

(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 NFI 製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

NFI 製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。NFI 製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、NFI 製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 NFI 製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。NFI 製燃料集合体は、最下部支持格子が下部ノズルに接触しており、そこから第 2 支持格子までの距離は mm となっている。模擬燃料集合体は、最下部支持格子から第 2 支持格子までの距離は mm である。

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 NFI 製燃料集合体の約 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。

NFI 製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 NFI 製燃料集合体の 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

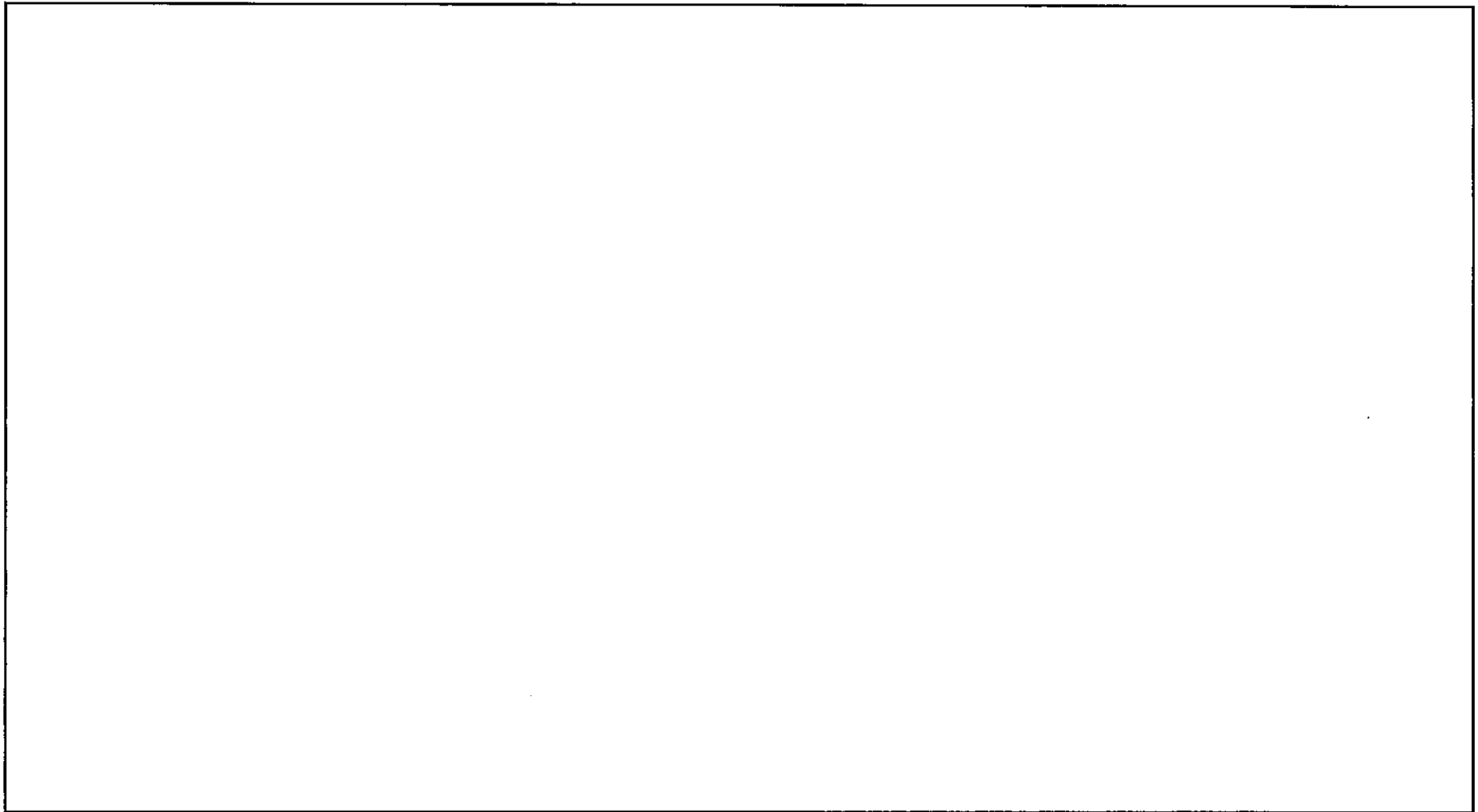
	NFI 製燃料集合体				模擬燃料集合体
型式	14×14 型	15×15 型	17×17 型 タイプ 64	17×17 型 タイプ 57	17×17 型 14 フィート燃料
燃料集合体外寸 (mm)	197	214	214	214	
燃料集合体長さ (mm)	4,057	4,057	4,055	4,055	
支持格子数	7 もしくは 8	7	9	9	
最下部スパン (mm)					
下部ノズル長さ (mm)					
集合体重量 ^{※1} (kg)					
燃料棒長さ (mm)	3,856 もしくは 3,866	3,856 もしくは 3,866	3,852	3,852 もしくは 3,862	
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 NFI 製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

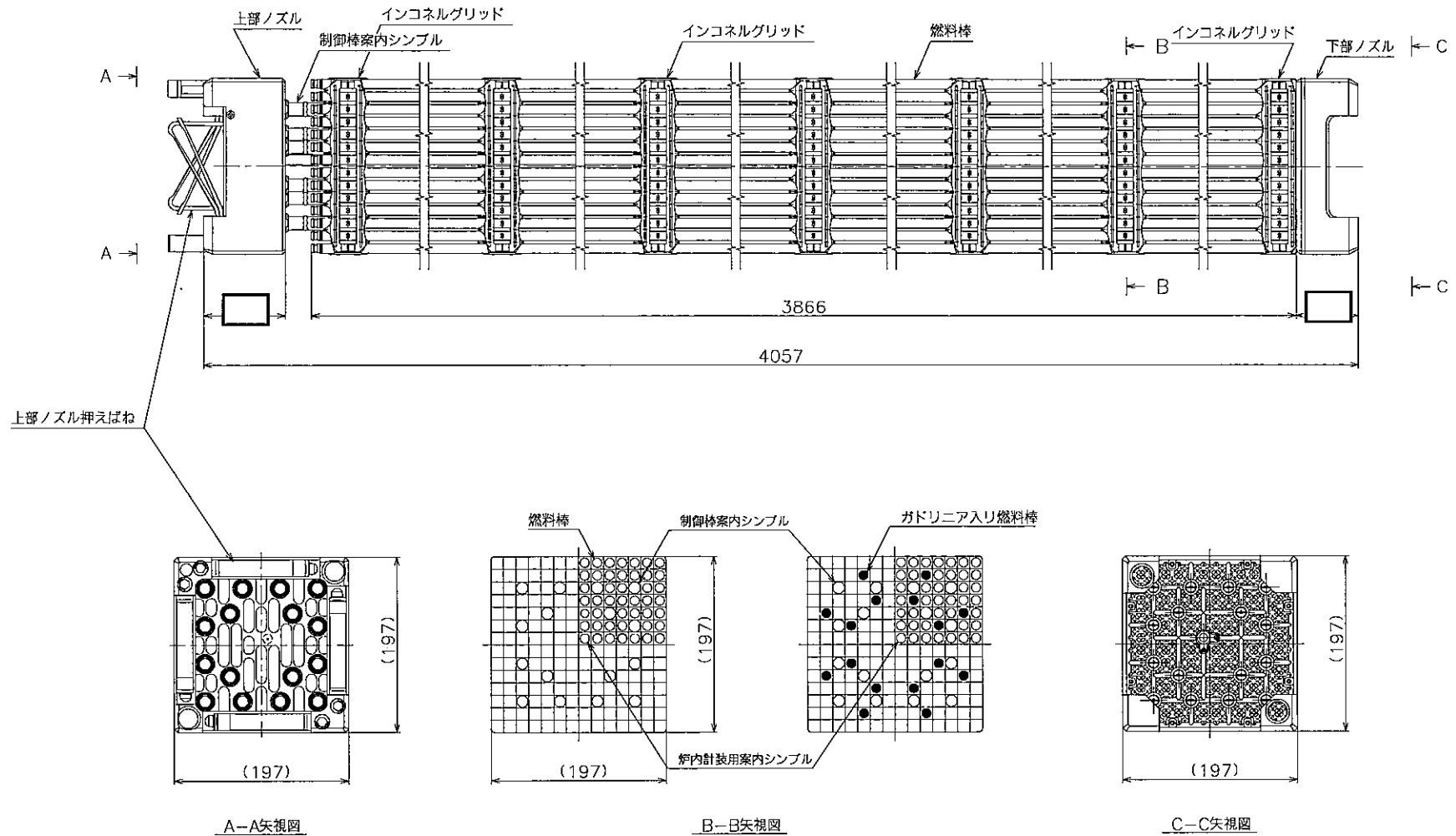
※4 Prototype1 および 2 については図(口)A 付 3- 1 の通り。QTU1,2 および CTU については図(口)A 付 3- 1 から P-グリッドを除いた設計の燃料集合体で落下試験が実施された。



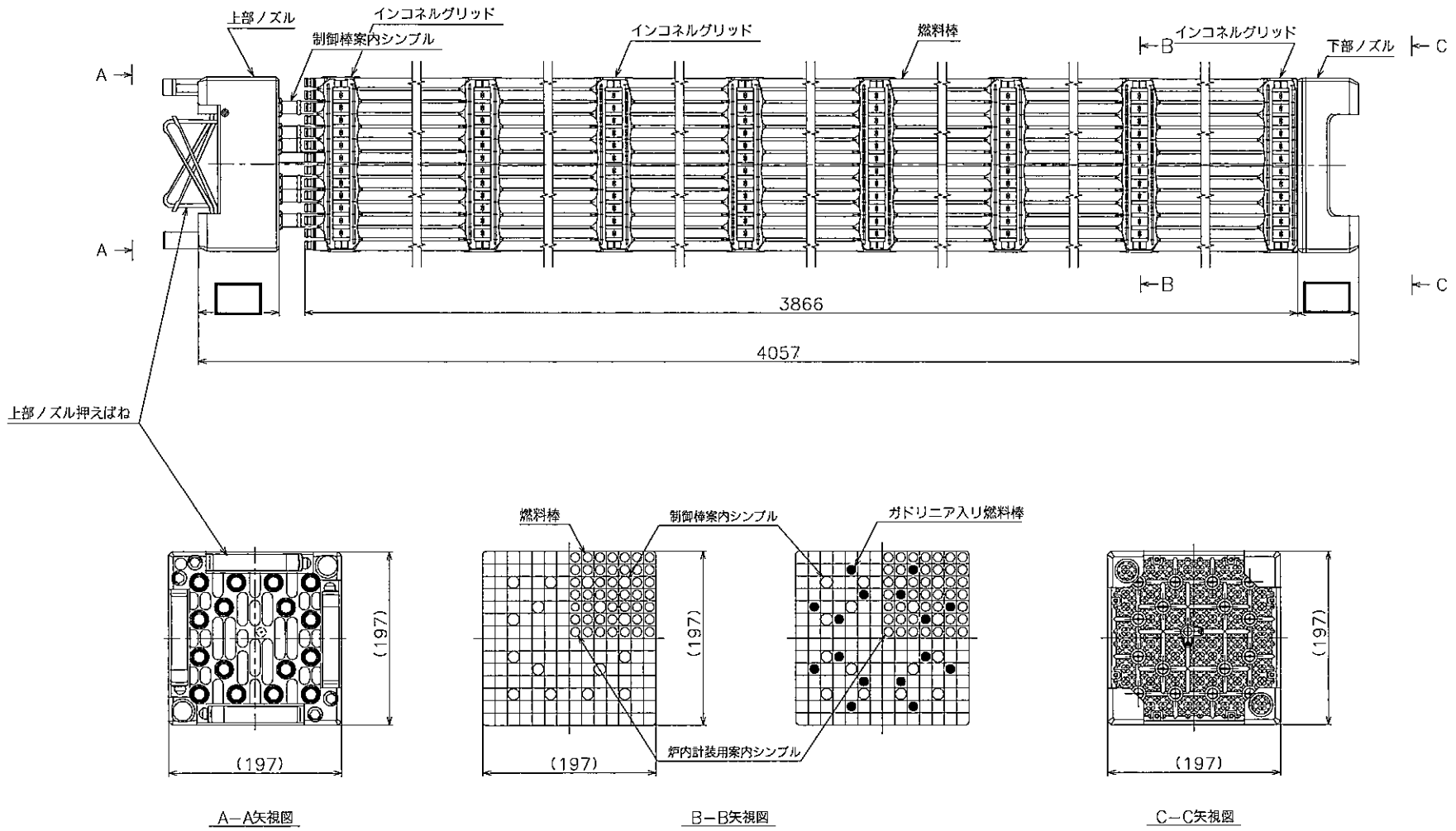
図(口)A付 3-1 17×17 型模擬燃料集合体構造図

※1 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。



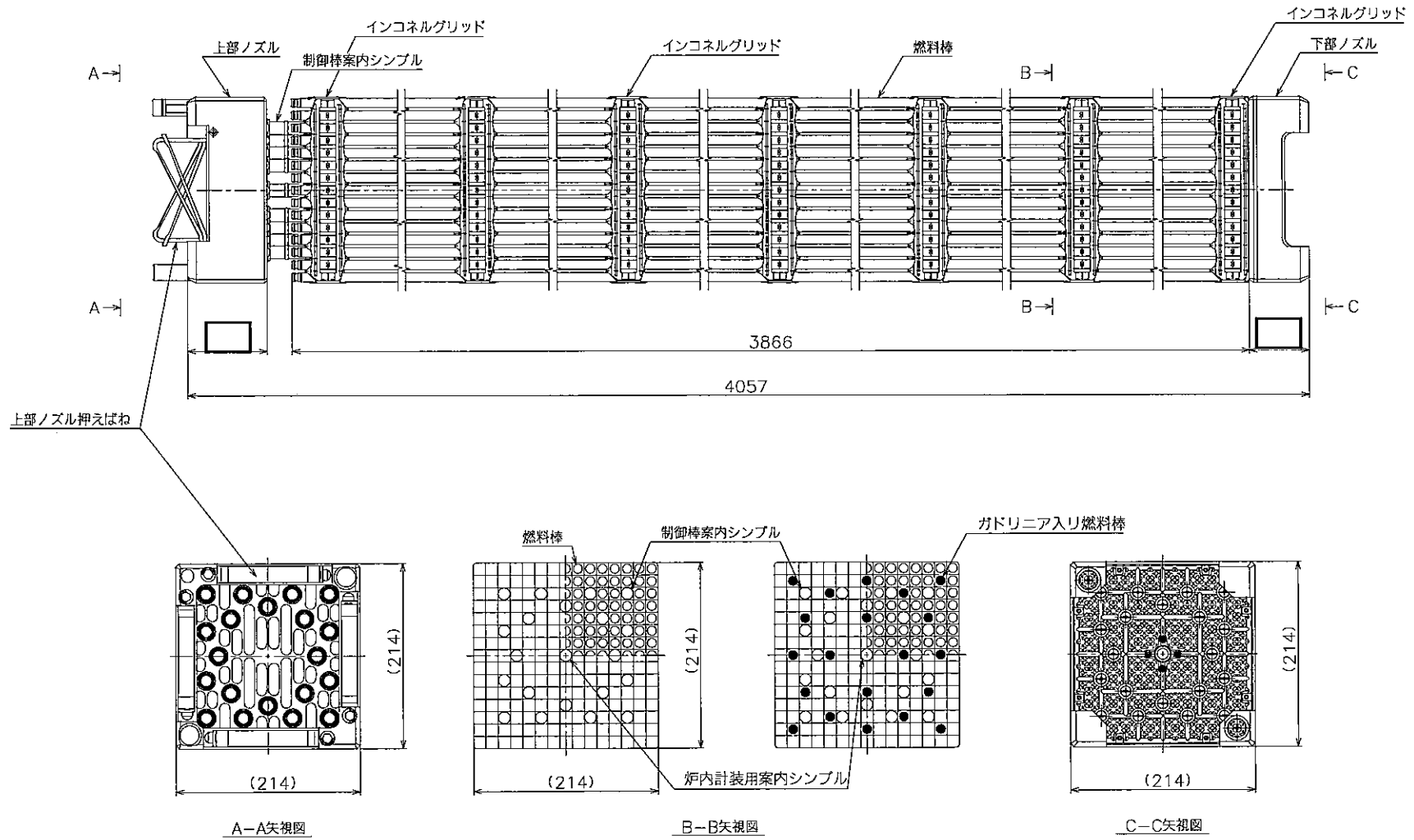


図(ロ)A付 3-2 14×14-7グリッド型燃料集合体構造図

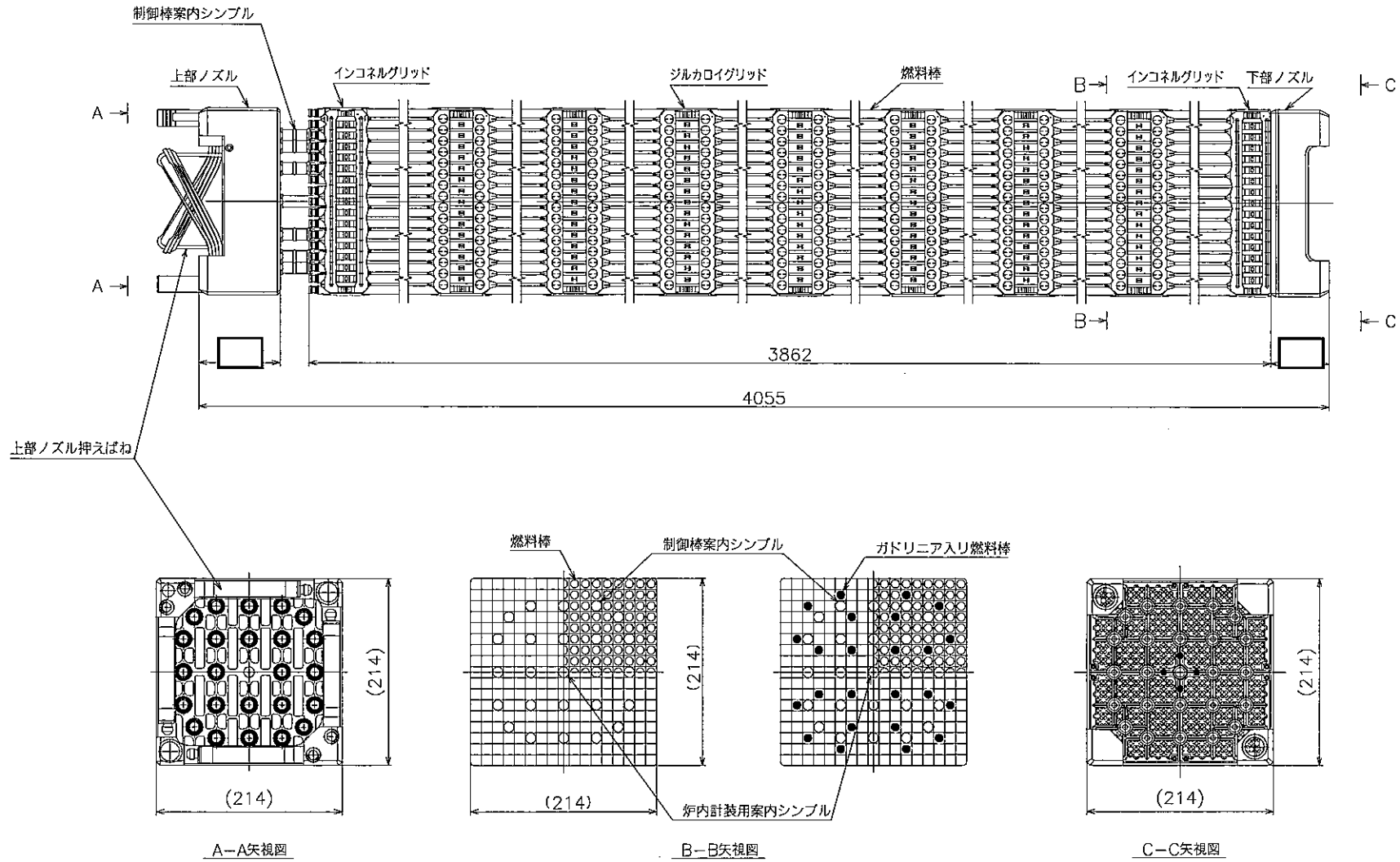


(口)A付属 3-7

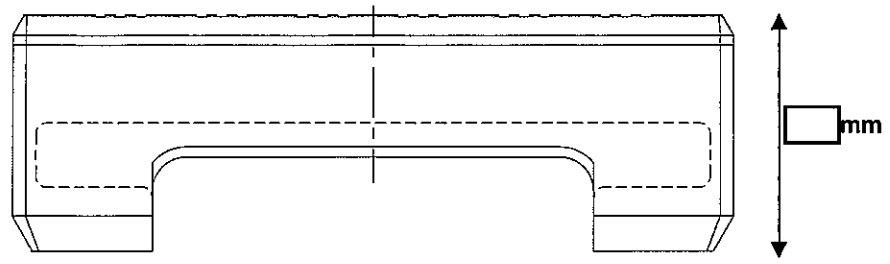
図(口)A付 3-3 14×14-8 グリッド型燃料集合体構造図



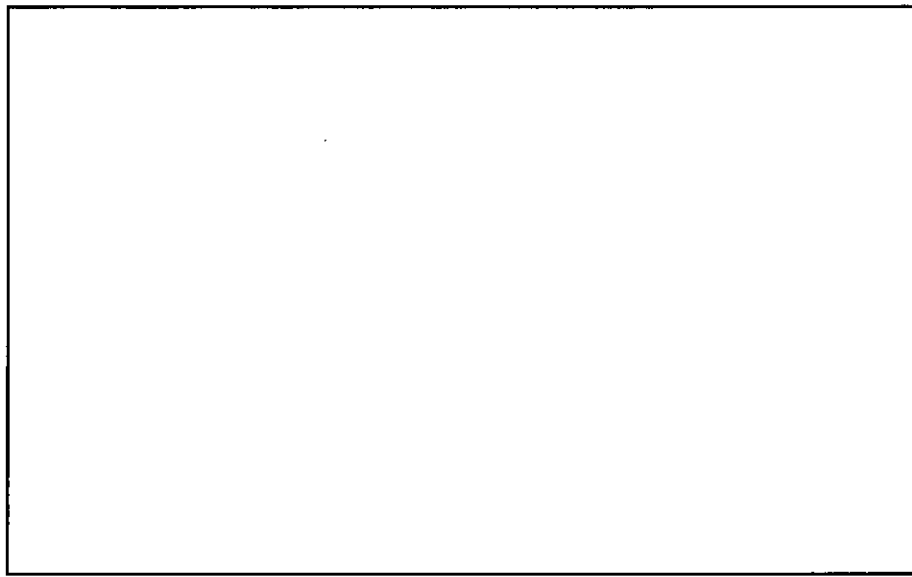
図(口)A付3-4 15×15型燃料集合体構造図



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. NFI 製燃料集合体と模擬燃料集合体の材質について

NFI 製燃料集合体と模擬燃料集合体の材質を表(口)A付 3-2 に示す。

密封境界である被覆管は、NFI 製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(口)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(口)A付 3-8～図(口)A付 3-10 に示す。 [] がわかる。

また NFI 製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、NFI 製燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] [] 合金であり、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、NFI 製燃料集合体、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、 [] 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、NFI 製燃料集合体、模擬燃料集合体のいずれも [] [] である。

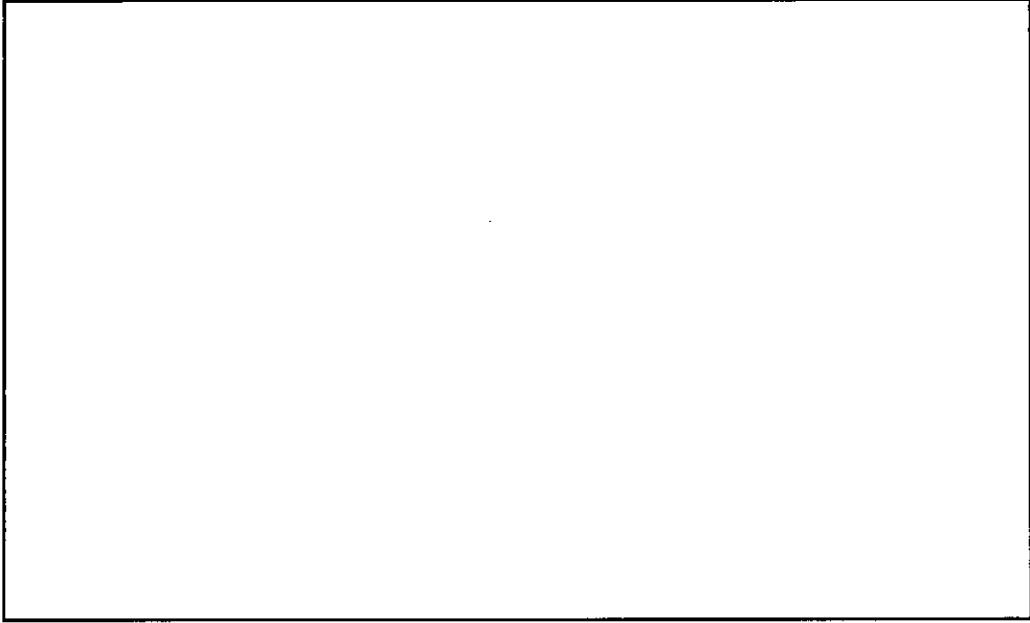
表(口)A 付 3-2 燃料集合体の材質一覧

型式	NFI 製燃料集合体				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	

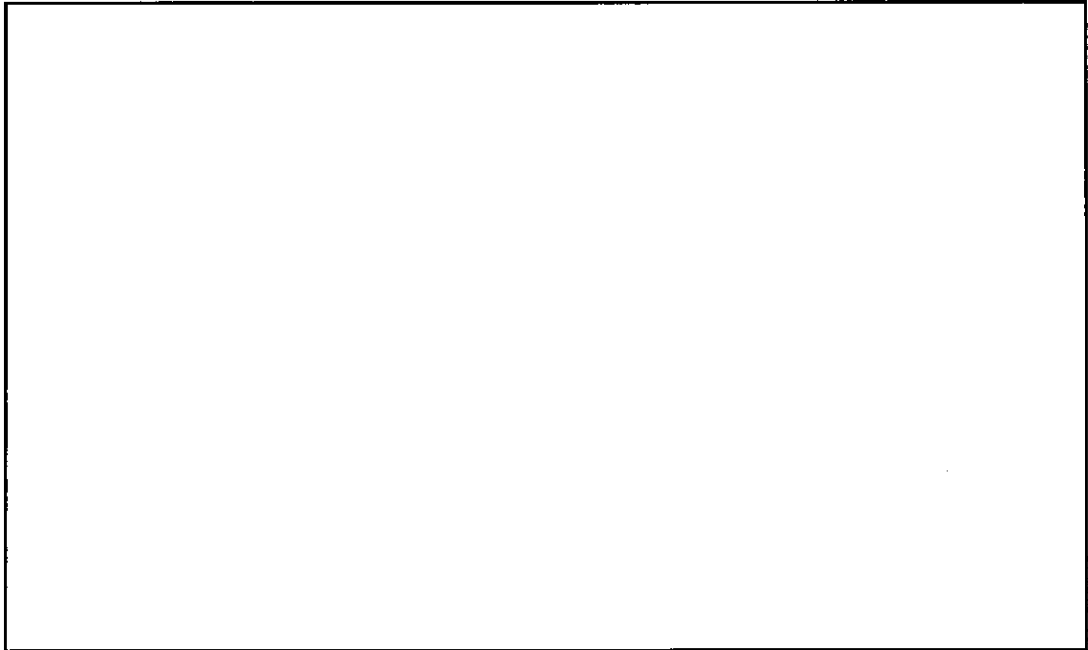
※模擬燃料集合体のみ

表(口)A 付 3-3 ジルコニウム合金の組成一覧

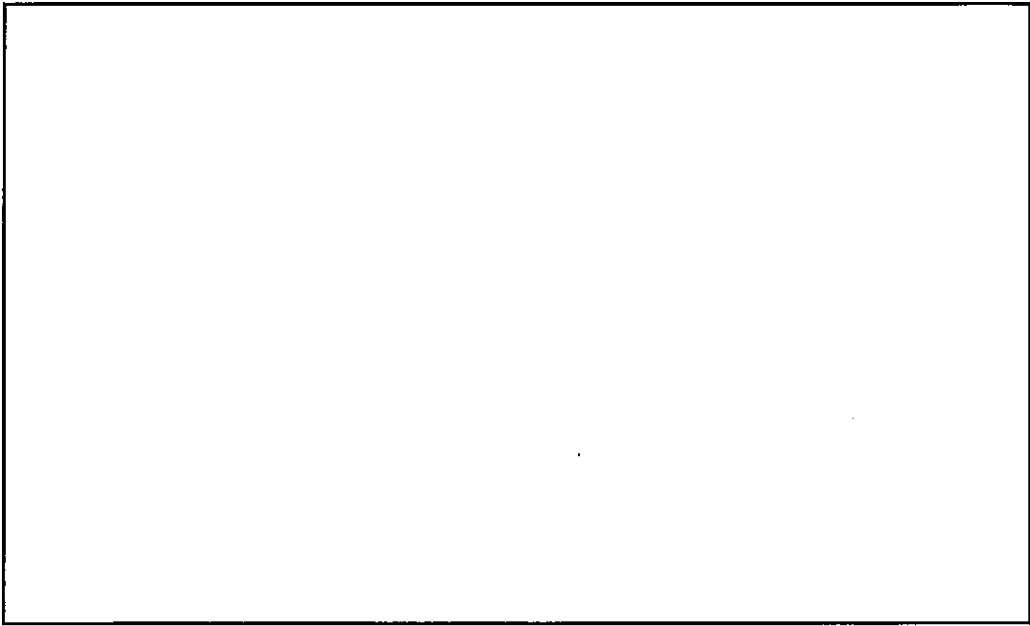
	Sn	Fe	Cr	Fe+Cr	Nb	Ni	Zr
NDA	0.90-1.15	0.24-0.30	0.13-0.19	—	0.08-0.14	0.007- 0.014	残り
ジルカロイ-4 (NFI の実績)	約 1.3	約 0.2	約 0.1	約 0.3	—	—	残り



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

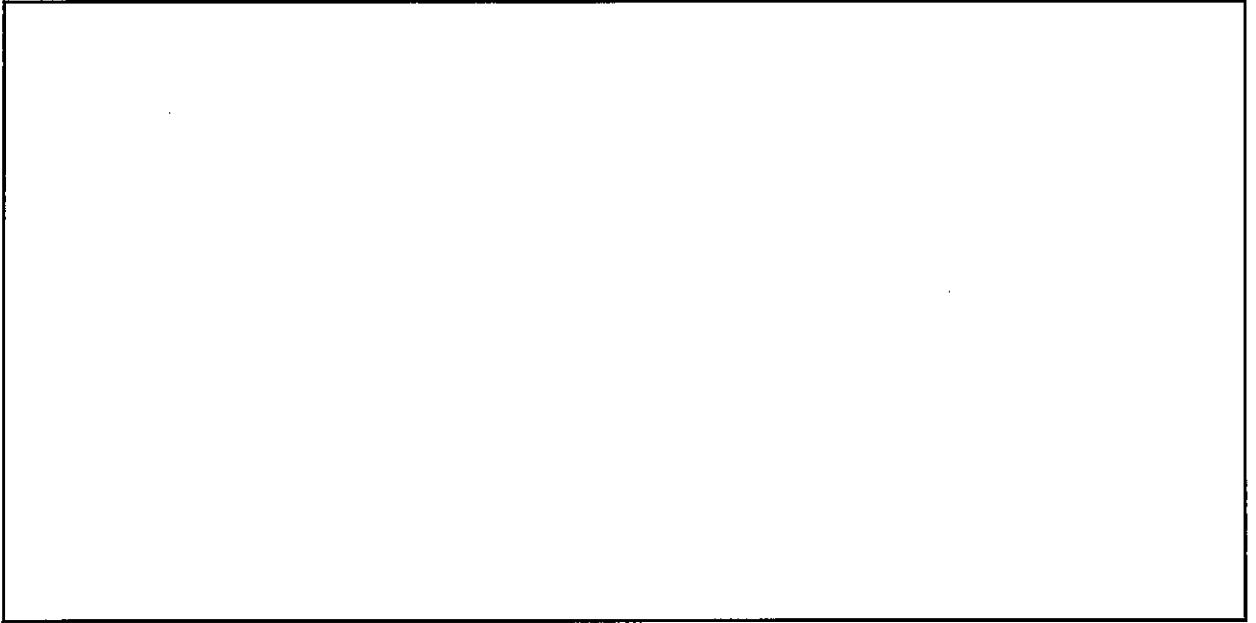
(口)A 付属資料 1 にて述べたように、CTU 落下試験時に燃料棒 20 本に対して亀裂が発生している。亀裂の発生した燃料棒は、いずれも集合体の四隅にある燃料棒であった (図 (口)A 付 1-3 参照)。特定の場所にもみ燃料棒の亀裂が確認されたことから、単純な燃料棒と下部ノズル上面の衝突による破損が原因ではないと考えられる。

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で発生していた (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。
- ・下部ノズルが椀型の変形をすることで落下時の衝撃を吸収する。それにより、中央部の燃料棒が受ける衝撃荷重は小さくなる方向。
- ・四隅については、中央部と比較して四隅は脚に近いので、変形による衝撃吸収効果は小さく、四隅の燃料棒に生じる衝撃荷重は中央部より大きくなる。また、下部ノズルが内側に折れ曲がることにより、燃料棒が燃料集合体中心方向に変位させられる。その中で、中実の下部端栓と中空の被覆管の境目となる下部端栓溶接部に曲げ応力が集中する。
- ・CTU 落下試験時に発生した燃料棒亀裂は四隅に集中していることから、この発生要因は燃料棒下端部に生じる衝撃荷重と曲げ応力の複合によるものと考えられる。



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

5.1 集合体設計の比較

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、燃料集合体落下時に燃料棒が受ける衝撃荷重および変形した下部ノズルと集合体の四隅にある燃料棒が接触し、燃料棒に曲げ応力がかかったことの複合的な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、NFI 製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り、燃料棒曲がりは大きくなると考えられる。そのため、燃料棒曲がりの観点からは模擬燃料集合体の方が燃料棒亀裂が発生しやすい設計といえる。

一方、下部ノズルの変形量が大きい方が燃料棒への衝撃荷重は吸収される。また、燃料棒重量が軽い方が衝撃荷重は小さくなる。そのため、燃料棒への衝撃荷重の観点からは模擬燃料集合体の方が燃料棒亀裂が発生しにくい設計といえる。

5.2 NFI 製燃料集合体の変形挙動について

次に NFI 製燃料集合体の落下時の変形挙動および強度を考察するため、過去に実施した NFI 製模擬燃料集合体に対する単体の落下試験（以下、単体落下試験）の結果を確認した。試験条件は以下の通りである。

- ・燃料タイプ：NFI 製 17×17 型（タイプ 57）燃料
- ・落下方向：燃料集合体の下部から垂直落下
- ・落下高さ：5m

本試験において測定された最大加速度は以下の通りである。



Traveller XL 型輸送物に対する 9m 垂直落下時に下部ノズルの下端に発生する最大加速度は [] であり、単体落下試験の最大加速度は、Traveller XL 型輸送物に対する 9m 垂直落下時の最大加速度より []。

写真(口)A 付 3-2 に単体落下試験後の外観写真を示す。下部ノズル中央部が衝突面に接触するまで変形しており、下部ノズル上面の曲がり変形としては構造上最大の変形量となっていたが、燃料棒の下部端栓溶接部に大きな曲がり確認されず、燃料棒に亀裂、破損は確認されなかった。

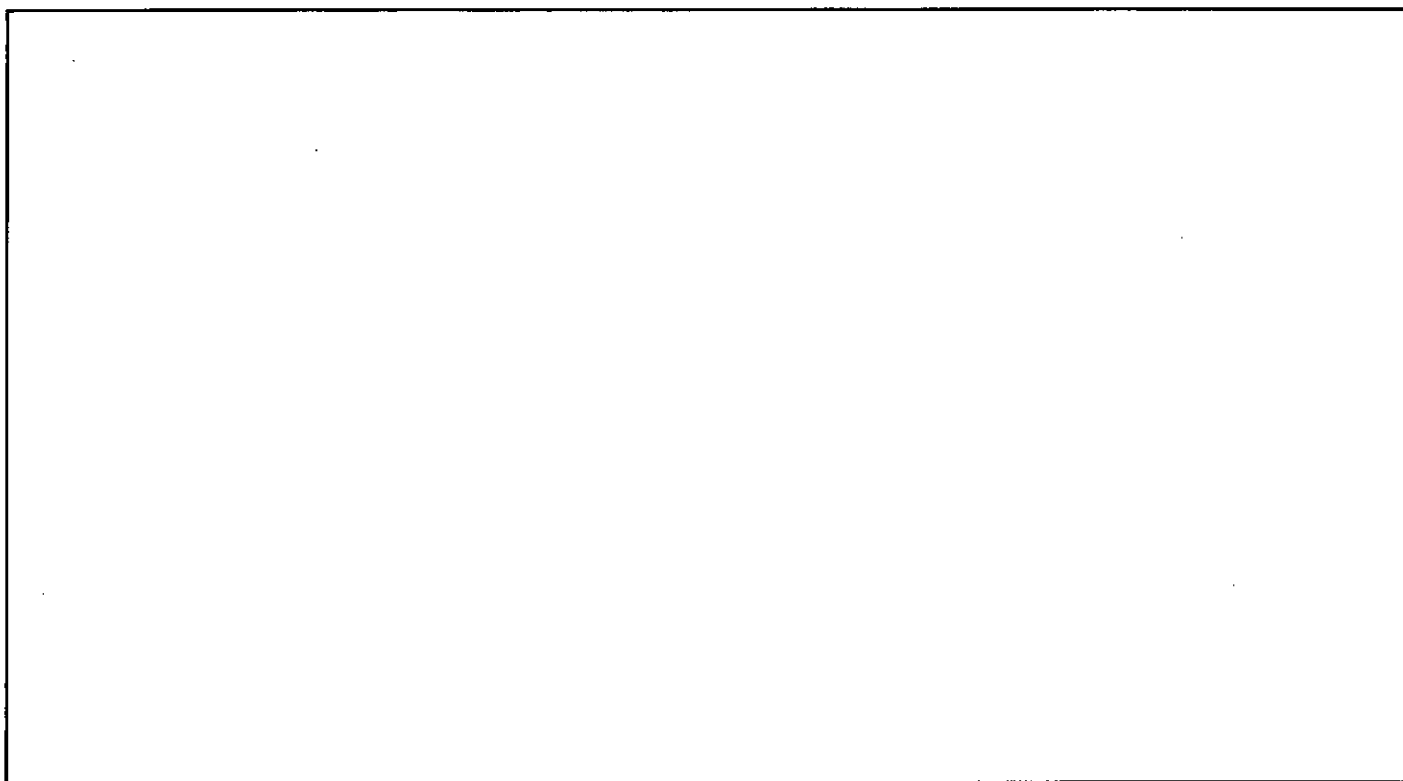
表(口)A 付 3-1 に示すとおり、14×14 型の燃料棒重量は [] と単体落下試験の 17×17 (タイプ 57) の [] よりも [] 倍重いことから、燃料棒単体でみた場合の落下時の衝撃は 17×17 (タイプ 57) より大きくなる。しかしながら、以下の点を考慮すると、14×14 型を Traveller XL 型輸送容器に収納し、9m 落下しても燃料棒に亀裂、破損は発生しないと考えられる。

- ・単体落下試験の最大加速度は [] (最下部グリッド) と、Traveller XL 型輸送物に対する 9m 垂直落下時の最大加速度の [] (下部ノズル) より []、重量が [] 倍程度増加しても破損に至るとは考えにくい
- ・集合体重量が 14×14 型の方が 17×17 (タイプ 57) より軽く下部ノズルの変形は小さくなる
- ・被覆管肉厚の違いから 14×14 型の溶接部の有効面積は 17×17 (タイプ 57) の約 1.3 倍大きい

以上のことから、NFI 製燃料集合体は、Traveller XL 輸送物で想定される落下時の衝撃では燃料棒は破損しないと考えられる。また、模擬燃料集合体で確認された燃料棒曲がりには NFI 製燃料集合体の構造上発生しないと考えられる。

表(口)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

	NFI 製燃料集合体	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)			
燃料棒重量 (kg)			



写真(口)A 付 3- 2 単体落下試験後の NFI 製模擬燃料集合体(17×17 型タイプ 57)の外観

6. まとめ

本輸送容器の収納物である NFI 製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、NFI 製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、燃料棒下端部に生じる衝撃荷重と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たことによる燃料棒曲げが複合したことで発生したことがわかった。

NFI 製燃料集合体を単体で落下させた際の変形挙動および強度を考察したところ、Traveller XL 輸送物で想定される落下時の衝撃では燃料棒は破損せず、模擬燃料集合体で確認された燃料棒曲がり NFI 製燃料集合体の構造上発生しないことがわかった。

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は燃料棒亀裂は発生しないといえる。