

資料番号	TK-1-890 改2
提出年月日	平成30年6月19日

東海第二発電所

燃料集合体の抗力係数測定試験 試験要領書

日本原子力発電株式会社

平成30年6月

目 次

1. 目的	1
2. 試験期間及び場所	1
3. 試験項目	1
4. 抗力係数測定試験について	1
4.1 抗力試験測定装置の概要	1
4.2 試験ケース	3
4.3 計測要領（計測項目）	3
5. 試験要領	4
5.1 試験手順	4
5.2 試験工程	6
5.3 測定計測器一覧表	6
6. CFD 解析	8
6.1 目的	8
6.2 試験範囲と CFD 解析による補完	8

東海第二発電所 燃料集合体の抗力係数測定試験要領について

1. 目的

本試験は、日本原子力発電株式会社東海第二発電所の工事計画審査における使用済燃料プール内での燃料集合体落下評価において、抗力係数を測定することで説明性向上に資することを目的とする。

2. 試験期間及び場所

実施期間：平成 30 年 6 月 18 日（月）～20 日（水）

場 所：株式会社セレス 流速計試験所

東京都狛江市岩戸北岩戸北 2 - 1 1 - 1

3. 試験項目

試験台車に実機形状を模擬した燃料集合体（燃料ペレットなし，チャンネルボックス付き）をセットし，試験水槽内において以下に示す速度で抗力係数測定試験を行い，各速度における抗力係数を測定する。

- ・模擬燃料集合体の試験速度： 1.3 m/s, 2.8 m/s, 6.0 m/s

4. 抗力係数測定試験について

4.1 抗力試験測定装置の概要

試験台車により水平に配置した模擬燃料集合体を試験水槽内において所定速度で水平移動させ，所定速度における荷重を計測して抗力係数を測定する。第 1 表に試験所の仕様，第 1 図に試験所の概要図，第 2 図に試験の概要を示す。

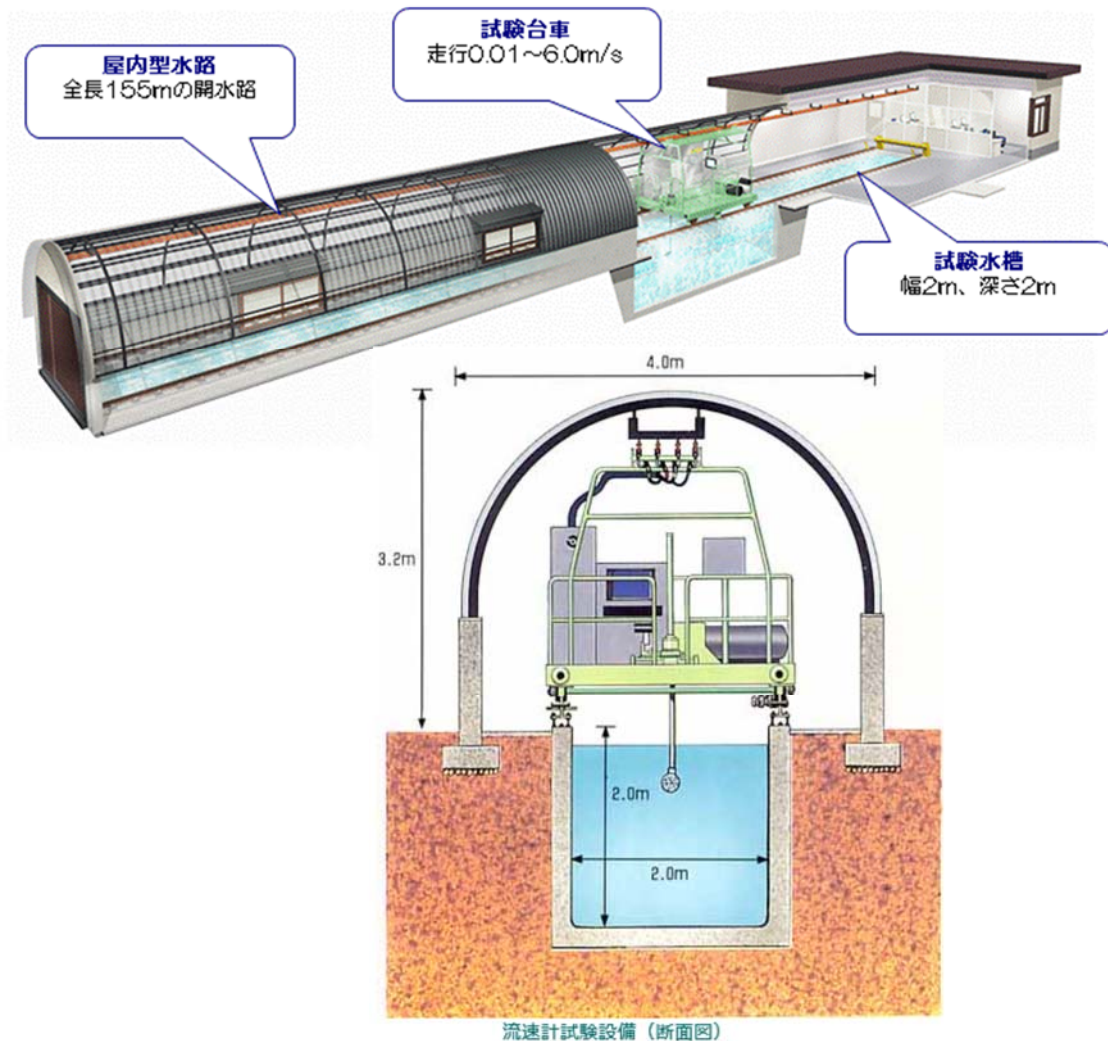
試験対象である模擬燃料集合体を水槽に沿って走行する台車に取り付けて，水槽内の静止した水の中を安定した速度で移動させながら荷重計の出力を測定し，台車の移動速度等から以下の式により抗力係数を算出する。

$$D = 1/2 \times \rho \times Cd \times A \times v^2 \quad \dots(a)$$

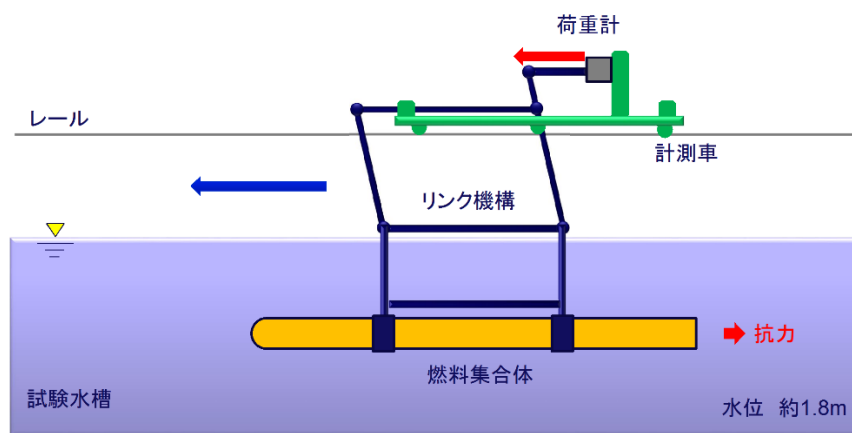
ただし，D：抗力[N]， ρ ：水密度[kg/m³]，Cd：抗力係数，A：投影面積 (0.13²) [m²]，v：流速 [m/s]である。

第1表 流速計試験所の仕様

試験水槽	
寸法	全長 155m, 幅 2.0m, 深さ 2.0m (貯水容量約 600m ³)
構造	側壁, 底ともに厚さ 22cm の鉄筋コンクリート
給水	井戸水及び上水道
試験台車 (計測車)	
寸法	長さ 3,500mm, 幅 2,500mm
走行速度	0.01[m/s]~6.00[m/s] (0.01[m/s]毎に設定可) 速度変動は設定速度に対して±1%以内
電動機	インバータ制御モータ 22kW
速度検出方法	エンコーダ (分解能 0.1mm), スリット板 10mm



第1図 流速計試験所の概要図



第2図 試験概要

4.2 試験ケース

模擬燃料集合体の抗力係数測定試験を実施する。第2表に抗力係数測定試験の試験ケースを示す。

第2表 抗力係数測定試験の試験ケース

ケース	試験体	長さ	速度	備考
1-1	模擬燃料集合体	0.13 m×0.13 m×4 m	1.3 m/s [※]	レイノルズ数 1.7×10^5
1-2	同上	同上	2.8 m/s [※]	レイノルズ数 3.6×10^5
1-3	同上	同上	6.0 m/s	計測車の最大速度
2-1	治具のみ	—	1.3 m/s	ケース 1-1 と同条件
2-2	同上	—	2.8 m/s	ケース 1-2 と同条件
2-3	同上	—	6.0 m/s	ケース 1-3 と同条件

※できる限り備考のレイノルズ数に近づくよう、水温に対応して速度を調整する

4.3 計測要領（計測項目）

試験体の抗力係数を評価するため次表に示す項目を測定する。各計測項目ともデータロガーにより収録する。計測項目を以下第3表に示す。

第3表 抗力係数測定試験の測定項目

計測項目	入 力	計測レンジ
移動速度	光電センサ信号	0.01 m/s ~ 6.0 m/s
荷重	ロードセル (-10V ~ 10V)	-200 N ~ 200 N -500 N ~ 500 N -2 kN ~ 2 kN -5 kN ~ 5 kN
水温	熱電対センサ信号	0 ~ 100 °C

5. 試験要領

5.1 試験手順

(1) 試験台車（以下「台車」という。）設備の安全確認

- ① 台車の車輪やガイドローラおよび制動盤に損傷等の異常がないことを確認する。
- ② レールやレール支持台に異常がないことを確認する。
- ③ 台車止めやリミットスイッチが所定の位置にあることを確認する。
- ④ 給電トロリ線や集電器に異常がないことを確認する。
- ⑤ 台車が走行する区域内に人がいたり物が放置されたりしてないかを確認する。
- ⑥ 水槽の水位が適切であるか、水面にゴミ、異物が浮いていないかを確認する。

(2) 台車の運転準備

- ① コンプレッサ下流側のニードルバルブを閉め、その横にあるストップバルブを開にする。
- ② 台車上のセレクトスイッチ（測定室－台車）を台車にセットする。
- ③ 台車上のシステムの電源（台車のキースイッチ）をONにする。台車上のパソコンのSWがONになり、試験システムプログラムが起動する。「モータ加熱」と「ブレーキ作動」の表示灯が点灯し、ブザーが鳴動する。
- ④ 「ブザー停止」を押す。 →（ブザーが止まる。）
- ⑤ 「異常リセット」を押す。 →（「モータ加熱」の表示灯が消える。）
- ⑥ 「ブレーキ解除」を押す。 →（「ブレーキ作動」の表示灯が消える。）
- ⑦ 台車上のシステム制御盤の「運転準備」の「入」のボタンを押す。コンプレッサが稼働し、自動で停止する。（サーボモータも同時稼働する）
- ⑧ コンプレッサ停止後、制御盤の空気圧OKランプが点灯し、空気タンクの圧力が 0.4 MPa ～ 0.6 MPa であることを確認する。

(3) 試験体の固定確認（治具のみの場合は除く）

リンク機構にしっかりと試験体が固縛しているかどうか目視等で確認する。

(4) リンク機構の検査

試験体が吊ってあるリンク機構が大きく傾いていないこと等を確認する。

(5) 計測機器の動作確認

ロードセル（荷重計）、熱電対センサ、光電センサの配線、取り付け等の確認と、出力されるデータを確認する。（電源コード、出力コードの接続等の再確認）

スコープコーダ（データ取得装置）にコードを接続する際、台車の移動、リンク機構の振れ分を考慮して無理な力がかからないようにゆとりを持たせること、その他、荷重計等に影響を与えることのないよう注意する。

(6) 記録シートへの記入

試験開始前に、試験番号、試験体の名称、使用する荷重計、日付、室温、水温等を記録シートに記入する。

(7) 試験開始

①試験水槽内の水の静止状況の確認

水の中で移動させての試験は、水槽内の水が静止していることが重要な要件であり、試験を実施する前に水槽内の水の静止状況を確認しておかなければならない。

②台車走行スタート前の指差し確認(合図)

周りに人、巻き込む物が無いことを確認し、測定室の要員に片手を上げて合図を送る。測定室に待機している要員は、合図の確認後相手に合図を送り直し台車走行動作へ移る。

③試験の実施

- a. 安全のために、台車の運転操作と記録係は必ず別々の者が行う。試験記録には、試験番号、パターンなどの試験情報を記載しておく。
- b. 試験速度が 5.0m/s 以上の場合には、台車乗車員はヘルメットを必ず着用する。

(8) 試験車等使用終了（台車を定位置に戻す）

抗力係数測定試験は、往路のみの計測とし、計測が完了したら、速やかに台車を所定の位置に戻す。所定の位置に戻ってきた台車において、リンク機構、試験体の状況において、異常がないことを確認する。

(9) 再度抗力係数測定試験を実施する場合の注意点

一度、抗力測定試験を実施すると、水槽内の水が波立つため、再度試験する場合には、水槽内の水が静止するまで、待機すること（30分～1時間待機）。

なお、模擬燃料集合体の実測試験の順番の例は以下のとおり。

- 測定 1 ラン目： 1.3 m/s 及び 2.8 m/s の連続計測 1 回ずつ
- 測定 2 ラン目： 6 m/s のみ 1 回
- 測定 3 ラン目： 6 m/s のみ 1 回
- 測定 4 ラン目： 1.3 m/s 及び 2.8 m/s の連続計測 1 回ずつ
- 測定 5 ラン目： 6 m/s のみ 1 回
- 測定 6 ラン目： 6 m/s のみ 1 回

(10) 抗力係数算出

各試験番号の荷重計測定値から抗力を算出する。試験番号 1-1, 2-1 の抗力から治具なし 1 の抗力を、試験番号 1-2, 2-2 の抗力から治具なし 2 の抗力を、ケース 1-3, 2-3 の抗力から治具

なし3の抗力をそれぞれ減じ、速度毎の模擬燃料集合体のみの抗力を算出する。

4.1の式(a)により、抗力から抗力係数を算出し、試験記録に記載する。記録は、記入者以外の者がダブルチェックを行う。

(11) レイノルズ数依存性の確認

(10)にて算出した抗力係数を、レイノルズ数を横軸にしたグラフにプロットし、大きな変動がないことを確認する。また、6.のCFD解析の結果も同じグラフにプロットし、同様の傾向であることを確認する。

(12) 落下エネルギー評価

(10)及び(11)の結果に基づく抗力係数により、水中高さ 5.975m からライニングに燃料集合体が落下した際の衝突時速度を算出する。この速度から落下を評価して、気中落下試験結果である15.5kJよりも小さいことを確認する。

5.2 試験工程

試験工程（案）を第4表に示す。

第4表 試験工程（案）

項目	6/6	6/7	6/8	6/9	6/10	6/11	6/12	6/13	6/14	6/15	6/16	6/17	6/18	6/19	6/20	6/21
	水	木	金	土	日	月	火	水	木	金	土	日	月	火	水	木
試験装置																
設計製作	■															
現地組立調整						■										
抗力計測試験																
校正試験									■							
模擬燃料体試験（治具含む）										■						
対照試験（治具のみ）												■				
模擬燃料体試験（再現性確認）														■		

5.3 測定機器一覧表

抗力係数測定試験に用いる測定機器一覧表を第5表、試験記録シート（案）を第6表に示す。

第5表 測定機器一覧表

No	計測器名称	メーカー	仕様
1	荷重計 (ロードセル) DB-200N DB-500N DB-2 kN DB-5 kN	株式会社 昭和測器	定格容量 200 N(約 20 kg) 500 N(約 50 kg) 2000 N(約 200 kg) 5000 N(約 500 kg)
2	荷重計指示計 DS-2000(デジタルトランスジューサ)	株式会社 昭和測器	印加電圧 DC2.5 V, -10 V±10 % 信号入力範囲:-3.2 mV/V~3.2 mV/V 校正精度:0.1%F.S 以内
3	データ収録装置 スコープコーダ DL350	YOKOGAWA	チャンネル数:最大 8 サンプルレート:100 kS/s 分解能:最高 16 bit

第6表 試験記録シート (案)

試験体 _____ 日付 _____
 荷重計 _____ 室温 _____

試験番号	移動速度 (設定値) m/s	移動速度 (測定値) m/s	最大荷重 N	水温 (開始時) ℃	水温 (終了時) ℃	抗力係数
1-1	1.3					
1-2	2.8					
1-3	6.0					
2-1	1.3					
2-2	2.8					
2-3	6.0					
治具なし1	1.3					
治具なし2	2.8					
治具なし3	6.0					

6. CFD 解析

6.1 目的

今回の試験においては、試験体の形状については実機と同じものを使用するが、速度及び水温が実機をカバーできない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。

6.2 試験範囲と CFD 解析による補完

今回の試験においては、水温は 20℃程度と予想され、試験速度は設備の上限の 6.0m/s である。一方、実機条件としては、使用済燃料プール水温は 65℃以下に保たれ、ライニングからの高さ約 6m から落下した場合の燃料集合体の衝突速度は約 10m/s である。

したがって、試験におけるレイノルズ数が、最大でも 7.8×10^5 程度であるのに対し、実機条件は 3.1×10^6 程度まで考えられる^(注1)。

このため、CFD 解析により試験範囲の抗力係数の傾向を確認するとともに、実機条件のレイノルズ数における試験体の抗力係数を計算により求め、試験結果を補完する。

なお、水温と試験速度を同時に考慮するため、レイノルズ数で整理した^(注2)。

(注1)

レイノルズ数 Re は以下のとおり定義される。

$$Re = v \times d / \nu$$

ここで、 v : 流速 (m/s), d : 代表長さ (ここでは流れに垂直な面の 1 辺の長さ) (m), ν : 動粘性係数 (粘性係数/水密度) (m^2/s) である。試験時の水温が約 20℃とすると、最大流速 6.0m/s, 代表長さ 0.13m, 動粘性係数 $1.0 \times 10^{-6} m^2/s$ より、 $Re(\text{試験時}) = 7.8 \times 10^5$ となる。

また、実機条件としては、抗力係数をもっとも小さく見積もった 0.5 の場合でもライニングとの衝突速度が約 10m/s であることからこれに余裕を持たせて 10.5m/s とし、代表長さ 0.13m, 水温 65℃時の動粘性係数約 $0.44 \times 10^{-6} m^2/s$ より、 $Re(\text{実機条件}) = 3.1 \times 10^6$ となる。

(注2)

レイノルズ数を変化させない場合、水温上昇によってレイノルズ数の分母である動粘性係数が減少すると、分子である速度が減少することになる。抗力は概ね速度の二乗に比例するため、大きく減少することとなる。

実際に速度は変化させずに水温を上昇させた場合には、レイノルズ数は上昇するが、速度は変化しないため、抗力への影響は少ないと考えられる。