

本資料のうち、枠囲みの内容は営業秘密又は防護上の観点から公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-180-2 改18
提出年月日	平成30年10月2日

工事計画に係る補足説明資料

補足-180-2 【燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能喪失の防止に関する説明書に係る補足説明資料】

1. 添付書類に係る補足説明資料

「核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設」に係る添付書類（共通資料は除く）の記載内容を補足するための説明資料リストを以下に示す。

工認添付書類	補足説明資料
V-1-3-3 燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能喪失の防止に関する説明書	1. 使用済燃料プール周りの主要な重量物の配置
	2. 燃料取替機及び原子炉建屋クレーンの待機場所について
	3. 原子炉建屋クレーンのインターロックについて
	4. 新燃料の取扱いにおける落下防止対策
	5. キャスク取扱い作業時における使用済燃料プールへの影響
	6. 照射済燃料及び使用済燃料取扱い時の使用済燃料プールへの影響
	7. ワイヤロープ及び主要部材の強度に関する説明について
	8. イコライザハンガの概要について
	9. 使用済燃料プールの機能に影響を及ぼすおそれのある重量物の抽出結果
	別添1 重量物落下時のチャンネル・ボックスへの荷重について
別添2 BWR燃料集合体落下時の使用済燃料プールライニングの健全性について	

2. 別 紙

(1) 工認添付書類と設置許可まとめ資料との関係【核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設】

別紙 工認添付書類と設置許可まとめ資料との関係【核燃料物質の取扱施設及び貯蔵施設】

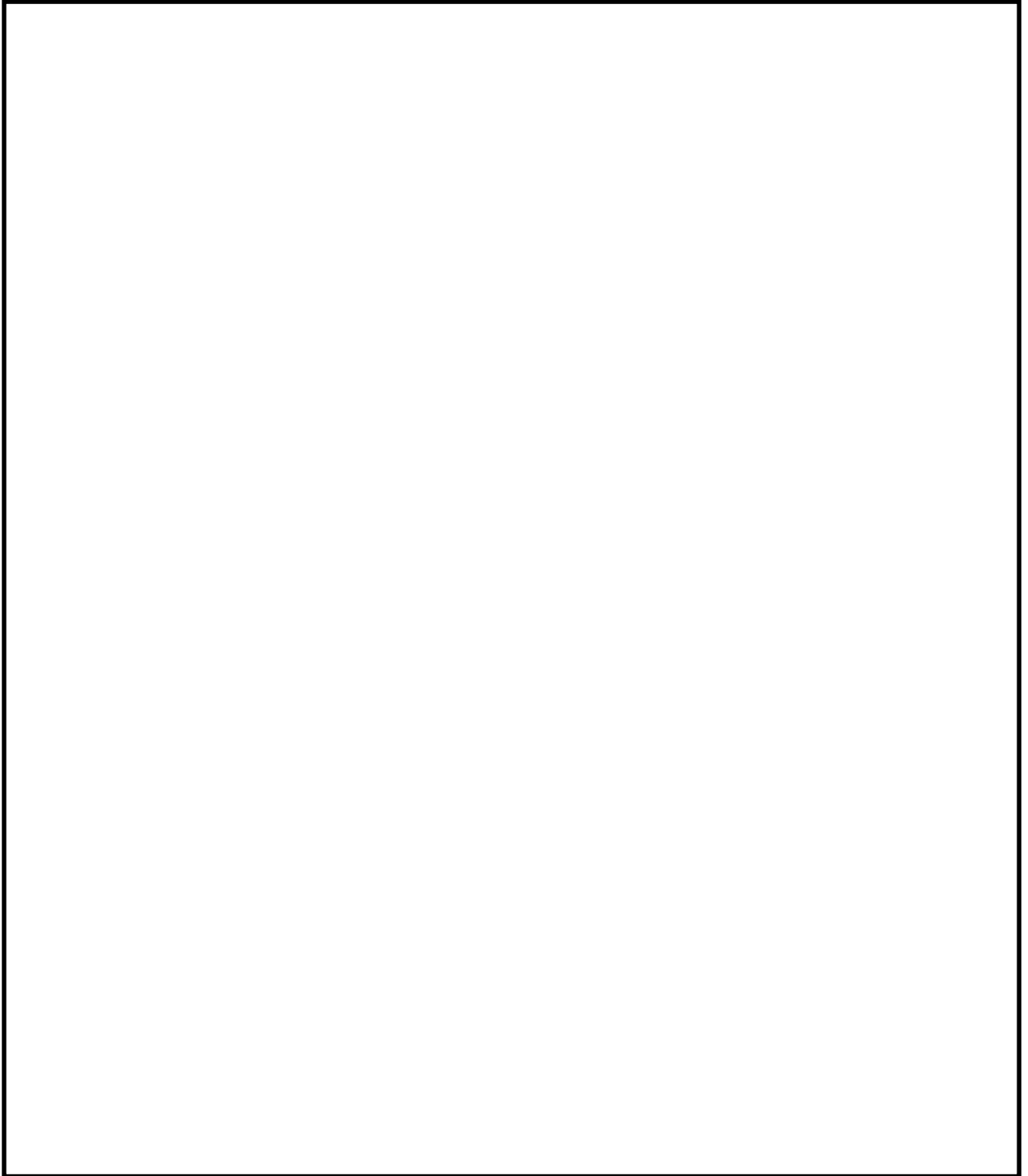
工認添付書類		設置許可まとめ資料			引用内容
V-1-3-3	燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能喪失の防止に関する説明書	DB	第 16 条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	落下防止について引用 ただし、燃料取替機、原子炉建屋クレーン及び使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーンに係る評価方法、評価結果については、各耐震計算書に示す。

補足説明資料目次

	頁
1. 使用済燃料プール周りの主要な重量物の配置	1-1
2. 燃料取替機及び原子炉建屋クレーンの待機場所について	2-1
3. 原子炉建屋クレーンのインターロックについて	3-1
4. 新燃料の取扱いにおける落下防止対策	4-1
5. キャスク取扱い作業時における使用済燃料プールへの影響	5-1
6. 照射済燃料及び使用済燃料取扱い時の使用済燃料プールへの影響	6-1
7. ワイヤロープ及び主要部材の強度に関する説明について	7-1
8. イコライザハンガの概要について	8-1
9. 使用済燃料プールの機能に影響を及ぼすおそれのある重量物の抽出結果	9-1
別添1 重量物落下時のチャンネル・ボックスへの荷重について	別1-1
別添2 BWR燃料集合体落下時の使用済燃料プールライニングの健全性について	別2-1

1. 使用済燃料プール周りの主要な重量物の配置

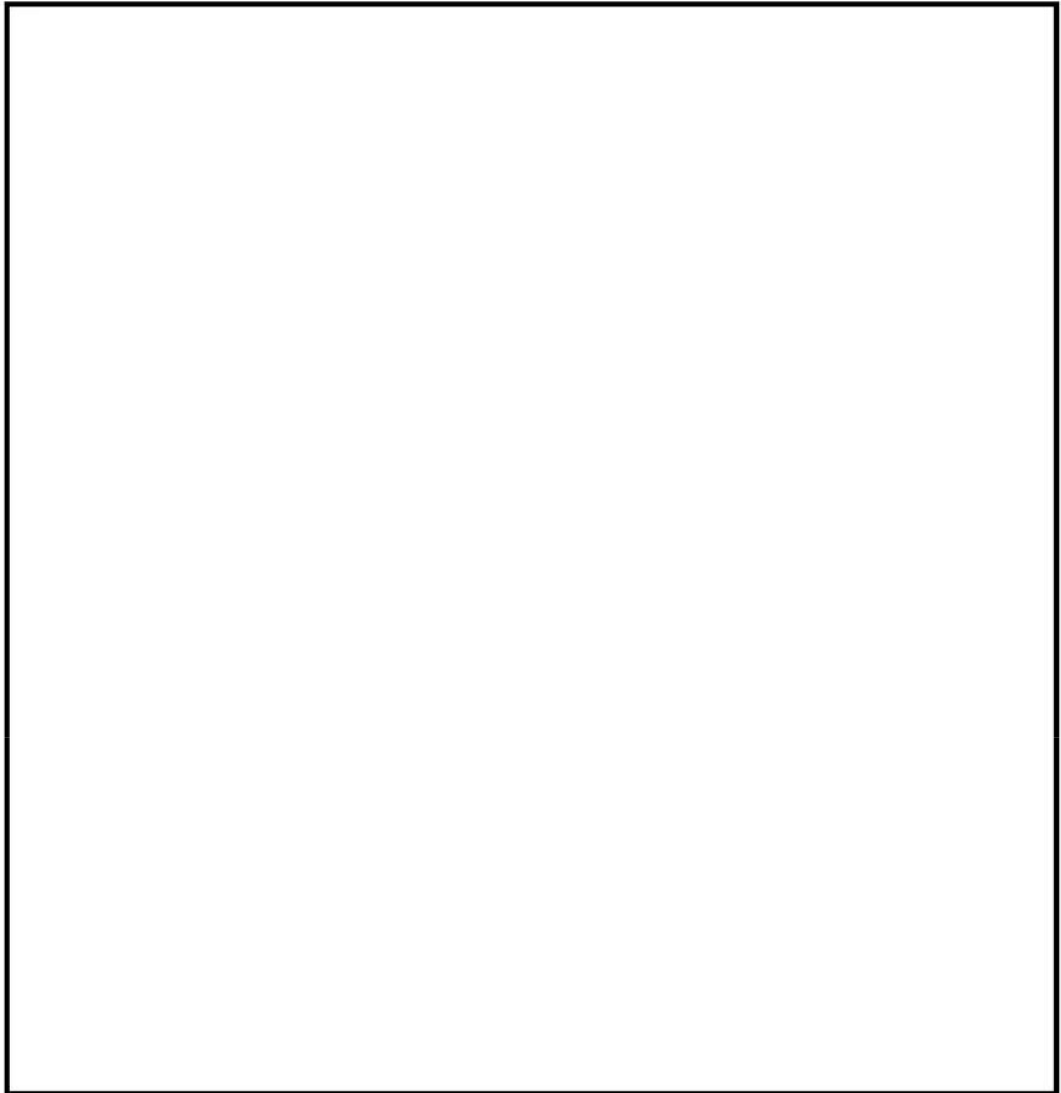
落下時に使用済燃料プールの機能へ影響を及ぼすおそれのある主要な重量物の配置を第1-1図に示す。



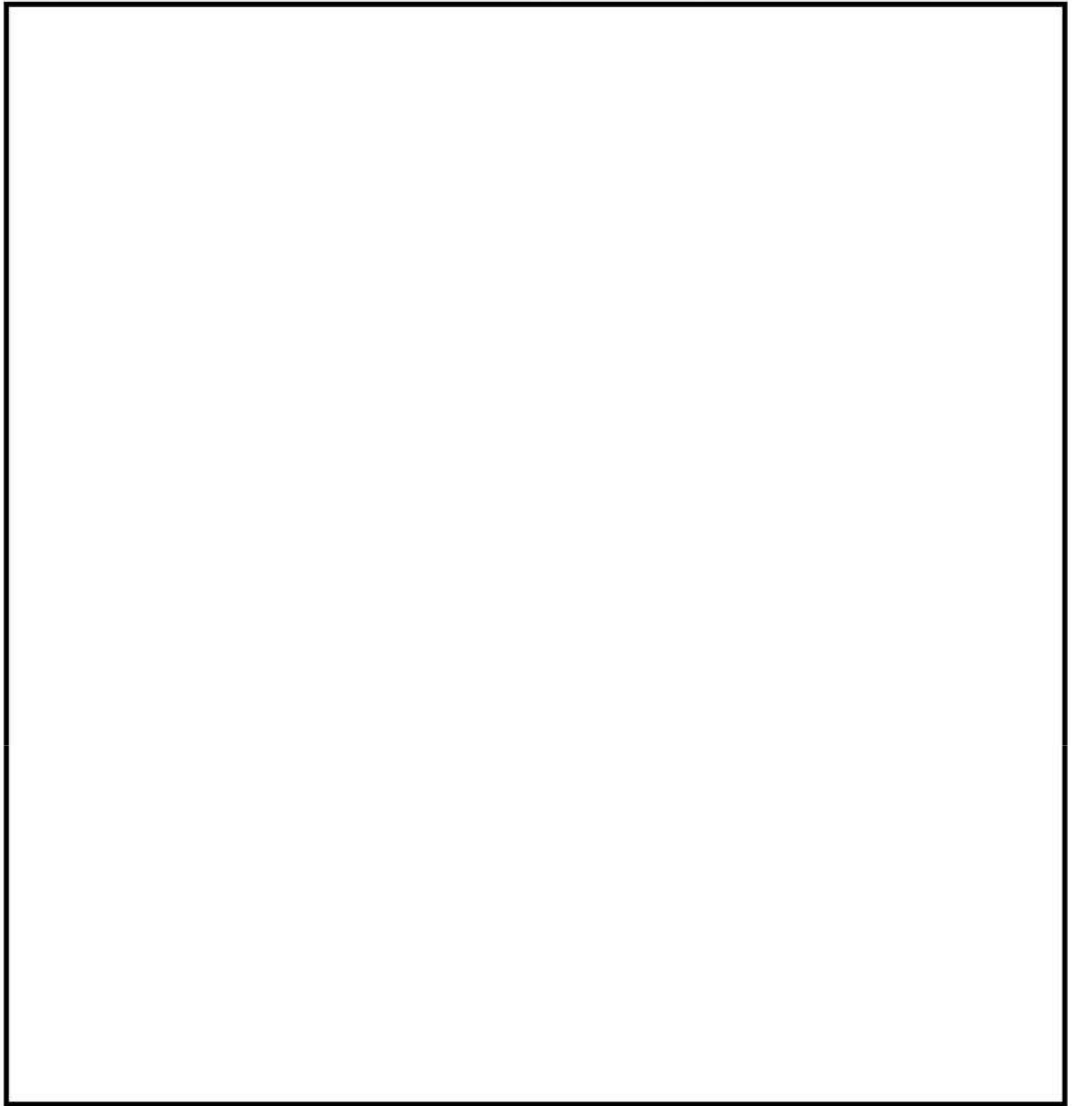
第 1-1 図 使用済燃料プール周りの主要な重量物の配置

2. 燃料取替機及び原子炉建屋クレーンの待機場所について

燃料取替機及び原子炉建屋クレーンは、使用済燃料プール上へ待機配置せず、待機位置はD/Sプール上とする運用にすることで、使用済燃料プールへの落下は防止される。また、レールからの落下を防止するよう、ストッパから基準地震動 S_s での滑りを考慮した距離をとる。第2-1～2図に東海第二発電所の燃料取替機及び原子炉建屋クレーンの待機場所を示す。



第2-1図 燃料取替機待機場所



第2-2図 原子炉建屋クレーン待機場所

3. 原子炉建屋クレーンのインターロックについて

原子炉建屋クレーンは、使用済燃料プール上を使用済燃料輸送容器又は使用済燃料乾式貯蔵容器（以下「キャスク」という。）及び重量物が走行及び横行できないように可動範囲を制限するインターロックを設けている。

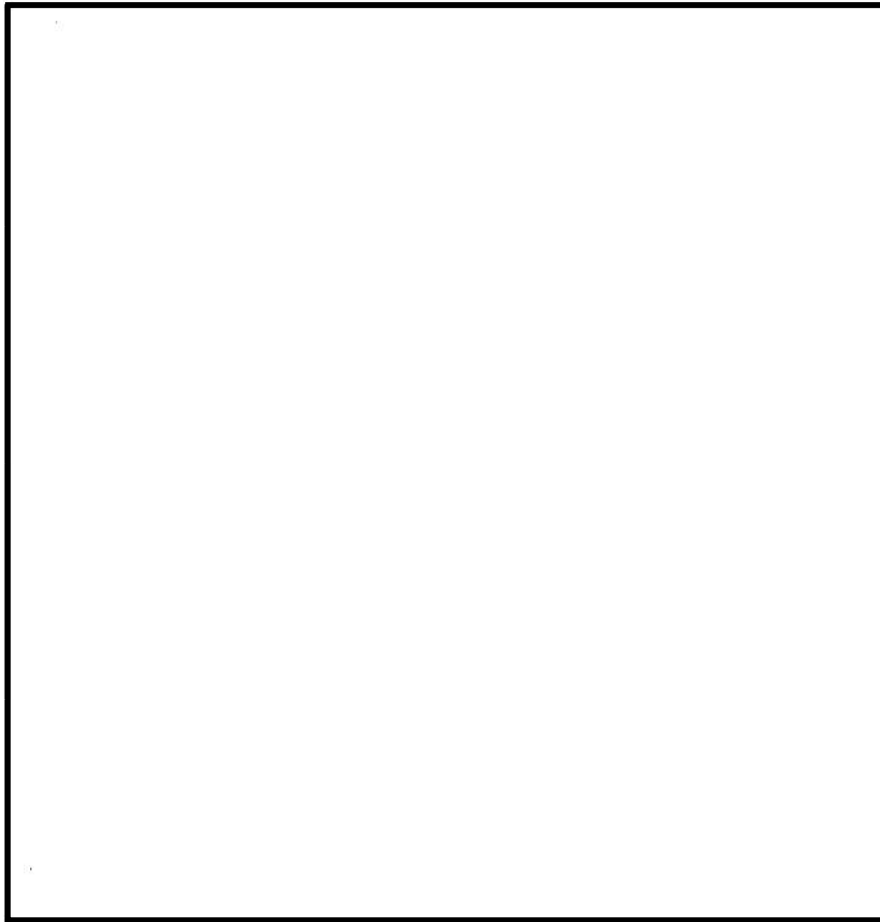
原子炉建屋クレーン走行レール及び横行レールは原子炉建屋原子炉棟6階床面全域を走行及び横行できるよう敷設されているが、重量物及びキャスクの移送を行う際には、重量物及びキャスクが使用済燃料プール上を通過しないよう、レールに沿って設置されたリミットスイッチ及びインターロックによる移送範囲の制限により、使用済燃料プールへの重量物及びキャスクの落下を防止する設計とする。

インターロックには3つのモード（A～Cモード）があり、取り扱う重量物に応じてモード選択を行い、移送範囲を制限することで、使用済燃料プールへの重量物及びキャスクの落下を防止している。上記について、3次文書「工事要領書作成手引き」にて原子炉建屋原子炉棟6階にて揚重作業を行う場合、インターロック（A～Cモード）のモード選択を行い、移送範囲を制限することを明確化し（使用済燃料プールへ移送を行わない場合は、A又はBモードとする。）、工事毎の要領書にて、走行範囲を明確にし、使用済燃料プールへの落下防止を図る。

原子炉建屋クレーンのインターロックによる重量物移送範囲とリミットスイッチ展開図の関係を第3-1～2図に示す。なお、使用済燃料プール上へアクセス可能なモードはCモードのみである。



第3-1図 原子炉建屋クレーンのインターロック（Bモード）による重量物移送範囲とリミットスイッチ展開図



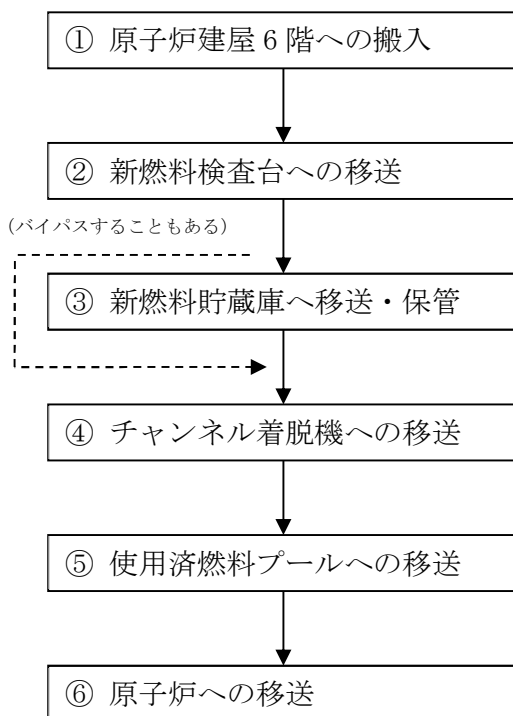
第3-2図 原子炉建屋クレーンのインターロック（Aモード）による
キャスク移送範囲とリミットスイッチ展開図

4. 新燃料の取扱いにおける落下防止対策

新燃料は、新燃料輸送容器に2体ずつ収納され原子炉建屋クレーン（主巻）によって原子炉建屋原子炉棟6階へ搬入する。新燃料輸送容器から新燃料検査台へは新燃料を1体ずつ原子炉建屋クレーン（補巻）によって移送し、受入検査を実施するとともにチャンネル・ボックスを装着する。新燃料検査台から新燃料貯蔵庫又はチャンネル着脱機へ原子炉建屋クレーン（補巻）にて移送する。新燃料貯蔵庫からチャンネル着脱機への移送にも原子炉建屋クレーン（補巻）を用いる。吊具として使用するナイロンスリングは気中作業で確実な装着を確認し、安全率は、6 以上を確保している。チャンネル着脱機から使用済燃料プールのラック、ラック間及びブロッカー原子炉間の移送は燃料取替機にて取り扱われる。

新燃料の取扱いに係る移送フロー及び経路（例）を第4-1図に示す。

<新燃料移送フロー>



第4-1図 新燃料の取扱いに係る移送フロー及び経路（例）

第4-1図に示すとおり、新燃料は、原子炉ウェル上を通過しているが、新燃料移送は運転中に実施するため、原子炉蓋は閉まっており、原子炉内に新燃料が落下することはない。また、新燃料を使用済燃料プールへ移送する際は、使用済燃料プール上を移送しない運用とし、使用済燃料プール上への落下を防止している（次頁「【参考】新燃料の入水作業」参照）。

原子炉建屋クレーンは、動力電源喪失時にて自動的にブレーキがかかる機能を有しているとともに、フックには外れ止め金具を装備し、新燃料の落下を防止する構造としており、速度制限、過巻防止用のリミットスイッチにより、誤操作等による新燃料の落下は防止される。

原子炉への燃料装荷の際には、燃料取替機による新燃料移送作業を行うこととなるが、燃料取替機についても、動力電源喪失時等における種々のインターロックが設けられており、新燃料の

落下は防止される。

チャンネル着脱機（第4-2図）は、使用済燃料プールの床面に設置し、ガイドレールがプール壁面の金物に差し込まれており、上部でボルト固定されている。チャンネル着脱機は、1体のみ燃料体等を載せることのできる台座と燃料体等が倒れないよう上部で支持する固定具が一体（カート）となり昇降する設計となっている。カートはガイドレールに支持されており、ローラチェーンを介して最上限ストoppaから下限ストoppaの位置までの間を昇降（第4-3図）し、直接使用済燃料プールライニングに衝突しないため、使用済燃料プールライニングを損傷させることはない。なお、燃料集合体外観検査時に燃料体等の昇降を行う際には、線量低減の観点から、機械的なインターロックにより、上限ストoppaの位置までに上昇を制限する運用とする。電源遮断時には、電磁ブレーキで駆動軸を保持する構造となっている。

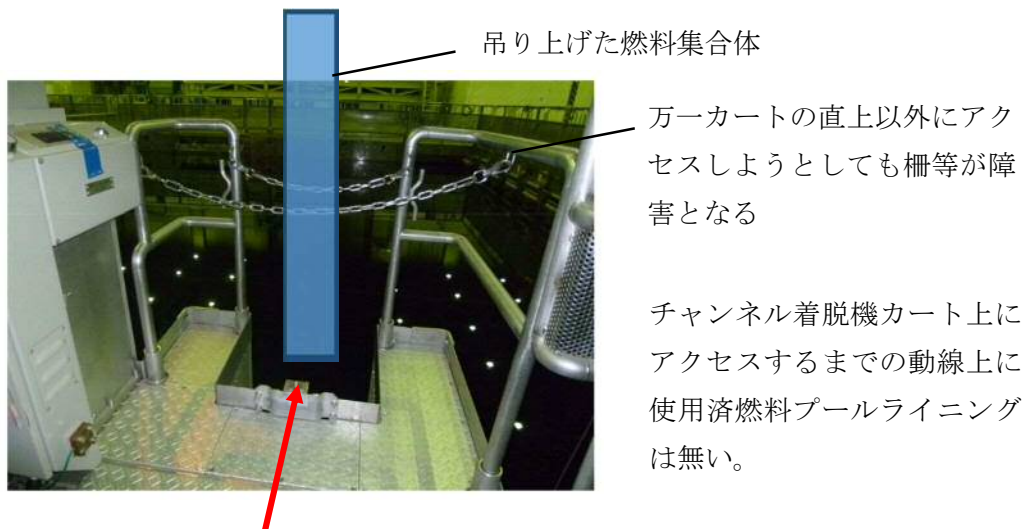
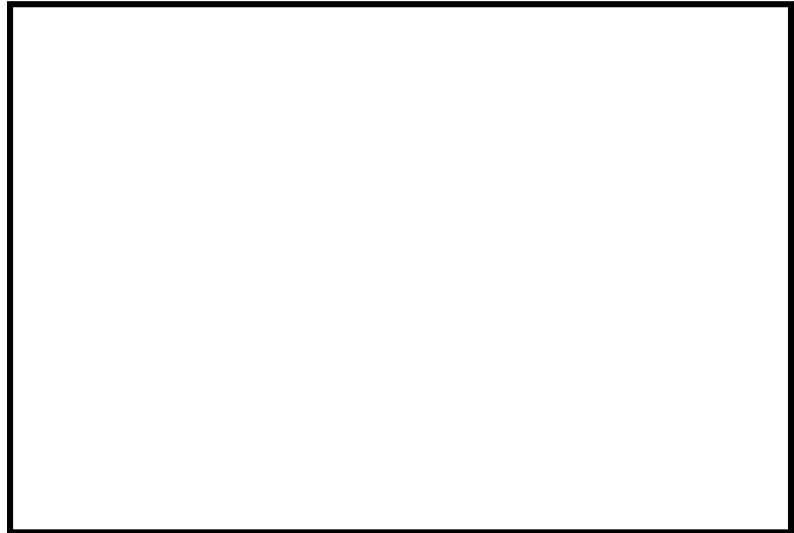
【参考】新燃料の入水作業

新燃料取扱時においては、原子炉建屋原子炉棟 6 階に搬入された新燃料輸送容器から、原子炉建屋クレーン（補巻）によって、燃料集合体を 1 体ずつ吊上げ、新燃料検査台にて受入検査しチャンネル・ボックスを装着した上で、再び原子炉建屋クレーン（補巻）にて吊上げて移動し（場合によっては新燃料貯蔵庫に貯蔵した後同様に吊上げて移動し）、チャンネル着脱機に載せて使用済燃料プールに入水し、燃料取替機に受け渡す。

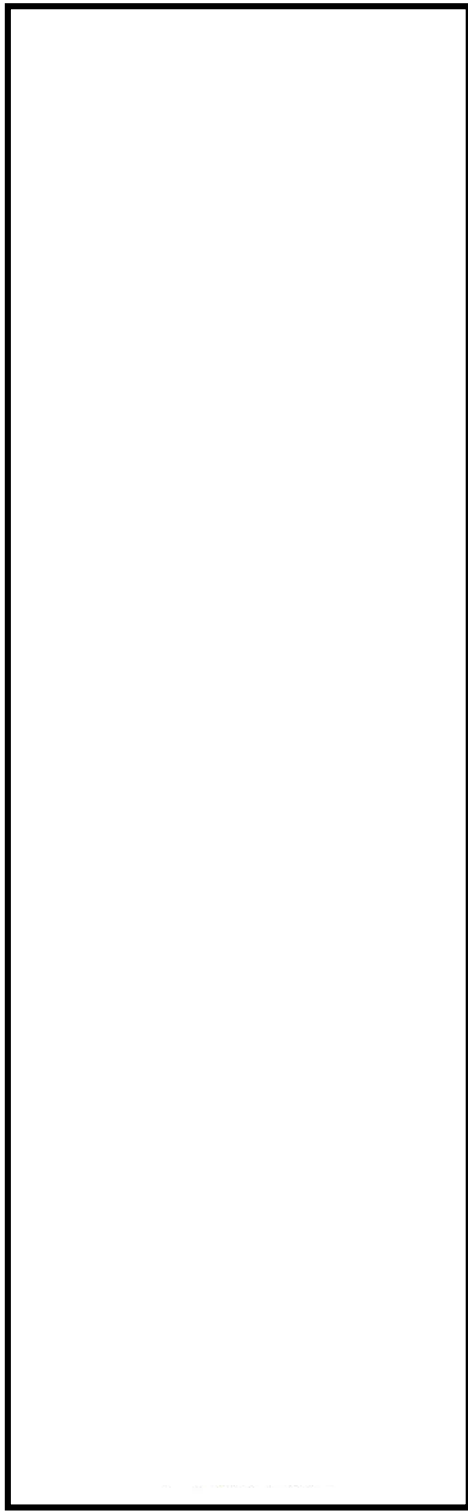
新燃料検査台又は新燃料貯蔵庫にて、原子炉建屋クレーン（補巻）は、安全率 6 以上のワイヤロープに装着された落下防止装置付きのフックに、安全率 6 以上のナイロンスリングを気中作業にて確実に取り付け新燃料をゆっくり吊り上げる。

新燃料検査台又は新燃料貯蔵庫からチャンネル着脱機の直近までは、原子炉建屋原子炉棟 6 階の床面上を、新燃料の動線上にある構造物を避けるために必要な高さ（最大約 1.2 m）に吊上げながら移動する。新燃料は、使用済燃料プールのチャンネル着脱機上に移動する前に、約 50 cm の吊上げ高さに降下し、参考図のように、金属製の柵に囲まれたチャンネル着脱機の吊り下ろしエリアへ、作業員が直接手で触れ監視しつつクレーン操作者に指示を出して移動する。チャンネル着脱機の吊り下ろしエリアでは、水面上に差し掛かる前に新燃料をチャンネル着脱機上面から約 10 cm の高さまでゆっくり吊下ろす。

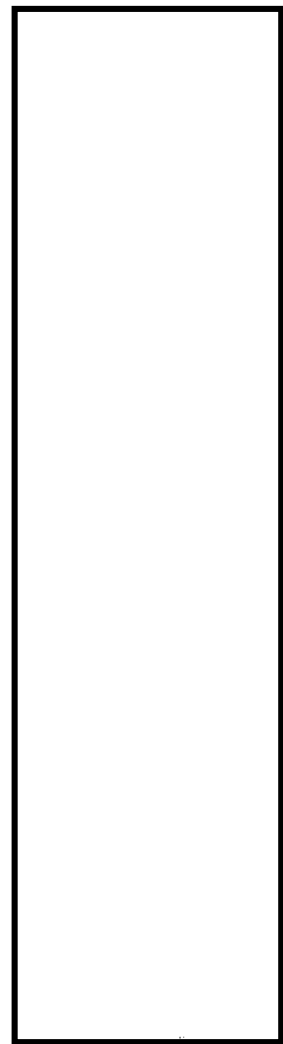
チャンネル着脱機のカートが、水面から深さ cm 程度の高さまで上昇した状態で待機しているところへ、作業員が直接手でサポートしながらクレーン操作者に指示を出し、新燃料をカート直上にゆっくりと移動させる。カートの真上に来たことを作業員が目視で確認し、ゆっくりと確実にカートの上面にある燃料をホールドする四角形の孔に目視をしながら下部タイ・プレートの下端から挿入し、カート下方の台座まで新燃料を降下させる。



参考図 チャンネル着脱機のカートへ吊り下ろす直前の状況 (イメージ)



第4-2図 チャンネル着脱機概略図



第4-3図 ストッパの位置

5. キャスク取扱い作業時における使用済燃料プールへの影響

空のキャスクの取扱い作業は原子炉建屋クレーン（主巻）を使用し、機器ハッチより原子炉建屋原子炉棟6階床面へキャスクの移送を行い、キャスクピットにて使用済燃料の収納作業が行われる。ラックからキャスクピットのキャスクへの使用済燃料の移送には燃料取替機を用いる。作業概要について第5-1図に示す。

本作業時における原子炉建屋クレーンの運転は、キャスクが使用済燃料プール上を通過することがないように、インターロックによる可動範囲制限を行うことで、使用済燃料プールへのキャスクの落下は防止される設計としている。

また、原子炉建屋クレーンはインターロックによる運転の他、動力電源喪失時にて自動的にブレーキがかかる機能を有しているとともに、フックには外れ止め金具が装備されており、速度制限、過巻防止用のリミットスイッチも設けられていることから、キャスクの落下は防止される設計としている。

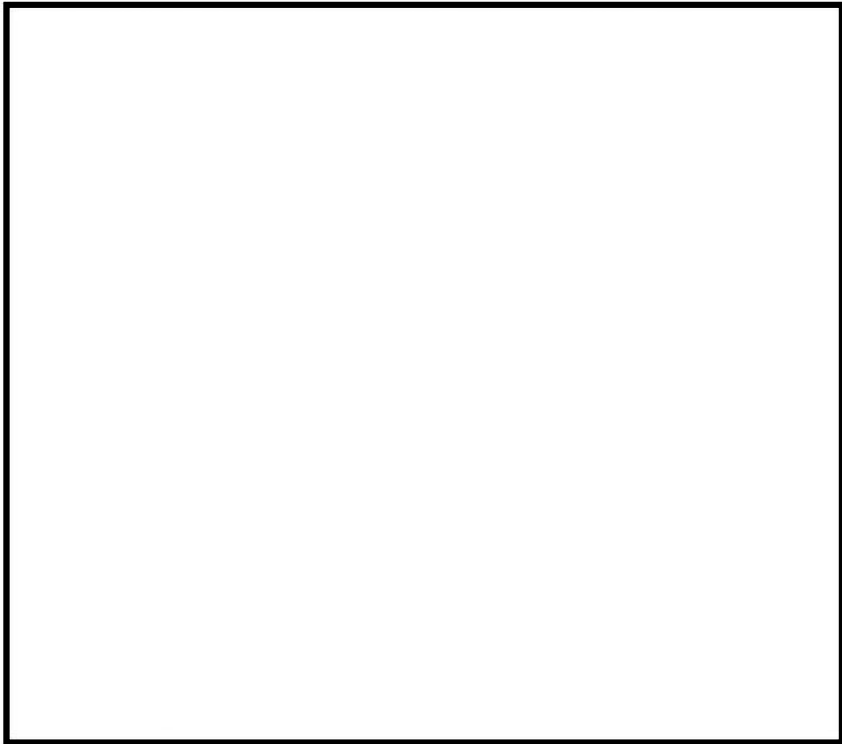
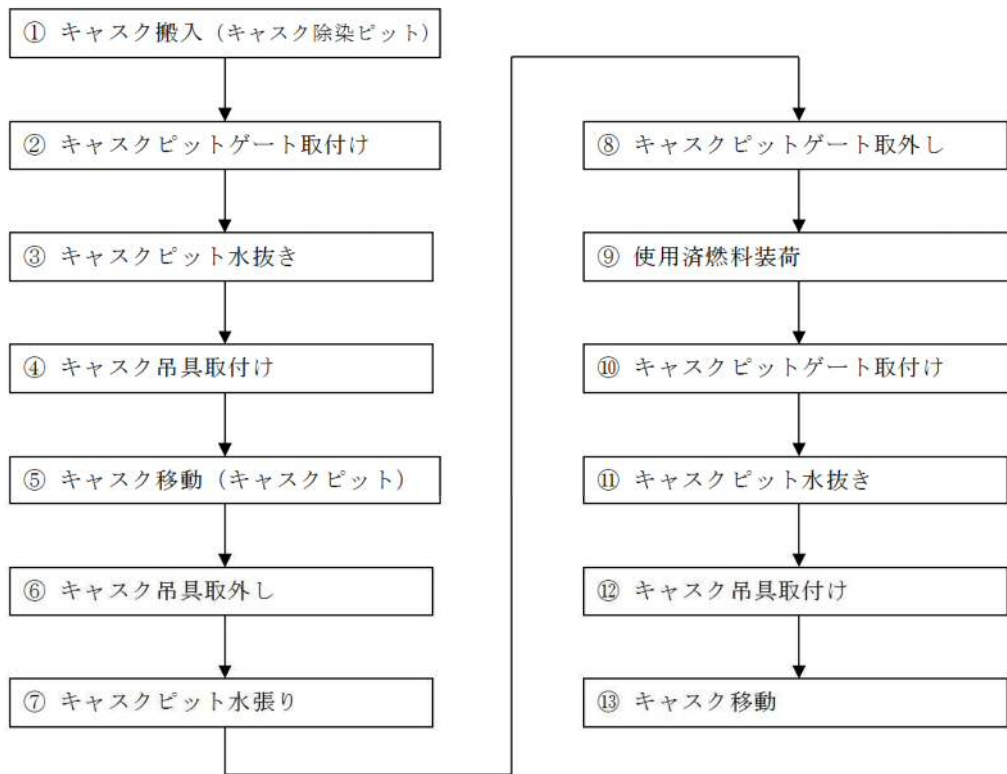
なお、キャスクピットでのキャスク取扱い時に、仮に地震等にて原子炉建屋クレーンの各ブレーキ（横行、走行、巻上下）の機能が喪失した場合、キャスクは横行、走行方向及び鉛直方向に滑るおそれがあるが、キャスクをキャスクピットにて取り扱う際には、キャスクピットを使用済燃料プールと隔離して、キャスクピット単独で水抜き等を実施するためのキャスクピットゲートが設置されるため、キャスクが横行、走行方向及び鉛直方向に滑った*1,2としても、使用済燃料プール水位維持のための使用済燃料プールライニング健全性は維持される。キャスクとキャスクピットゲートの上から見た位置関係を第5-2図に示す。

使用済燃料を燃料取替機にてキャスクに収納する際は、キャスクピットにアクセスするため、燃料取替機のモードをキャスクピットモードに切り替える。通常燃料を□ mmしか吊り上げられないインターロックとなっているが、これによって、最大□ mmまで吊り上げられるようになる。しかし当該モード切替は通常モードでアクセス不可となるキャスクピットゲートの手前で行うこととし、□ mm以上の吊り上げもキャスクの手前であるキャスクピットゲート付近で行うこととする。第5-3図にキャスクとキャスクピットゲートの横から見た位置関係を示す。

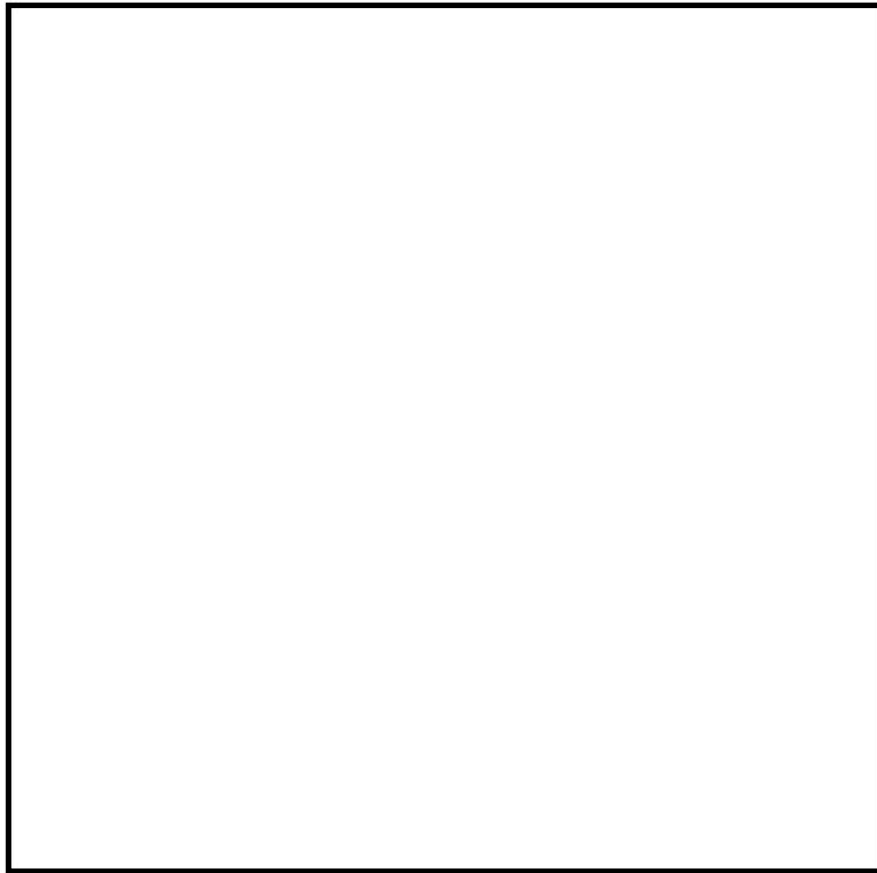
キャスクピットから取り出したキャスクは、原子炉建屋原子炉棟6階床面とは隔離されたキャスク除染ピットにおいて、転倒防止装置を取り付けることにより固縛する。

注記 *1: キャスク取扱い時は、インターロックにより可動範囲が制限されること及びキャスクピットはキャスクピットゲートにより使用済燃料プールと隔離されることから、キャスクがキャスクピット内に吊下ろされている状態で横行、走行方向に滑ったとしてもキャスクとキャスクピット壁の隙間は最大でも約20 cmであり、使用済燃料プールライニングを損傷させない。

*2: 鉛直方向ブレーキについて、制動力を上回る負荷トルクが発生した場合の滑り量は「補足340-2 耐震評価対象の網羅性、既工認との手法の相違点の整理について」にて説明する。



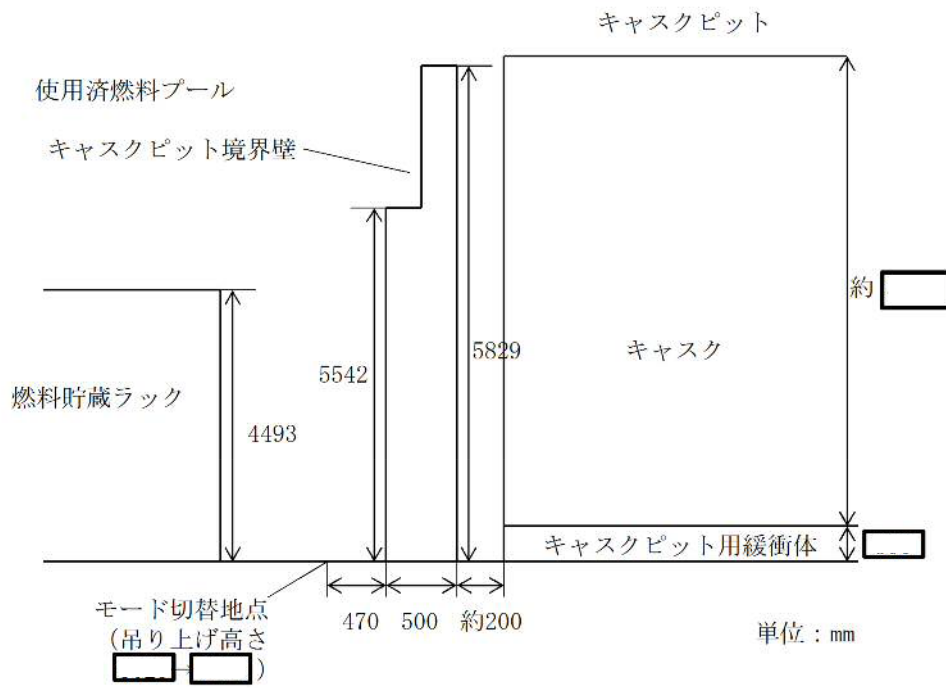
第5-1図 キャスク取扱い作業フロー (例)



キャスクの種類

番号	名称	外径 (mm)
1	キャスク (NFT-32B 型)	
2	ドライキャスク (A 社製)	
3	ドライキャスク (B 社製)	
4	ドライキャスク (C 社製)	

第5-2図 キャスクとキャスクピットゲートの位置関係 (上から見た図)



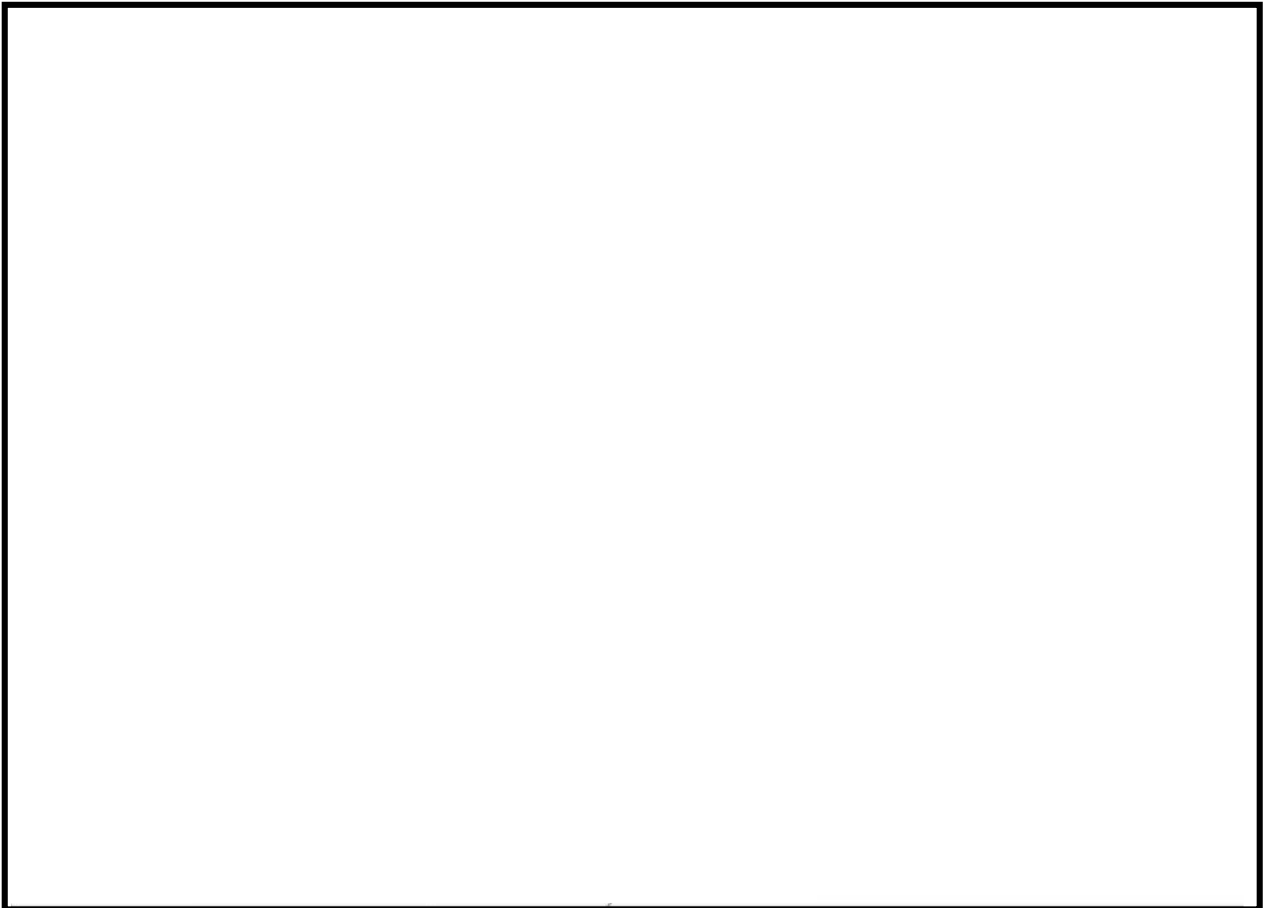
第5-3図 キャスクとキャスクピットゲートの位置関係 (横から見た図)

6. 照射済燃料及び使用済燃料取扱い時の使用済燃料プールへの影響

照射済燃料及び使用済燃料は、直接には燃料取替機のみにて取り扱われ、ラックから燃料取替機によって移動し、使用済燃料プール内にて必要に応じて検査され、所定の場所（燃料装荷の場合は原子炉、それ以外の場合は使用済燃料プール、キャスクなどを指す）へ移動される。

燃料体等の使用済燃料プール上での移動経路（例）を第6-1図に示す。

なお、使用済燃料プール底部の使用済燃料プールライニングの下に設置されている漏えい検知溝については第6-1図に示す箇所にて、ラックに隠れていない箇所は存在するが、燃料取替機が原子炉ウェルから使用済燃料プール内へ自動モードにて入ってくる場合、燃料取替機は最南端の使用済燃料貯蔵ラックに燃料を貯蔵する場合であっても、ラック南端のほぼ真上を移動して各ラックへ向かうため、燃料が直接漏えい検知溝上へ落下することはない。また、自動モード範囲外で唯一漏えい検知溝上を通る可能性があるのは旧チャンネル着脱機にアクセスする場合だが、直下に漏えい検知溝がない東側チャンネル着脱機1基のみを使用可能とすることから、燃料体等は漏えい検知溝上を通らない。



第6-1図 燃料体等の使用済燃料プール上での移動経路（例）

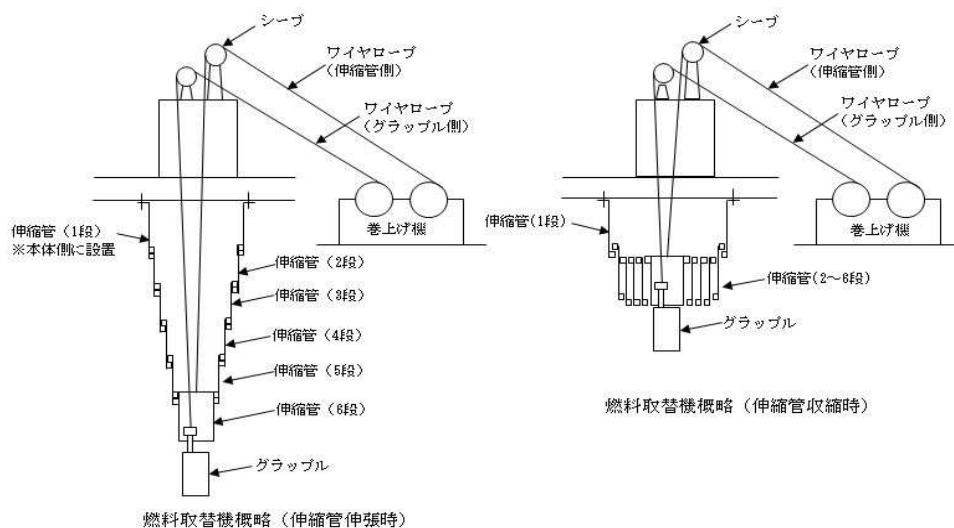
7. ワイヤロープ及び主要部材の強度に関する説明について

燃料取替機は、ワイヤロープを2本有しており、1本が「燃料集合体及びグラップル」を、もう1本が「伸縮管」をそれぞれ吊る構造となっている（第7-1図参照）。

燃料取替機は、定格荷重を450 kgとしており、0.5 t未満のためクレーン構造規格適用除外揚重機となるが、ホイスト、走行レール、ガーダの設計については、クレーン構造規格を準用し、その他の部品は、JIS及びメーカー社内基準等に基づいた設計としており、各ワイヤロープは、当該規格要求を満足する安全率を有した設計としている。

万が一どちらかのワイヤロープが切断した場合でも、残り1本のワイヤロープで吊荷（燃料集合体 約 kg）、伸縮管（本体側に設置（固定）された第1段を除く第2段～6段の荷重：約 kg）及びグラップル（約 kg）を保持可能な設計としている。

ワイヤロープの破断荷重 kN) に対し、使用上の最大荷重は12.5 kN（定格荷重 450 kg、グラップル 約 kg、伸縮管（第2段～6段の荷重）約 kg：合計約 kg）で、安全率は約10であり、クレーン構造規格要求（安全率3.55）を満足した設計となっている。また、燃料吊り荷重伝達ルートにおける、ワイヤロープ以外の主要強度部材（フック、グラップルシャフト、ワイヤロープ取付部等）においても、クレーン構造規格に定めるワイヤロープと同等以上の安全率を有する設計としている。



第7-1図 ワイヤロープ概要図

・片側ワイヤロープが切断した場合の衝撃荷重について

先に示したクレーン構造規格要求の安全率3.55は、静荷重に対して定められたものであるため、片側ワイヤロープが切断した場合の衝撃荷重が加わっても、残りの片側ワイヤロープが保持可能であることについて以下のとおり確認した。

ワイヤロープの破断荷重が、衝撃荷重と負担荷重の和よりも大きいことを確認する。

ワイヤロープ2本の内、伸縮管側のワイヤロープが切断したと仮定する。この場合の衝撃荷重Fは、

$$\int F dt = m \cdot v$$

で表される。ここで、m：伸縮管荷重（約 kg），v：速度である。ワイヤロープの固有周期をTとすれば、

$$F = 2\pi mV/T$$

となる。ここで、 π ：円周率、V：落下距離到達時の速度である。

固有周期Tは、以下の式で表せる。

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}$$

ここで、kはワイヤロープのバネ定数で、

$$k = E \cdot A / L \quad (E: \text{ワイヤロープの弾性係数 約 } \text{ N/mm}^2, A: \text{ワイヤロープの断面積 } \text{ mm}^2, L: \text{ワイヤロープの長さ (巻出し長さ) 約 } \text{ m})$$

落下距離は（伸縮管－グラップル間）として46 mmであり、落下距離到達時の速度Vは重力加速度を9.8 m/s²とすれば0.95 m/sと計算でき、衝撃荷重F=約 Nとなる。

ワイヤロープの負担荷重は、定格荷重 kgとグラップル約 kgの合計とし、衝撃荷重Fには余裕をみてF=40000 Nとすると、ワイヤロープの破断荷重： Nより、

$$\begin{aligned} \text{破断荷重} / (\text{衝撃荷重} + \text{負担荷重}) &= / (40000 + \times 9.8) \\ &= > 2 \end{aligned}$$

上記結果により、片側ワイヤロープ（伸縮管側）が切断した場合においても、破断荷重が衝撃荷重と負担荷重の和を上回っており、もう片側のワイヤロープにて保持可能な設計を有している。

なお、式の出典は機械工学便覧、各パラメータは以下による。

E：ワイヤロープのメーカ値を採用。ワイヤロープはプレテンション加工*¹を実施しており、経年後の固くなった状態を想定)

A：ワイヤロープは、約10倍の安全率を有した設計であり、2定検毎に交換を行うことから、顕著な恒久的伸びは発生しないため、断面積の縮小は考慮せず、製作時の寸法を想定

L：グラップルを最上限位置まで巻上げ，伸縮管第2段～6段の荷重が掛かった状態を想定

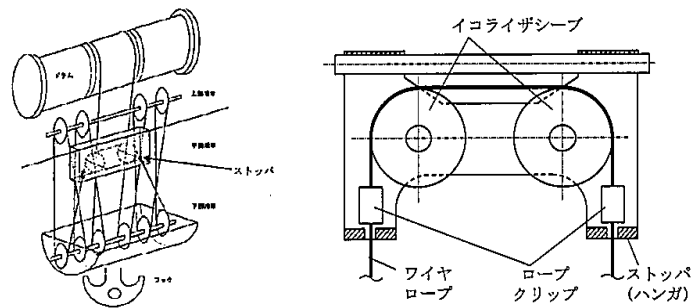
注記 *1：製作完了後，引張装置を使用し，所定の荷重（張力）をかけ，一定時間保持した後，荷重を元に戻すことを一定回数繰り返すことで，使用初期に生じる初期伸び及びロープ径の細りが少なくなる。なお，加工により弾性係数が約1.3倍増加する。

8. イコライザハンガの概要について

8.1 ストッパの機構について

イコライザハンガのストッパ機構は、ワイヤロープ、ロープクリップ、イコライザシーブ及びストッパで構成されている。

ワイヤロープが破断したとすると、吊荷の質量によりイコライザハンガからロープが引き出されるが、第8-1図のようにイコライザハンガのロープにロープクリップが取り付けられ、その下方にストッパが備えられた構造であり、ロープクリップがイコライザハンガに当たり保持されることで、引き出しが止まるので吊荷は落下しない。



第8-1図 イコライザハンガのストッパ概念図

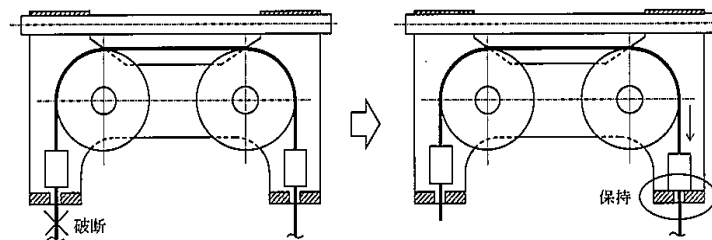
8.2 ワイヤロープ破断時の動作について

ケース①：ワイヤロープがイコライザハンガ外で破断した場合（第8-2図）

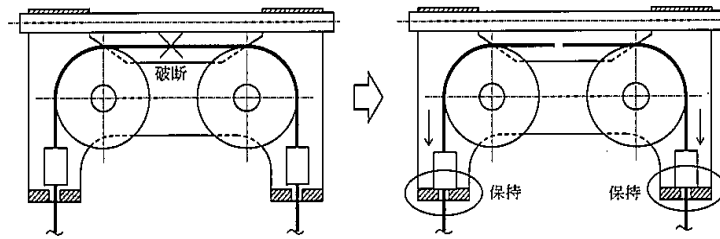
吊荷の質量により、イコライザハンガから破断していない方のワイヤロープが引き出されるが、ロープクリップがストッパに当たり保持されることにより、引き出しが止まり落下しない。

ケース②：ワイヤロープがイコライザハンガ内で破断した場合（第8-3図）

吊荷の質量により、イコライザハンガから両方のワイヤロープが引き出されるが、それぞれのロープクリップがストッパに当たり保持されることにより、引き出しが止まり落下しない。



第8-2図 ワイヤロープがイコライザハンガ外で破断した場合の概要図



第8-3図 ワイヤロープがイコライザハンガ内で破断した場合の概要図

8.3 ストップ機能の実証実験等の有無について

ロープクリップの把握力試験にて確認している（限界値約 kN に対しワイヤ 1 本あたり約 kN の荷重）。

8.4 ロープクリップの点検について

施設定期検査毎に外観点検，ボルトのハンマリング及びマーキングを行い，ずれの有無を確認することとしている。

9. 使用済燃料プールの機能に影響を及ぼすおそれのある重量物の抽出結果

使用済燃料プール周辺設備等の重量物について、使用済燃料プールへの落下時に使用済燃料プールの機能に影響を及ぼすおそれのある重量物について、使用済燃料プールとの位置関係、作業計画を踏まえて抽出した結果の詳細を第1表に示す。気中落下時の衝突エネルギーが落下試験の衝突エネルギーより大きい設備等について、十分な離隔距離の確保、固縛若しくは固定、又は基準地震動 S_s による地震荷重に対し使用済燃料プールへ落下しない設計を行うことにより落下防止対策を行っている。なお、使用済燃料プール周辺で資機材等を設置する場合は、落下時の衝突エネルギーの大小に関わらず、社内規程に基づき荷重評価を行い、設置場所や固定方法について検討した上で設置している。

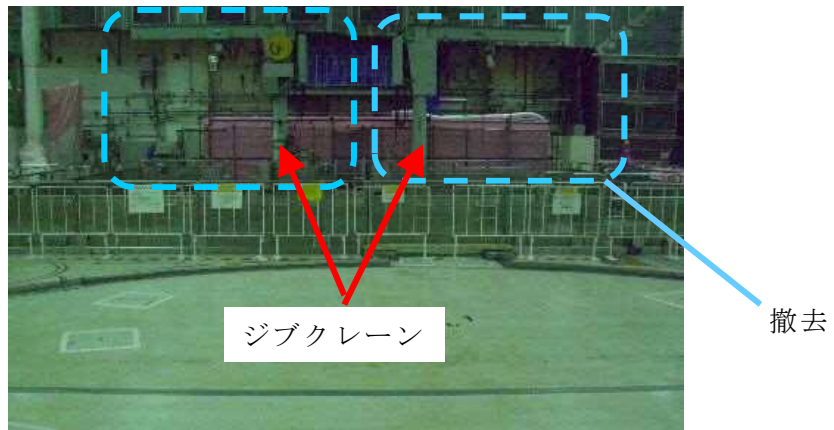
また、使用済燃料プールの機能に影響を及ぼすおそれのある重量物のうち、使用済燃料プールのフロアレベルに設置するものの一覧（第2表）、配置図（第9-3図）及び吊荷の落下防止対策（第3表）を以下に示す。

第1表 使用済燃料プールの機能に影響を及ぼすおそれのある重量物の抽出結果*1

番号	抽出項目	詳細	抽出の考え方	使用済燃料プールに対する位置関係、作業計画を踏まえた落下防止対策
1	原子炉建屋原子炉棟	屋根トラス、耐震壁等	作業計画を踏まえ抽出	基準地震動S ₁ に対する落下防止対策
		天井照明		
2	燃料取替機	燃料取替機	作業計画を踏まえ抽出	同上
3	原子炉建屋クレーン	原子炉建屋クレーン	作業計画を踏まえ抽出	同上
4	その他クレーン	使用済燃料プール用ジブクレーン	作業計画を踏まえ抽出	撤去*2
5	PCVヘッド (取扱具含む)	PCVヘッド	ウォークダウンにより抽出	離隔、固縛等による落下防止対策*3,4
		PCVヘッド吊具		
6	RPVヘッド (取扱具含む)	RPVヘッド (+スタッドボルトテンショナ)	ウォークダウンにより抽出	同上*3,4
		RPVヘッドフランジガスケット		
		ミラーインシュレーション		
		スタッドボルト着脱装置		
		ミラーインシュレーションペロー		
7	ドライヤ、セパレータ等 (取扱具含む)	ドライヤ	作業計画を踏まえ抽出 (プール床置きだが作業時吊り上げる)	同上*4
		セパレータ		
		シュラウドヘッドボルト		
		シュラウドヘッドボルトレンチ		
		D/S吊具		
		MSラインブラグ		
		MSLP用電源箱		
		MSLP用空気圧縮機		
		MSLP用電動チェーンブロック		
		マルチストロングバック		
D/S水中移動装置				
8	プール内設置物	制御棒貯蔵ハンガ及び貯蔵中制御棒*5	作業計画を踏まえ抽出 (プール床置きだが作業時吊り上げる)	落下時に使用済燃料プールの機能に影響を及ぼさない
		制御棒		
		燃料集合体(ツインプレドガイド含む)		
		収納缶類		
		LPRM等使用済炉内計装品		
		使用済チャンネル・ボックス		
使用済カートリッジフィルタ				
9	プールゲート類	燃料プールゲート(大)	作業計画を踏まえ抽出 (プール床置きだが作業時吊り上げる)	離隔、固縛等による落下防止対策*4
		燃料プールゲート(小)		
		キャスクビットゲート		
10	キャスク (取扱具含む)	キャスク	作業計画を踏まえ抽出 (ウォークダウン時はなし。作業時原子炉建屋に搬入)	同上*4
		キャスク吊具		
		ドライキャスク		
		ドライキャスク吊具		
		固体廃棄物移送容器 固体廃棄物移送容器用垂直吊具(R/B用)		
11	電源盤類	照明用トランス	ウォークダウンにより抽出	離隔、固縛等による落下防止対策*3
		照明用分電盤		
		チャンネル着脱機制御盤		
		作業用分電盤		
		中継端子箱		
		原子炉建屋クレーン電源切替盤、操作盤		
		水中照明電源箱		
		シッピング用操作盤部		
		シッピング動力盤		
		開閉器		
キャスクビット排水用電源盤				
12	フェンス・ラダー類	手摺り(除染機用レール含む)	ウォークダウンにより抽出	離隔、固縛等による落下防止対策*3
		可動ステージ開放用ホイスト架台		
		原子炉ウエル用梯子		
		DSP昇降梯子 パーテーション		
13	装置類	集塵装置(収納コンテナ含む)	ウォークダウンにより抽出	同上*3
		DSPパッキン用減圧器		
		酸化膜厚測定装置		
		水中テレビ制御装置		
		燃料付着物採取用装置 (本体、ポール、ヘッド)		
		水位調整装置 リークテスト測定装置		

番号	抽出項目	詳細	抽出の考え方	使用済燃料プールに対する位置関係、作業計画を踏まえた落下防止対策
14	作業用機材類	SFPゲート用架台	ウォークダウンにより抽出	落下時に使用済燃料プールの機能に影響を及ぼさない
		工具類		
		大型セイバーソー		
		遮へい体		
		防災シート類		
		足場材		
		水中簡易清掃装置保管箱		
		局所排風機		
		ウェル用資機材		
		ローリングタワー		
		フィルタ収納容器		
		LPRM収納箱		
		テント		
		酸化膜厚測定装置架台		
		工具箱（引き出しタイプ）鋼製		
		ドロップライト収納箱		
		グラップル収納箱		
		水中カメラ支持ポール		
		チャンネル固縛仮置き架台		
		NFV用吊り具ワイヤ		
除染ビット用クーラー				
スポットクーラー				
注水ユニット				
キャスク底部固定金具				
足場収納箱				
15	計器・カメラ・通信機器類	差圧計	ウォークダウンにより抽出	同上
		エリアモニタ		
		プロセスモニタ		
		ページング		
		固定電話		
		監視カメラ		
		IAEAカメラ		
		使用済燃料プール温度計		
		使用済燃料プール水位計		
		水素濃度計		
		D/Sプールレベルスイッチ（保管箱含む）		
		RCWサージタンク液位計		
		地震計		
16	試験・検査用機材類	テンション用テストブロック	ウォークダウンにより抽出	隔離、固縛等による落下防止対策 ^{*3}
		スタッドボルト試験片		
		FHM用テストウエイト		
		シッパーキャップ架台（16キャップ含む）		
		シッピング装置架台		
17	コンクリートプラグ・ハッチ類	可動ステージ	ウォークダウンにより抽出	同上 ^{*3,4}
		キャスク除染ビットカバー		
		DSプールカバー		
		原子炉ウェルシールドブラグ		
		スキマサージタンク用コンクリートブラグ		
		SFPスロットブラグ		
		SFPスロットブラグ吊具		
		DSPスロットブラグ		
		DSPスロットブラグ吊具		
		新燃料貯蔵庫コンクリートブラグ		
FPC F/Dコンクリートブラグ				
CUW F/Dコンクリートブラグ				
18	空調機	空調機	ウォークダウンにより抽出	落下時に使用済燃料プールの機能に影響を及ぼさない
		FHM操作室空調機		
19	重大事故対処設備	静的触媒式水素再結合器	作業計画を踏まえ抽出	基準地震動S _s に対する落下防止対策
		常設スプレッドヘッド		

- 注記 *1：なお、重量物の抽出にあたっては、ニューシア情報を確認し重量物の固縛措置に 関して、東海第二発電所で反映が必要な事項はないことを確認している。
- *2：ジブクレーンは基準地震動S_sによる使用済燃料プールへの波及的影響を考慮して撤去する（第9-1図参照）。
- *3：隔離、固縛等による落下防止対策の詳細について第2表にて記載する。
- *4：吊り上げ時の落下防止対策の詳細について第3表にて記載する。
- *5：制御棒貯蔵ハンガは3本掛けであるが、そのうち先端部を除く2箇所を使用する（第9-2図参照）。

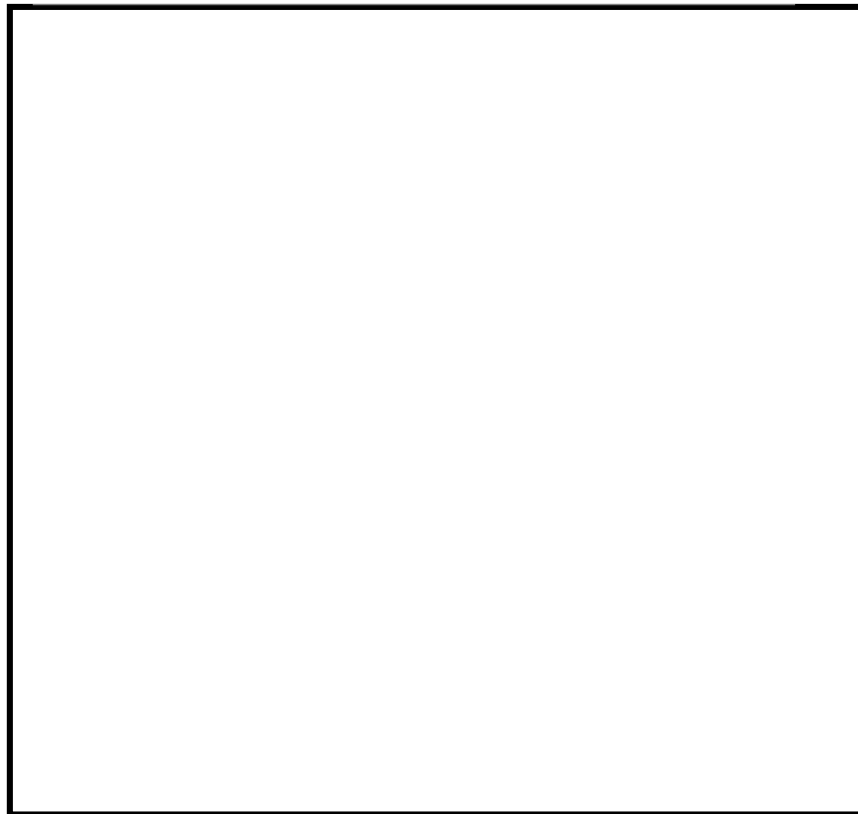
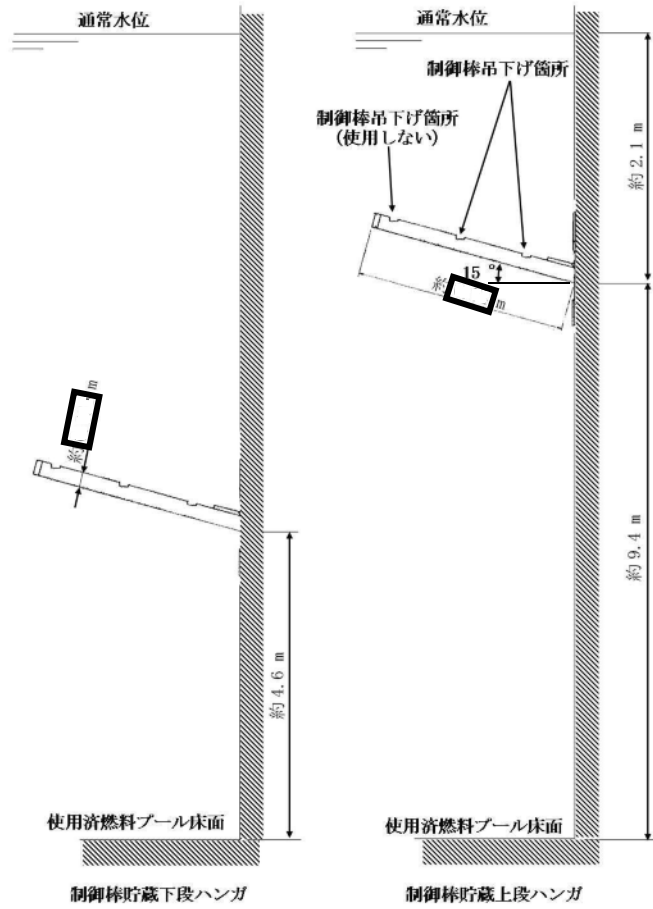


ジブクレーンは以下のものの吊上げ，吊下ろしに使用してきた。

- ・チャンネル・ボックス
- ・水中 TV カメラ
- ・酸化膜厚測定用治具
- ・かき取り装置
- ・シッパーキャップ

当該作業は原子炉建屋クレーンでも可能なため，ジブクレーン撤去による当該作業への影響はない。

第9-1図 ジブクレーンの撤去



第9-2図 制御棒貯蔵ハンガ

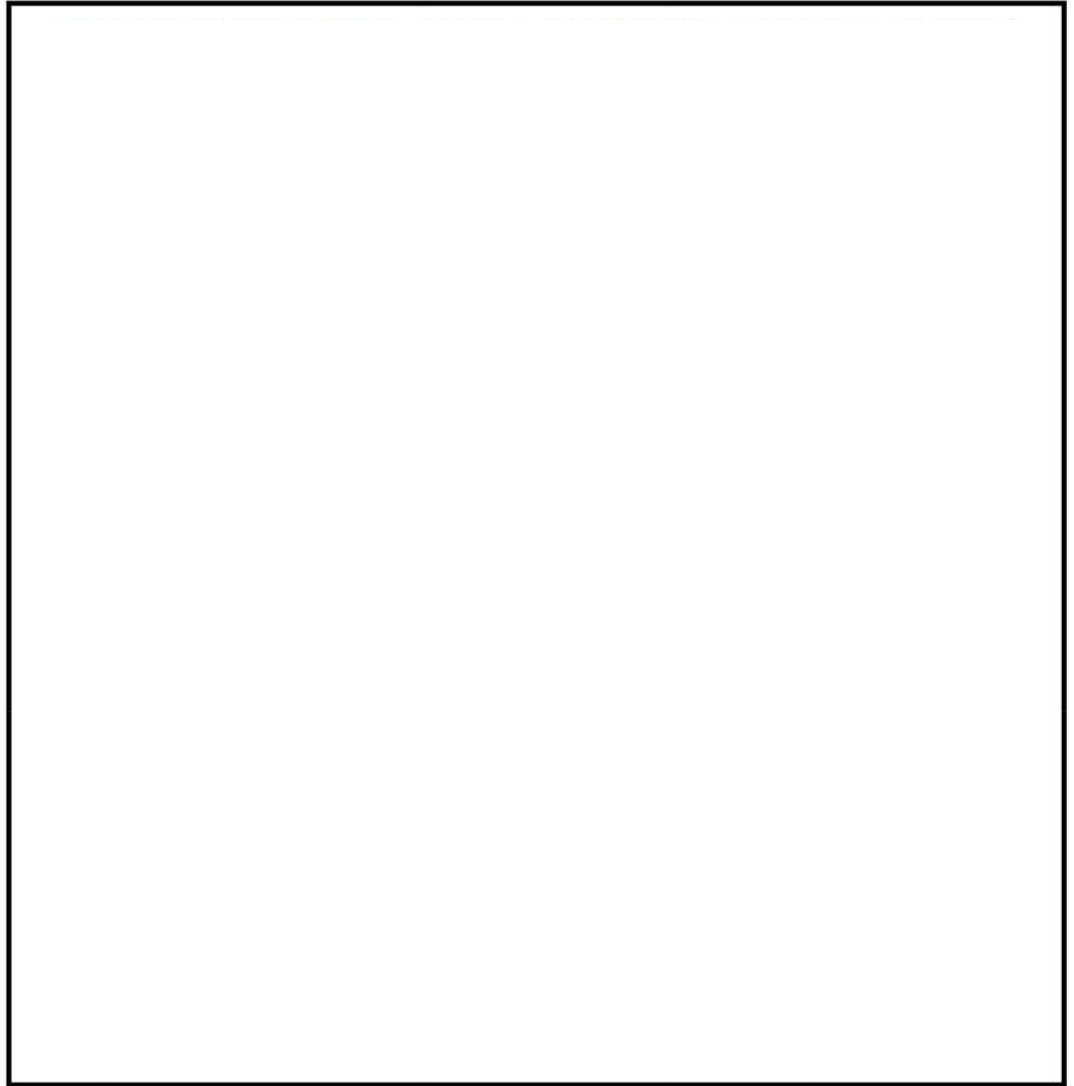
第2表 使用済燃料プールのフロアレベルに設置するものの一覧

番号	抽出項目	No	詳細	離隔の考え方 (使用済燃料プールからの距離, 設置高さ, 重量, 形状, 床の段差)
5	PCVヘッド (取扱具含む)	1	PCVヘッド	使用済燃料プールからの距離, 重量, 形状
		2	PCVヘッド吊具	
6	RPVヘッド (取扱具含む)	3	RPVヘッド (+スタッドボルトテンショナ)	使用済燃料プールからの距離, 重量, 形状
		4	RPVヘッドフランジガasket	
		5	ミラーインシュレーション	
		6	スタッドボルト着脱装置	
		7	ミラーインシュレーションペロー	
11	電源盤類	8	照明用トランス	使用済燃料プールからの距離, 形状, 床の段差
		9	照明用分電盤	
		10	チャンネル着脱機制御盤	
		11	作業用分電盤	
		12	中継端子箱	
		13	原子炉建屋クレーン電源切替盤, 操作盤	
		14	水中照明電源箱	
		15	シッピング用操作盤部	
		16	シッピング動力盤	
		17	開閉器	
12	フェンス・ラダー類	18	キャスクビット排水用電源盤	使用済燃料プールからの距離, 床の段差
		19	手摺り (除染機用レール含む)	
		20	可動ステージ開放用ホイスト架台	
		21	原子炉ウエル用梯子	
		22	DSP昇降梯子	
		23	パーテーション	
		24	集塵装置 (収納コンテナ含む)	
13	装置類	25	DSPパッキン用減圧器	使用済燃料プールからの距離, 床の段差
		26	酸化膜厚測定装置	
		27	水中テレビ制御装置	
		28	燃料付着物採取用装置 (本体, ボール, ヘッド)	
		29	水位調整装置	
		30	リークテスト測定装置	
16	試験・検査用機材類	31	テンショナ用テストブロック	使用済燃料プールからの距離, 床の段差
		32	スタッドボルト試験片	
		33	FHM用テストウエイト	
		34	シッパーキャップ架台 (16キャップ含む)	
		35	シッピング装置架台	
17	コンクリート プラグ・ハッチ類	36	可動ステージ	使用済燃料プールからの距離, 重量, 形状
		37	キャスク除染ビットカバー	
		38	DSプールカバー	
		39	原子炉ウエルシールドプラグ	
		40	スキマサージタンク用コンクリートプラグ	
		41	SFPスロットプラグ	
		42	SFPスロットプラグ吊具	
		43	DSPスロットプラグ	
		44	DSPスロットプラグ吊具	
		45	新燃料貯蔵庫コンクリートプラグ	
		46	FPC F/Dコンクリートプラグ	
		47	CUW F/Dコンクリートプラグ	

第3表 吊荷の落下防止対策

番号	抽出項目	詳細	使用するクレーン（主巻・補巻・モノレールホイスト）及び吊具（専用・汎用のワイヤ・スリング・吊具）	適用法令・安全率の考え方
5	PCVヘッド (取扱具含む)	PCVヘッド	主巻・専用吊具	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。吊具はメーカー社内基準に基づき、強度評価を実施。
		PCVヘッド吊具	主巻	工認-028 3. 落下防止対策による。
6	RPVヘッド (取扱具含む)	RPVヘッド (+スタッドボルトテンシヨナ)	主巻・専用吊具	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。吊具はメーカー社内基準に基づき、強度評価を実施。
		RPVヘッドフランジガasket	補巻・汎用吊具 (ワイヤロープ)	補巻はクレーン構造規格による。ワイヤロープはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
		ミラーインシュレーション		
		スタッドボルト着脱装置		
ミラーインシュレーションペロー				
7	ドライヤ、セパレータ 等（取扱具含む）	ドライヤ	主巻・専用吊具	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。吊具はメーカー社内基準に基づき、強度評価を実施。（二重化）
		セパレータ		
		シュラウドヘッドボルト	補巻・汎用吊具 (ワイヤロープ)	補巻はクレーン構造規格による。ワイヤロープはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
		シュラウドヘッドボルトレンチ		
		D/S吊具	主巻	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。
		MSラインプラグ	補巻・汎用吊具 (ワイヤロープ及びナイロンスリング)	補巻はクレーン構造規格による。ワイヤロープはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。ナイロンスリングはメーカー値に対して、余裕をもった使用荷重としている。
		MSLP用電源箱		
		MSLP用空気圧縮機		
		MSLP用電動チェーンブロック		
		マルチストロングバック	補巻・専用吊具	補巻はクレーン構造規格による。吊具はメーカー社内基準に基づき、強度評価を実施。
D/S水中移動装置	主巻	工認-028 3. 落下防止対策による。		
9	プールゲート類	燃料プールゲート（大）	補巻・汎用吊具 (ワイヤロープ)	補巻はクレーン構造規格による。ワイヤロープはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
		燃料プールゲート（小）		
		キャスクピットゲート	補巻・汎用のワイヤ	補巻はクレーン構造規格による。汎用のワイヤロープについてはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
10	キャスク (取扱具含む)	キャスク	主巻・専用吊具	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。専用吊具は二重化している。
		キャスク吊具	主巻	工認-028 3. 落下防止対策による。
		ドライキャスク	主巻・専用吊具	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。専用吊具は二重化している。
		ドライキャスク吊具	主巻	工認-028 3. 落下防止対策による。
		固体廃棄物移送容器	主巻・専用吊具	主巻については工認-028 3. 落下防止対策による。汎用のワイヤロープについてはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
		固体廃棄物移送容器用垂直吊具 (R/B用)	主巻	工認-028 3. 落下防止対策による。
		水位調整装置	—	—
		リークテスト測定装置	—	—
可動ステージ	—	—		
17	コンクリート プラグ・ハッチ類	キャスク除染ピットカバー	主巻・汎用のワイヤ	工認-028 3. 落下防止対策による。汎用のワイヤロープについてはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
		DSプールカバー	補巻・汎用吊具 (ワイヤロープ)	補巻はクレーン構造規格による。ワイヤロープはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
		原子炉ウェルシールドプラグ	主巻・汎用吊具 (ナイロンスリング)	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。ナイロンスリングはメーカー値に対して、余裕をもった使用荷重としている。
		スキマサージタンク用コンクリートプラグ	補巻・汎用吊具 (ワイヤロープ)	補巻はクレーン構造規格による。ワイヤロープはクレーン等安全規則により、安全率6 以上のものを使用。
		SFPスロットプラグ	補巻・専用吊具	補巻はクレーン構造規格による。吊具はメーカー社内基準に基づき、強度評価を実施。
		SFPスロットプラグ吊具	補巻	補巻はクレーン構造規格による。

番号	抽出項目	詳細	使用するクレーン（主巻・補巻・モノレールホイスト）及び吊具（専用・汎用のワイヤ・スリング・吊具）	適用法令・安全率の考え方
		DSPスロットプラグ	主巻・専用吊具	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。吊具はメーカー社内基準に基づき、強度評価を実施。
		DSPスロットプラグ吊具	主巻	主巻は工認-028 3. 落下防止対策による。
		新燃料貯蔵庫コンクリートプラグ	補巻・汎用のワイヤ	補巻はクレーン構造規格による。汎用のワイヤロープについてはクレーン等安全規則により、安全率6以上のものを使用。
		FPC F/Dコンクリートプラグ CUW F/Dコンクリートプラグ	モノレールホイスト	クレーン構造規格による。

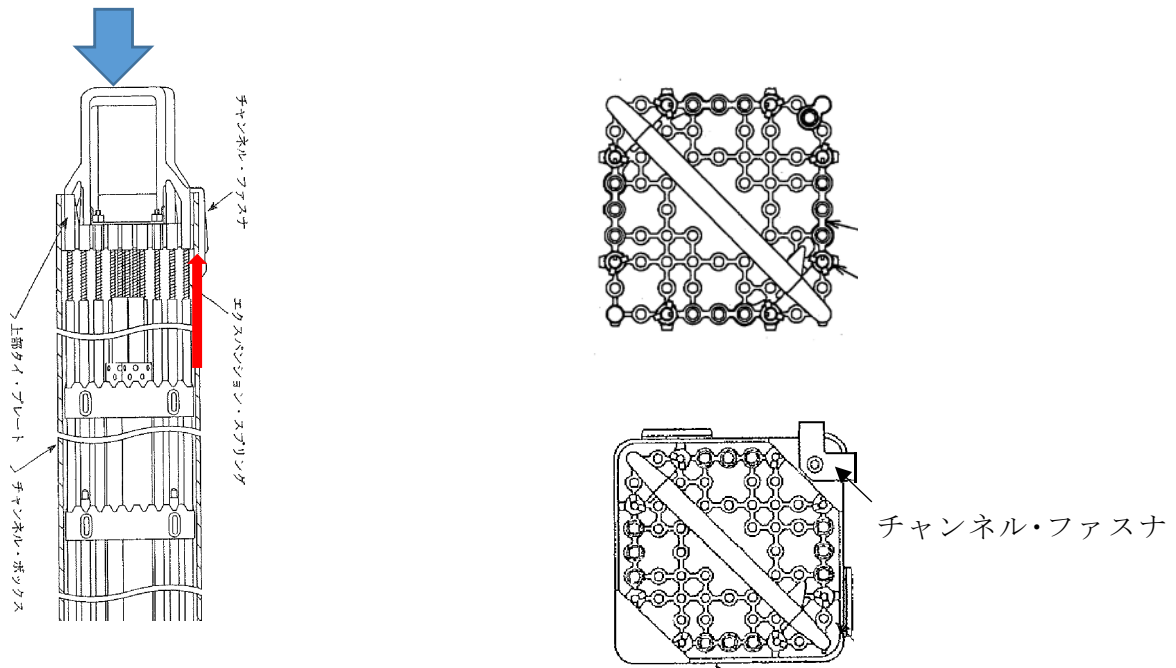


第9-3図 使用済燃料プールのフロアレベルに設置するものの一覧

重量物落下時のチャンネル・ボックスへの荷重について

チャンネル・ボックスはチャンネル・ファスナによって上部タイ・プレートに結合されており、チャンネル・ファスナを通じて上部タイ・プレートを支えている。その荷重は摩擦によって7つのスペーサ及び下部タイ・プレートにかかっている。7つのスペーサは2本のウォータ・ロッドのうちの1本に結合しており、支持されている。したがって、燃料棒でなくウォータ・ロッドにチャンネル・ボックスへの重量物の荷重がかかることになる（第1図）。

以上を考慮すると、チャンネル・ボックスによる支持を無視し、燃料棒のみで落下物の荷重を受け止める想定は保守的であると考えられる。



第1図 チャンネル・ボックスの受ける荷重について

BWR燃料集合体落下時の使用済燃料プールライニングの健全性について

1. 確認方法

BWR燃料集合体落下時の使用済燃料プールライニングの健全性の確認方法は、文献1*1の落下試験に基づいている。

文献1においては、落下時に使用済燃料プールライニングに衝突する下部タイ・プレート部分を特に模擬した310 kgの模擬燃料集合体を、気中にて高さ5.1 mから落下させている。

使用済燃料プールライニングは厚さ3.85 mmであり、模擬燃料集合体が落下して衝突したことにより、0.7 mm減肉したものの、割れ等の有害な欠陥は認められず、健全性が確認された。

このときの落下エネルギーは、

$$310 \text{ kg} \times \mathbf{g} \times 5.1 \text{ m} \approx 15.5 \text{ kJ}$$

であるので、使用済燃料プールにおけるBWR燃料集合体落下を想定する場合、下部タイ・プレートの形状は燃料集合体によらずほぼ同等であることから、この落下エネルギーを超えないことの確認により使用済燃料プールライニングの健全性を判断できる。

注記 *1: 株式会社日立製作所「沸騰水型原子力発電所燃料集合体落下時の燃料プールライニングの健全性について」(HLR-050), 平成6年12月

2. 落下試験の保守性

文献1の燃料集合体落下試験には、以下の保守性がある。

(1) 燃料集合体重量 (気中)

東海第二発電所の燃料に対し、8×8燃料(□kg)を除き、全ての燃料よりも重い310 kgの模擬燃料集合体を使用している。

(2) 燃料集合体重量 (水中)

気中の落下試験であるため、水中で落下する燃料集合体の浮力は無視している。

(3) 水の抵抗を無視

気中の落下試験であるため、水中で落下する燃料集合体を受ける水の抵抗を無視している。

(4) 使用済燃料プールライニング厚さ

東海第二発電所の使用済燃料プールライニング厚さは、公称値6 mm, 設計値□mmで、落下試験に使用したライニング厚さはそれよりも薄い3.85 mmであり、また、落下試験により0.7 mm減肉したものの、割れ等の有害な欠陥は認められず健全であった。

(5) 落下高さ

東海第二発電所の使用済燃料プール中で燃料取替機が通常の燃料移動の際の吊上げ高さ mm に対し、落下試験時は高さ 5.1 m から落下させた。

3. 東海第二発電所の運用における確認

使用済燃料プール水中における燃料取扱いの運用において、2. の保守性を超えて非保守的となる項目がある場合、その他の項目の保守性を考慮したうえで、1. のとおり落下エネルギーによる確認が必要となる。

(1) 燃料集合体重量

8×8 燃料のみ、落下試験に用いた模擬燃料集合体を上回る重量 (kg) である。これに対しては、排水体積分の水による浮力を考慮することにより、落下エネルギーを評価する（工認-028にて重量が310 kgを下回ることを評価済）。

(2) 落下高さ

使用済燃料プールにおける燃料取扱いの運用において、吊上げ高さの上限は2種類あり、通常時は上記の通り mm で落下試験の落下高さ 5.1 m に包絡されるが、キャスク装荷時は上限を切り替え、キャスクの最大寸法に応じて mm としており、包絡されない。これに対しては、排水体積分の水による浮力を考慮することに加え、落下中の水の抵抗を考慮することにより、落下エネルギーを評価する（4. 参照）。

新燃料搬入の場合、使用済燃料プールへの入水時は、気中吊上げ高さを含めると最大 m の高さになる。これについては、新燃料搬入時、使用済燃料プールまでの動線においては、チャンネル着脱機上で新燃料を入水させるまで、使用済燃料プールライニング上を通らない。新燃料の吊具として使用するナイロンスリングは気中作業で確実な装着を確認し、安全率は、6以上を確保しており、落下させない運用としている。チャンネル着脱機は、新燃料を所定の場所に確実に入水させるよう、入水箇所の周りを柵等で囲む構造としている。

4. 水の抵抗を考慮した落下エネルギー評価

(1) 落下エネルギー評価式

燃料集合体の変位（落下移動距離）を x (m) , 時間を t (s) とし、以下に示す運動方程式を用いて、6 m 落下後の使用済燃料プールライニング衝突直前の速度及び落下エネルギーを評価する。本評価では、燃料集合体は垂直に落下し、落下中に水による浮力及び抵抗（抗力）を受けることを想定する。

$$m_1 \frac{d^2x}{dt^2} = (m_1 - \rho V) \cdot g - D$$

これを、速度 v の式にすると

$$m_1 \frac{dv}{dt} = m_2 \cdot g - D$$

ここで、

g : 重力加速度, 9.80665 m/s²

m_1 : 燃料集合体の重量 (気中), kg (東海第二発電所使用済燃料プール内最大重量燃料 : 8 × 8 燃料)

m_2 : 燃料集合体の重量 (水中), kg (浮力考慮) ($m_1 - \rho V$)

D : 抗力 ($= \frac{1}{2} \rho C_d A v^2$)

ρ : 水の密度, 9.8045×10^2 kg/m³ (大気圧・65 °C)

C_d : 抗力係数, 0.60 (抗力係数測定試験結果を反映した設定の考え方を参考資料に示す)

A : 流れに垂直な面の投影面積, 正方形断面 ($0.13 \text{ m} \times 0.13 \text{ m} = 1.69 \times 10^{-2} \text{ m}^2$) を仮定

V : 燃料集合体体積, m³ (メーカー設計値)

上記微分方程式より、

$$v = \sqrt{\frac{m_2 g}{k}} \cdot \tanh\left(\frac{k}{m_1} \sqrt{\frac{m_2 g}{k}} \cdot t\right)$$

ここで、

$$k = \frac{1}{2} \rho C_d A$$

(2) 落下エネルギー評価結果

6 m 落下時点の速度 v は m/s と評価され、このときの落下エネルギーは、

$$\text{} \times \text{}^2 / 2 \doteq 14.9 \text{ kJ}$$

であり、15.5 kJ を下回るため、使用済燃料プールライニングの健全性を確認した。

なお、上記に従った燃料集合体の気中と水中の落下距離と落下速度の関係を示したグラフを第 1 図に示す。



第 1 図 燃料集合体の落下距離と落下速度の関係

参考資料 抗力係数測定試験の結果を反映した設定の考え方について

以下のとおり，燃料集合体の抗力係数測定試験を実施し，燃料集合体の使用済燃料プールライニングへの落下エネルギー評価に用いる抗力係数を，測定値のばらつき等を考慮して設定した。

1. 燃料集合体抗力測定試験

(1) 試験条件 (図 1)

試験体については，実機 8 × 8 形状の模擬燃料集合体（燃料ペレットなし，チャンネル・ボックス付）を用いた。

計測速度については，実機における燃料集合体落下では約 10 m/s の速度が想定されるが，試験場の機能の上限である 6.0 m/s を最大値として，2.8 m/s，4.0 m/s，5.0 m/s，6.0 m/s にて計測した。

水温については，実機では使用済燃料プール水温として最大 65 °C まで想定される場所，試験場では室温と同等の 20 °C 程度となる。

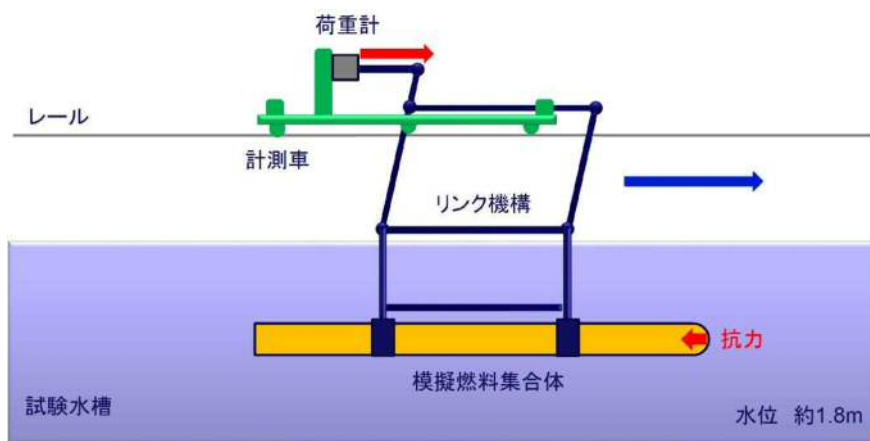


図 1 抗力係数測定試験イメージ

(2) 評価手順

- ①燃料集合体を取り付けた状態で，荷重計により計測速度毎の抗力 D_1 を測定。
- ②燃料集合体を取外した状態で，荷重計により計測速度毎の抗力 D_2 を測定。
- ③ $D_1 - D_2$ の差分から，燃料集合体だけの抗力 D を得る。
- ④抗力 D から抗力係数 C_d を求める。

$$C_d = \frac{2D}{\rho A v^2}$$

ここで， D ：抗力 [N]， ρ ：水密度 [kg/m^3]， A ：流れに垂直な投影面積 [m^2]， v ：流速 [m/s]

また，抗力係数のレイノルズ数依存性を確認。

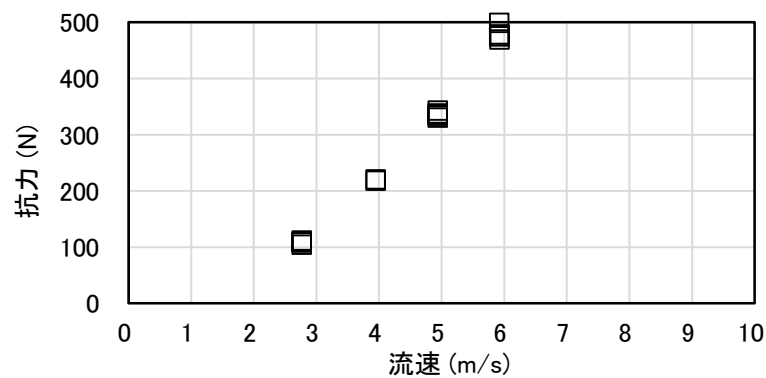
⑤試験体系での CFD 解析（2. 参照）により，試験状態を評価し試験結果と傾向を比較，確認。

⑥CFD 解析により実機状態での抗力係数を計算し，実機の抗力係数を推定。

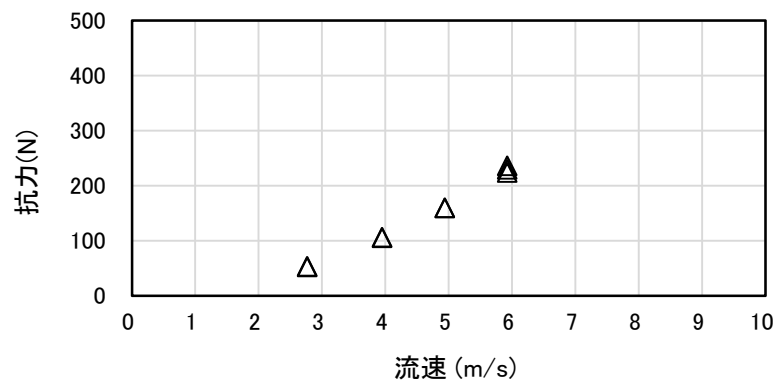
⑦抗力係数から落下エネルギーを評価し，既往の燃料集合体落下試験に包絡されることを確認。

(3) 試験測定結果

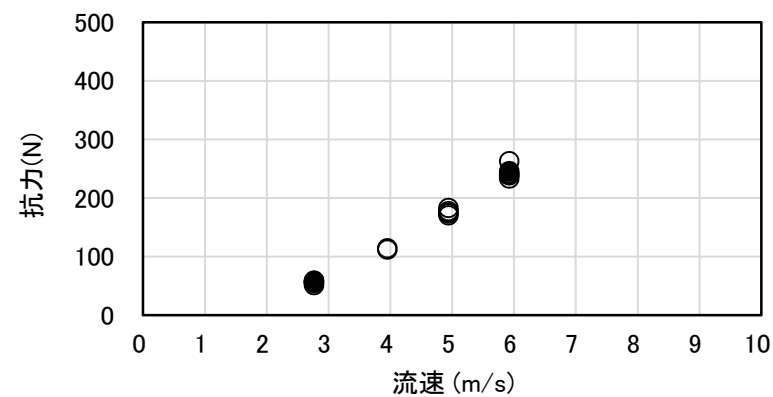
①燃料集合体と固定治具の合計抗力 D1



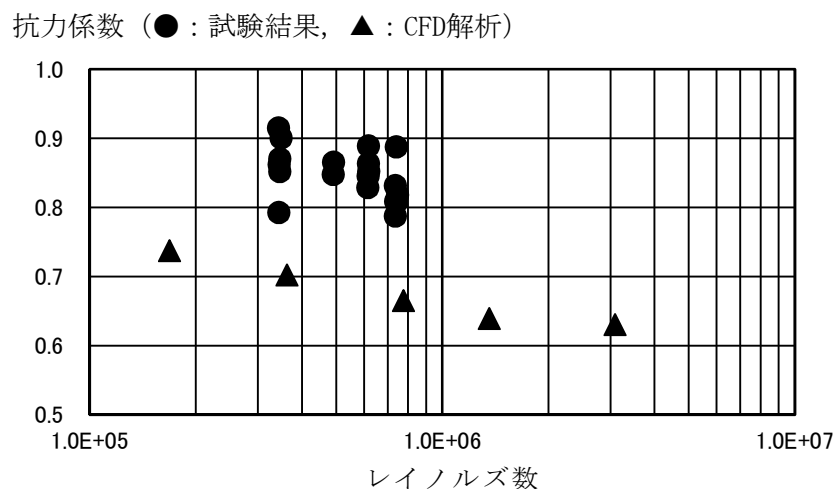
②固定治具のみの抗力 D2



③燃料集合体のみの抗力 D



④燃料集合体の抗力係数 C_d



2. CFD 解析

今回の試験において、試験体の形状については実機と同じものを使用したが、速度及び水温の不足分をレイノルズ数で整理して、CFD 解析により抗力係数 C_d を求め補完した。

(1) 解析モデル

解析モデルの概念図を図 2 に示す。燃料集合体外形の詳細形状を模擬（下部タイプ・プレートの CAD を使用）し、燃料集合体内部形状は多孔質近似（実際の集合体内の流動抵抗係数（燃料設計値）を設定）とした。

(2) 解析手法

解析コードの概要を表 1 に示す。解析コードは、汎用熱流体解析コード（STAR-CCM+）であり、解析手法には定常単相流解析を、乱流モデルにはチャンネル・ボックス近傍をより精緻に計算するモデルを採用してチャンネル・ボックス近傍にメッシュを密に配置し、流速分布を考慮するメッシュ条件とした。

(3) 解析条件

一様流の中で燃料集合体にかかる抗力を解析するものとし、以下のとおり試験条件と実機条件にて解析した。

<試験解析> 流体：水（大気圧，20 °C），流速：1.3 m/s，2.8 m/s，6.0 m/s（レイノルズ数 $Re=1.7 \times 10^5 \sim 7.8 \times 10^5$ ）

<実機補完> 流体：水（大気圧，65 °C），流速：10.5 m/s（レイノルズ数 $Re=3.1 \times 10^6$ ）

(4) 使用コードの適用事例

使用コードには、以下の適用事例がある。

- ・円柱後流部の渦剥離構造において、レイノルズ数 Re 1×10^5 , 2×10^6 , 1×10^7 に対する抗力係数 C_d について実験値及び他コードとの比較により妥当性確認がなされている (Ahmed Ibrahim, et al “CFD Simulation of Current Past Bluff Body at High Reynolds Number,” Offshore Technology Conference, OTC-26911 f MS, Huston, Texas, USA, May 2016.)
- ・高レイノルズ数体系における複雑形状に対する適用事例多数 (航空機, 自動車等)

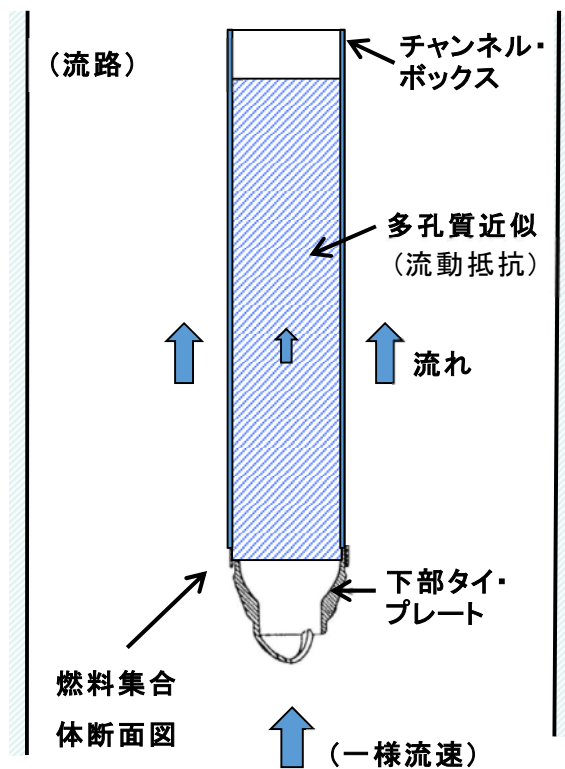


図2 解析モデルの概念図

表 1 解析コードの概要

項目 \ コード名	STAR-CCM+
使用目的	3次元流動解析による燃料集合体の抗力評価
開発機関	シーメンス社
開発時期	2004年
使用したバージョン	13.02
計算機コードの概要	有限体積法を用いた汎用流体解析用計算機プログラムであり、数多くの研究機関や企業において、航空宇宙、鉄道、自動車、機械、原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野の流体解析に広く利用されている。
検証(Verification)及び妥当性確認(Validation)	<p>【検証 (Verification)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 他コードによる計算結果と比較して検証が実施されていることを確認した。 <p>【妥当性確認 (Validation)】</p> <ul style="list-style-type: none"> 本解析コードは有限体積法を用いた汎用流体解析用計算機プログラムであり、数多くの研究機関や企業において、様々な分野の流体解析に広く利用されていることを確認している。 本解析コードは、航空宇宙、鉄道、自動車、機械、原子力・火力・水力・風力発電などの様々な分野における使用実績を有しており、妥当性は十分に確認されている。

3. 試験結果の整理及び評価

(1) 統計的整理

抗力係数 C_d の試験結果を計測車の速度毎（ \equiv レイノルズ数 (Re) 毎）に統計的に整理した結果は以下のとおりである。

2.76 m/s (Re = 3.58×10^5) : データ数 6, 平均値 0.866, 標準偏差 0.0429

3.95 m/s (Re = 5.11×10^5) : データ数 2, 平均値 0.857, 標準偏差 0.0126

4.94 m/s (Re = 6.39×10^5) : データ数 5, 平均値 0.856, 標準偏差 0.0225

5.92 m/s (Re = 7.67×10^5) : データ数 6, 平均値 0.824, 標準偏差 0.0346

上記のうち最も大きい標準偏差 0.0429 によって、 $\pm 3\sigma = \pm 0.129$ にて 99.7 % 信頼区間をとり、試験結果の抗力係数から 0.129 を差し引いて落下エネルギー評価に用いる。

(2) 近似曲線

1. (3) ④の抗力係数 C_d のグラフに近似曲線を加えたものが図 3 である。流体力学上の観点から、直線近似でなく対数近似した曲線を示した。対数近似は双方の傾向が同様になっており、摩擦抵抗にレイノルズ数の -0.25 乗の項が含まれるブラジウスの式の特徴の一端が示されていると考えられる。この場合、試験測定結果の外挿（水温 65 °C, 落下速度 10.5 m/s）は 0.77 となる。

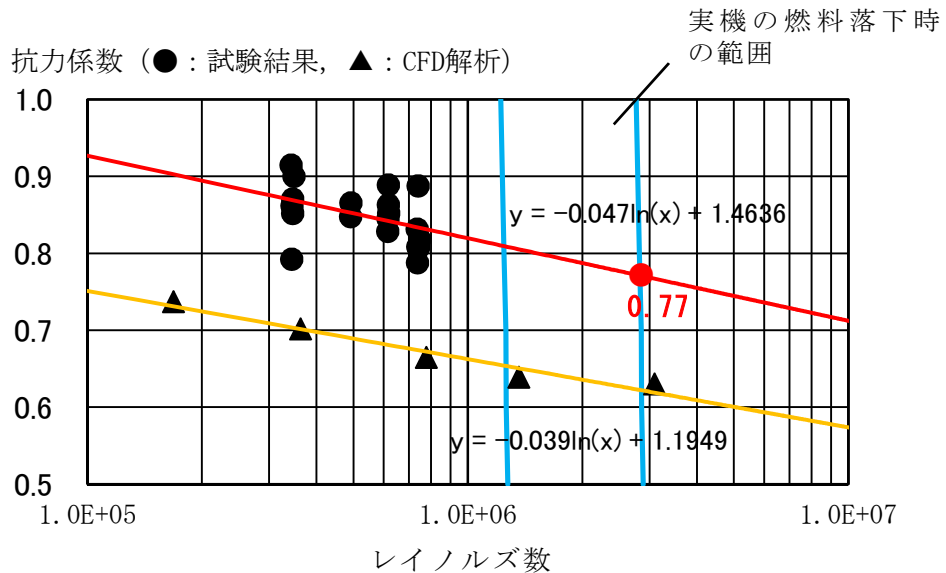


図 3 試験結果の外挿の検討

(3) 中実四角柱の試験

比較的高いレイノルズ数でのデータを得るため、中実の四角柱（水が柱体の中を通過しない）が円管内流水によって受ける抗力を測定する試験も行った（図4）。図3にこの実験の結果を加えて、図5に示す。この場合は内部を水が通り抜けることはなく、レイノルズ数が高くなっても抗力係数の変化は小さい。（2）と同様に表計算ソフトの対数近似により外挿によっても、変化が小さい傾向を確認した。

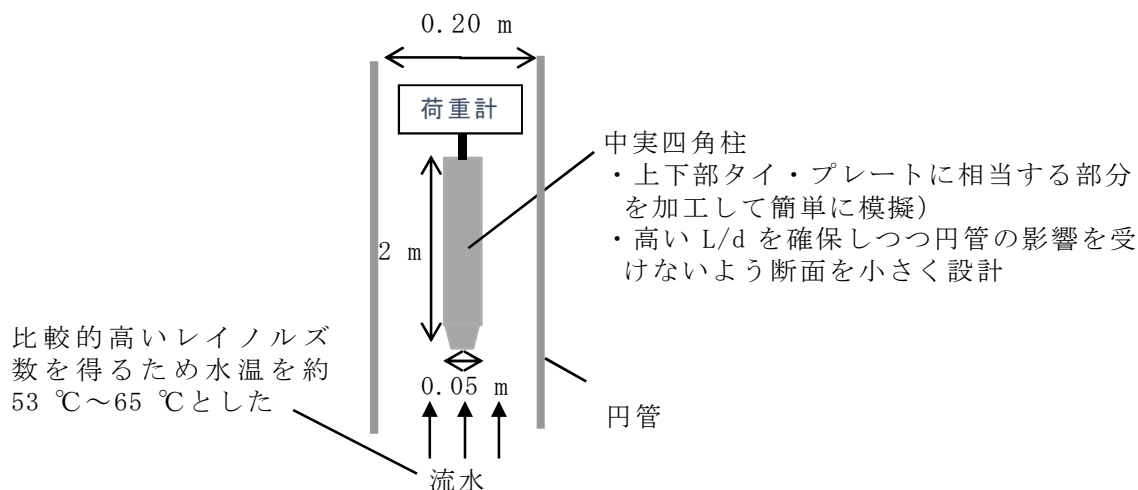


図4 中実四角柱の実験

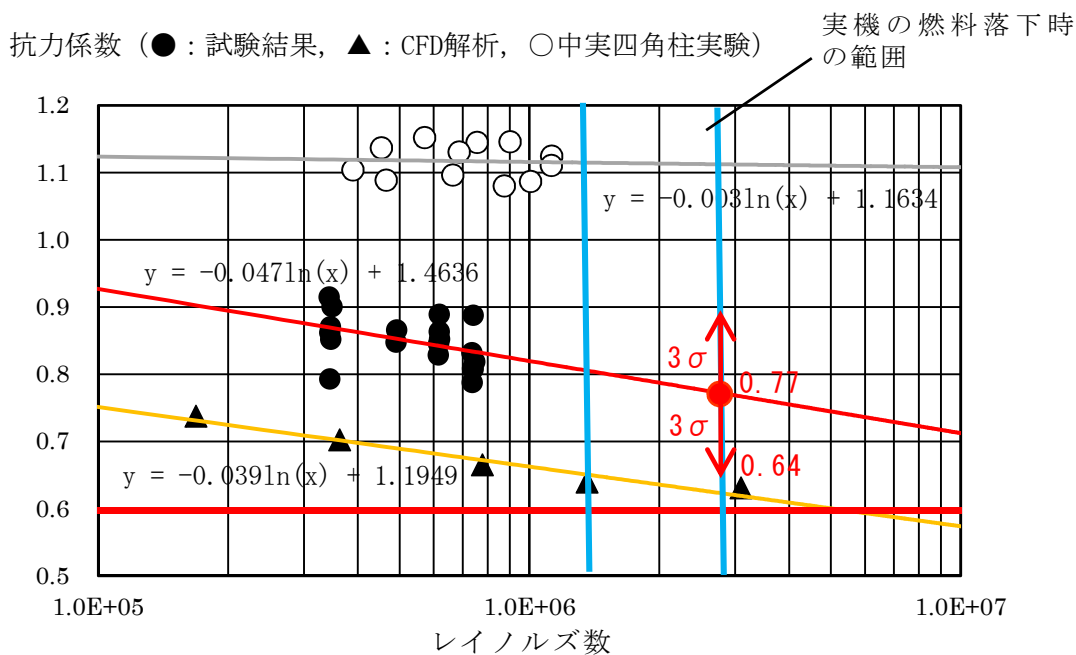


図5 抗力係数の外挿

(4) CFD 解析結果と試験測定結果への考察

CFD 解析では、燃料集合体の外面形状と内部流動抵抗を精密に模擬する一方、表面粗さや燃料集合体内の非均質性を無視して単純化 (図 6) しているため、抗力係数解析値は保守側の小さい値となる。解析の不確かさを考慮しても保守性が大きく、実際の燃料集合体の抗力係数が解析値を下回ることはない。詳細は表 2 のとおり。

表 2 CFD 解析結果に対する感度評価

	項目	説明	抗力係数への感度
正 の 感 度	多孔質下端部に実際の空隙率 (流路面積割合) を与える	多孔質近似した燃料集合体内部の流動抵抗が変らないように配慮しながら、下部タイ・プレート部分に相当する多孔質下端部に実際の空隙率 (流路面積割合) を与えた結果、燃料集合体内部を通る流量に変化はなかったものの、抗力係数は増加。これは、下部タイ・プレート部分の構造物としての充填率が増加したことにより、下部タイ・プレート部分 (多孔質下端面) に衝突する水流の圧力を直接受ける割合が増加したためと考えられる。	約 6 % 増加
	横流れ禁止	構造物がある場所には本来流れないため、横流れを禁止する措置をとると抗力係数は増加。これは、横流れ禁止前には斜めに流入できた経路に流入できなくなり、流入できない流れによる圧力抗力が増加したためと考えられる。	約 5 % 増加
	表面粗さ	表面粗さを一律 20 μm (滑らかとされる表面の 2 倍~数倍) とする	約 1 % 増加
負 の 感 度	多孔質近似に用いた圧損係数の誤差	圧損係数を 10 % 低下させる	約 1 % 低下
	解析が収束に至るまでの抗力係数の振幅	解析が収束に至るまでの抗力係数の振幅は ± 2 % 程度あるため低い方を考慮	約 2 % 低下
	解析手法の誤差	円柱の文献値と CFD 解析の誤差を差し引く	約 1 % 低下

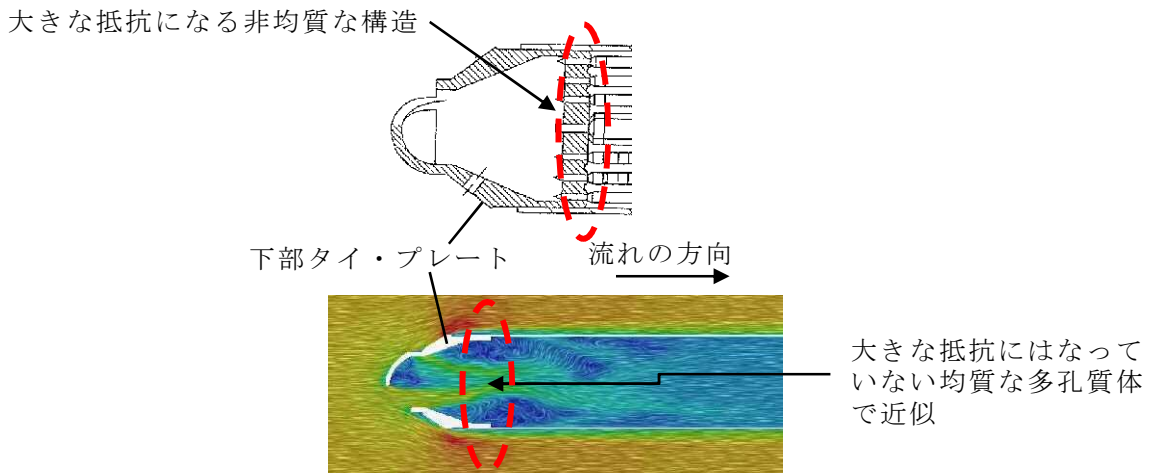


図 6 CFD 解析の保守性

抗力係数の試験測定結果は、当初推定した 0.80 を下回った。燃料集合体は、外観は直方体に近いが、内部を通り抜ける水の影響を無視できず、内部を通り抜けた後の水流が後流の抗力を打ち消す方向に作用したため、抗力係数が低くなった可能性が考えられる（図 7）。

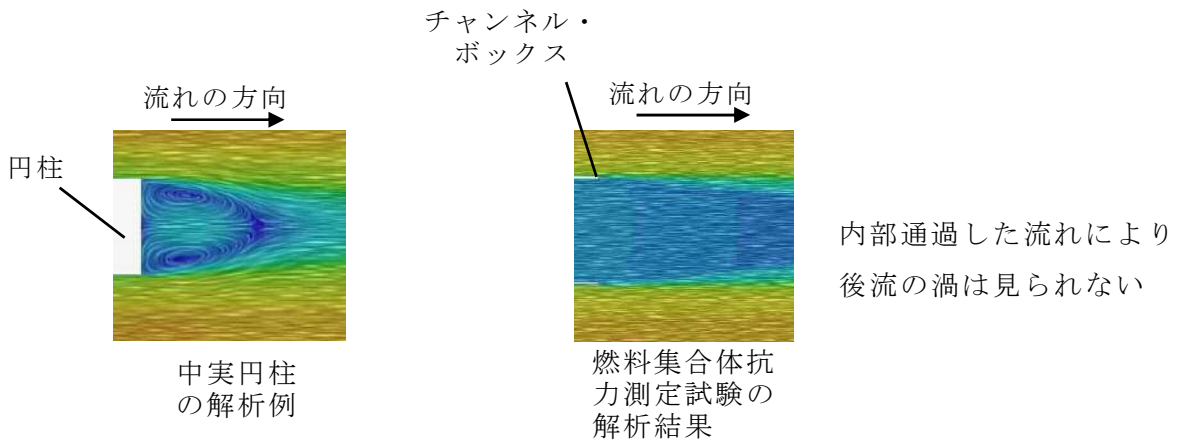


図 7 内部通過流の影響（CFD 解析結果の比較）

(5) 試験結果

試験結果として、落下エネルギーを評価する。落下エネルギー評価に用いる抗力係数は、(2) 近似曲線にて求めた 0.77 から、(1) 統計的整理により求めた $3\sigma = 0.129$ を差し引いて、0.64 に余裕をみた 0.60 とする。

抗力係数 0.60 とすると、落下高さ m で使用済燃料プール床面に衝突するときの速度は m/s となり、最も重い 8×8 燃料の重量を用いて落下エネルギーを評価すれば、14.9 kJ であり、の落下試験結果 15.5 kJ よりも低い結果となった。

なお、燃料集合体の落下において、落下開始から使用済燃料プールライニングへの衝突まで抗力係数を一定とする本手法においては、速度 0 m/s 付近でレイノルズ数が非常に小さい落下開始時には、抗力係数は一般的に大きな値となり、次第に低下することを考慮していないため、手法そのものにも保守性がある。

また、今回の燃料集合体抗力係数測定試験において、模擬燃料集合体を水中で動かし始めてから測定速度に達するまでの加速領域において、測定区間よりも大きな抗力を測定した。これより、重力によって加速されながら静水中を落下していく燃料集合体においても、同様の大きな抗力が働くと考えられる。この抗力を考慮しなかった今回の試験結果は、更に保守的である可能性がある。