



資料1

**核燃料輸送物設計承認申請（Traveller XL型）に係る
審査会合での指摘事項の回答について**

2020年11月2日
原子燃料工業株式会社



□ 指摘事項①

模擬燃料集合体を用いた実証試験の結果をもって、収納物（NFI製燃料集合体）の損傷状態を予想できることを説明すること。模擬燃料集合体では燃料棒亀裂が確認されたものの亀裂が小さいためペレットの脱落等が発生しないと説明されているが、収納物に対しても同じことが言えるか説明すること。



□ 指摘事項①の回答

◆ 9m垂直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*落下試験時において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（p3参照）。

*CTU: Certification Test Unit（認証試験ユニット）

- CTU落下試験後の下部ノズルの変形を観察すると、燃料棒との接触面は中央部が大きく腕型に変形し、四隅は内側に折れ曲がるように変形（p4参照）。
- 中央の変形：下部ノズルが腕型の変形をすることで落下時の衝撃を吸収する。中央部の燃料棒が受ける衝撃荷重は小さくなる方向。
- 四隅の変形：中央部と比較して四隅は下部ノズルの脚に近いこと、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る(p5参照)曲げ応力も発生。

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。

□ 指摘事項①の回答

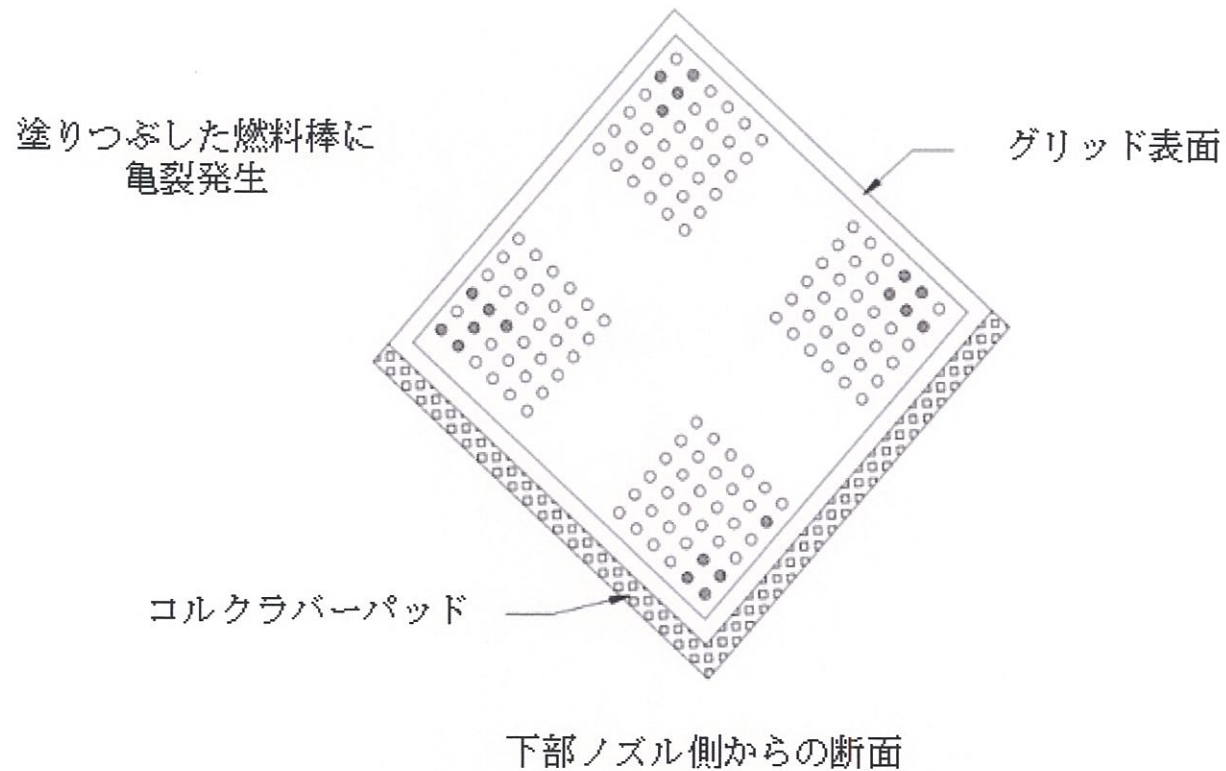


図1. 割れが発生した燃料棒の配置

□ 指摘事項①の回答

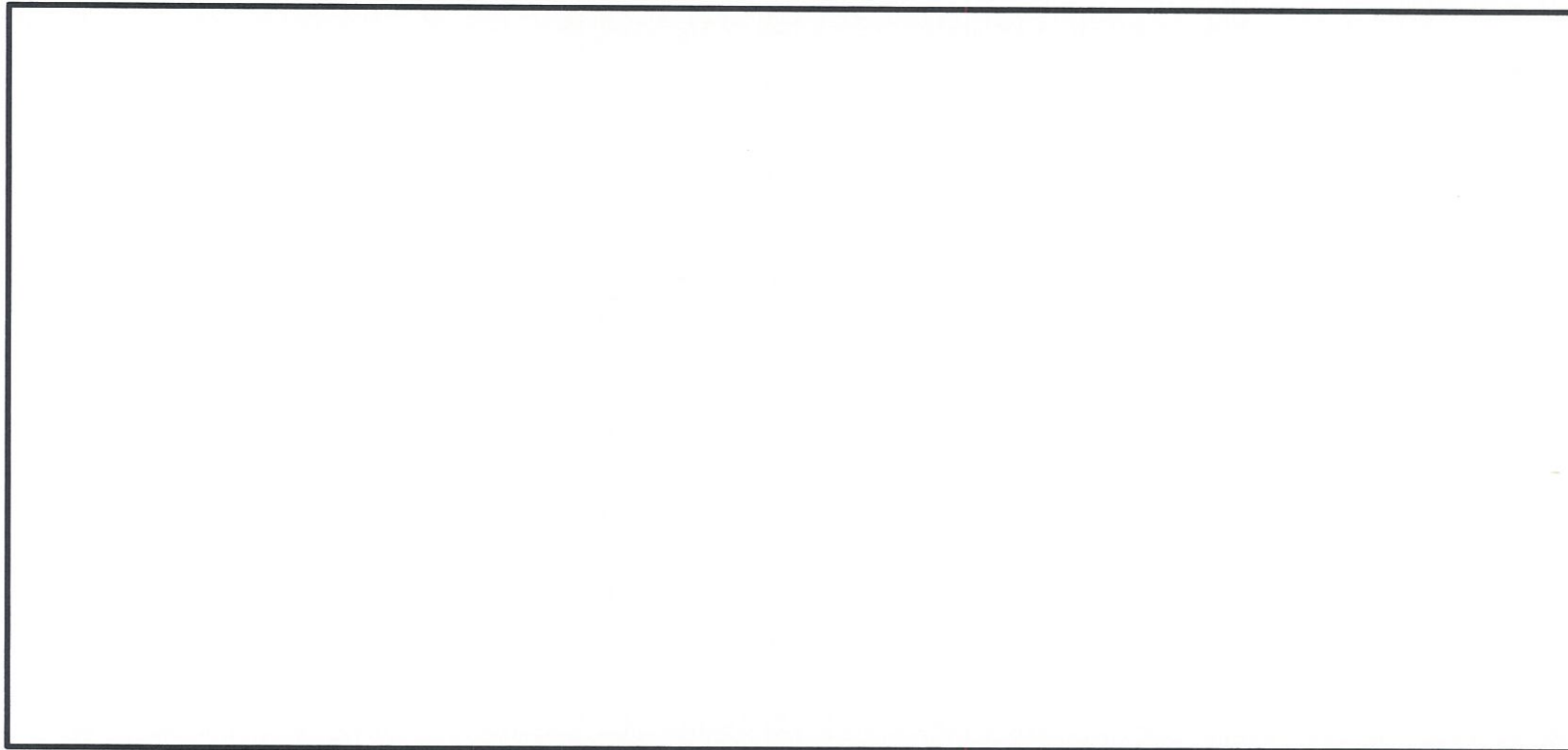


図2. CTU落下試験後の下部ノズル

□ 指摘事項①の回答

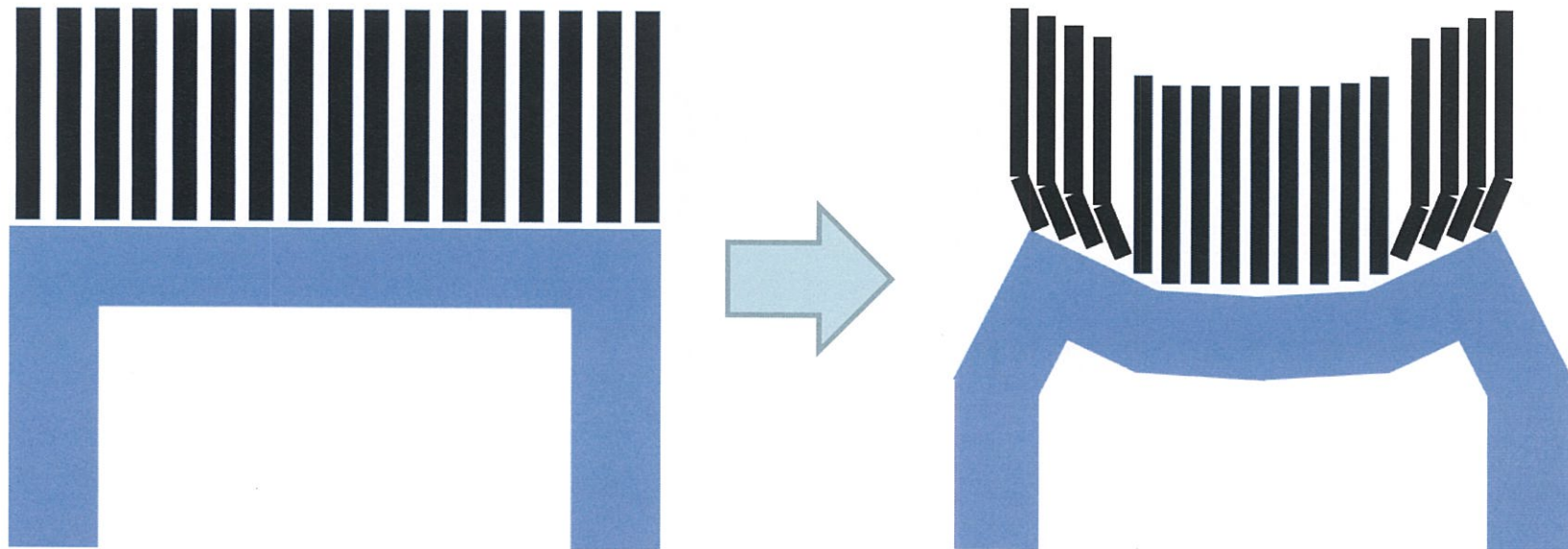


図3. CTU落下試験における燃料棒亀裂発生イメージ図



□ 指摘事項①の回答

◆ NFI製燃料集合体（17×17型（タイプ57））の落下時の挙動

➤ 過去に実施したNFI製燃料集合体に対する単体落下試験

- 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
- 最大加速度：

➤ Traveller XL輸送物に対する9m垂直落下時に、模擬燃料集合体下部ノズルの下端に発生する最大加速度は（解析値）。

➤ Traveller XL輸送物内において、燃料集合体支持格子部はクラムシエルのグリッドパッド（板ばねとゴムからなるパッド）と接触しているが、グリッドパッドは通常輸送時の移動止めの機能をもつのみでグリッドの変形は抑制しない。

→ 単体落下試験の支持格子の変形挙動は、Traveller XL輸送物に収納した場合と同等。

核燃料輸送物設計承認申請（Traveller XL型）に係る審査会合での指摘事項の回答について



Nuclear Fuel Industries, Ltd.

□ 指摘事項①の回答

◆ NFI製燃料集合体（17×17型（タイプ57））の落下時の挙動

- 単体落下試験におけるNFI製燃料集合体の最大加速度は、Traveller XL型輸送物の9m垂直落下時の最大加速度より大きい。
- 下部ノズル中央部が衝突面に接触するまで変形するも、変形量は模擬燃料集合体よりも小さく、衝撃吸収は小さい方向のため、燃料棒に与えられる衝撃荷重は大きい。
- 下部ノズル四隅の内側への変形は模擬燃料集合体よりも小さく（図5参照）、曲げ応力は小さい方向。
- 下部端栓溶接部に大きな曲がりはなく、燃料棒に亀裂、破損は確認されなかった。

NFI製燃料集合体の17×17型（タイプ57）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。
- 模擬燃料集合体で確認された燃料棒曲がりも発生せず、燃料棒に亀裂、破損は発生しない。

CTU落下試験時に発生した燃料棒亀裂は、模擬燃料集合体の設計に起因するものであり、NFI製燃料集合体(17×17型（タイプ57）)をTraveller XL型輸送物に収納した場合は発生しない。

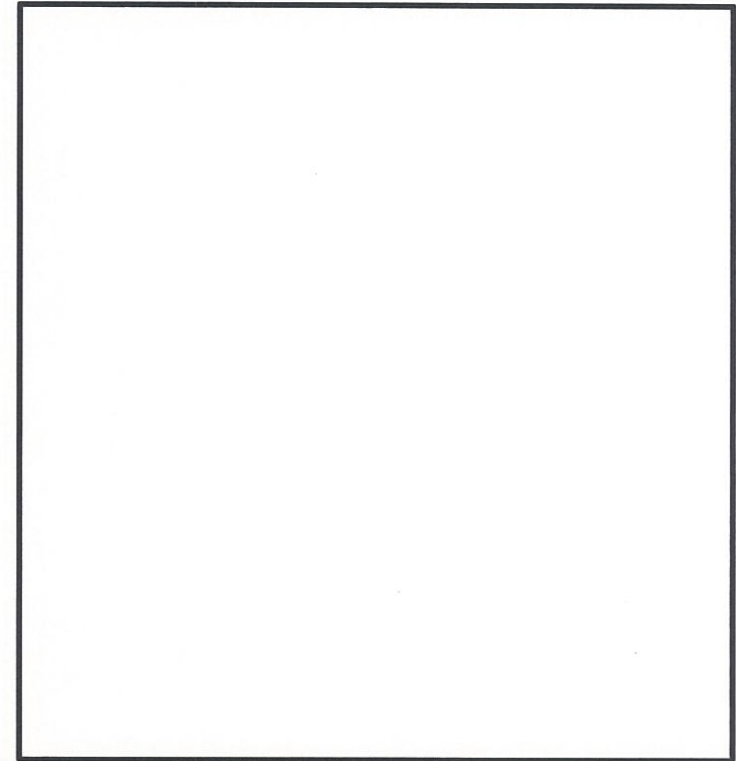
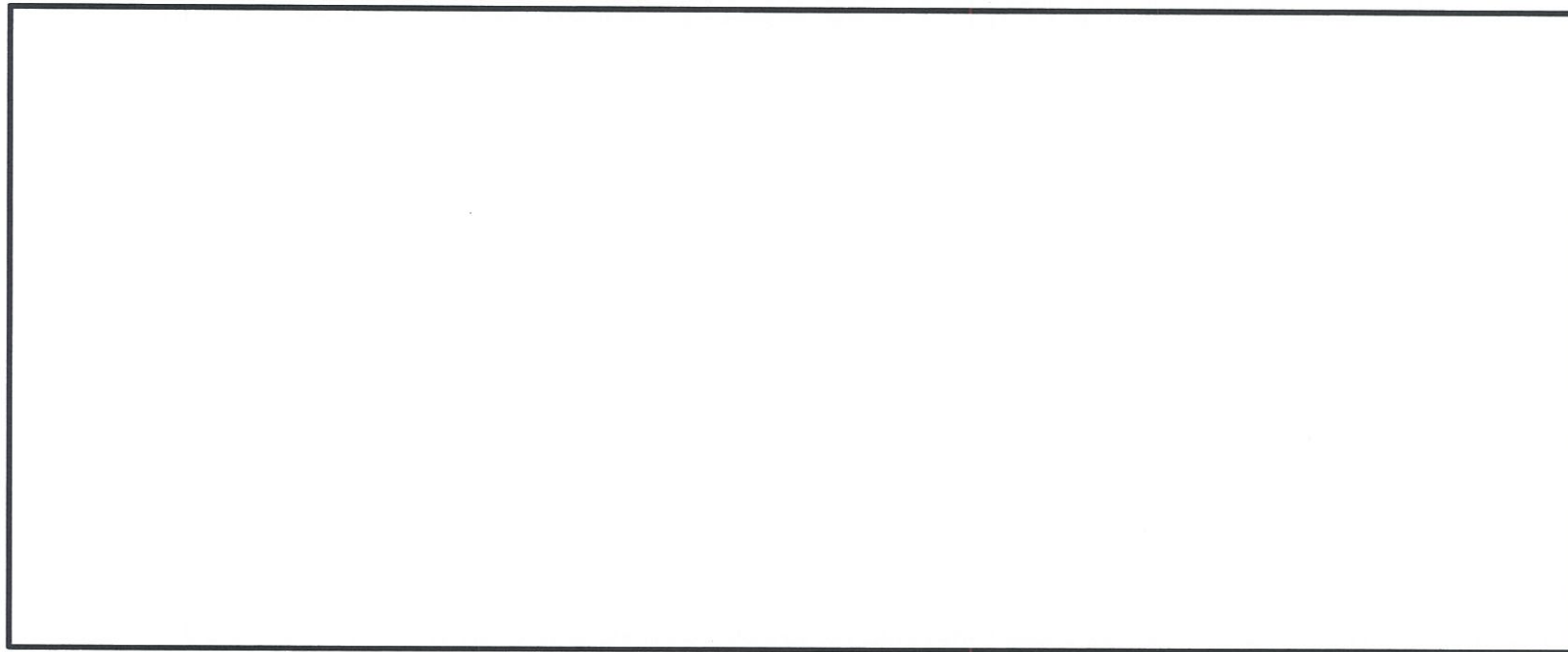


図4. NFI製燃料集合体(17×17型タイプ57)単体落下試験後の外観

□ 指摘事項①の回答



模擬燃料集合体下部ノズル

NFI製燃料集合体(17×17型タイプ57)

図5. 燃料集合体と模擬燃料集合体の下部ノズルの比較

核燃料輸送物設計承認申請（Traveller XL型）に係る審査会合での指摘事項の回答について



Nuclear Fuel Industries, Ltd.

□ 指摘事項①の回答

◆ 17×17型（タイプ57）以外のNFI製燃料集合体の落下時の挙動

燃料棒曲がり

- 下部ノズル長さは全ての燃料タイプでほぼ同等。
- 燃料集合体外寸が大きい方が下部ノズルは曲がりやすいと考えられるが、他の設計より小さい14×14型を除き、15×15型、17×17型（タイプ64）および17×17型（タイプ57）は同等。
- 集合体重量が重い方が下部ノズルの変形量は大きくなるが、17×17型（タイプ57）は最も重い。17×17型（タイプ57）が最も下部ノズルが変形しやすく、燃料棒曲がりが最も発生しやすい設計。

表1. NFI製燃料集合体仕様の比較

	14×14型	15×15型	17×17型 タイプ64	17×17型 タイプ57
下部ノズル長さ(mm)				
燃料集合体外寸(mm)	197	214	214	214
集合体重量(kg)				

核燃料輸送物設計承認申請（Traveller XL型）に係る審査会合での指摘事項の回答について



Nuclear Fuel Industries, Ltd.

□ 指摘事項①の回答

◆ 17×17型（タイプ57）以外のNFI製燃料集合体の落下時の挙動

燃料棒衝撃（次ページの表2参照）

- 落下時に端栓溶接部に発生する圧縮応力は、17×17型（タイプ57）が最も大きい。
- 燃料棒の最下部スパンの座屈荷重は、17×17型（タイプ57）が最も低く、最も座屈が発生しやすい。なお、いずれの燃料棒についても垂直落下時（220G）の軸方向荷重は、座屈荷重を下回る。

17×17型（タイプ57）が端栓溶接部にかかる応力が最も大きくなる設計であるといえる。

また、いずれの燃料設計においても燃料棒座屈は生じない。

17×17型（タイプ57）はNFI製燃料集合体の中で、燃料棒亀裂、破損の観点から最も保守的な設計である。そのため、17×17型（タイプ57）以外のNFI製燃料集合体についても、Traveller XL輸送物に収納して9m落下を実施しても亀裂、破損は発生しない。

核燃料輸送物設計承認申請（Traveller XL型）に係る審査会合での指摘事項の回答について



□ 指摘事項①の回答

◆ 17×17型（タイプ57）以外のNFI製燃料集合体の落下時の挙動

表2. NFI 製燃料集合体の垂直落下時の燃料棒の荷重、応力、座屈荷重

比較項目		14×14 (7支持格子)	14×14 (8支持格子)	15×15	17×17 (タイプ64)	17×17 (タイプ57)
燃料 ス ペ ック	被覆管外径[mm]	10.72	10.72	10.72	9.50	9.50
	被覆管内径[mm]	9.40	9.40	9.40	8.22	8.36
	被覆管肉厚[mm]	0.66	0.66	0.66	0.64	0.57
	被覆管断面積(A) [mm ²]	20.86	20.86	20.86	17.81	15.99
	最下部スパン(l)[mm]					
	ペレットを除いた燃料集合体重量(m) [kg]					
	燃料棒本数(n)	179	179	204	264	264
燃料 棒 垂 直 座 屈 荷 重 、 持 た れ な い 荷 重 、 座 屈 の 荷 重 、 座 屈 の 荷 重	垂直落下時の燃料棒軸方向最大荷重 [N] $P_c = m \times a / n$ a : 加速度 [G] G : 重力加速度 9.80665 [m/s ²]					
	垂直落下時の端栓溶接部圧縮応力 [N/mm ²] $\sigma = P_c / A$					
	燃料棒(最下部スパン)の座屈荷重 [N] $P_{cr} =$ [] P_{cr} : 座屈荷重 E : ヤング率 93,655 [N/mm ²] I_z : 被覆管の断面二次モーメント [mm ⁴]					

核燃料輸送物設計承認申請（Traveller XL型）に係る審査会合での指摘事項の回答について



Nuclear Fuel Industries, Ltd.

□ 指摘事項①の回垂直落下についての答（垂直落下について）

◆ 回答まとめ

- 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、燃料集合体落下時に燃料棒が受ける衝撃荷重および四隅の下部ノズル変形に伴う燃料棒への曲げ応力が複合したものであると考えられる。
- NFI製燃料集合体の17×17型（タイプ57）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17×17型（タイプ57）の燃料棒は破損せず、模擬燃料集合体で確認された燃料棒曲がりとは構造上発生しない。また、17×17（タイプ57）は燃料棒亀裂、破損の観点から最も保守的な設計であり、17×17型（タイプ57）以外のNFI製燃料集合体についても亀裂、破損は発生しない。

以上のことから、CTU落下試験時に発生した燃料棒亀裂は、模擬燃料集合体の設計に起因するものであり、NFI製燃料集合体をTraveller XL型輸送物に収納した場合は発生しない。

□ 指摘事項②

臨界解析の付属資料（(□)E 付属資料1）について、評価条件を具体的に記載すること。

□ 指摘事項②の回答

- 配列、収納物といった評価条件を明確化するように修正する（詳細は資料2参照）。

- (□)E 付属資料1のサーベイ計算は、基本的にE4.1の未臨界評価と同じ条件で計算しており、サーベイ対象のインプット項目を除き、表(□)E-2に示す一般の試験条件下もしくは特別の試験条件下の配列条件、表(□)E- 1 及び表(□)E- 8 に示す一般の試験条件下もしくは特別な試験条件下の収納物の評価条件を用いている。

□ 指摘事項③

臨界解析における保守性を明確化すること。

□ 指摘事項③の回答

- (□)E4.1において、臨界解析モデルの中で保守性を考慮した項目を示す形に修正する（詳細は資料2参照）。

核燃料輸送物設計承認申請（Traveller XL型）に係る審査会合での指摘事項の回答について



Nuclear Fuel Industries, Ltd.

□ 指摘事項③の回答

実際の収納物、輸送容器の構造や試験結果よりも厳しいモデルとした点

- ① 構造解析の結果、収納物である燃料集合体には亀裂、破損が生じないという結果であったが、すべての燃料棒内への浸水を考慮する。
- ② 耐火試験の結果、ポリエチレン製袋が熔融する温度とはならなかったが、 させる。
- ③ 燃料集合体の燃料有効長内の のみを考慮する。
- ④ 燃料有効長を実際より長い mm とする。
- ⑤ 落下試験の結果、クラムシェルは所定の位置から移動することはなかったが、 させる。
- ⑥ は考慮せず、浸水を考慮する領域とし、他の浸水を考慮する領域と同様に安全側となる水密度とする。
- ⑦ 耐火試験の結果、減速材ブロックの重量減は確認されなかったが、減速材ブロックの密度を させる
- ⑧ のみ考慮し、その他の構造物は考慮しない。
- ⑨ 中性子吸収材中の¹⁰B密度を最小値からさらに % 減じる。

例えば、②の影響について特別の試験条件下における条件を用いて計算したところ、中性子実効増倍率が 以上大きくなることが確認できている。

→仮に②の影響をみない場合、中性子実効増倍率は 以下となる。