

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 14
提出年月日	平成 30 年 7 月 6 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】

平成 30 年 7 月

日本原子力発電株式会社

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」に係る添付資料（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。

工認添付資料	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作業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
	10. 技術基準規則への適合性
	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
	別添3 燃料取替機のスロッシングによる波及的影響評価別添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

2. 別 紙

(1) 工認添付資料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 工認添付資料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】

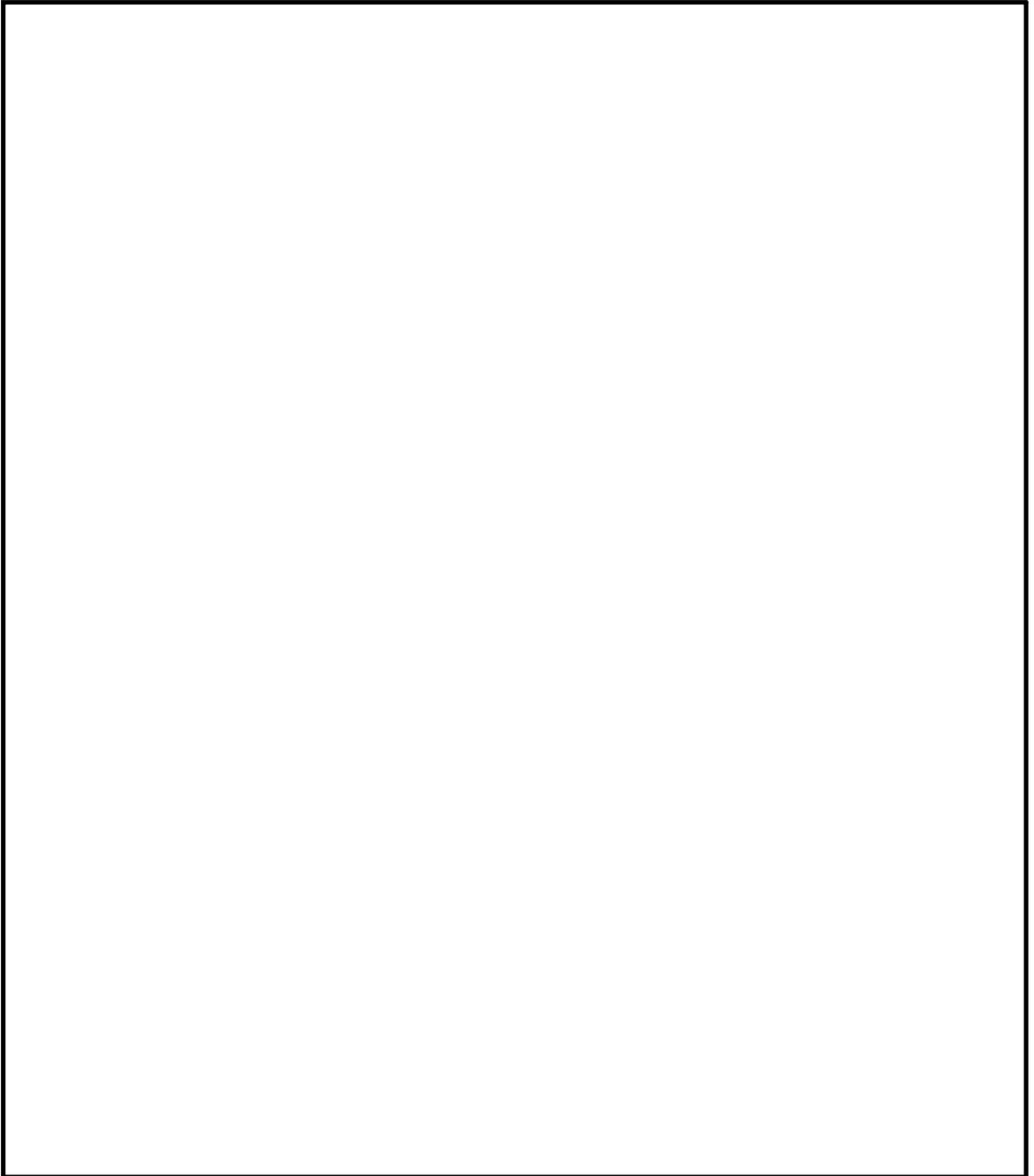
工認添付資料		設置許可まとめ資料			引用内容
V-1-3-3	燃料体等又は重量物の落下による使用済燃料貯蔵槽内の燃料体等の破損の防止及び使用済燃料貯蔵槽の機能喪失の防止に関する説明書	DB	第 16 条	燃料体等の取扱施設及び貯蔵施設	落下防止について引用 ただし、燃料取替機、原子炉建屋クレーン及び使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーンに係る評価方法、評価結果については、各耐震計算書に示す。

## 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
10. 技術基準規則への適合性	10-1
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
別添3 燃料取替機のスロッシングによる波及的影響評価	別3-1

1. 使用済燃料プール周りの重量物の配置

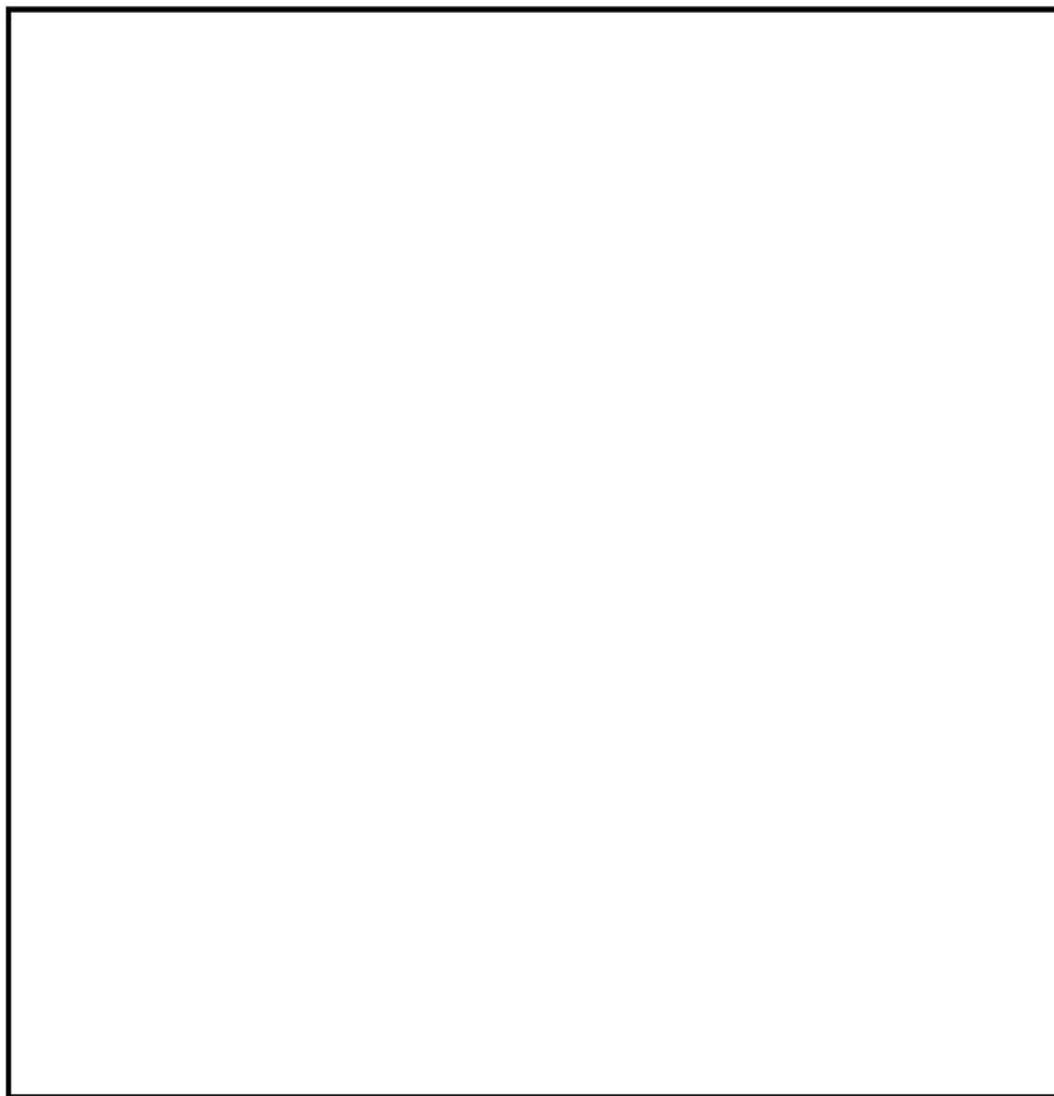
落下時に使用済燃料プールの機能へ影響を及ぼすおそれのある重量物の配置を第1-1図に示す。



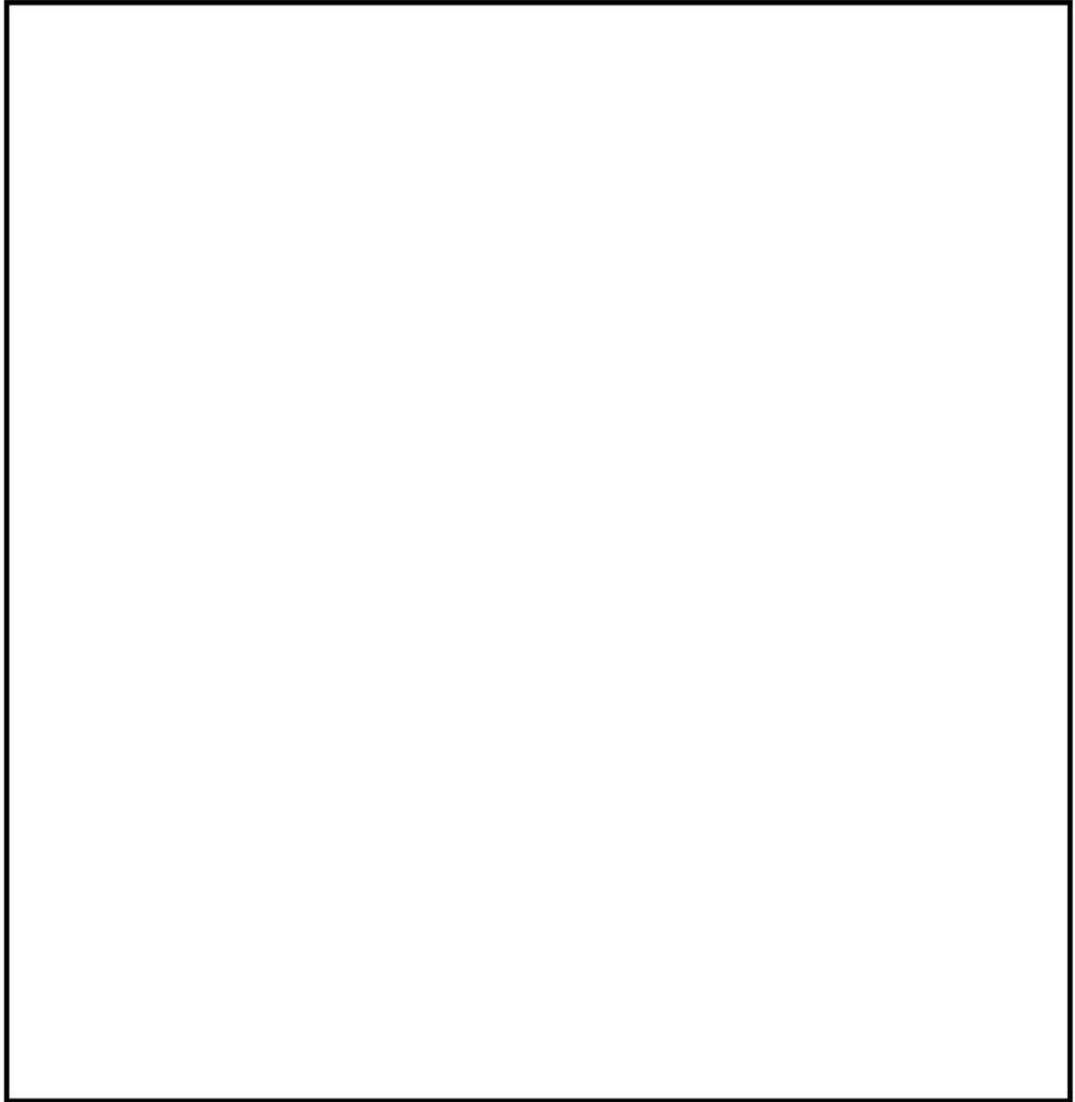
第 1-1 図 使用済燃料プール周りの重量物の配置

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、通常時、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。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通常時待機場所を示す。



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

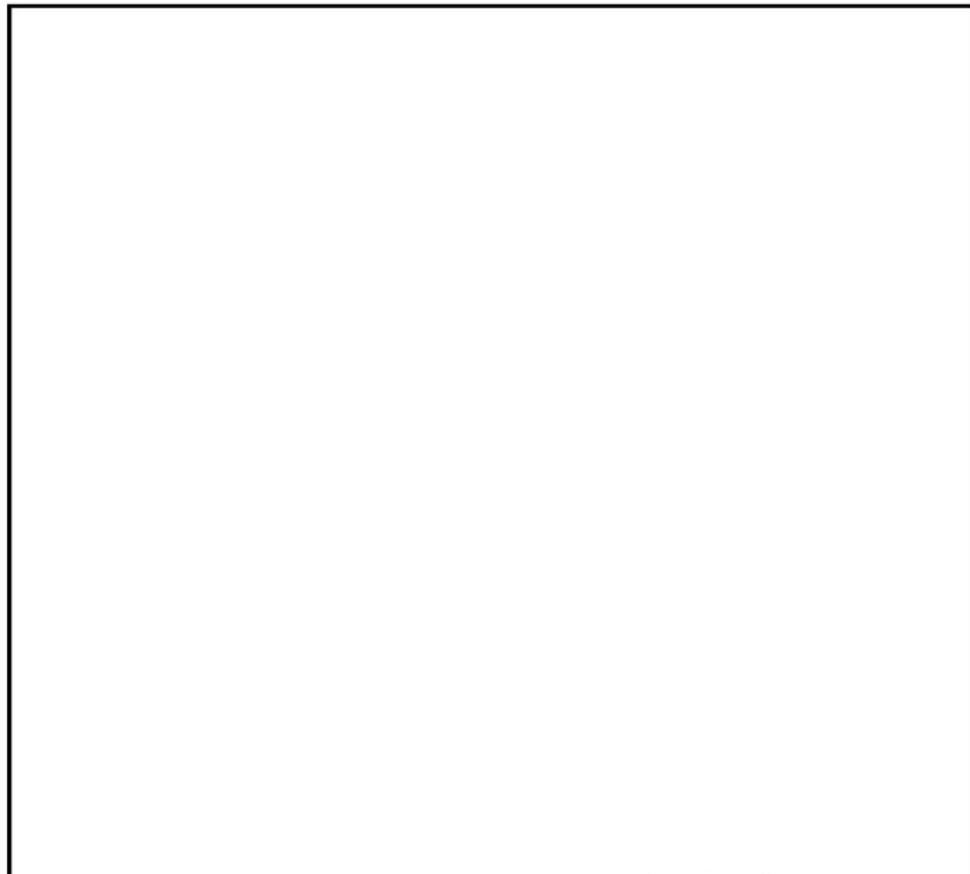
### 3. 原子炉建屋クレーンのインターロックについて

原子炉建屋クレーンは、使用済燃料プール上を重量物及びキャスク（使用済燃料輸送キャスク及び使用済燃料乾式貯蔵容器）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。

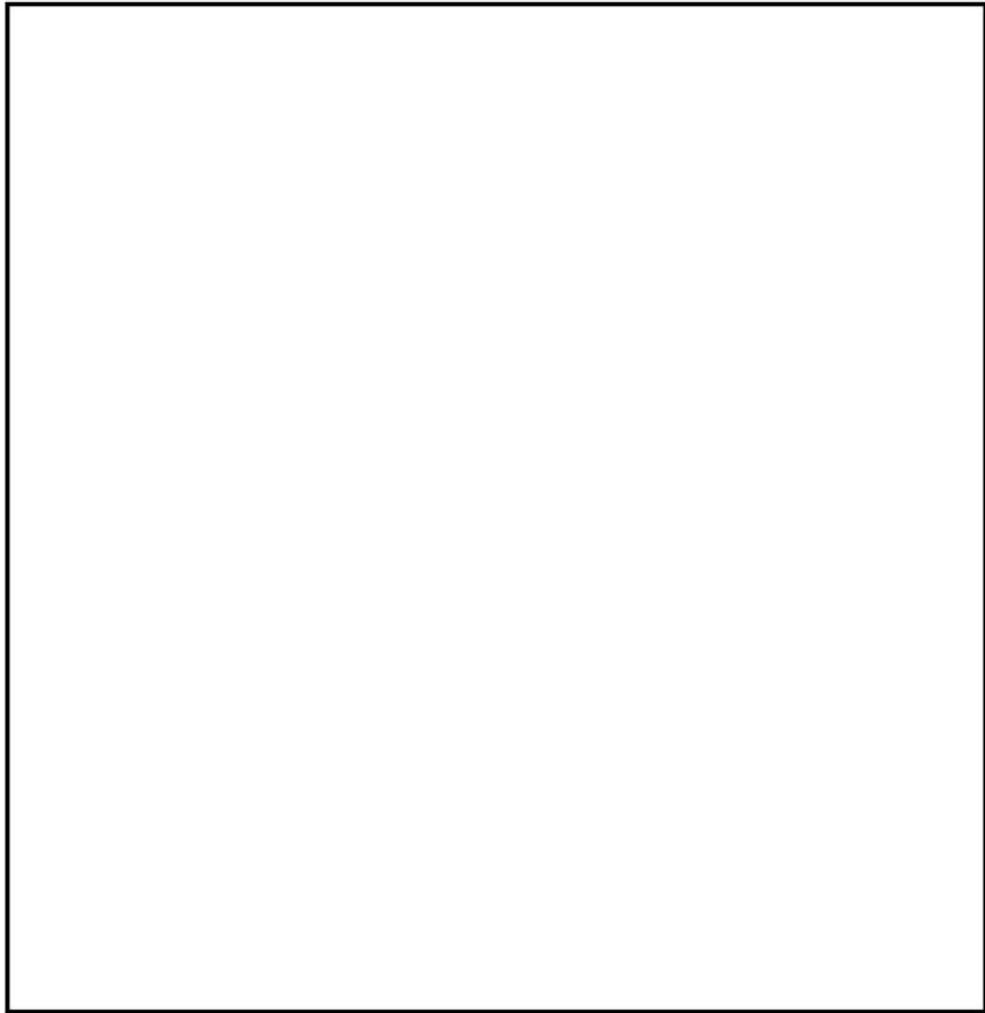
原子炉建屋クレーン走行レール及び横行レールは原子炉建屋原子炉棟6階床面全域を走行及び横行できるよう敷設されているが、重量物及びキャスクの移送を行う際には、重量物及びキャスクが使用済燃料プール上を通過しないよう、レールに沿って設置されたリミットスイッチ及びインターロックによる移送範囲の制限により、使用済燃料プールへの重量物及びキャスクの落下を防止する設計とする。

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



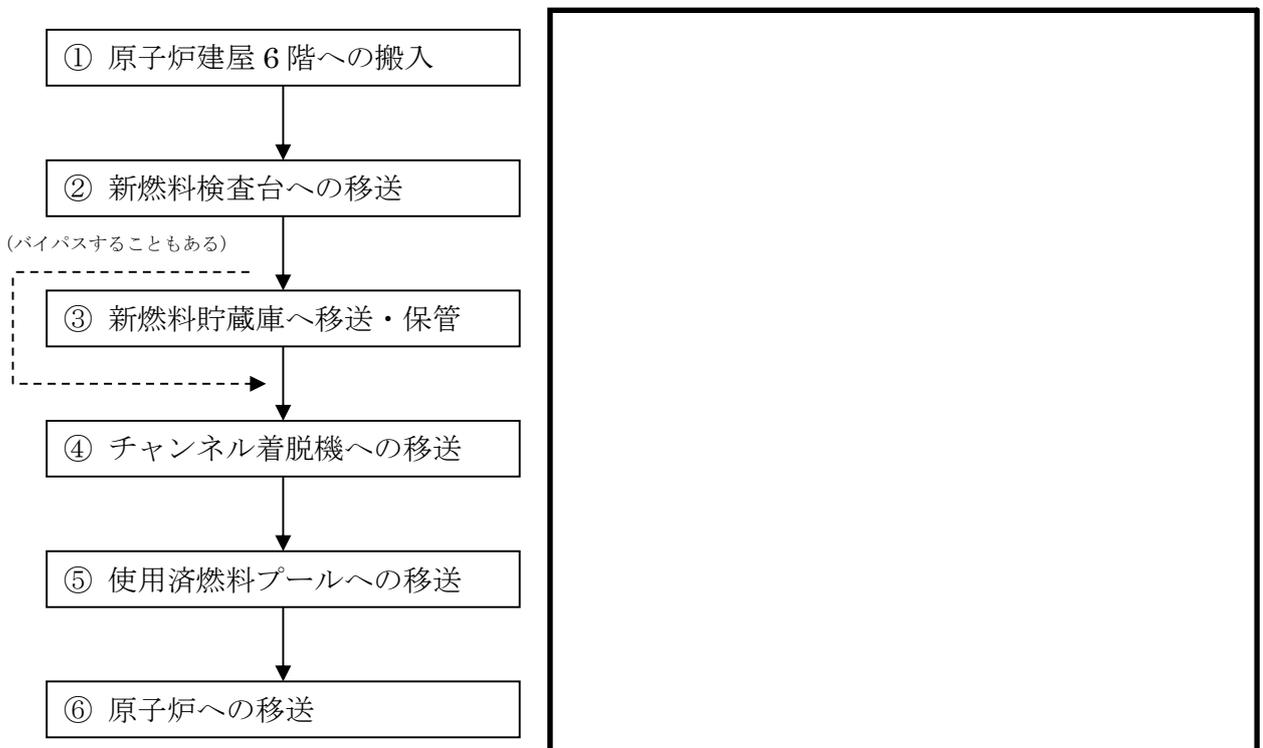
第3-2図 原子炉建屋クレーンのインターロック（Aモード）による  
キャスク移送範囲とリミットスイッチ展開図

#### 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。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、ラック間及びラック-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、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。

原子炉建屋クレーンは、動力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。

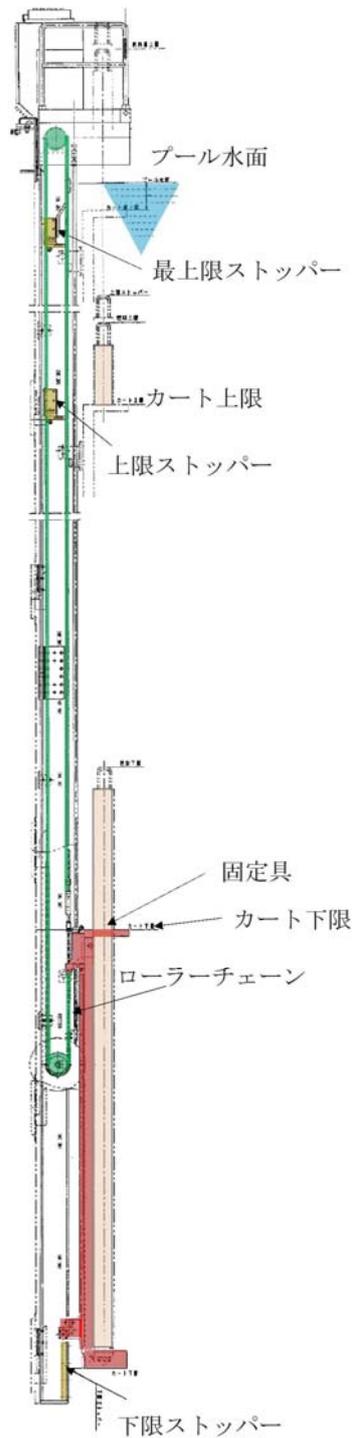
原子炉への燃料装荷の際には、燃料取替機による新燃料移送作業を行うこととなるが、燃料取替機についても、駆動源喪失時等における種々のインターロックが設けられており、新燃料の落

下は防止される。

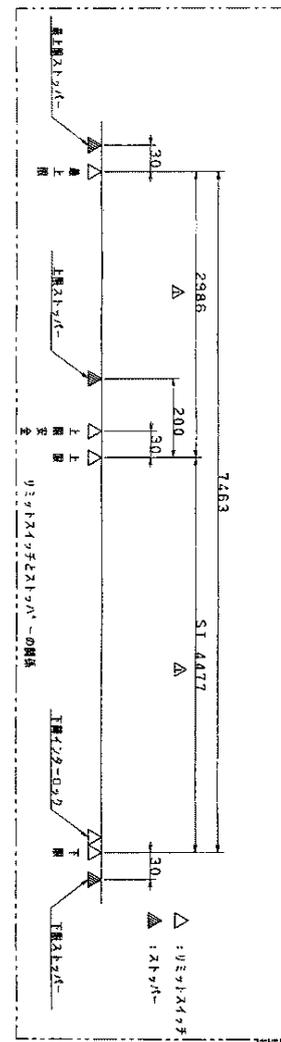
チャンネル着脱機（第4-2図）は、使用済燃料プールの床面に設置し、ガイドレールがプール内の金物に差し込まれており、上部でボルト固定されている。カートはガイドレールに支持されており、ローラチェーンを介して最上限ストッパから下限ストッパの位置までの間を昇降（第4-3図）し、直接ライナに衝突しないため、ライナを損傷させることはない。なお、燃料集合体外観検査時に燃料体等の昇降を行う際には、線量低減の観点から、機械的なインターロックにより、上限ストッパの位置までに上昇を制限する運用とする。電源遮断時には、電磁ブレーキで駆動軸を保持する構造となっている。

新燃料を受入れてから原子炉に装荷するまでに使用する設備は以下のとおり。

- ①原子炉建屋クレーン（主巻）
- ②原子炉建屋クレーン（補巻）
- ③新燃料検査台
- ④新燃料貯蔵庫
- ⑤チャンネル着脱機
- ⑥使用済燃料貯蔵ラック
- ⑦燃料取替機



第4-2図 チャンネル着脱機概略図



第4-3図 ストッパーの位置

原子炉建屋クレーン及び燃料取替機については、「新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備」であることから、燃料取扱設備である。チャンネル着脱機については、燃料集合体の吊り上げての移動に使用する設備ではないが、チャンネルボックスの着脱、燃料集合体外観検査のための一時的な仮置きと昇降、新燃料搬入時の昇降に使用する設備であることから、燃料取扱設備である。

## 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燃料の装荷作業が行われる。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恐れがあるが、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<sup>※1,2</sup>としても、使用済燃料プール水位維持のための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装荷する際は、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。これによって、通常燃料を $\square$ 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、最大 $\square$ 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、 $\square$ 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。また、ライナ下部には複数の漏えい検知溝が走っているが、ほとんどがラックの下部に隠れており落下物が直接衝突することはない。ラック下部以外の漏えい検知溝上は、燃料取替機の通常モードでインターロック上アクセスは可能であるが、燃料がその上部を通過することはないことから、漏えい検知溝上に燃料が落下することはないものとする。

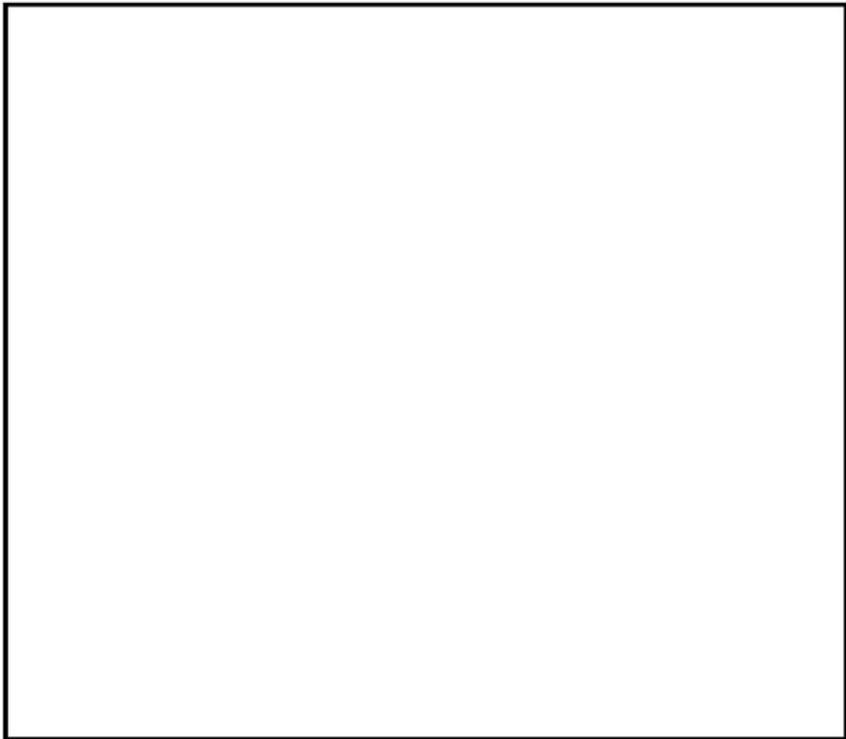
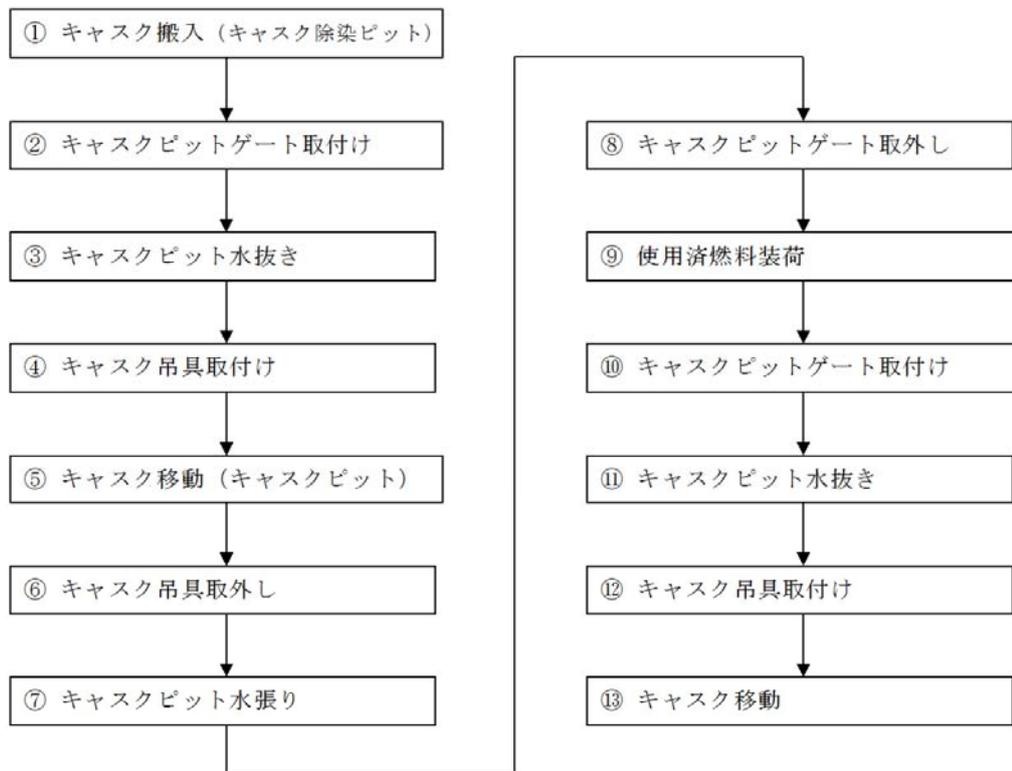
使用済燃料プールから取り出したキャスクは、原子炉建屋原子炉棟6階床面とは隔離された除染ピットにおいて、転倒防止装置を取り付けることにより固縛する。固体廃棄物移送容器等についても同様である。

※1 キャスク取扱い時は、インターロック運転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、キャスクが横行、走行方向に滑ったとしてもキャスクがキャスクピットエリア外の使用済燃料プール内に落下することはないものとする。

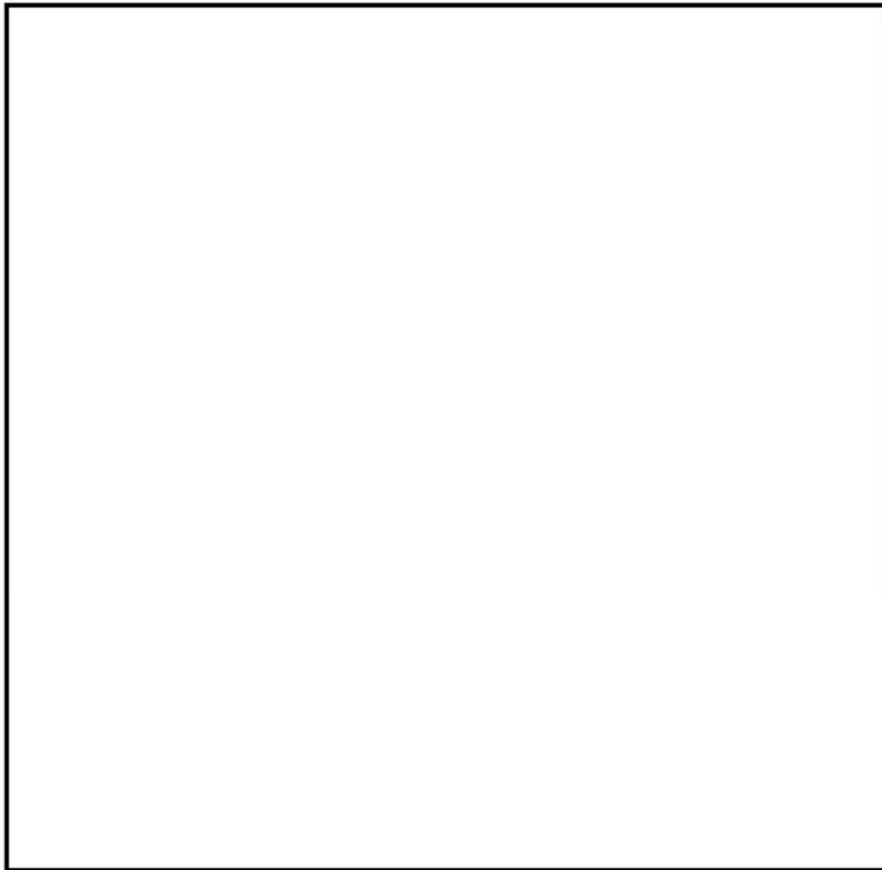
※2 鉛直方向ブレーキについて、制動力を上回る不可トルクが発生した場合のすべり量は、基準地震動S s時の評価にて示すこととする。

キャスクを原子炉建屋原子炉棟6階床面に搬入してから使用済燃料をキャスクに収納し、キャスクを搬出するまでに使用する設備は以下のとおり。

- ①原子炉建屋クレーン（主巻）
- ②燃料取替機



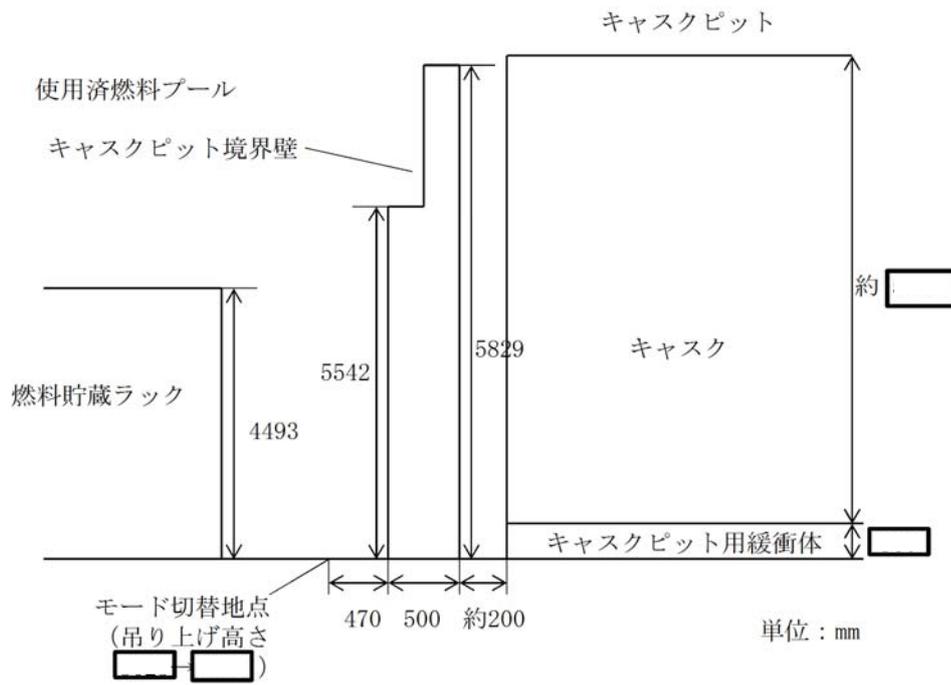
第5-1図 キャスク取扱い作業フロー (例)



キャスクの種類

番号	名称	外形 (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)



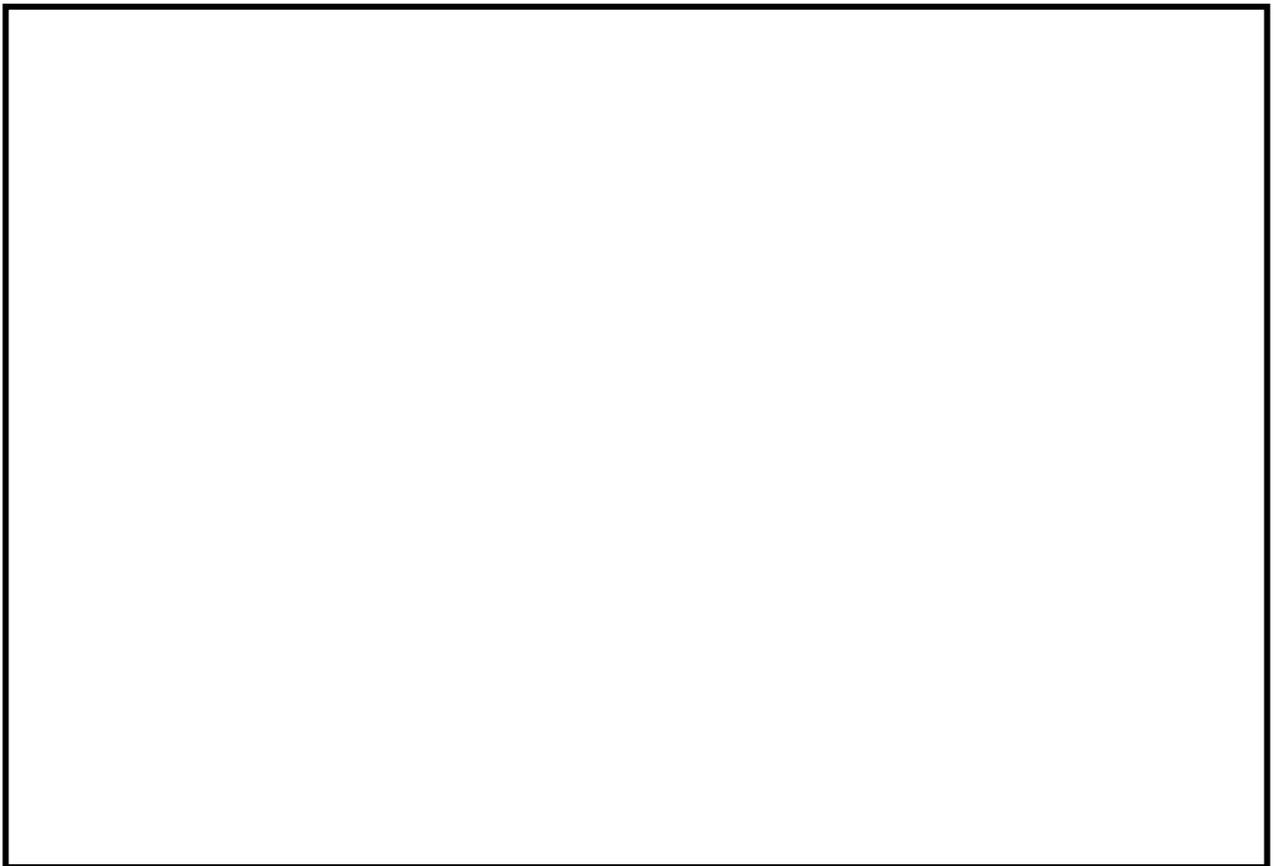
第5-3図 キャスクとキャスクピットゲートの位置関係 (横から見た図)

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（燃料装荷の場合は炉心、それ以外の場合は使用済燃料プール、使用済燃料乾式貯蔵キャスク、輸送キャスク、などを指す）へ移動される。

使用済燃料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ライナ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、直下に検知溝がない東側のチャンネル着脱機1基のみを使用可能とすることから、チャンネル着脱機使用時に燃料体等は検知溝上を通らない。その他の検知溝上も自動モードではアクセスできず、通ることはない。



第6-1図 使用済燃料の使用済燃料プール上での移動経路（例）

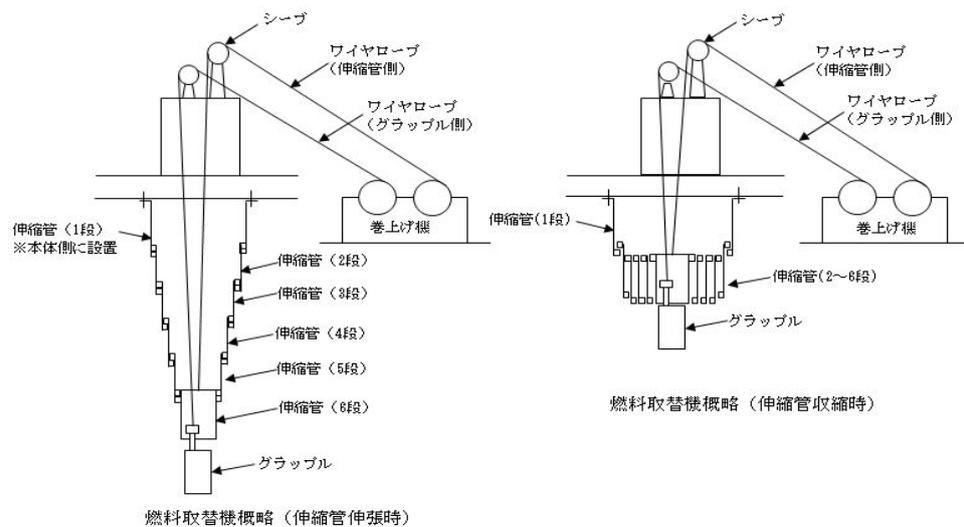
## 7. ワイヤロープ及び主要部材の強度に関する説明について

燃料取替機のワイヤロープは、二本有しており、一本が「燃料集合体及びグラップル」を、もう一本が「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、クレーン構造規格適用除外揚重機（0.5 t未満のため）となるが、ホイスト、走行レール、ガータの設計については、クレーン構造規格を準用し、その他の部品は、JIS及びメーカー社内規格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、残り一本のワイヤロープで吊荷（燃料集合体 約320 kg）、伸縮管（本体側に設置（固定）された1段を除く2～6段の荷重：約800 kg）及びグラップル（約30 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（119 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30 kg、伸縮管（2～6段の荷重）約800 kg：合計約1280 kg）であり、約10倍の安全率を有しており、クレーン構造規格要求（3.55倍）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

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。

ワイヤロープの破断荷重：119000 N ①

衝撃荷重はワイヤロープが伸縮管荷重等を受けて伸縮するため，荷重を伸縮管2段～6段（約800 kg）とする。

伸縮管の落下距離（伸縮管－グラップル間）を46 mm

ワイヤ固有周期を 0.145 s

固有周期  $T = 2\pi\sqrt{m/k}$ （m/k）（出典元：機械工学便覧 第7章 線形系の振動より）

（m：伸縮管荷重（約800 kg），k：ワイヤのバネ定数（約  $1500 \times 10^3$  N/m））

バネ定数  $k = E \cdot A / L$ （下記2式より求める）

（E：ワイヤの弾性係数 約  $110000$  [N/mm<sup>2</sup>]（メーカー指示値を採用。なお，ワイヤはプレテンション加工<sup>※1</sup>を実施しており，経年後の固くなった状態を想定），A：ワイヤの断面積  $89.2$  [mm<sup>2</sup>]（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：ワイヤの長さ（巻出し長さ）約  $6.5$  [m]（グラップルを最上限位置まで巻上げ，伸縮管2～6段の荷重が掛かった状態を想定））

ワイヤ（鋼材）の伸びλと力Pの関係式  $\lambda = P \cdot L / (E \cdot A)$ （出典元：機械工学便覧 第1章 変形する固体の力学より）

バネの伸びと力Pの関係式  $P = k \cdot \lambda$ （出典元：機械工学便覧 第7章 線形系の振動より）

※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。尚，加工により弾性係数が約1.3倍増加する。

ワイヤロープ切断時，ワイヤロープに発生する衝撃荷重：40000 N（詳細は下記参照）

$\int F dt = m \cdot v$ （出典元：（力積）－（運動量変化）の関係式 機械工学便覧 第6章 衝突より）

よって， $F = (2 \cdot \pi \cdot m \cdot V) / T$

（m：伸縮管荷重（約800 kg），T：ワイヤ固有周期（0.145 s），V：落下距離到達時の速度（0.95 m/s ※自由落下での落下距離46 mm到達時の速度））

F=約33000 N

以上により，余裕をみて衝撃荷重を40000 Nとする。②

ワイヤロープの負担荷重  $480^{※2} \times 9.8 + 40000$ ② = 44704 N ③

※2：定格荷重 450 kg，グラップル 約30 kg

よって，破断荷重①／負担荷重③； $119000 / 44704 = 2.66$

≒2倍以上

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、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。

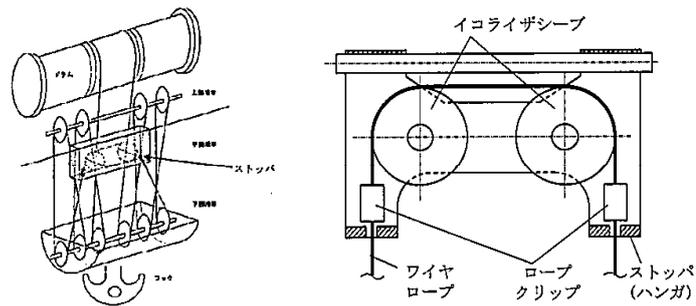
なお、ワイヤロープ更新時、購入仕様書に既設ワイヤロープの仕様（材質、寸法、破断荷重等）、適用法令及び基準を記載し手配を行い、必要な検査を実施し、検査成績書の確認をもって、当社が要求した仕様、基準等に基づき製作されていることを確認する。

## 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

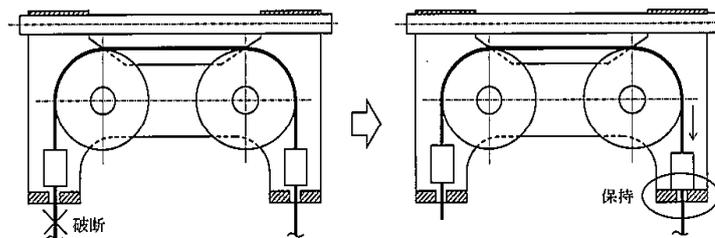
### 8.2 ワイヤロープ破断時の動作について

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）

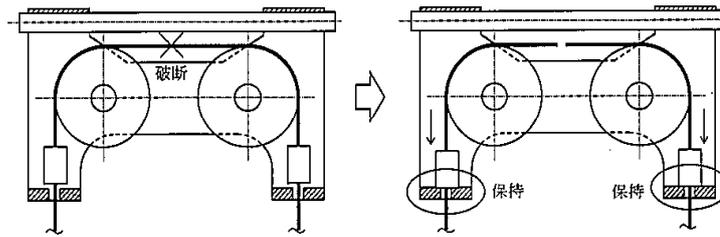
吊荷の質量により、イコライザハンガから破断していない方のワイヤロープが引き出されるが、ロープクリップがストッパに当たり保持されることにより、引き出しが止まり落下しない。

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550 kNに対しワイヤ1本あたり約220 kNの荷重)

8.4 ロープクリップの点検について

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、固縛又は固定、並びに基準地震動 $S_s$ 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、設置場所や固縛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9-1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	隔離、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ン)	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	制御棒ハンガ及び貯蔵中制御棒※4	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(ツインブレードガイド含む)		
		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)	隔離、固縛等による落下防止対策※3
		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	落下時に使用済燃料プールの機能に影響を及ぼさない
		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	隔離、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		
		原子炉ウェル用梯子		
		DSP昇降梯子		
13	装置類	パーテーション	ウォークダウンにより抽出	同上※4
		集塵装置(収納コンテナ含む)		
		DSPバックシン用減圧器		
		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、ボール、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		
除染ピット用クーラー				
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	離隔、固縛等による落下防止対策※1
		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※1,4
		キャスク除染ピットカバー		
		DSプールカバー		
		原子炉ウェルシールドプラグ		
		スキマサージタンク用コンクリートプラグ		
		SFPスロットプラグ		
		SFPスロットプラグ吊具		
		DSPスロットプラグ		
		DSPスロットプラグ吊具		
		新燃料貯蔵庫コンクリートプラグ		
FPC F/Dコンクリートプラグ				
CUW F/Dコンクリートプラグ				
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	基準地震動に対する落下防止対策
		常設スプレイヘッド		

※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等に関して、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。ジブクレーンはチャンネルボックスの取り外し及び水中TVカメラ、酸化膜厚測定用の治具、かき取り装置、シッパーキャップの吊上げに使用してきたが、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。

- ※3 離隔，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。

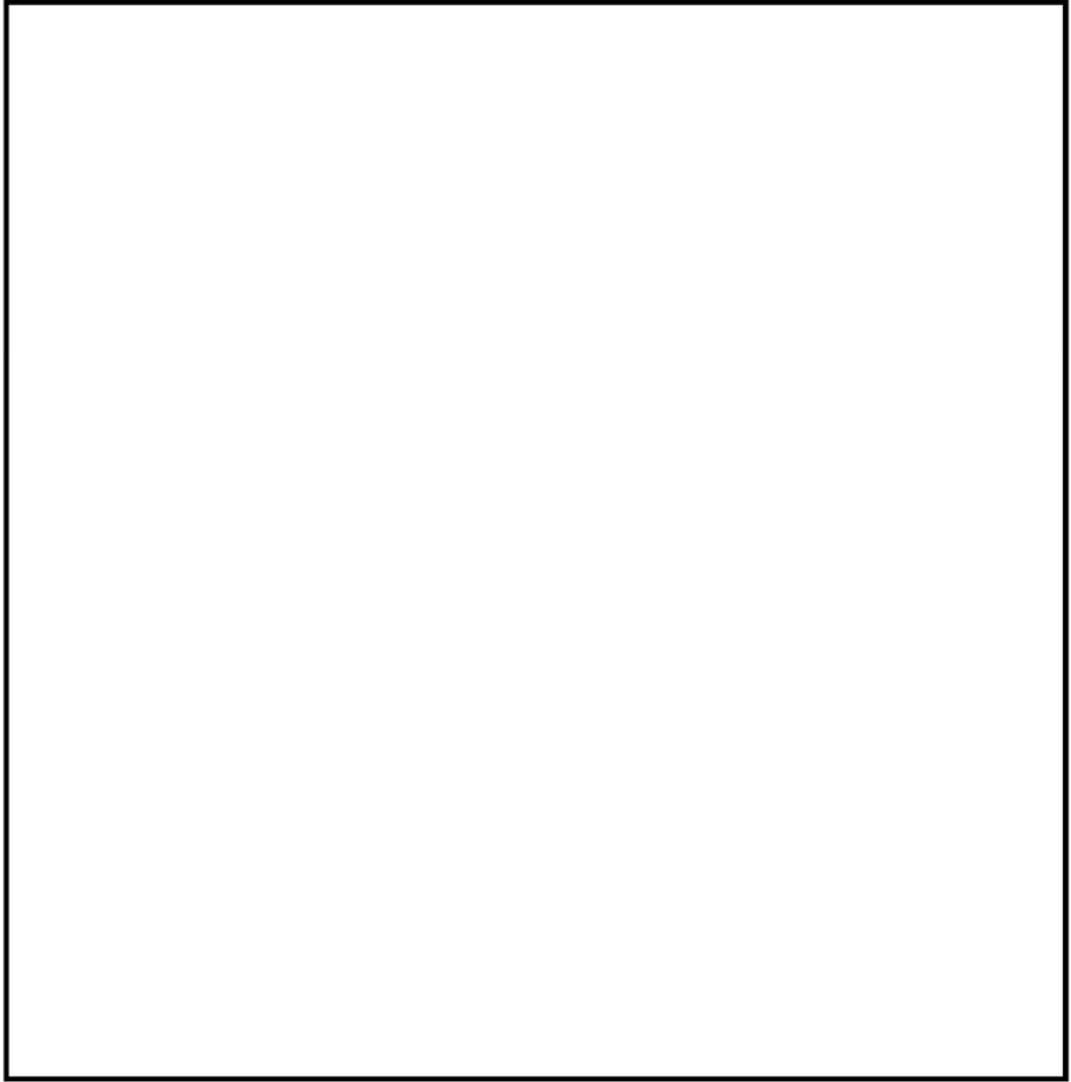
第2表 使用済燃料プールのフロアレベルに設置するものの一覧

番号	抽出項目	No	詳細	隔離の考え方 (SFP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	SFP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)	SFPからの距離, 重量, 形状
		4	RPVヘッドフランジガスケット	
		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	
12	フェンス・ラダー 類	7	ミラーインシュレーションベ ロー	SFPからの距離, 床の段差
		8	手摺り(除染機用レール含む)	
		9	可動ステージ開放用ホイスト 架台	
		10	原子炉ウェル用梯子	
13	装置類	11	DSP昇降梯子	SFPからの距離, 床の段差
		12	パーテーション	
		13	集塵装置(収納コンテナ含む)	
		14	DSPパッキン用減圧器	
		15	酸化膜厚測定装置	
		16	水中テレビ制御装置	
		17	燃料付着物採取用装置 (本体, ポール, ヘッド)	
16	試験・検査用機材 類	18	水位調整装置	SFPからの距離, 床の段差
		19	リークテスト測定装置	
		20	テンション用テストブロック	
		21	スタッドボルト試験片	
		22	FHM用テストウェイト	
17	コンクリート プラグ・ハッチ類	23	シッパーキャップ架台 (16キャップ含む)	SFPからの距離, 重量, 形状
		24	シッピング装置架台	
		25	可動ステージ	
		26	キャスク除染ビットカバー	
		27	DSプールカバー	
		28	原子炉ウェルシールドプラグ	
		29	スキマサージタンク用コンクリートプ ラグ	
		30	SFPスロットプラグ	
		31	SFPスロットプラグ吊具	
		32	DSPスロットプラグ	
		33	DSPスロットプラグ吊具	
		34	新燃料貯蔵庫コンクリートプ ラグ	
35	FPC F/Dコンクリートプラグ			
36	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ヘッドフランジガスカート	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。
		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	ブルゲート類	燃料ブルゲート(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。
		燃料ブルゲート(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	主巻については工認-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	主巻については工認-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	—	—		
17	コンクリート プラグ・ハッチ類	可動ステージ	—	—
		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ブルカバー	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スロットブラグ吊具	補巻	補巻はクレーン構造規格による。
		DSPスロットブラグ	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スロットブラグ吊具	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ブラグ	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コンクリートブラグ	モノレールホイスト	クレーン構造規格による。
		CUW F/Dコンクリートブラグ		



第9-1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

10. 技術基準規則への適合性

第1表に燃料取扱設備の技術基準規則第26条への適合性と適合方針を示す。

第1表 燃料取扱設備の技術基準規則と条文への適合性

	燃料取扱設備	条文	技術基準規則の解釈	条文への適合性
1	燃料取替機	<p>第二十六条 通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」という。）を取り扱う設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。</p> <p>一 燃料体等を取り扱う能力を有するものであること。</p>	<p>1 第1項に規定する「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。</p> <p>2 第1項第1号に規定する「燃料体等を取り扱う能力」とは、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いにおいて、関連する機器間を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる能力があること。</p>	<p>○</p> <p>新燃料をチャンネル着脱機に着座させてから炉心に装荷するまで、及び使用済燃料を炉心から取り出し容器に収納するまでの取扱いを行える設計とする。</p>

		<p>二 燃料体等 が臨界に達 するおそれ がない構造 であること。</p>	<p>3 第1項第2号に規 定する「燃料体等が 臨界に達するおそ れがない構造であ ること」とは、臨 界計算により燃料 が臨界に達しない ことを確認され た構造であること。</p>	○	<p>燃料体等を1体ずつ 取扱う構造とする ことにより、臨界 を防止する設計 とする。</p>
		<p>三 崩壊熱に より燃料体 等が溶融し ないもので あること。</p>	<p>4 第1項第3号に規 定する「燃料体等 が溶融しないもの であること」とは 、設計計算により 、燃料が溶融しな いことを確認され た冷却能力を有 すること。</p>	○	<p>燃料体等（新燃料 を除く。）の移送 は、すべて水中で 行い、崩壊熱によ り溶融しない設 計とする。</p>
		<p>四 取扱中に 燃料体等が 破損しない こと。</p>	<p>5 第1項第4号に規 定する「燃料が破 損しないこと」と は、以下によるこ と。 ・燃料交換機にあ っては、掴み機構 のワイヤーを二重 化すること。 ・燃料交換機にあ っては、燃料取扱 中に過荷重とな った場合は上昇阻 止される措置がな されていること。 この場合において 、取扱い時の荷重 監視等による運 転管理による対応 も含まれる。</p>	○	<p>燃料取替機のワイ ヤロープは、二本 有しており、一本 が「燃料集合体及 びグラップル」を 、もう一本が「伸 縮管」をそれぞれ 吊る構造となっ ている。 取扱い中に燃料 体等を損傷させ ないよう、あらか じめ設定する荷 重値を超えた場 合、上昇を阻止 するインターロ ックを有するこ とで燃料体等の</p>

			<p>・燃料交換機、原子炉建屋天井クレーン等にあつては、適切な落下防止対策等を施すことにより、その落下により燃料を破損するおそれがないとしてもよい。</p>		<p>破損やそれに伴う燃料体等の落下を防止する設計とする。</p>
		<p>七 燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源がなくなった場合に、燃料体等を保持する構造を有する機器を設けることにより燃料体等の落下を防止できること。</p>	<p>8 第1項第7号に規定する「燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源が無くなった場合に、燃料体等を保持する機構」とは、動力源である電源又は空気等が喪失した場合でも燃料を保持できる性能を有すること。</p>	○	<p>駆動源喪失の場合にも燃料体等の保持状態を維持する設計とする。</p>
2	原子炉建屋クレーン	<p>通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」という。）を取り扱う設備は、次に定めるところにより施設しなければならない</p>	<p>1 第1項に規定する「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。</p>	○	

	い。 一 燃料体等 を取り扱う 能力を有す るものであ ること。	2 第1項第1号に規 定する「燃料体等 を取り扱う能力」と は、新燃料の搬入か ら使用済燃料の搬 出までの取扱いに おいて、関連する機 器間を連携し、当該 燃料を搬入、搬出又 は保管できる能力 があること。		新燃料を原子炉建 屋内に搬入してから チャンネル着脱機に 着座させるまで、及び 使用済燃料を容器に 収納してから原子炉 建屋外へ搬出するま での取扱いを行える 設計とする。
	二 燃料体等 が臨界に達 するおそれ がない構造 であること。	3 第1項第2号に規 定する「燃料体等が 臨界に達するおそ れがない構造であ ること」とは、臨界 計算により燃料が 臨界に達しないこ とを確認された構 造であること。	○	燃料体等を1体ずつ 取扱う構造とするこ とにより、臨界を防止 する設計とする。
	三 崩壊熱に より燃料体 等が溶融し ないもので あること。	4 第1項第3号に規 定する「燃料体等が 溶融しないもので あること」とは、設 計計算により、燃料 が溶融しないこと を確認された冷却 能力を有すること。	○	燃料体等（新燃料を 除く。）の移送は、す べて水中で行い、崩壊 熱により溶融しない 設計とする。
	四 取扱中に 燃料体等が 破損しない こと。	5 第1項第4号に規 定する「燃料が破損 しないこと」とは、 以下によること。 ・原子炉建屋天井ク レーンにあっては、	○	原子炉建屋クレー

			<p>吊り上げられた使用済燃料運搬用容器等重量物が燃料プールに貯蔵された燃料上を走行できない措置を行うこと。</p> <p>ただし、措置には、運用管理での対応も含むものとする。この運用管理にあっては、運搬用容器等重量物が燃料上に行かないことを確実にするものであること。</p> <p>また、フックのワイヤー外れ止めを設けること。なお、ここでの「使用済燃料運搬用容器等」の等には、燃料交換機又は原子炉建屋天井クレーンを用いて取扱うものであって、その落下によって燃料を破損させるおそれがあるものを含む。</p> <p>・燃料交換機、原子炉建屋天井クレーン等にあつては、適切な落下防止対策等を施すことにより、その落下により燃料を破損するおそれがないとしてもよい。</p>	<p>ンは、使用済燃料プール上を重量物及びキヤスク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。</p> <p>重量物を移送する主巻フックはイコライザハンガをストップ方式にすることで仮にワイヤロープが切れた場合でも重量物が落下せず、安全に保持できる設計とする。</p>
--	--	--	--	--

		七 燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源がなくなった場合に、燃料体等を保持する構造を有する機器を設けることにより燃料体等の落下を防止できること。	8 第1項第7号に規定する「燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源が無くなった場合に、燃料体等を保持する機構」とは、動力源である電源又は空気等が喪失した場合でも燃料を保持できる性能を有すること。	○	原子炉建屋クレーンは、原子炉建屋内で新燃料搬入容器、使用済燃料輸送容器の移送及び新燃料等の移送を安全かつ確実にを行うものである。本クレーンは、新燃料搬入容器、使用済燃料輸送容器及び新燃料等の移送中において、駆動源が喪失しても確実に保持できる。
3	使用済燃料乾式貯蔵建屋天井クレーン	通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」という。）を取り扱う設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。  一 燃料体等を取り扱う能力を有するものであること。	1 第1項に規定する「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。  2 第1項第1号に規定する「燃料体等を取り扱う能力」とは、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いに	○	使用済燃料乾式貯蔵建屋内において燃料集合体を装填した使用済燃料乾式貯蔵容器の取扱いを行える設計とする。

			<p>において、関連する機器間を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる能力があること。</p>		
	二 燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること。	3	<p>第1項第2号に規定する「燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること」とは、臨界計算により燃料が臨界に達しないことを確認された構造であること。</p>	○	<p>使用済燃料乾式貯蔵容器を取扱うこととし、直接燃料集合体の取扱いを行わない設計とする。</p>
	三 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものであること。	4	<p>第1項第3号に規定する「燃料体等が溶融しないものであること」とは、設計計算により、燃料が溶融しないことを確認された冷却能力を有すること。</p>	○	<p>使用済燃料乾式貯蔵容器を取扱うこととし、直接燃料集合体の取扱いを行わない設計とする。</p>
	四 取扱中に燃料体等が破損しないこと。	5	<p>第1項第4号に規定する「燃料が破損しないこと」とは、以下によること。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子炉建屋天井クレーンにあっては、吊り上げられた使用済燃料運搬用容器等重量物が燃料プールに貯蔵された燃料上を走行できない措置を行うこと。</li> </ul> <p>ただし、措置には、</p>	○	<p>使用済燃料乾式貯蔵容器を取扱うこととし、直接燃料集合体の取扱いを行わない設計とする。</p>

			<p>運用管理での対応も含むものとする。この運用管理にあつては、運搬用容器等重量物が燃料上に行かないことを確実にするものであること。また、フックのワイヤー外れ止めを設けること。なお、ここでの「使用済燃料運搬用容器等」の等には、燃料交換機又は原子炉建屋天井クレーンを用いて取扱うものであつて、その落下によって燃料を破損させるおそれがあるものを含む。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・燃料交換機、原子炉建屋天井クレーン等にあつては、適切な落下防止対策等を施すことにより、その落下により燃料を破損するおそれがないとしてもよい。</li> </ul>	<p>フックは、使用済燃料乾式貯蔵容器専用吊り治具または玉掛け用ワイヤロープ等が当該フックから外れることを防止するための装置を設ける。</p>
--	--	--	---	---

		<p>七 燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源がなくなった場合に、燃料体等を保持する構造を有する機器を設けることにより燃料体等の落下を防止できること。</p>	<p>8 第1項第7号に規定する「燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源が無くなった場合に、燃料体等を保持する機構」とは、動力源である電源又は空気等が喪失した場合でも燃料を保持できる性能を有すること。</p>	○	<p>使用済燃料乾式貯蔵容器の移送中において、駆動源が喪失しても確実に保持できる。</p>
4	チャンネル着脱機	<p>通常運転時に使用する燃料体又は使用済燃料（以下この条において「燃料体等」という。）を取り扱う設備は、次に定めるところにより施設しなければならない。</p> <p>一 燃料体等を取り扱う能力を有するものであること。</p>	<p>1 第1項に規定する「燃料体又は使用済燃料を取り扱う設備」とは、新燃料、再使用燃料又は使用済燃料の装荷、取出又は保管等を行うために使用する設備をいう。</p> <p>2 第1項第1号に規定する「燃料体等を取り扱う能力」とは、新燃料の搬入から使用済燃料の搬出までの取扱いにおいて、関連する機</p>	○	<p>新燃料を新燃料貯蔵庫又は新燃料検査台から使用済燃料貯蔵ラックに装荷するまでの取扱い、及び新燃料、再使用燃料の検査ができる設計とす</p>

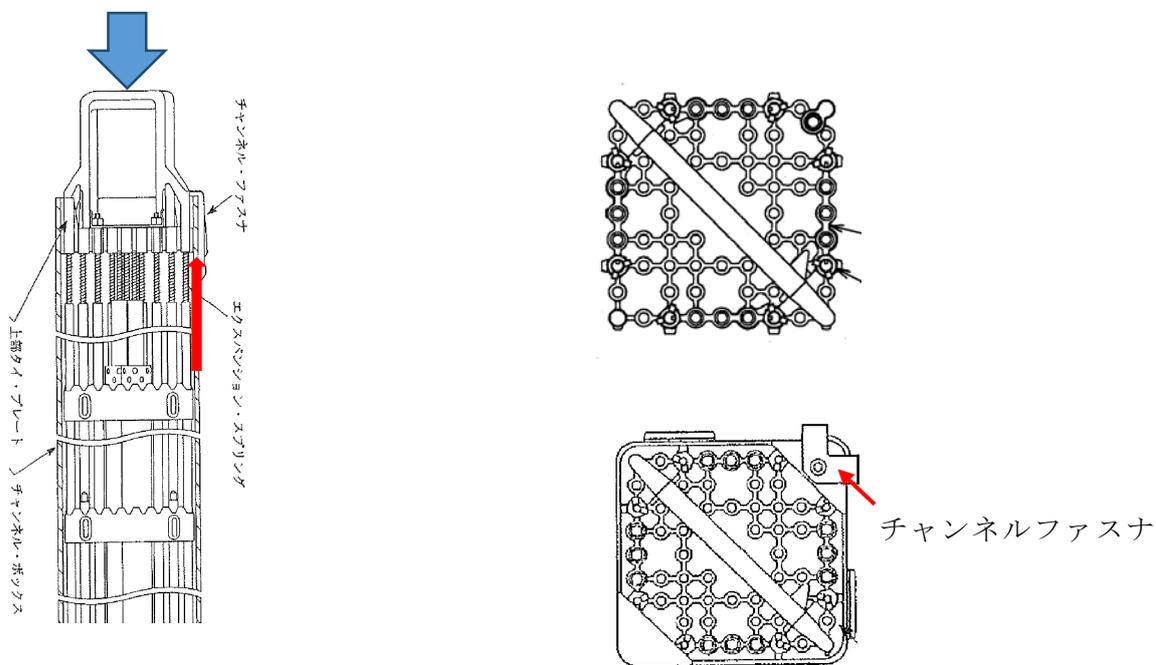
			器間を連携し、当該燃料を搬入、搬出又は保管できる能力があること。		る。
	二 燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること。	3	第1項第2号に規定する「燃料体等が臨界に達するおそれがない構造であること」とは、臨界計算により燃料が臨界に達しないことを確認された構造であること。	○	燃料体等を1体ずつ取扱う構造とすることにより、臨界を防止する設計とする。
	三 崩壊熱により燃料体等が溶融しないものであること。	4	第1項第3号に規定する「燃料体等が溶融しないものであること」とは、設計計算により、燃料が溶融しないことを確認された冷却能力を有すること。	○	燃料体等（新燃料を除く。）の移送は、すべて水中で行い、崩壊熱により溶融しない設計とする。
	四 取扱中に燃料体等が破損しないこと。	5	第1項第4号に規定する「燃料が破損しないこと」とは、以下によること。 ・燃料交換機、原子炉建屋天井クレーン等にあっては、適切な落下防止対策等を施すことにより、その落下により燃料を破損するおそれがないとしてもよい。	○	機械的な下限インターロックを設け、チェーンが切れて落下した場合でも床まで落ちることのない設計とする。

		<p>七 燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源がなくなった場合に、燃料体等を保持する構造を有する機器を設けることにより燃料体等の落下を防止できること。</p>	<p>8 第1項第7号に規定する「燃料体等の取扱中に燃料体等を取り扱うための動力源が無くなった場合に、燃料体等を保持する機構」とは、動力源である電源又は空気等が喪失した場合でも燃料を保持できる性能を有すること。</p>	<p>○</p>	<p>使用済燃料乾式貯蔵容器の移送中において、駆動源が喪失しても確実に保持できる。</p>
--	--	---	---	----------	---

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\*の落下試験に基づいている。

文献1においては、落下時に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。

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、

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

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ライニングの健全性を判断できる。

※文献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) 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。

→ 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-029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。

→ 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. を参照）。

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。

→ 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、入水箇所を柵等で囲む構造としている。（5. 参照）

### 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  $x$  とし、以下に示す運動方程式を用いて、6 m 落下後の衝突直前の速度及び衝突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。燃料集合体が水中で受ける抗力を算出する上では、燃料集合体の形状は直方体とみなす。

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

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/s<sup>2</sup>

$m_1$  : 燃料集合体の質量 (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)

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

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

$\rho$  : 水の密度,  $9.8045 \times 10^2$  kg/m<sup>3</sup> (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)

$A$  : 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,  m<sup>3</sup> (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

6m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,

$$\frac{1}{2} \times \text{質量} \times v^2 \div 2 \approx 14.9 \text{ kJ}$$

であり, 15.5 kJ を下回るため, 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図 1 に示す。

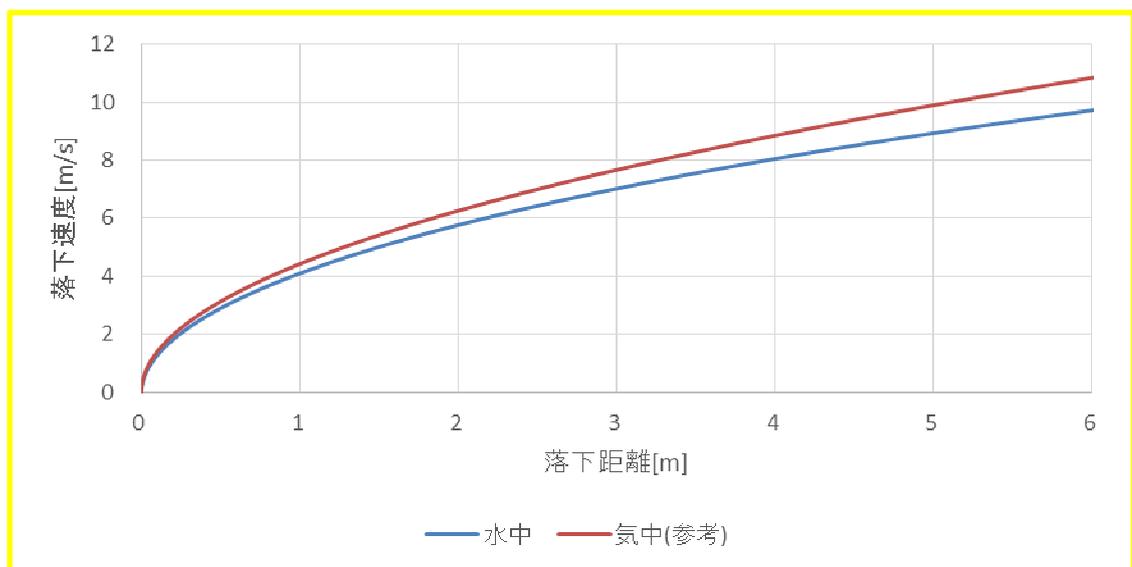


図 1 燃料集合体の落下距離と落下速度の関係

### (3) 抗力係数の保守性

当初、抗力係数として直方体を仮定していた。燃料集合体は、落下時の先端となる下部タイプレートの外観が円錐形で、一見、直方体よりも水の抵抗が少ないように見えるが、下部タイプレートの先端から見た様子等の例は図2のとおりで、流れ込む水を受ける部分には燃料棒等の底面及び燃料棒の支持部品がある。さらに、8×8燃料の場合は63本の燃料棒の他、上下部タイプレート、7つのスペーサ、1本のウォータロッド及びチャンネルボックスが存在しており、他の種類の燃料でも同様に、水の抵抗を受ける表面積が直方体に比べて大きいため、燃料集合体の抗力係数は直方体に比べて大きいと考えていた。

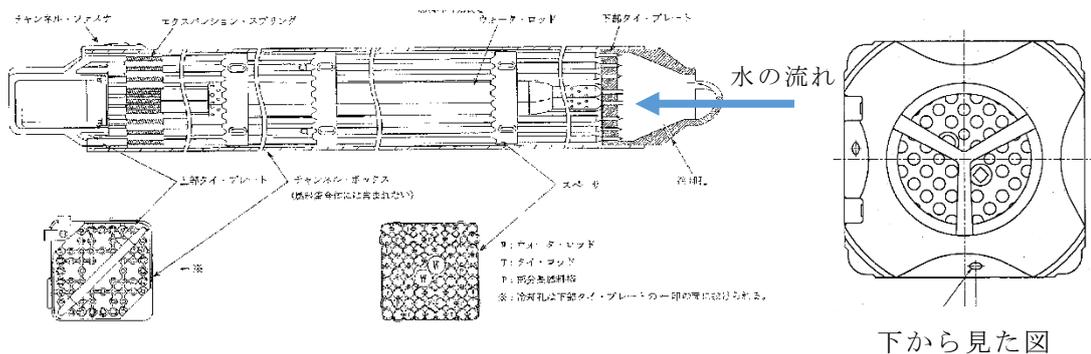


図2 燃料集合体下部タイプレート（9×9燃料（A型）の例）

また、以下に示すように抗力係数は  $L/d$  ( $L$ : 長手方向の長さ,  $d$ : 断面の代表長さ) 依存性があり、薄板から厚みが増して柱状に至る過程で、薄板の間は抗力係数が大きく、厚みが増すにしたがって一旦小さくなり、柱状となって長くなるにしたがって側面抵抗の影響によりまた抗力係数は大きくなる傾向があると考え、当初は抗力係数の極小値である 0.87 からより保守的に 0.80 と設定した。しかし、6. に示す燃料集合体抗力測定試験の結果、内部を通り抜ける水の影響を無視できず、内部を通り抜けた水流が後流の抗力を打ち消す方向に作用したため、0.80 より低くなることが分かったことから、0.60 に設定し直した。

#### (4) 抗力係数の保守性についての考察

##### ①形状による抗力係数

- 直方体（断面は正方形，流れは長手方向）（レイノルズ数  $Re = 1.7 \times 10^5$ ）（下線は極小値）

（出典）機械設計便覧編集委員会「第3版機械設計便覧」丸善，平成4年3月10日

寸法の割合 $L/d$	0	0.5	1.0	1.5	2.0	2.5	3.0	4.0	5.0
抗力係数 $C_d$	1.25	1.25	1.15	0.97	<u>0.87</u>	0.90	0.93	0.95	0.95

ここで、 $L$ : 長手方向の長さ,  $d$ : 一辺の長さ

● その他の三次元物体

(出典) 日本機械学会「機械工学便覧」, 2006年1月20日(図4)

・ 円柱 (断面は円, 流れは長手方向) (レイノルズ数  $Re = 3.6 \times 10^5$ ) (下線は極小値)

寸法の割合 L/d	0.5	1.0	2.0	4.0	6.0	7.0
抗力係数 $C_d$	1.00	0.84	<u>0.76</u>	0.78	0.80	0.88

ここで, L: 長手方向の長さ, d: 円の半径

➤ 円錐 (断面は円, 流れは頂点から底面の方向) (レイノルズ数  $Re = 2.7 \times 10^5$ )

頂角	60°	30°
抗力係数 $C_d$	<u>0.51</u>	0.33

(図3を参考に, 60°の円錐の値を代表値とする)

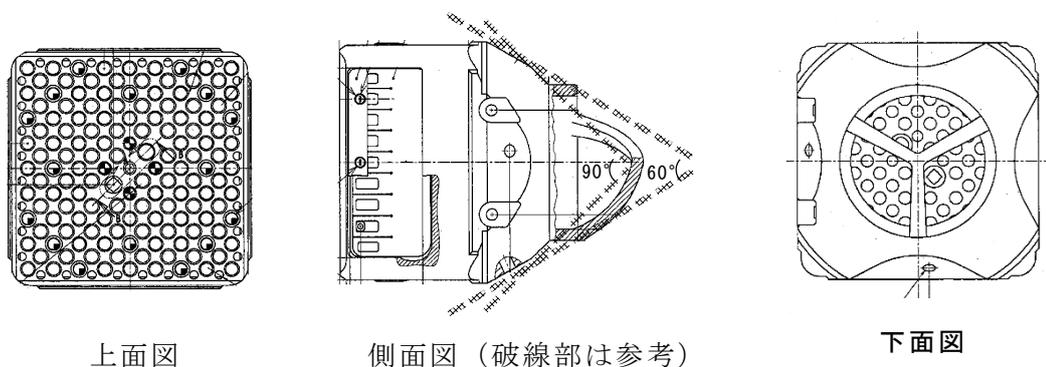


図3 下部タイププレート図 (9×9燃料 (A型) の例)

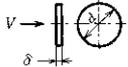
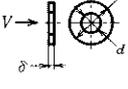
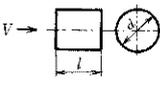
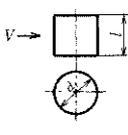
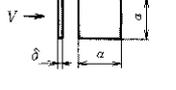
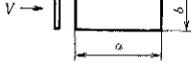
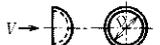
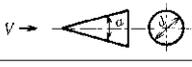
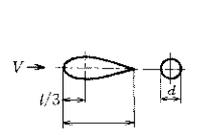
物体	寸法の割合	基準面積 $A$	レイノルズ数	$C_D$	
(a)		$\delta=0.01 d$	$(\pi d^2)/4$	$9.6 \times 10^5$	1.12
		$d/D=0.2$ 0.4 0.6 0.8 $\delta=0.01 d$	$\{\pi(D^2-d^2)\}/4$	$3.6 \times 10^5$	1.16 1.20 1.22 1.76
(b)		$l/d=0.5$	$(\pi d^2)/4$	$3.6 \times 10^5$	1.00
		1.0			0.84
		2.0			0.76
		4.0			0.78
		6.0			0.80
(c)		$l/d=1$	$ld$	$0.9 \times 10^5$	0.61
		2			0.69
		5			0.76
		10			0.80
		20			0.92
		40			0.98
		$\delta=0.01 a$	$a^2$	$3.9 \times 10^5$	1.14
		$a/b=2$			1.15
		5	$ab$	$(0.9-3.9) \times 10^5$	1.22
		10			1.27
		20			1.50
			$(\pi D^2)/4$	$4 \times 10^5$ $5 \times 10^5$	0.36
					0.40
			$(\pi l^2)/4$	$4 \times 10^5$ $5 \times 10^5$	1.44
					1.42
		$\alpha=60^\circ$	$(\pi d^2)/4$	$2.7 \times 10^5$	0.51
$30^\circ$		0.33			
		$(\pi d^2)/4$	$1.4 \times 10^5$	0.16	
				0.09	
	$l/d=3.0$	$(\pi d^2)/4$	$(5-6) \times 10^5$	0.049	
	3.5			0.048	
	4.0			0.051	
	4.5			0.055	
	5.0			0.060	
	5.5			0.067	
	6.0			0.072	

図 4 種々の三次元物体の抗力係数

○抗力係数と落下エネルギー

上記の例のうち、下線部の抗力係数よりも保守的な値にて落下エネルギーを計算した結果は以下のとおり。

抗力係数  $C_d$             0.50    0.70    0.80    0.95

落下エネルギー (kJ)               

抗力係数を 0.50 (頂角  $60^\circ$  の円錐以下) と仮定しても落下エネルギーは  kJ となり、  
15.5kJ を下回る。

②抗力係数のレイノルズ数依存性について

①の考察において示した抗力係数の実験値は、いずれもレイノルズ数 ( $Re = \frac{vd}{\nu}$ ,  $v$ :流速,  $d$ :代表長さ,  $\nu$ :動粘性係数) が実機使用済燃料プールよりも小さい場合のものとなっている。実機使用済燃料プールにおける  $Re$  は、落下速度(流速)を  $9.5 \sim 10.5 \text{ m/s}$  (図1の6 m(ライナ衝突時)の値参照), 代表長さを燃料集合体幅の  $0.13 \text{ m}$ , 動粘性係数を  $0.443 \times 10^{-6} \sim 1.004 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$  (@  $65 \text{ }^\circ\text{C} \sim 20 \text{ }^\circ\text{C}$ ) とすると,  $Re = 1.23 \sim 3.08 \times 10^6$  であり, ①の例よりも1桁程度大きい。

文献においては、図4に示すような三次元物体に対する流れについて、 $Re$  と  $C_d$  の関係を広く示したものは少ないが、例えば図4(a)のように、流れに直交する円板の抗力係数については、 $Re$  と図5のような関係にあり(日本機械学会「機械工学便覧」, 2006年1月20日),  $Re = 10^3 \sim 10^7$  の広範囲に渡って  $C_d$  に変化はない。

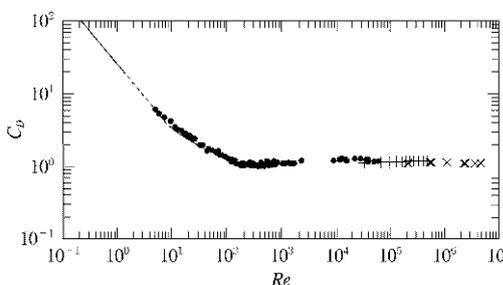


図5 円板の抗力係数

また、澤田ら「気流に平行に磁力支持された円柱の抵抗係数」(日本風工学会論文集, 第29巻第4号(通号第101号)平成16年10月)には、直径45 mmの円柱の長さを変化させ、図6のような結果を得ており、 $Re = 60,000 \sim 100,000$  の範囲では  $L/d$  によらず  $C_d$  に変化はない。

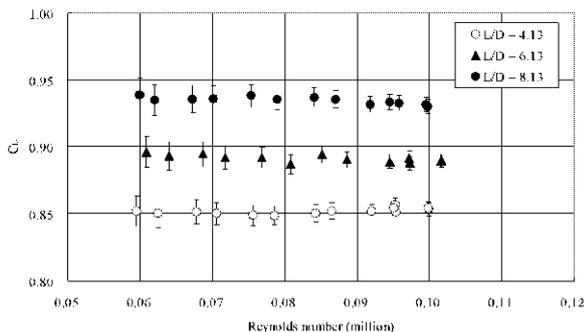


図6 抗力係数  $C_d$  のレイノルズ数依存性

③抗力係数の  $L/d$  依存性について

P. 別2-2の抗力  $D$  は、流れに垂直な面の投影面積  $A$  の関数としているが、本来は圧力抵抗 ( $A$  の関数) と摩擦抵抗 (流れと平行な面の関数) の和であるところ、一般的な形とし

て圧力抵抗で代表させた形としている。抗力係数  $C_d$  は、圧力抵抗だけでなく摩擦抵抗の影響も受けた挙動を示す。

$L/d$  が大きくなると、摩擦抵抗を受ける面積が増大するため、抗力係数  $C_d$  は大きくなる傾向にあると考えられる。前出の文献（澤田ら「気流に平行に磁力支持された円柱の抵抗係数」(日本風工学会論文集, 第 29 巻第 4 号 (通号第 101 号) 平成 16 年 10 月)) に、図 7 があり、燃料集合体の  $L/d$  ( $L$ : チャンネルボックス長さ約 4.25 m,  $d$ : 約 0.13 m とすると,  $L/d \approx 33$ ) は含まない範囲であるものの、 $L/d$  増に対して  $C_d$  は増加している。

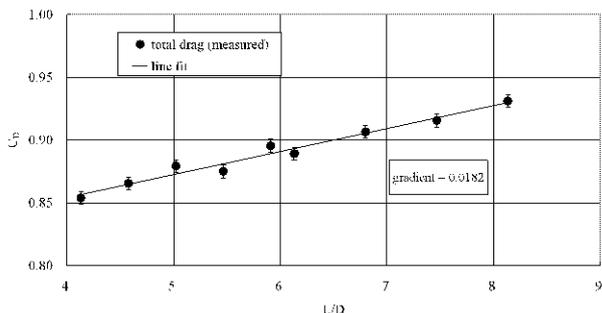


図 7 抗力係数  $C_d$  の  $L/d$  依存性

(5) 抗力係数測定試験について

図 8 に抗力係数測定試験のイメージを示す。

上述の通り、燃料集合体落下における抗力係数は、0.80 を仮定すれば十分保守的と考えていたが、 $L/d$  に関する文献データが、実機  $L/d \approx 33$  に対して比較的小さい値の範囲のみ示されていることから、実機データに近い条件で燃料集合体の抗力係数を測定する試験を実施した。結果を 6. に示す。

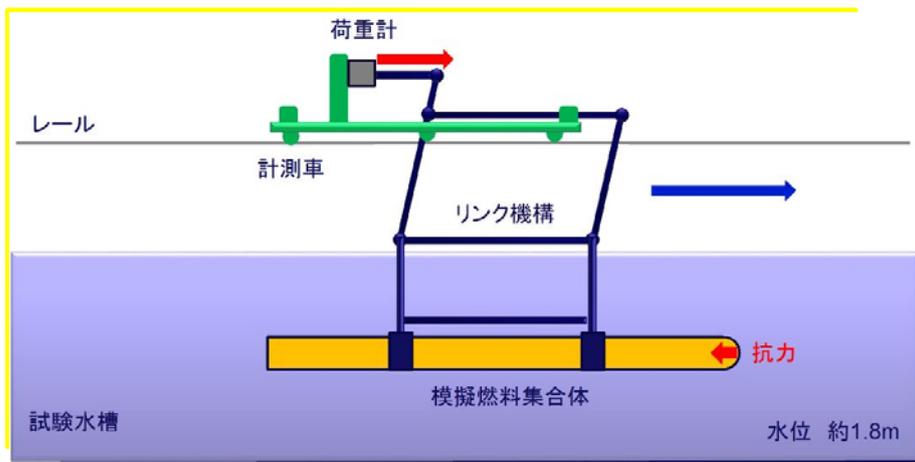


図 8 抗力係数測定試験イメージ

## (6) 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するが、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を求め補完する。

### ① 解析モデル(図 9)

- ・燃料集合体外形の詳細形状を模擬（下部タイプレートの CAD を使用）
- ・燃料集合体内部形状を多孔質近似（実際の集合体内の流動抵抗係数（燃料設計値）を設定）

### ② 解析手法

- ・解析コード：汎用熱流体解析コード（STAR-CCM+, 概要を第 1 表に示す。）
- ・解析手法：定常単相流解析
- ・乱流モデル：チャンネルボックス近傍をより精緻に計算するモデル
- ・メッシュ条件：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

### 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

<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（Re 数 =  $1.7 \times 10^5 \sim 7.8 \times 10^5$ ）

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

### ④ 使用コードの適用事例

- ・円柱後流部の渦剥離構造において、レイノルズ数  $1 \times 10^5$ ,  $2 \times 10^6$ ,  $1 \times 10^7$  に対する抗力係数 Cd 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-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）

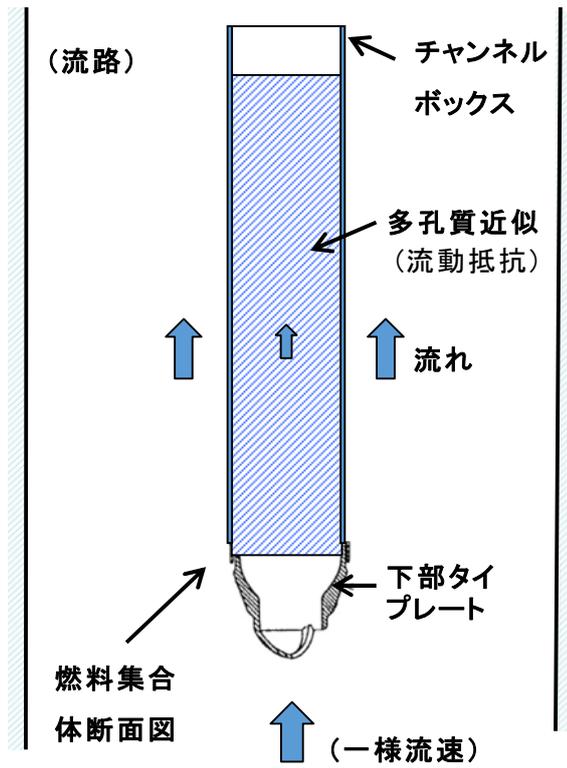


図 9 解析モデルの概念図

第 1 表 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><b>【検証 (Verification)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> </ul> <p><b>【妥当性確認 (Validation)】</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li>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。</li> <li>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。</li> </ul>

(7) 抗力係数測定試験における流速及び水温と抗力の関係について

レイノルズ数((4)②参照)を変化させない場合、水温上昇によって動粘性係数(分母)が低下すると、流速(分子)も減少させることになる。例えば、動粘性係数が半分程度になる(水温が20℃→50℃程度の変化に相当)と、流速も半分程度にすればレイノルズ数を一定にすることになる。抗力は概ね流速の二乗に比例するため、流速が半分になると抗力は1/4程度になる。すなわち、水温の上昇による動粘性係数の低下は、流速の低下と同様の効果がある。

流速を変化させずに水温だけ上昇した場合、動粘性係数が低下してレイノルズ数は上昇するが、速度低下がないため、抗力はあまり変化しない。

抗力を圧力抗力Dと摩擦抗力Fの和であると仮定し、水温20℃→65℃の変化が生じた場合の抗力の変化を以下のとおり試算すると、動粘性係数は半分程度になるのに対し、抗力は約5%減少するに過ぎない。

$$D = \frac{1}{2} \cdot C_d \cdot \rho \cdot v^2 \cdot d^2$$

$$F = \frac{1}{2} \cdot f \cdot \rho \cdot v^2 \cdot d \cdot 4 \cdot L$$

ここで、D:圧力抗力、 $C_d$ :抗力係数(0.8と仮定)、 $\rho$ :水密度、 $v$ :流速、 $d$ :流れに垂直な面の1辺の長さ、L:長手方向の長さであり、

$$f = 0.0791 \times Re^{-0.25} \text{ (ブラジウスの式)}$$

ここで、 $Re$ :レイノルズ数である。 $Re = \frac{vd}{\nu}$ であり、 $\nu$ :動粘性係数(=粘性係数/水密度)である。

これらに、水温20℃における水密度998 kg/m<sup>3</sup>、粘性係数 $1.00 \times 10^{-3}$  Pa·s、水温65℃における水密度981 kg/m<sup>3</sup>、粘性係数 $4.33 \times 10^{-4}$  Pa·s、 $d = 0.13$  m、 $v = 10$  m/s、 $L = 4$  mを代入し、 $D + F = D'$ として $D'$ について $C_d'$ を計算すると、水温20℃→65℃のとき、動粘性係数は半分以下に低下するのに対し、抗力係数 $C_d'$ は1.089→1.035と約5%の減少に留まる。すなわち、レイノルズ数が $10^6$ 程度の場合には、動粘性係数の変化は抗力係数に大きな影響はないと考えられる。

## 5. 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使って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、図 10 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床から約 10cm 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、上面が水面から深さ 20 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、原子炉建屋クレーンにて約 10 cm 吊上げた新燃料を、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、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、カート下方の受け皿まで新燃料を降下させる。

使用済燃料プール上に移動していくこの状態においては、作業員が直接手でサポートするとともに、燃料集合体は金属製の柵に囲まれた状態となっており、柵等が障害となつて大きく振られることはなく、万が一燃料集合体が水中に落下する場合も最大で約 70cm 下のカート上面に衝突して岸側に転倒するか、設備の狭隘な隙間に固定されたり、摩擦による抗力が生じるなどして水中には落下しにくく、ライナに直接落下しにくい。

※この時、使用済燃料プール水面上で、使用済燃料プール床面から新燃料が最も高い位置にあることになる。待機しているチャンネル着脱機のカート下面から新燃料下端の高さは約 4 m であり、以下のとおり新燃料がカート下面まで落下した場合、着水時の抵抗を無視してもカートを支えるローラチェーンに生じる荷重は破断荷重を超えず、カートは落下しない。さらに、カートが落下したとしてもチャンネル着脱機の下限ストップにより、新燃料がライナに直接衝突することはない。

新燃料重量（9×9 燃料）：295 kg（水中重量（保守的にカート下面から上面までの長さに相当する燃料体積の浮力を受けるとする）：265kg）

衝突時速度：8.86 m/s（気中落下：4 m）

チェーンの破断時伸び量：0.204 m

以上より、荷重を受ける時間  $\Delta t = 2 \times 0.204(\text{m}) / 8.86(\text{m/s}) = 0.046(\text{s})$  となる。したがって、新燃料衝突時荷重  $F = 265(\text{kg}) \times 8.86(\text{m/s}) / 0.046(\text{s}) / 1000 = 51.1\text{kN}$  であり、チェーンの破断荷重 51.6 kN を下回る。

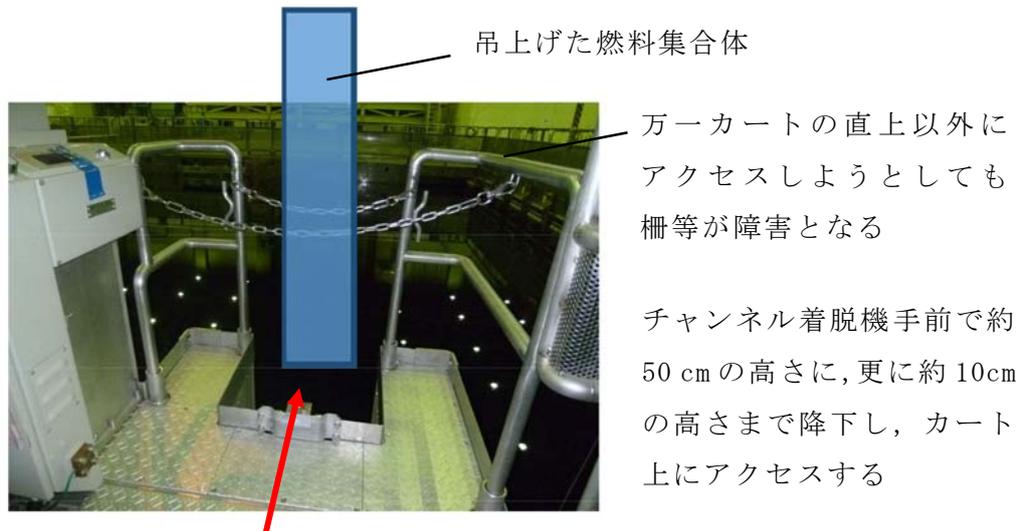
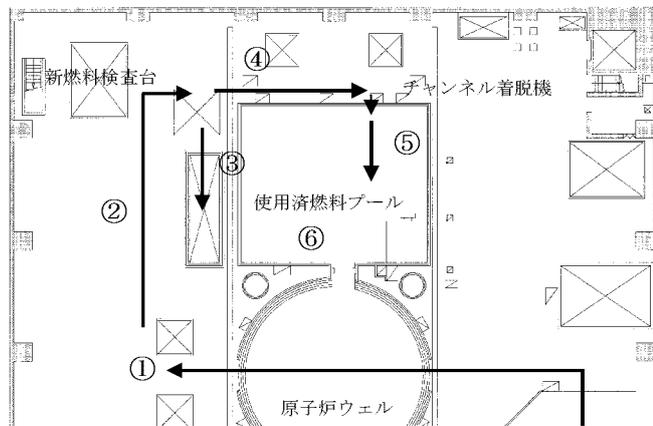


図 10 チャンネル着脱機のカートへ吊下ろす直前の状況 (イメージ)

6. 抗力係数測定試験の結果について

以下のとおり燃料集合体の抗力係数測定試験を実施した。

(1) 試験条件

試験体：模擬燃料集合体(実機 8 × 8 形状(燃料ペレットなし), チャンネルボックス付)

計測速度：2.8 m/s, 4.0 m/s, 5.0 m/s, 6.0 m/s (実機：～約 10m/s)

水温：20℃程度 (実機：～65 ℃)

なお、計測速度は当初、1.3 m/s, 2.8 m/s, 6.0 m/s としていたが、計測車が計測速度まで加速する際の大きな荷重と一定速度時の荷重の両方を適切なレンジで測定できる荷重計がなく、1.3 m/s を取止め、代わりに 4.0 m/s と 5.0 m/s の測定を実施した。

(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 D1 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 D2 を測定。
- ③D1－D2 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。

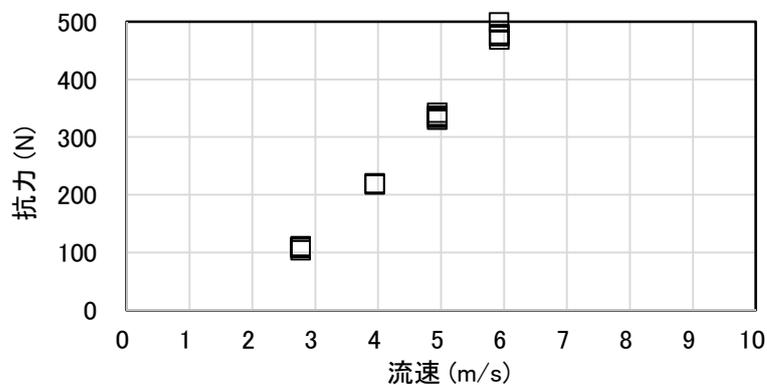
$$C_d = \frac{2D}{\rho A v^2}$$

ここで、D：抗力[N]， $\rho$ ：水密度[kg/m<sup>3</sup>]，A：流れに垂直な投影面積[m<sup>2</sup>]，v：流速[m/s]  
また、抗力係数のレイノルズ数依存性を確認。

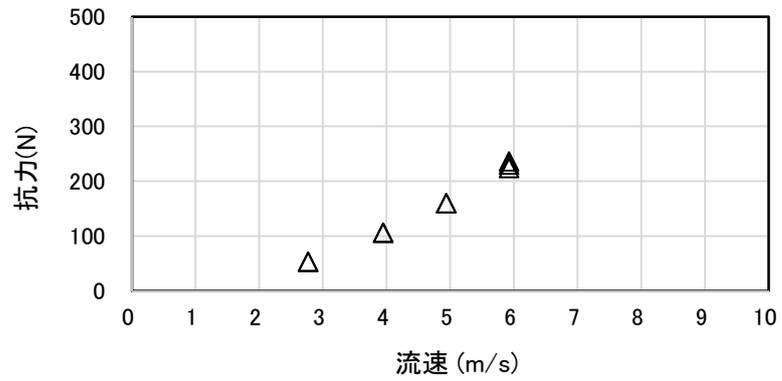
- ⑤試験体系での CFD 解析により、試験状態を評価し同様の傾向を確認。
- ⑥CFD 解析により実機状態での抗力係数を計算し、実機の抗力係数を推定。
- ⑦抗力係数から落下エネルギーを評価し、既往の燃料集合体落下試験に包絡されることを確認。

(3) 試験測定結果

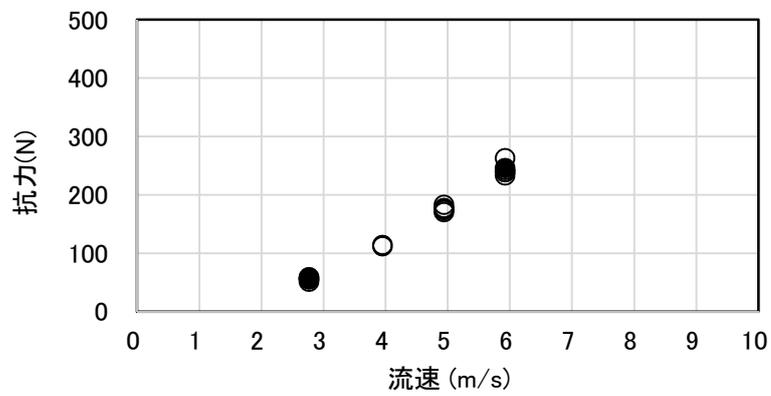
- ①燃料集合体と固定治具の合計抗力 D1



②固定治具のみの抗力 D2

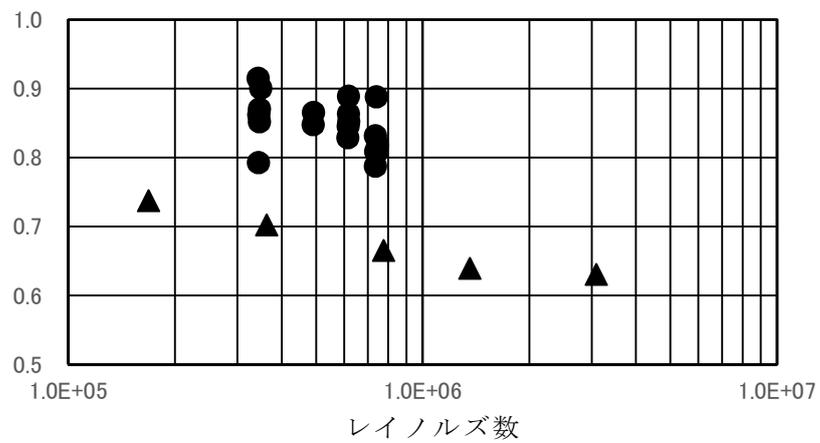


③燃料集合体のみの抗力 D



④燃料集合体の抗力係数  $C_d$

抗力係数 (● : 試験結果, ▲ : CFD解析)



(4) 統計的整理

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

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

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

4.94m/s (Re 数  $6.39 \times 10^5$ ) : データ数 5, 平均値 0.856, 標準偏差 0.0225

5.92m/s (Re 数  $7.67 \times 10^5$ ) : 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。

抗力係数データのばらつきが大きく見えることについては、計算式から抗力データのばらつきと同等と考えられるため、プロットのスケール（縦軸のレンジ幅の大きさ）によるものと考えられる。

### (5) 近似曲線

(3) ④の抗力係数のグラフに近似曲線を加えたものが図 11 である。直線近似には流体力学上の根拠がなく、表計算ソフトの機能を用いて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  $65^\circ\text{C}$ 、落下速度  $10.5\text{m/s}$ ）は  $0.77$  となる。

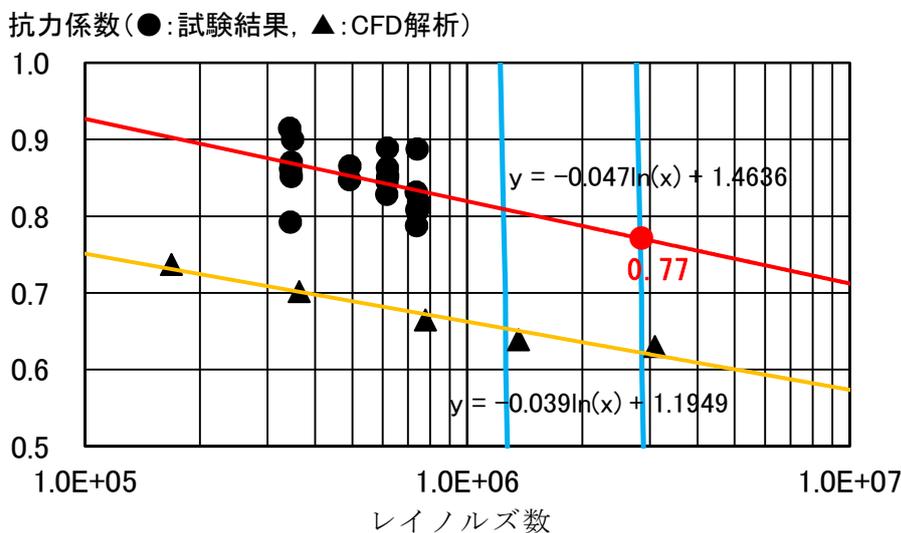


図 11 試験結果の外挿の検討

### (6) 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 12）。図 11

にこの実験の結果を加えて、図 13 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。(5)と同様に表計算ソフトの対数近似により外挿しによっても、変化が小さい傾向を確認した。

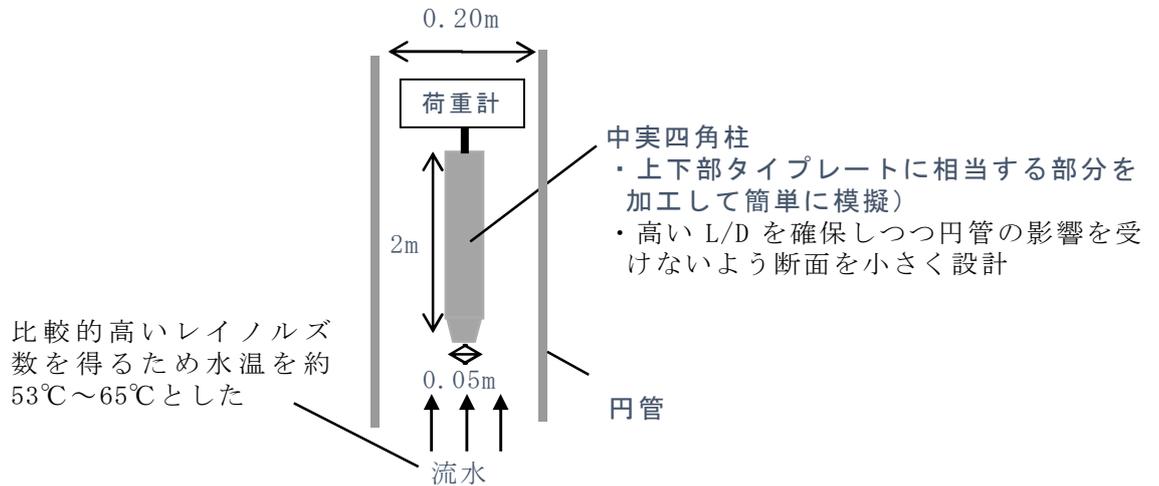


図 12 中実四角柱の実験

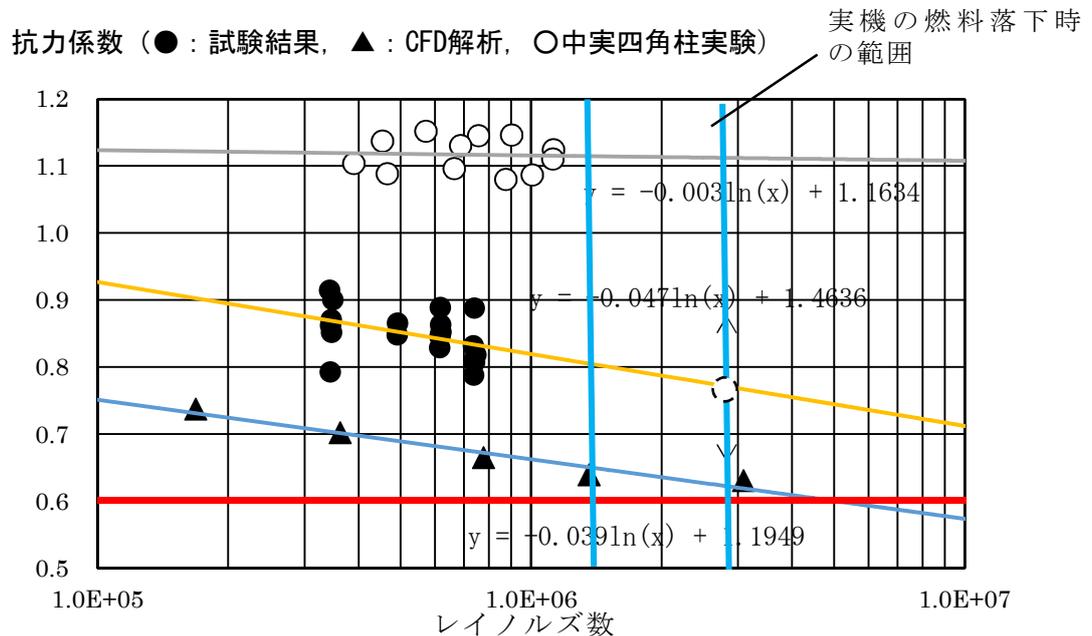


図 13 抗力係数の外挿

#### (7) 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、表面粗さや集合体内の非均質性を無視して単純化 (図 14) 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。

多孔質近似により単純化した集合体内部構造のうち、非均質性の大きい構造物のひとつとして、集合体内で流路面積が最小となる下部タイプレートの部分（図 14 の破線部）の影響を調べた。多孔質近似した集合体内部の流動抵抗が変わ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、集合体内部を流通する流量に変化はなかったものの、抗力係数は約 6%増加した。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。これに加えて、構造物を仮定したことによって横流れを禁止する措置（抗力係数は約 5%増加）を考え合わせると、抗力係数は約 10%の増加が見込まれる。さらに、表面粗さを一律  $20\mu\text{m}$ （滑らかとされる表面の 2 倍～数倍）とすると抗力係数が 1%程度増加した。一方、考える抗力係数の減少要因として、多孔質近似に用いた圧損係数の誤差（圧損係数を 10%小さくしても抗力係数の低下は 1%程度）、解析が収束に至るまでの抗力係数の振幅（ $\pm 2\%$ 程度）、単純形状の解析結果から推定される解析手法の誤差（1%程度）を積み上げても 4%程度と見積もられる。

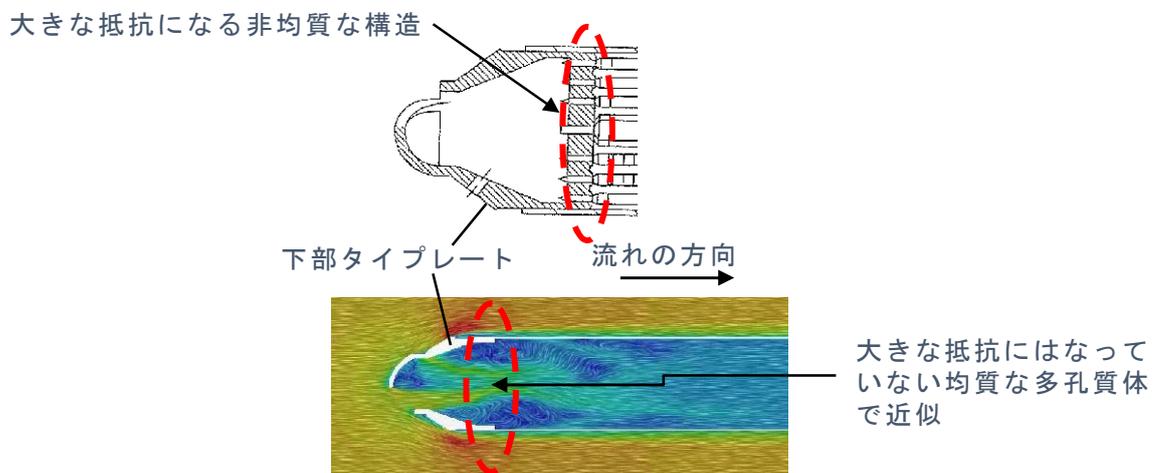


図 14 CFD 解析の保守性

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 15）。



内部通過した流れにより

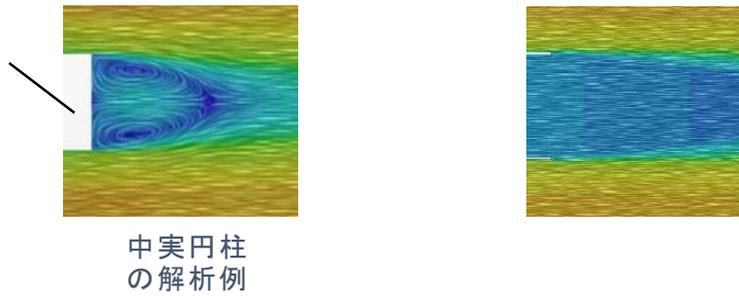


図 15 内部通過流の影響（CFD 解析結果の比較）

#### （8）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、（5）近似曲線にて求めた 0.76 から、（4）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  $8 \times 8$  燃料の重量を用いて落下エネルギーを評価すれば、14.9kJ 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 0m/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。

## 燃料取替機のスロッシングによる波及的影響評価

地震により使用済燃料プールにスロッシングが発生した場合における、燃料取替機の波及的影響評価結果を以下に示す。

## 1. 評価条件

燃料取替機に対するスロッシング評価では、以下の内容を条件とする。

## (1) 波高, 圧力

燃料取替機に発生する使用済燃料プールスロッシングの波高, 圧力は以下を使用する。

- ・ 波高 : 水面より 2.485 m
- ・ 圧力 (鉛直上向き) : 0.028 MPa

図 1 に波高と燃料取替機構造の関係を示す。上記波高を燃料取替機設置レベルに合わせると、燃料取替機のブリッジガーダ部まで波が到達する。このため、燃料取替機はスロッシングの影響を受けるものとして検討する。

圧力については、下記 (2) 項により鉛直方向の圧力のみを考慮する。

## (2) スロッシング波の方向

スロッシングの波の方向は、水平方向、鉛直方向が考えられる。このうち、スロッシングの水平方向の波は、燃料取替機の走行方向から燃料取替機の正面に向かって接触する。

この時の水平荷重は、燃料取替機の車輪の走行レールとの摩擦係数相当以上の荷重 (0.15 G 以上) になると燃料取替機が滑るため、地震評価時に水平方向で考慮している荷重以上 (0.15 G 以上) はかからないものとする。

したがって、スロッシングによる影響を評価する荷重については、燃料取替機の鉛直下方から盛り上がってきた水が燃料取替機を押し上げることによる鉛直荷重のみを評価対象とする。

鉛直上向きの圧力は、最大波高時の使用済燃料プール標準水位以下での最大流速 (鉛直方向) 5.3 m/s が、保守的に燃料取替機のブリッジガーダ部高さまで重力による減速がなかったと仮定し、一様流体中での構造物に作用する動水圧として以下のとおり計算する。

$$P_t = 1/2 \times C_d \times \rho \times v^2$$

ここで、 $P_t$  [N/m<sup>2</sup>] : 動水圧荷重,  $C_d$  : 抗力係数 (2.0 (平板)),  $\rho$  [kg/cm<sup>3</sup>] : 水密度,  $v$  [m/s] : 流速である。このとき、 $P_t = 0.028$  MPa となる。

### (3) 燃料取替機本体評価対象部位

燃料取替機本体評価対象部位は、以下の観点からブリッジガーダと脱線防止ラグとする。

ブリッジガーダ : 波高の接触する部分の燃料取替機の主要構造であるため  
脱線防止ラグ (ツメ部) : 上向き荷重を受けた場合に、脱線を防止する構造のため

### (4) 許容値

スロッシングは地震が発生した時に同時に発生し得るものであるため、影響評価では地震による発生応力又は発生荷重にスロッシングによる応力や荷重が足し合わされるものとし、この時の許容値に対する裕度の確認を行う。

許容値については、スロッシングによる波及的影響評価として、燃料取替機本体の鋼材の破断による構造物落下を防止する観点から、鋼材の引張強さ (Su 値) を使用することも可とする。

## 2. 評価方法

### 2.1 ガーダ評価方法

#### (1) 荷重の足し合わせ

ブリッジガーダの地震評価では、水平地震動、鉛直地震動、自重による発生応力を足し合わせている。スロッシングでは、この地震応力にスロッシング応力を足し合わせ、このガーダ応力を許容応力と比較する。

ガーダ応力 = 水平地震動応力 + 鉛直地震動応力 + 自重分応力 + スロッシング応力

#### (2) スロッシング荷重

スロッシングによって発生する荷重は、使用済燃料プール上に存在する燃料取替機ブリッジ部の投影面積を燃料取替機受圧面積として上記 1. (1) の圧力をかけたものとする。

図 1 に燃料取替機受圧面を示す。

#### (3) スロッシング応力

スロッシング荷重はガーダ 2 本とガーダ内部骨格に分散してかかるが、保守的に応力評価では上記 (2) のスロッシング荷重が全てガーダの梁 2 本に等分布荷重としてレール間スパン全体にかかるものとする。

ガーダは、一様の両端固定梁として、この時の梁の最大応力をスロッシング応力とする。

## 2.2 脱線防止ラグ（ツメ部）評価方法

### (1) 荷重の足し合わせ

脱線防止ラグ（ツメ部）の地震評価では、各地震動評価により発生する脱線防止ラグ（ツメ部）荷重の鉛直上向き成分のみを足し合わせて鉛直荷重（上向き）とし、水平方向のみを足し合わせて水平荷重としている。ここで、脱線防止ラグ（ツメ部）では鉛直荷重（上向き）を応力評価に使用している。

スロッシングでは、発生した水の圧力により生じる上向き荷重を脱線防止ラグ（ツメ部）個数で等分したものを評価荷重として用いる。

脱線防止ラグ（ツメ部）応力評価荷重は、地震動による鉛直荷重とスロッシング荷重の足し合わせにより得るものとする。

この脱線防止ラグ（ツメ部）応力評価に対し、脱線防止ラグ（ツメ部）断面性状に基づいた応力評価を行い、許容応力と比較する。

脱線防止ラグ（ツメ部）応力評価荷重

＝地震動による脱線防止ラグ（ツメ部）1個当たりの鉛直荷重＋スロッシングによる脱線防止ラグ（ツメ部）1個当たりの荷重

## 3. 評価結果

### 3.1 ガーダ評価結果

添付1にガーダのスロッシング影響評価結果を示す。

スロッシング応力を考慮して評価した結果、耐震評価時の許容値（275 MPa＝0.7 Su）を僅かに超える結果となる。ただし、ガーダに耐震評価時の許容値を超える応力が発生した場合でも、ガーダに変形は発生するものの、当該応力範囲では破断するわけではない。

スロッシングを考慮した波及的影響評価においては、燃料取替機本体の落下を防止する観点から、ガーダが破断する応力値（設計引張強さ：Su）を比較対象値とする。

この結果、地震とスロッシング評価時のSu値に対する裕度は確保されており、ガーダの破断による燃料取替機の落下は発生しない。

### 3.2 脱線防止ラグ（ツメ部）評価結果

添付2に脱線防止ラグ（ツメ部）のスロッシング影響評価結果を示す。

スロッシング応力を考慮した結果、耐震評価時の許容値（253 MPa＜0.7・Su）は超えない。

このため、地震とスロッシング評価時の裕度は確保されており、脱線防止ラグの破断による燃料取替機の落下は発生しない。

また、当然ながら脱線防止ラグ（ツメ部）が破断する応力値（設計引張強さ：Su）との比較においても裕度が確保されている。

### 3.3 燃料取替機のスロッシングによる波及的影響評価

上記 3.1 及び 3.2 の結果、地震及びスロッシングが同時に発生した場合においても、燃料取替機の鋼材は破断せず、燃料取替機が落下することはない。したがって、燃料取替機におけるスロッシングによる波及的影響はないと考える。

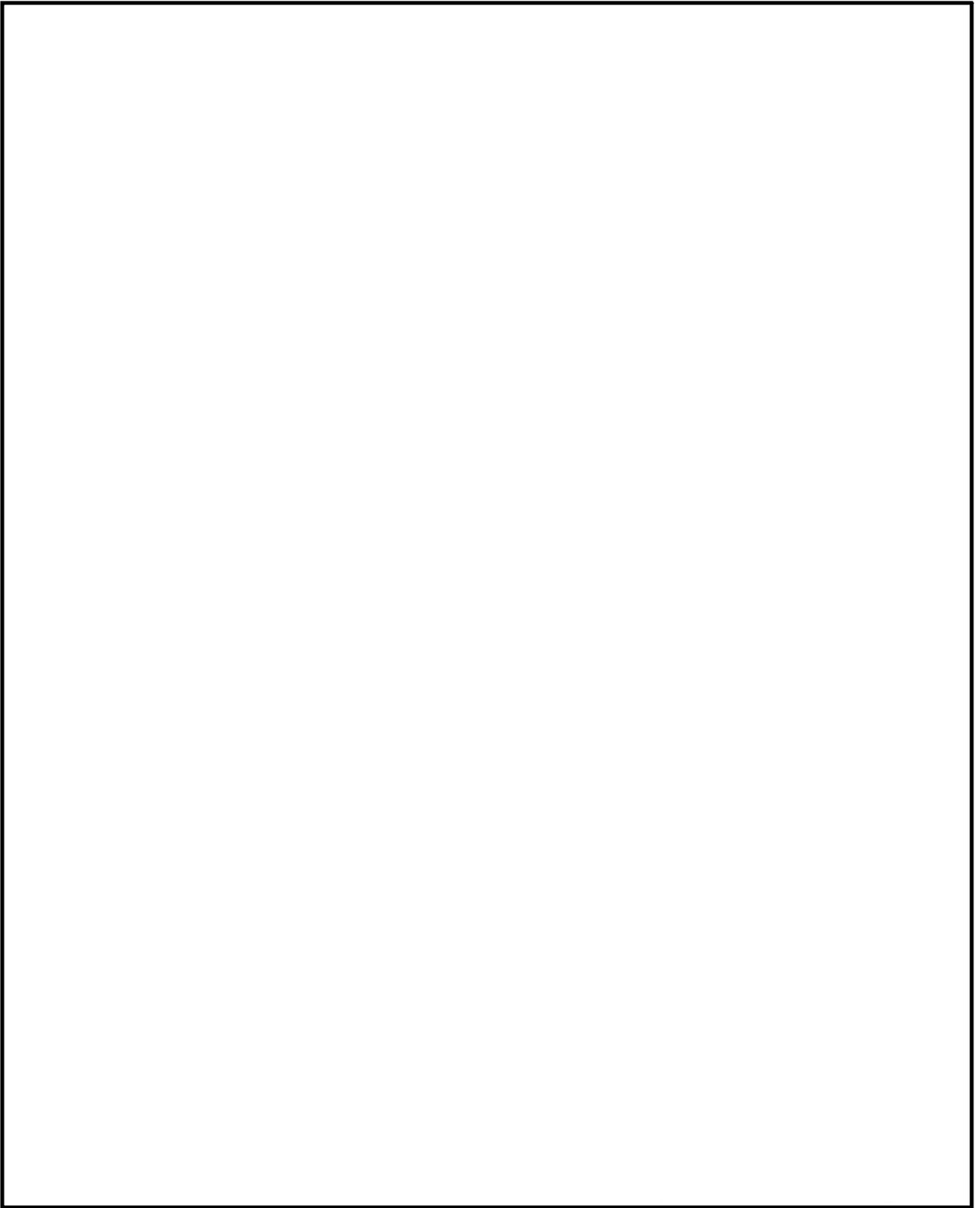


図 1 燃料取替機とスロッシング波高の比較及び波の受圧面

## 燃料取替機ガーダのスロッシング評価

## 1. ガーダのスロッシング応力評価

スロッシング荷重をガーダにかかる等分布荷重とみなし、ガーダを両端固定梁モデルとして応力評価する。ガーダの両端固定梁モデルを図 1 に示す。

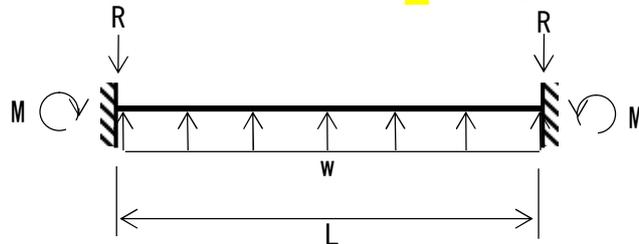


図 1 ガーダの両端固定梁モデル

図 2 において、最大曲げモーメント  $M = w \cdot L^2 / 12$  [Nmm]，反力  $R = w \cdot L / 2$  [N] である。ただし、 $w$ ：ガーダ等分布荷重 ( $w = P / (N \cdot L)$ ) [N/mm]

$L$ ：レール間スパン [mm]

$N$ ：ガーダ本数 [本]

$P$ ：スロッシング荷重（燃料取替機全体， $P = p \cdot S$ ) [N]

$p$ ：スロッシングによる波の圧力 [MPa]

$S$ ：燃料取替機受圧面積 ( $S = a \cdot b$ ) [mm<sup>2</sup>]

$a$ ：ガーダ幅 [mm]

$b$ ：使用済燃料プール幅 [mm]

ここで、 $Z$ ：ガーダ断面係数 [mm<sup>3</sup>]， $A$ ：ガーダ断面積 [mm<sup>2</sup>] とすると、スロッシング曲げ応力  $\sigma_{SB} = M / Z$  [MPa] であり、スロッシングせん断応力  $\tau_{SS} = R / A$  である。

## 2. 地震評価とスロッシング評価の足し合わせ

地震とスロッシングの同時発生を考慮し、評価結果を足し合わせる。

地震による曲げ応力  $\sigma_E$  [MPa]，地震によるせん断応力  $\tau_E$  [MPa] とすると、地震とスロッシングの組合せ応力を  $\sigma_C$  は、 $\sigma_C = \sqrt{(\sigma_E + \sigma_{SB})^2 + 3 \cdot (\tau_E + \tau_{SS})^2}$  なので、設計引張強さを  $S_u$  [MPa] とすると、 $S_u$  値に対する裕度  $S_u / \sigma_C = 1.40$  となる。

## 3. 評価結果

スロッシングを考慮した波及的影響評価においては、燃料取替機本体の落下を防止する観点から、ガーダが破断する応力値（設計引張強さ  $S_u$ ）を比較対象値とする。

この結果、地震とスロッシング評価時の  $S_u$  値に対する裕度は確保されており、ガーダの破断による燃料取替機の落下は発生しない。

## 燃料取替機脱線防止ラグ（ツメ部）のスロッシング評価

## 1. 燃料取替機脱線防止ラグ（ツメ部）へのスロッシング荷重

脱線防止ラグ（ツメ部）へのスロッシング荷重  $F$  は、燃料取替機が受けるスロッシング荷重を脱線防止ラグの個数で等分したものとする。

すなわち、 $F = P/N_L$  [N] と計算される。

ただし、 $P$ ：スロッシング荷重（燃料取替機全体、添付 1 と同じ）である。

## 2. 地震荷重とスロッシング荷重の足し合わせ

脱線防止ラグ（ツメ部）の評価では、別添 2 図 1 の断面 2 を評価する。地震とスロッシングの合成せん断力  $Q$  は、ツメ部せん断力  $Q_2$  とスロッシング荷重  $F$  の和であり、

$$Q = Q_2 + F \quad [\text{N}]$$

となる。地震とスロッシングの合成曲げモーメント  $M$  は、モーメントアーム長  $h_2$ （別添 3 図 1 参照）と  $Q$  より、

$$M = Q \cdot h_2 \quad [\text{Nmm}]$$

となる。地震とスロッシングの曲げ応力  $\sigma$  は、地震とスロッシングの合成曲げモーメント  $M$  とツメ部断面係数  $Z_2$  により、

$$\sigma = M/Z_2 \quad [\text{MPa}]$$

となる。地震とスロッシングのせん断応力  $\tau$  は、地震とスロッシングの合成せん断力  $Q$  とツメ部断面積  $A_2$  により、

$$\tau = Q/A_2 \quad [\text{MPa}]$$

となる。地震とスロッシングの組合せ応力を  $\sigma_c$  とすると、

$$\sigma_c = \sqrt{(\sigma^2 + 3 \cdot \tau^2)} \quad [\text{MPa}]$$

であり設計引張強さを  $S_u$  [MPa] とすると、 $S_u$  値に対する裕度  $S_u/\sigma_c = 1.68$  となる。

## 3. 評価結果

スロッシング応力を考慮した結果、脱線防止ラグ（ツメ部）が破断する応力値（設計引張強さ  $S_u$ ）との比較において十分な裕度が確保されており、脱線防止ラグの破断による燃料取替機の落下は発生しない。

## 燃料取替機伸縮管のスロッシング影響について

以下に、燃料取替機伸縮管がスロッシングの影響を受けた場合の波及的影響について示す。

## 1. 伸縮管の健全性について

伸縮管の機械的強度に作用するスロッシング水荷重は横荷重と鉛直荷重の2種類に分類することができる。これより、以下にそれぞれの荷重に対する伸縮管の健全性について述べる。なお、最終的には破損した伸縮管が使用済燃料プール、炉心内に落下するかどうか問題となる。言い換えると落下が防げていれば良いことになる。

## 1.1 横からの水の荷重

図1に伸縮管最上部（燃料取替機トロリフレームへの固定部）の概要図を示す。伸縮管は最上部（第1管）がトロリフレームと結合されており、その他伸縮管は各管がストッパにて結合されている。したがって、第1管のトロリとの結合部、各管ストッパ部に作用する荷重が当該部材の破断荷重を超えなければ、破断に至らないことになる。

ここで、伸縮管第1管のトロリとの結合部は図1に示すとおり、ジンバル機構部、ストッパ部には一定以上の荷重が作用しない。よって、スロッシングによる水横荷重により伸縮管いずれの部位も損傷にいたる事象は想定されない。

なお、万が一何らかの想定が荷重で伸縮管のいずれかの部位が破損した場合を想定した場合、最も破損の可能性が考えられるのはストッパ部位となるが、このような場合でも伸縮管の構造上、下記のとおり更なる落下防止構造が設けられている。

## ①内側伸縮管が外側伸縮管に乗っている場合（伸縮管が伸びている状態）

この場合、内側伸縮管のストッパが外側伸縮管の下降ストッパに乗り上げている状態となっているが、万が一当該ストッパが破損し、内側伸縮管が落下しても、落下した伸縮管の上昇ストッパが内側伸縮管のストッパに接触し、更なる落下が阻止される（図2）。

## ②外側伸縮管が内側伸縮管に乗っている場合（伸縮管が縮んでいる状態）

この場合、外側伸縮管の上昇ストッパが内側伸縮管のストッパに乗り上げている状態となっているが、万が一当該ストッパが破損し、外側伸縮管が落下しても、落下した伸縮管のストッパが外側伸縮管の下降ストッパに接触し、更なる落下が阻止される（図2）。

上記のとおり、2種類のストッパいずれかの健全性が保たれば、第1に伸縮管ワイヤにより伸縮管の落下は防がれ、また、当該ワイヤが破断したとしても、最終的にはグラップル側ワイヤにより伸縮管の落下は防止される。

## 1.2 上向きの水の荷重

伸縮管は全体で6管構造になっており、第1管から第5管までは下部に閉止構造をもたない円筒構造となっている。このため、基本的にはスロッシングによる上向きの荷重の作用は実質上考慮する必要はない。

一方、グラップルもしくはそれと接合している第6管下面はフランジで閉止されている。当該部は上向きの受圧面となるが、当該面積は質量に対して小さく、問題とする必要はないと考えられる。

なお、万が一当該面を受圧面として第6管もしくはグラップルが有意な量の上向き荷重を受けたとしても、第6管と第5管、それぞれの管の移動ストローク分については拘束されていない。したがって、構造健全上問題となる荷重は伸縮管には作用せず、スロッシングの上向き荷重の伸縮管への影響は考慮する必要はない。

## 2. ワイヤ構造及び強度について

伸縮管は、落下防止の構造としてワイヤの二重化構造になっている。このため、スロッシングの波を受け、万が一伸縮管が落下し、伸縮管側ワイヤが破断するような事象が発生しようとも、グラップル吊り側のワイヤにより荷重を受け、最終的な伸縮管落下には至らない構造となっている。

図1に示すように伸縮管は、グラップル（燃料）を吊るワイヤとは別の伸縮管用ワイヤにて吊り下げられている。燃料取替機は、独立して荷重をかけることが可能な2本のワイヤを有しており、これをワイヤの二重化構造と称している。

伸縮管は6管からなる多重管構造であるが、伸縮管ワイヤは伸縮管の最先端管である第6管を吊り下ろす構造となっている。

図3に示すように伸縮管ワイヤが、伸縮管破損などにより万が一過大な荷重を受け破断した場合、グラップル側ワイヤに荷重をはずける。

この時、グラップル側にかかる荷重は定格荷重(450 kg)、伸縮管荷重(最大約 800 kg)、グラップル荷重(約 30 kg)の合計(約 1280 kg)であり、ワイヤの破断荷重に対し、静荷重ベースで9倍以上の裕度がある。

なお、図3の状態になって落下した衝撃を考慮した場合においても、ワイヤの破断荷重に対し2倍以上の裕度があり、グラップル側ワイヤが破断することはない。

### 3. グラップルについて

グラップル自体は荷重経路が1つのものであり、破損することによる落下の可能性はあるが、荷重が約30 kgであり、落下影響を評価する対象からは除外されるものと考えられる。

### 4. 伸縮管第1管の健全性について

伸縮管第1管のトロリとの結合部は図1に示すとおり、ジンバル機構（構造）にて接合されている。この構造のため、伸縮管は横方向のいずれの方向から荷重が作用しても、当該ジンバル機構（構造）を支点に傾くことにより荷重を逃がす構造としている。

ただしここでは保守的に、スロッシングにより発生するプール水速度及び水平地震動により発生するFHMのすべりによる速度を基にした水平方向荷重と、自重及び鉛直方向荷重を、伸縮管第1管のジンバル機構（構造）で支えるものとした場合に、構造強度を評価した結果を示す。

なお、吊荷は伸縮管とは異なるワイヤーロープで吊られており、伸縮管第1管のジンバル機構（構造）には荷重がかからない構造であるため、鉛直方向荷重には吊り荷重は含めないものとする。

#### 4.1 概略構造及び評価荷重

図4に評価用概略構造を示す。

##### 4.1.2 水平方向荷重

横方向荷重は、プール水の横方向動水圧と、伸縮管の投影面積の積とする。

横方向荷重算出では、伸縮管が最大での状態において、スロッシングによる横方向動水圧をもっとも大きく受けるものとする。このため伸縮管投影面積の各管の長さは、伸縮管の最大ストローク時に、スロッシング最大波高が接触する範囲とする。

これに加え、水平方向地震によりFHMがレール上を滑ることによって発生する速度を動水圧計算に考慮する。動水圧算定で用いる速度は、スロッシングによるプール水の速度と、水平方向地震でのFHMのすべりによる建屋との相対速度の絶対値和とする。

FHMの速度算定に使用する水平方向地震動は以下とし、地震動ごとに上記の速度の和が最大となるものを確認し、その最大の速度にて動水圧を算定する。

地震動：基本ケース8波（Ss-D1, Ss-11, Ss-12, Ss-13, Ss-14, Ss-21, Ss-22, Ss-31）

方向：NS方向, EW方向

標高：EL 46.500 m

FHMの水平方向地震による速度算出法の概略を図5に示す。

FHM は水平方向地震動の時刻歴波がレールとの摩擦力以上となる自己区間はすべり、その間は建屋との相対加速度により等加速度運動をしているものとする。また、FHM はレールとの摩擦力相当の加速度未満となる時刻間は滑らないため加速度及び速度は 0 とする。以上の条件から時刻歴波の終了まで書く時刻における速度を確認し、最大となる速度をその時刻歴波での最大速度とする。これを各地震動に対して実施する。

また、燃料集合体のスロッシングによる横方向荷重は、保守的に燃料集合体の投影面積分を考慮するものとする。

#### 4.1.2 鉛直方向荷重

鉛直方向荷重は、伸縮管の第 1 管から第 6 管までの質量に対し、自重分と鉛直地震動による震度（FHM 卓越固有周期の震度※）を考慮したものとする。吊荷の鉛直方向荷重は 4. で記載の通り、ジンバル機構（構造）に荷重がかからないため、評価荷重には含まないものとする。

※伸縮管第 1 管のジンバル機構部は FHM 本体に取り付けられ、鉛直方向には拘束されていることから、鉛直方向の地震動に対して伸縮管は FHM 本体と同じ挙動をとることとなる。このため、FHM 卓越固有周期の震度を用いる。

#### 4.1.3 評価用荷重

評価用荷重は保守的に水平方向荷重と、鉛直方向荷重の絶対値和を用いる。

#### 4.2 評価対象部位

図 6 に評価対象部位を示す。

評価対象は、伸縮管第 1 管のジンバル機構（構造）においてロードパスとなる以下 3 部品とする。

- ・ ジンバルピン
- ・ リング
- ・ ハンガー

#### 4.3 評価結果

表 1 に評価結果を示す。

すべての部品において、発生応力は、耐力または降伏点（ $S_y$  値）を基にした許容値未満であり、裕度が確保されている。

これにより、伸縮管第 1 管はスロッシング荷重を受けても、破断して落下することはないと考える。

表1 評価結果

部位	材質	評価応力	発生応力 [MPa]	許容値 [MPa]	裕度
ジンバルピ ン	SUS630	曲げ応力	573	1175	2.36
		せん断応力	69	678	11.49
		組合せ	585	1175	2.31
リング	SUS304	曲げ応力	179	205	1.32
		せん断応力	29	118	4.72
		組合せ	186	205	1.27
ハンガー	S45C	引張応力	49	490	11.39
		せん断応力	20	282	16.58
		組合せ	60	490	9.42

※許容値は各材質の耐力又は降伏点の値（ $S_y$ ）を基に，以下とする。

曲げ応力，引張応力，組合せ： $S_y$       せん断応力 $S_y/\sqrt{3}$

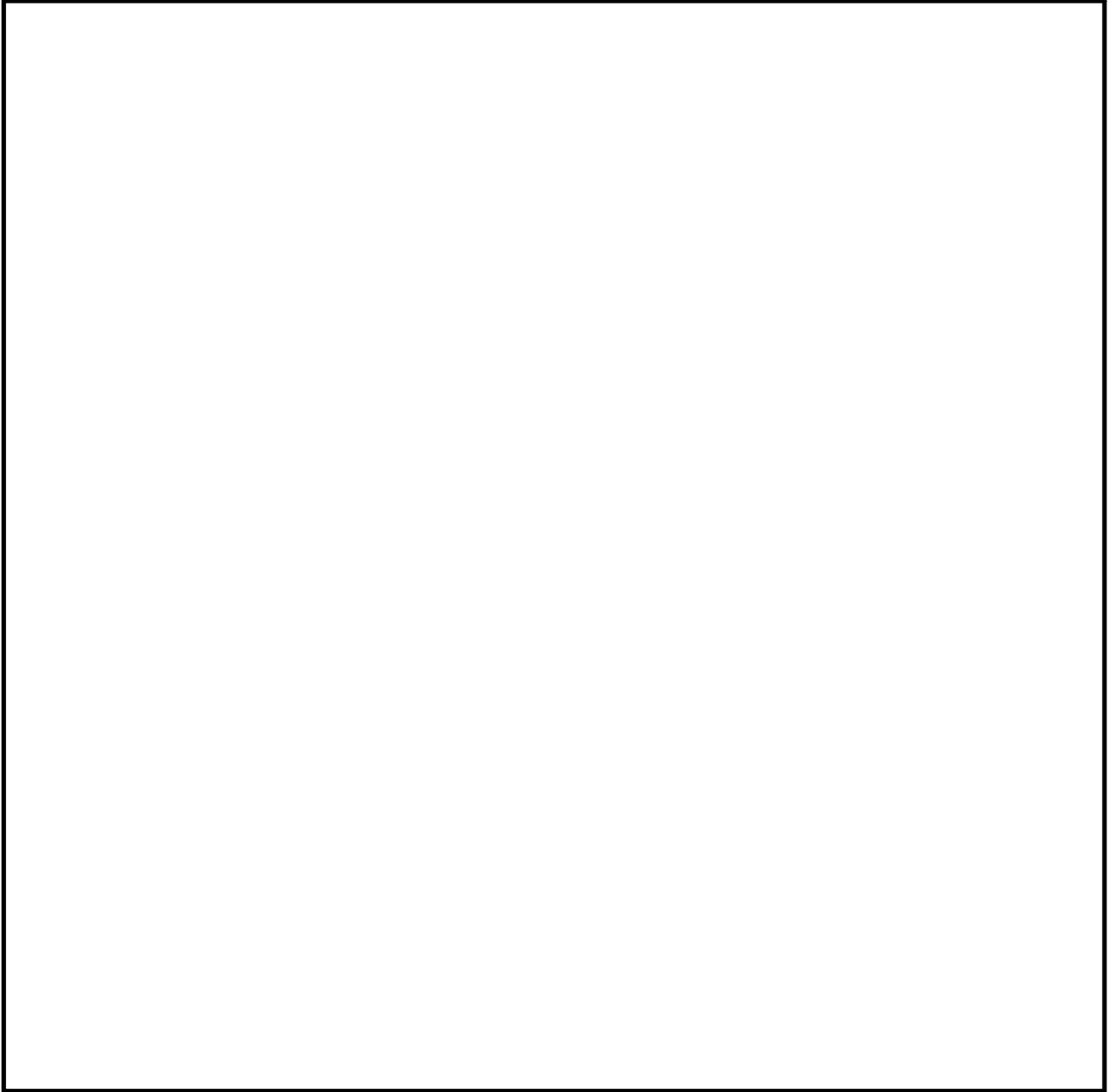


図 1 燃料把握機（伸縮管とグラップル）の吊構造概要図

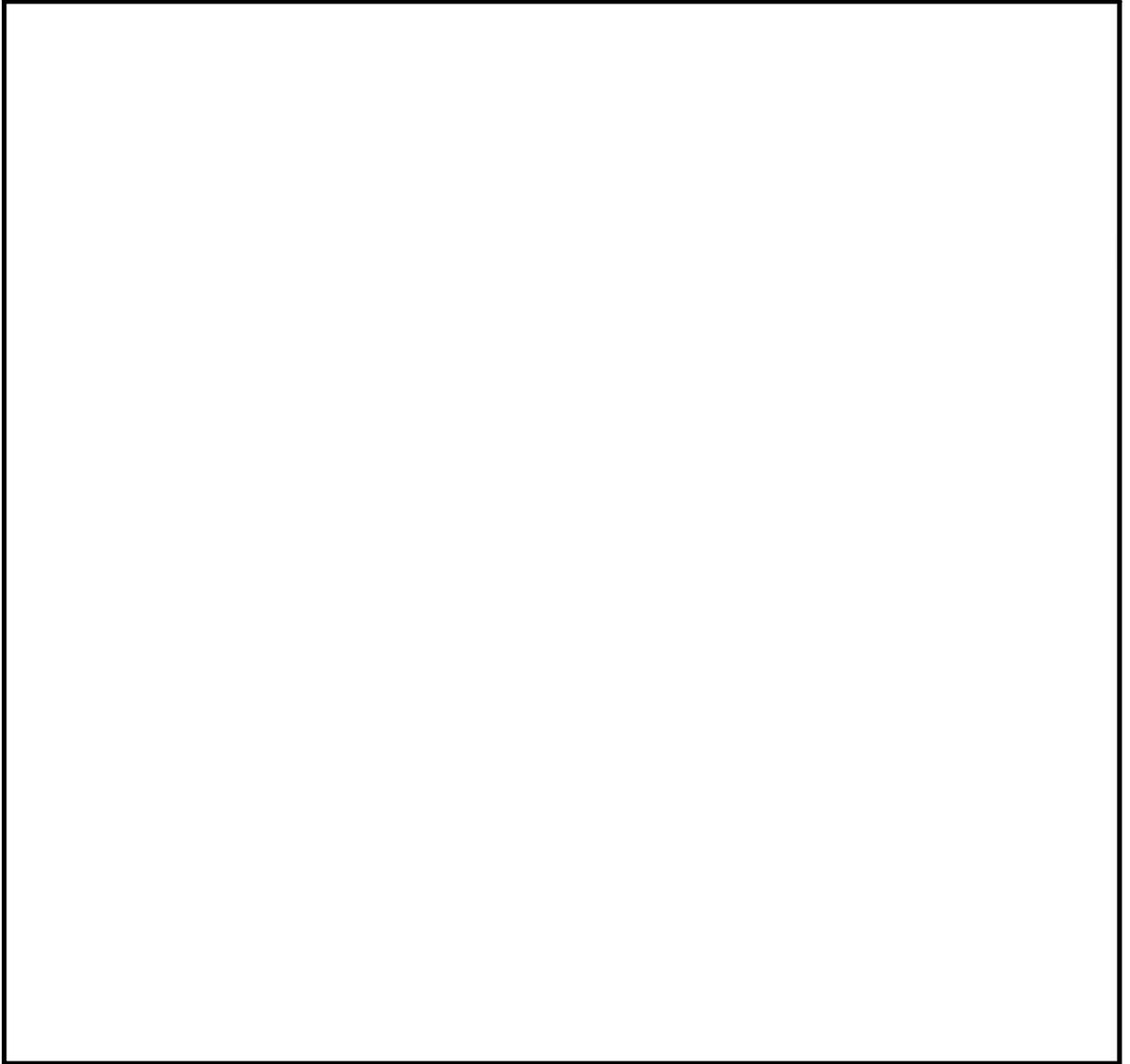


図 2 伸縮管とグラップルの吊構造概要図

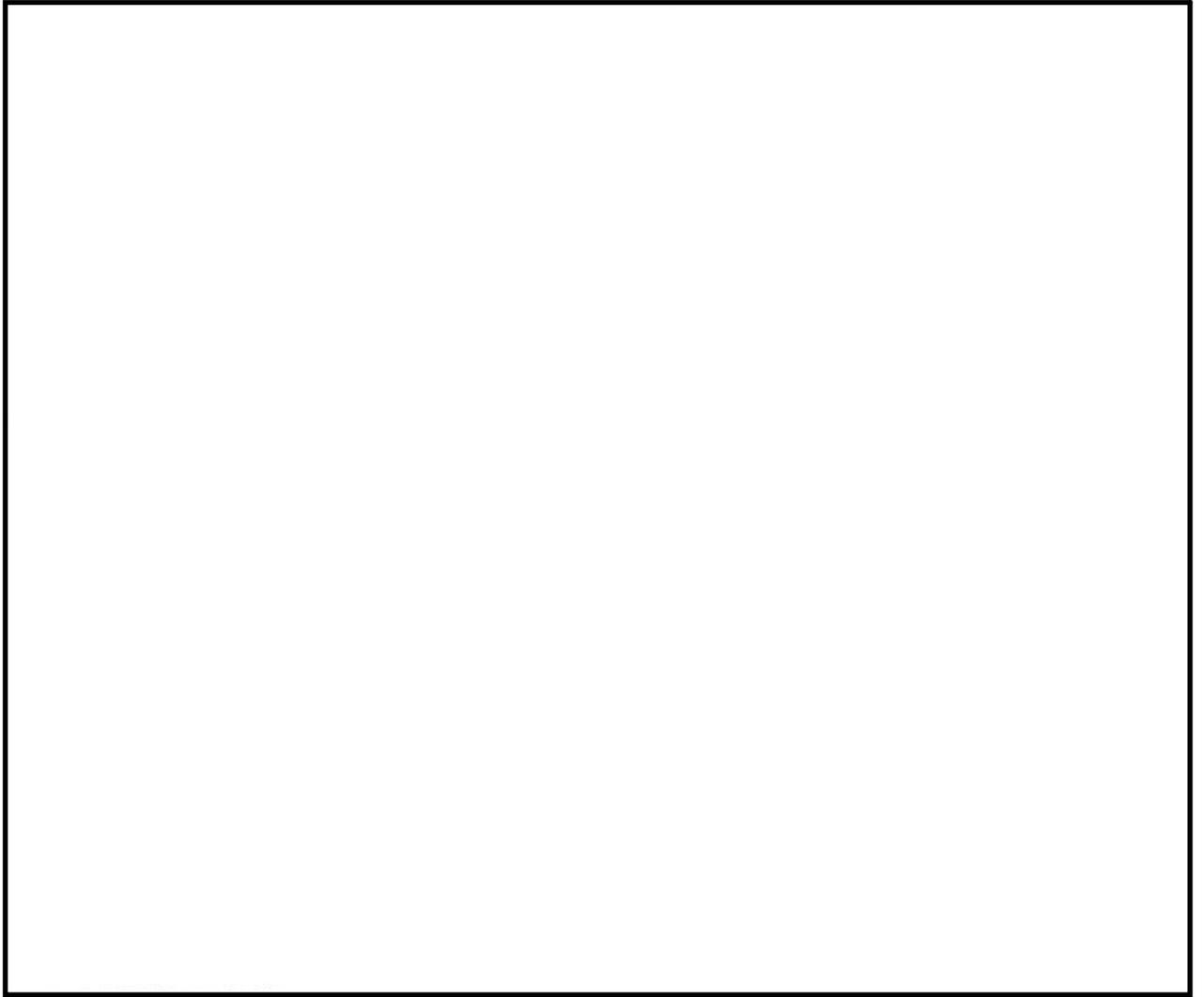


図 3 伸縮管とグラップルの先端部及び破断時の状態概略図

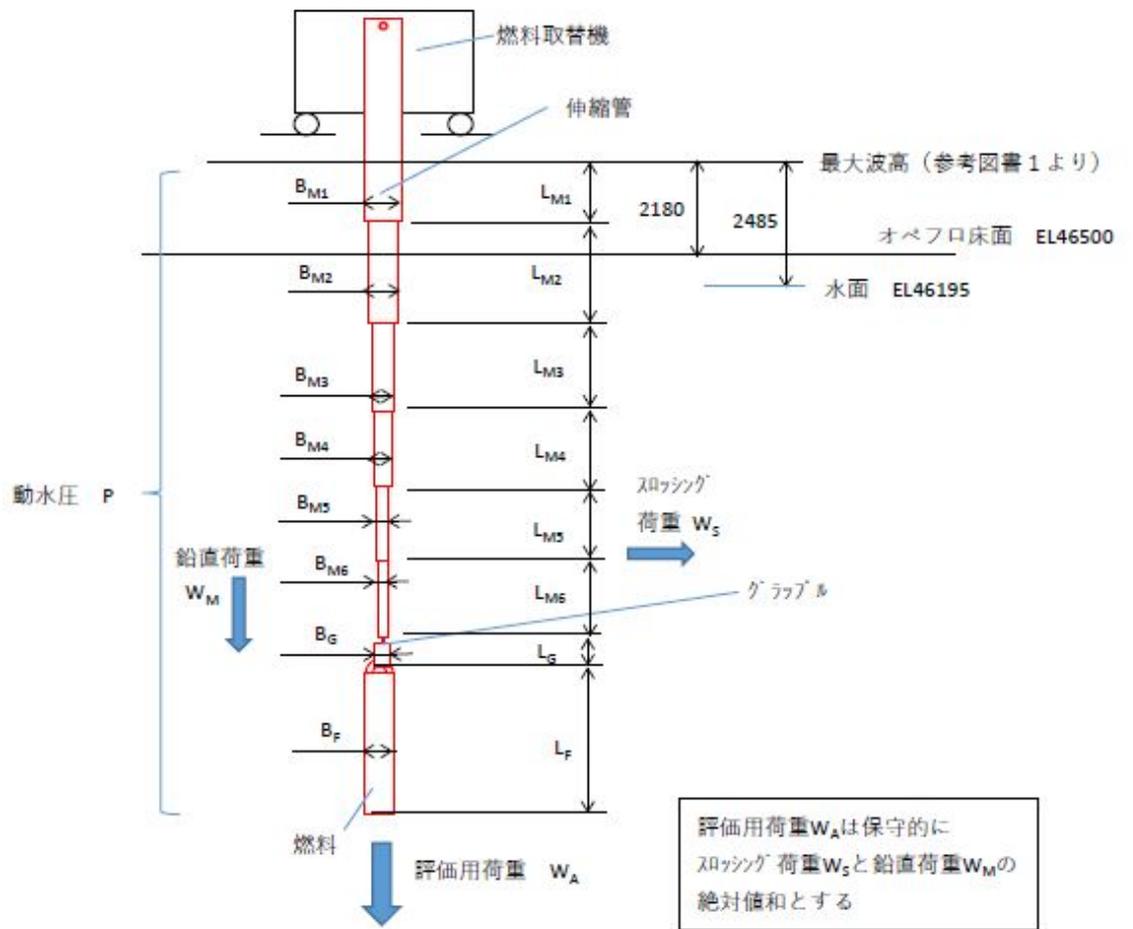
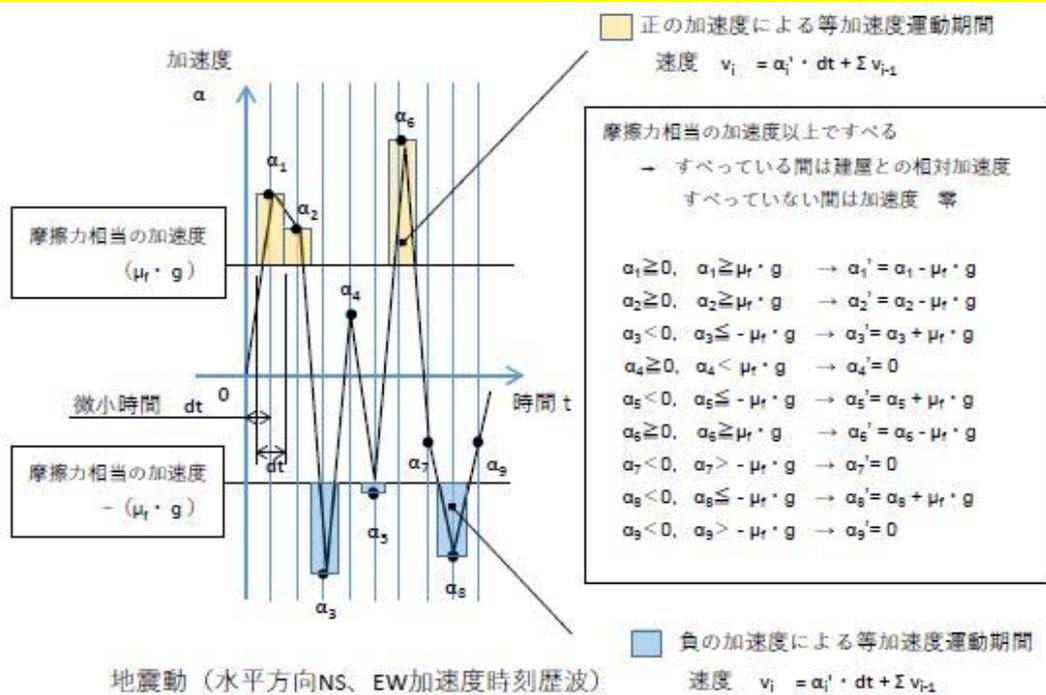


図4 評価用概略構造



地震発生時のFHMは、水平地震動によって受ける力が、自重による摩擦력에打ち勝つと、FHM自体が走行レール上でずれる。

このため、FHMの水平方向地震動の加速度時刻歴波が、FHMの摩擦力相当の加速度以上となる時刻間は、FHMがすべるものとする。

FHMがすべるときに受ける加速度は、建屋との相対加速度となり、時刻歴加速度から摩擦力相当の加速度を引いた値となる。

一方、時刻歴加速度が摩擦力相当の加速度未満のときは、FHMはすべらないので、加速度は零とする。

ここではFHMがすべっている時刻間は、上記の加速度により等加速度運動をしているものとみなす。  
等加速度運動による微小時間の速度  $v_i$

$$v_i = a_i' \cdot dt + \Sigma v_{i-1}$$

（摩擦力相当の加速度未満ではすべらないため、速度  $v_i$  式のうち、それまでの累積速度を示す  $\Sigma v_{i-1}$  は、加速度が摩擦力相当の加速度未満となる時点で零となるものとする。）

したがって、水平地震時の最大速度  $V_{\mu}$  は、時刻歴波が終了するまでの各微小時間の速度  $v_i$  の中で絶対値の最大値とする。

図5 水平方向速度 算出法概略

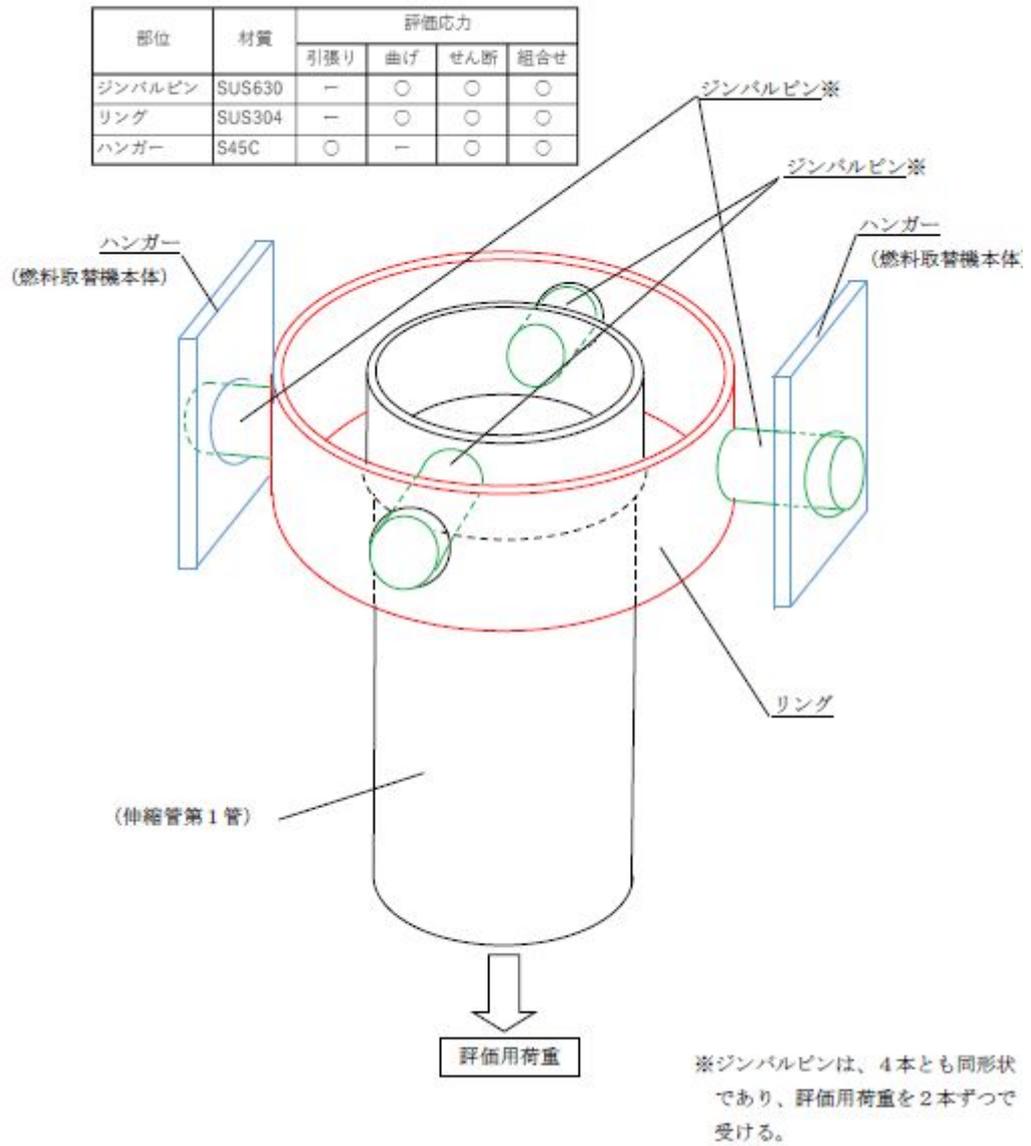


図6 評価対象部位