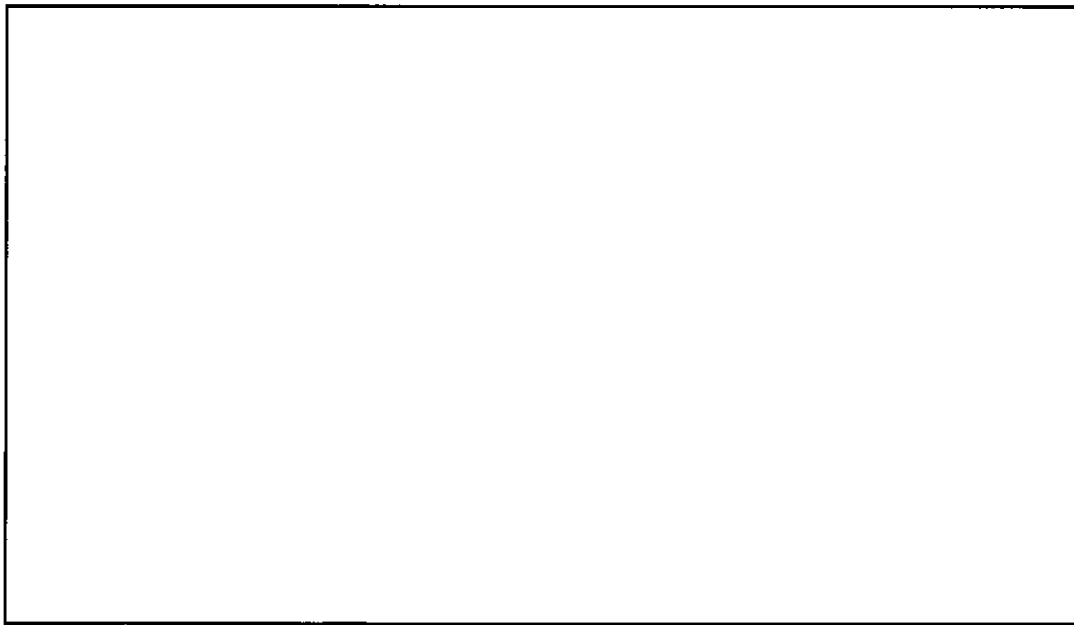
※模擬燃料集合体のみ

表(ロ)A付3-3 ジルコニウム合金の組成一覧

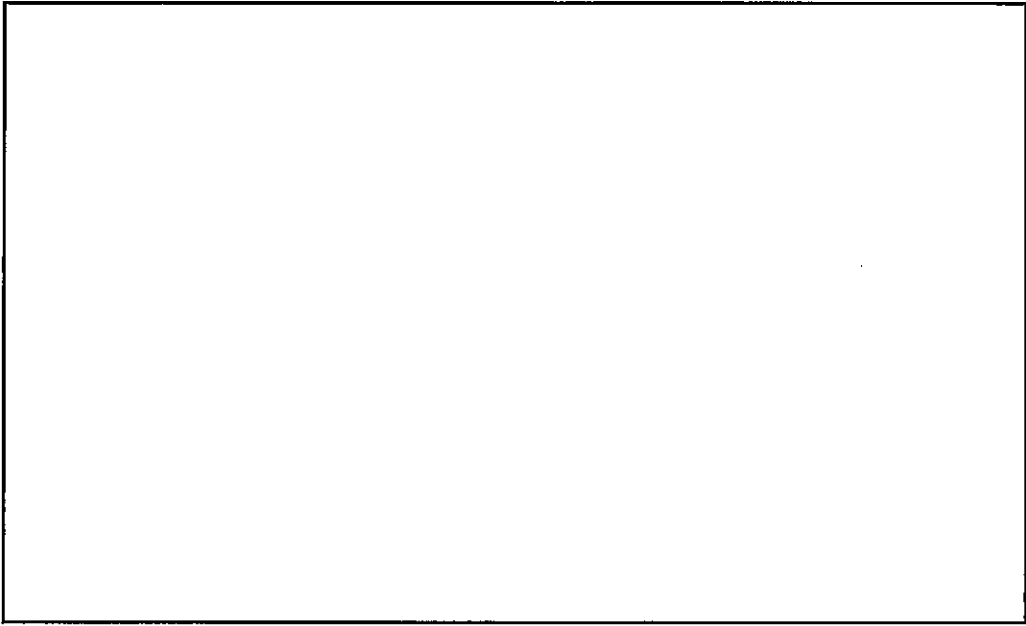
	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	Zr
NDA	0.90-1.15	0.24-0.30	0.13-0.19	—	0.08-0.14	0.007- 0.014	残り
ジルカロイ-4 (NFI の実績)	約 1.3	約 0.2	約 0.1	約 0.3	—	—	残り



図(口)A 付 3-8 被覆管の耐力温度依存性



図(口)A 付 3-9 被覆管の引張強さ温度依存性



図(口)A 付 3- 10 被覆管の破断伸び温度依存性

4. CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂の発生メカニズムについて

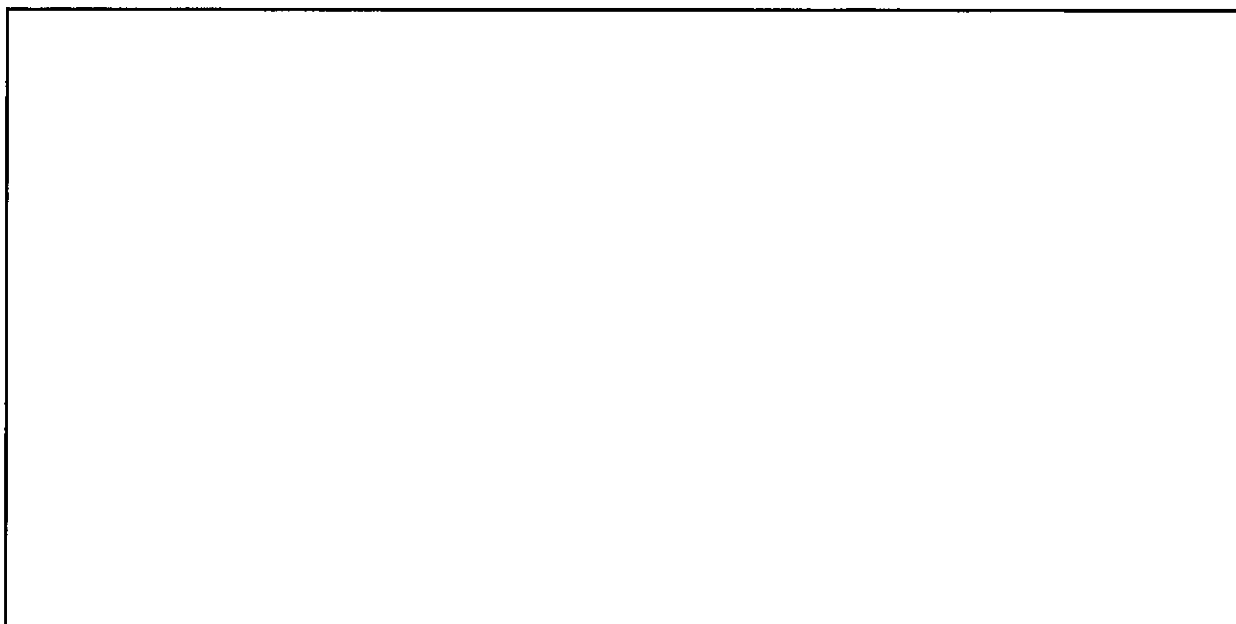
(口)A 付属資料 1 にて述べたように、CTU 落下試験時に燃料棒 20 本に対して亀裂が発生している。亀裂の発生した燃料棒は、いずれも集合体の四隅にある燃料棒であった（図(口)A 付 1-3 参照）。特定の場所にもみ燃料棒の亀裂が確認されたことから、単純な燃料棒と下部ノズル上面の衝突による燃料棒の圧縮や座屈が原因ではないといえる。

また、燃料棒には曲がりが生じ、燃料棒の亀裂はすべて下部端栓溶接部発生している（写真(口)A 付 1-33）。

CTU 落下試験後の下部ノズルの外観を写真(口)A 付 3-1 に示す。下部ノズルの脚部が座屈し、それに伴い下部ノズル上面も大きく湾曲変形し、四隅が大きく傾いていることがわかる。

以上のことから、CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂の発生メカニズムは以下の通りであると考えられる。

- ・落下の衝撃で下部ノズルの脚が座屈し、下部ノズル上面の四隅に大きな湾曲変形が発生する。
- ・下部ノズルの四隅に発生した曲がりによって、下部ノズルと燃料棒が接触し、集合体の四隅にある燃料棒が燃料集合体中心方向に変位させられる。
- ・上記の強制変位により、下部端栓と被覆管の境目である下部端栓溶接部に曲げ応力が集中し、溶接部に亀裂が発生する。



写真(口)A 付 3-1 CTU 落下試験後の下部ノズル

5. 模擬燃料集合体の代表性について

4.で述べたように、亀裂の発生した燃料棒位置や下部ノズルの変形挙動から考えて、燃料棒の亀裂は、変形した下部ノズルと集合体の四隅にある燃料棒と接触し、燃料棒に曲げ応力がかかったことが原因で発生したと考えられる。亀裂の発生メカニズムを考慮し、構造の違いから、燃料集合体と模擬燃料集合体のどちらに亀裂が発生しやすいか考察した。その結果を表(口)A付 3-4 に示す。

下部ノズル長さや集合体重量の違いから、模擬燃料集合体の方が下部ノズルの変形量は大きくなると考えられる。また、下部端栓端部から溶接部までの長さの違いから、模擬燃料集合体の方が溶接部に発生する曲げ応力は大きくなると考えられる。

以上のように、集合体の構造の違いから検討した結果、模擬燃料集合体の方がより燃料棒に発生する曲げ応力が大きくなることは明らかであるため、NFI 製燃料を落下させた場合の亀裂の大きさは模擬燃料集合体よりも小さくなる。

表(ロ)A 付 3-4 燃料集合体の構造の違いと燃料棒亀裂への影響

	燃料集合体	模擬燃料集合体	燃料棒亀裂への影響
燃料集合体外寸 (mm)	214 (15,17 型)		
燃料集合体長さ (mm)	4,057 (14, 15 型)		
支持格子間距離の最大値 (mm)			
下部ノズル長さ (mm)			
集合体重量 (kg)			
燃料棒長さ (mm)	3,866 (14, 15 型の一部)		
被覆管肉厚 (mm)	0.57 (17 型タイプ 57)		
下部端栓長さ (mm)	10.0		
燃料棒重量 (kg)	3.1 (14, 15 型)		

6. まとめ

本輸送容器の収納物である燃料集合体と落下試験時の模擬燃料集合体を比較し、落下試験評価の代表性を確認した。

重量は模擬燃料集合体の方が約 重かった。構造は集合体長さ、支持格子数の違いを除き、大きな違いはなかった。材質は、模擬燃料集合体の各部材は、燃料集合体と比較して同等もしくは保守的な設計になっていた。

亀裂の発生した燃料棒の位置や下部ノズルの変形挙動から、CTU 落下試験によって発生した燃料棒亀裂は、下部ノズルに変形が生じて集合体の四隅にある燃料棒と接触し、燃料棒曲げが発生したことが原因で発生したことがわかった。亀裂の発生メカニズムから、集合体の構造の違いにより、燃料集合体と模擬燃料集合体のどちらに亀裂が発生しやすいか考察したところ、模擬燃料集合体の方が亀裂が発生しやすい構造であることがわかった。

以上のことから、模擬燃料集合体を用いた評価は保守的な評価となっており、NFI 製燃料を落下させた場合の亀裂の大きさは模擬燃料集合体より小さくなる。