

本資料のうち、枠囲みの内容は、  
営業秘密あるいは防護上の観点  
から公開できません。

資料番号

TK-1-176 改10

平成 30 年 6 月 21 日  
日本原子力発電株式会社

## 東海第二発電所 ペDESTAL排水系の排水機能確認試験について

### 1. 概要

原子炉圧力容器（以下「RPV」という。）から落下した溶融炉心の冠水及び水蒸気爆発による影響抑制の観点から、RPV破損時のペDESTAL内水位を1mに維持することとしている。

このため、ペDESTAL排水系に設置する格納容器床ドレンサンプ導入管（以下「導入管」という。）及びスリット形状の排水ラインを設けることにより、ペDESTAL内に流入する流入水（余剰水）を排水することとしており、モックアップ試験により流入水が確実に排水できることを確認する。

### 2. 目的

SA時にペDESTAL内への流入水が増加した場合に、余剰水が規定時間内にサブプレッション・チェンバへ排水できることを確認する。具体的には、下記の確認を実施する。

- ・余剰水が排出時間の制限約2.7時間内に排水できること。また、その流動状況を確認する。
- ・圧損係数を算出し、設置許可で評価した排出時間約2.3時間（圧損係数 ）と比較し、設置許可における評価の妥当性を確認する。

排出時間の制限としては、ペDESTAL内水位が高くなり得るボトムドレンLOCA時の、RPVからペDESTAL内への流入が停止する事象発生0.3時間から、RPV破損が早くなる大破断LOCA時におけるRPV破損時間を保守的に短くした3時間を組合せて2.7時間とする。

### 3. 試験条件

試験方法を表1、設備条件を表2、確認項目及び判定基準を表3に示す。また、試験装置を図1に示す。

表1 試験方法

試験水	排水配管状態	排水先	試験方法
水道水 (常温)	配管内満水。 (DB時に常時 排水があるため)	排水口をスリットと同 程度の高さに設定。 (SA時にベント管へ の排水となるため)	排水弁を閉の状態にて導入管より 高く水を張り、弁を開とすること で、静水圧にて排水。

表2 設備条件

排水配管経路	試験計画
導入管～ スリット入口	アクリル製 80A (ペDESTAL床面から高さ1m)
スリット入口～ スリット出口	アクリル製 (流路断面寸法: <input type="text"/> )
スリット出口～ ベント管	塩化ビニル製 80A

表3 確認項目/判定基準

確認項目	判定基準
排水流路全体での排水時間 (圧損係数)	2.7時間以下 (目標値: <input type="text"/> )
流動状況	—

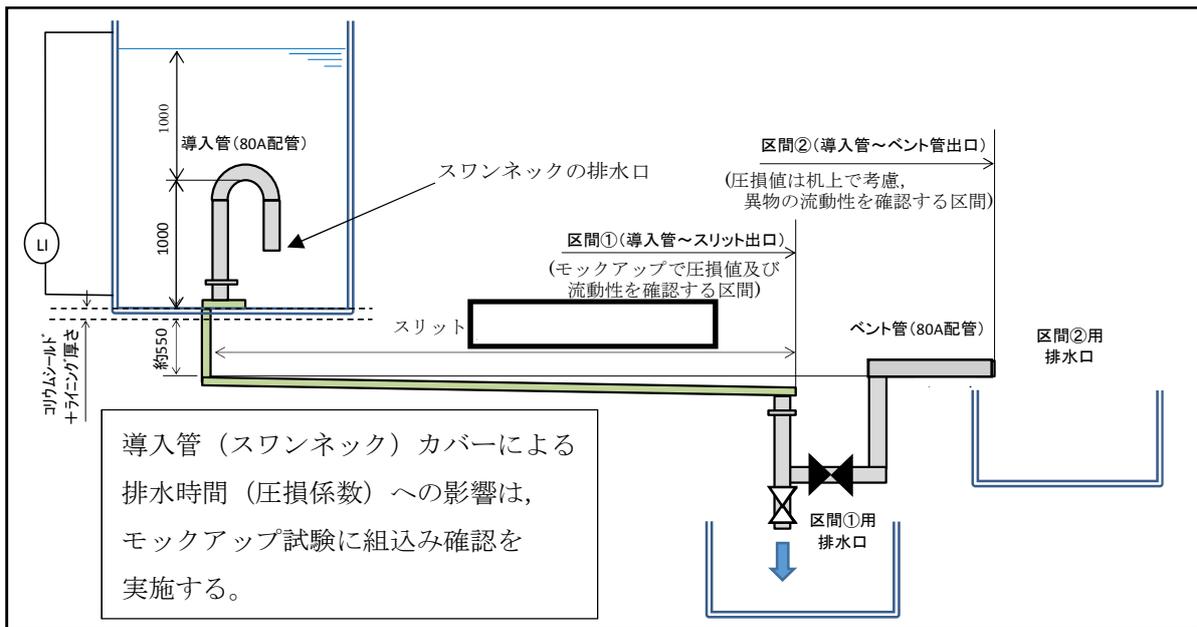


図1 試験装置

4. モックアップ装置と実機の相違点について

今回使用するモックアップ装置と実機の相違点を表4に示す。

表4 モックアップ装置と実機の相違点

	モックアップ装置	実機	評価に与える影響
配管材質	導入管～スリット出口： アクリル製  スリット出口からベント管： 塩化ビニル製	導入管～ベント管： ステンレス製	材質の違いによる表面粗さの違いによって、圧損係数への影響はあるが、試験で得られた係数に対しては、裕度を考慮して今後の設計を行うため問題ないとする。※1
水温	常温（約10～20℃）	高温水 （約167℃（2Pdでの飽和温度に相当））	水温が低い方が圧損係数は高くなるため、常温水での試験を実施しておけば、SA時の高温水の排水性については包絡できる。
流路勾配			装置のたわみ等を考慮し、保守的に設定。
水位差	1.000m （最高水位2mから最低水位1mまでの差）		圧損 $H = \text{圧損係数} K \times \text{流量} Q^2$ より水位差による圧損係数算出への影響は無いが、信頼性のあるデータ取得のため十分な試験時間及び流量確保の観点から設定。

注※1：アクリルの表面粗さは約6μm（算術平均粗さ）であり、実機ステンレス鋼の表面粗さは約5μm（算術平均粗さ）と同等である。表面粗さの相違による圧損への影響を確認するため、配管長さ10mとし、表面粗さを1μm及び10μmと仮定した場合の圧損を評価した。

その結果、圧損は以下の通りとなり表面粗さが10倍相違したとしても圧損への影響は3%程度の相違である。また、ペDESTAL排水系の配管圧損は数mであるのに対し、表面粗さによる影響は十数mm程度であるため、表面粗さの配管圧損への影響（約0.3%）は小さいと言える。

<表面粗さによる圧損評価値の比較>

	表面粗さ（μm）	
	1	10
圧損値（m）	0.401	0.414

評価条件：配管 80A, Sch80

流 量：22m<sup>3</sup>/h

5. 試験時期

試験内容	試験時期
試験体の製作	2018年3月～4月中旬
モックアップ試験	2018年4月下旬～5月下旬
試験結果（速報）の説明	2018年6月上旬

6. モックアップ試験で想定する異物の種類について

事故時にペDESTAL内の計装用・照明用ケーブル，照明が破損し，スワンネックに到達する可能性があるが，床に沈降すること及びスワンネックカバー(※2)を設置することから，スワンネックに直接接触することはない。

また，上記に加え，想定したその他の異物の種類を表5に示す。表5の保温材，塵土，塗料片，錆片，スラッジ及びその他異物は，ECCS ストレーナに関する『平成20・02・12 原院第5号』の内規記載項目から抽出した。

表5に示すように，スワンネックに到達，通過する異物としてスラッジが想定されるため，モックアップ試験で想定する異物はスラッジを想定する。

表5 モックアップで想定する異物の種類

想定異物	ペDESTAL内への流入		スワンネック・スリットへの流入	
	○	×	○	×
ケーブル	○	ペDESTAL内での落下	×	床に沈降(※2)
照明	○	ペDESTAL内での落下	×	床に沈降(※2)
保温材	×	ペDESTAL内には無い。(※1)	—	(評価不要)
塵土	×	ペDESTAL内には無い。(※1)	—	(評価不要)
塗料片	○	流入，或いは，ペDESTAL内に存在	×	床に沈降(※2)
錆片	○		×	床に沈降(※2)
スラッジ	○		○	大部分は床に沈降(※2)

○：流入すると想定したもの。

×：流入しないと想定したもの。

※1：外部からの通常時流入については，作業後清掃等を実施することでほとんど無いと想定。

また事故後早期に流入経路の弁を閉とすることで流入を制限することから事故時の流入は無いものと想定。

※2：スワンネック(80A)の周りにはスワンネックカバー(□の穴ダブル構造)を設置していることから，大きな異物は近接・流入できない構造となっている。

スワンネックの排水口を水位1mの中間位置に設置するため床(水面)の異物が排水口に流入するとは考え難い。

【参考値】塗料片密度：1.4kg/L～1.8kg/L

錆片密度：約5.2kg/L

7. モックアップ試験での異物量について

- ・異物（スラッジ）の模擬材として  $\text{Fe}_3\text{O}_4$ （四酸化三鉄）を使用する。
- ・濃度は、東海第二発電所の調査結果から最大値を考慮し保守的に  で設定する。
- ・異物（スラッジ）は、保守的に全量がスリットを通過するよう投入する。
- ・1 バッチに使用する異物量は表 6 に示す。

表 6 異物量の算出

項目	単位	値	備考
ベデスタル断面積	m <sup>2</sup>		
水位差	m		
排水量	m <sup>3</sup>		
流路本数	—	2	
流路を通過する排水量	m <sup>3</sup>		
流路を通過する排水量（単位変換）	kg		
異物（スラッジ）量	kg		

8. スリット部圧損過大他発生時の対応について

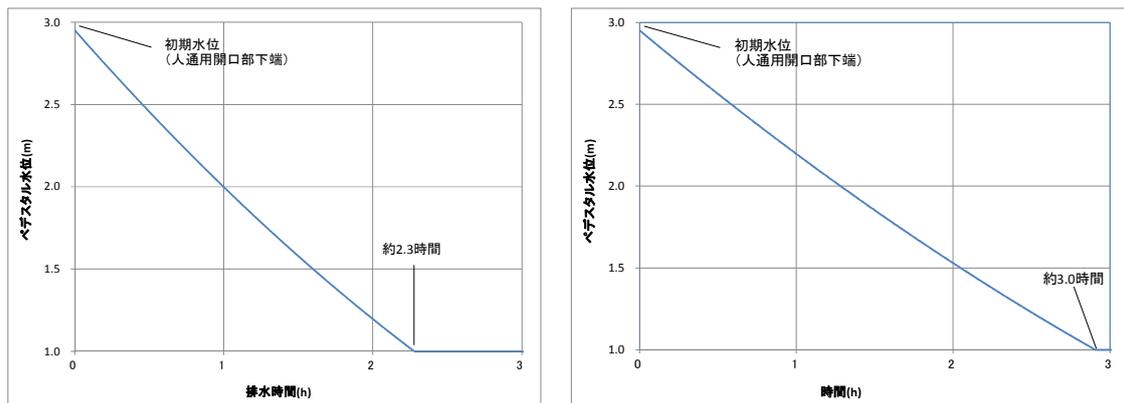
試験結果により排水時間が制限を超える結果となった場合、想定される要因が改善するように流路形状を見直す。

添付資料 1 モックアップ装置詳細図

## 9. 試験結果

試験結果の一例を図9-1に示す。図9-1は床ドレン排水系経路のみを考慮した場合であるが、RPVからペデスタルへの流入停止（事象発生後約0.3時間）からRPV破損（事象発生後約3時間）までの2.7時間以内に水位1mまで排水できないことを確認した。

このため、排水経路全体で支配的な圧損発生部位を特定し、特定部位を改善し、全体圧損を低減することとした。



(a) 机上検討時

(b) 試験結果を用いた評価

図9-1 実機排水時間評価結果

## 10. 試験結果を踏まえた改善

### 10.1 圧損低減

排水経路の圧損が支配的な部分を特定するため、スリットモックアップ試験設備の流動解析を実施した結果、導入管及び下流配管とスリットの接続部で局所的に高流速となる部分（図10-1）があり、抵抗が大きくなっていることを確認した。

このため、導入管とスリット接続部の形状をレデューサ形状（図10-2）とし、流速及び抵抗の低減を図ることとした。

改善前後のスリット入口部の流動解析結果を図10-1に示す。

接続部形状をレデューサ状に見直すことにより、局所的に高流速となる部分が減少し、抵抗が小さくなることを確認したため、本改善案を採用することとした。

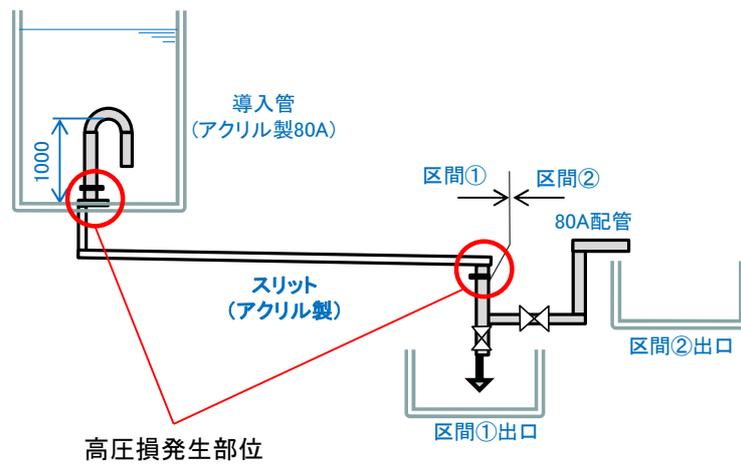


図 1 0 - 1 高圧損発生部位

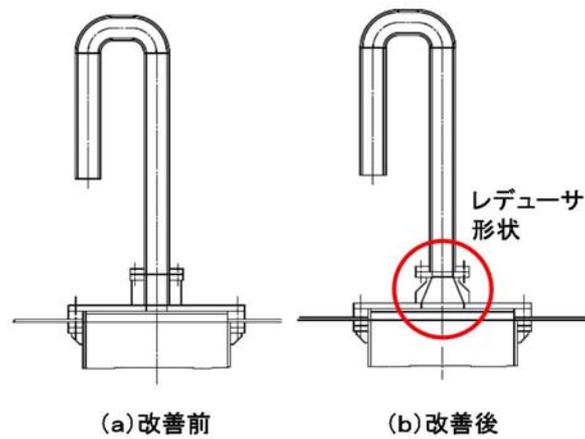


図 1 0 - 2 導入管-スリット接続部の改善

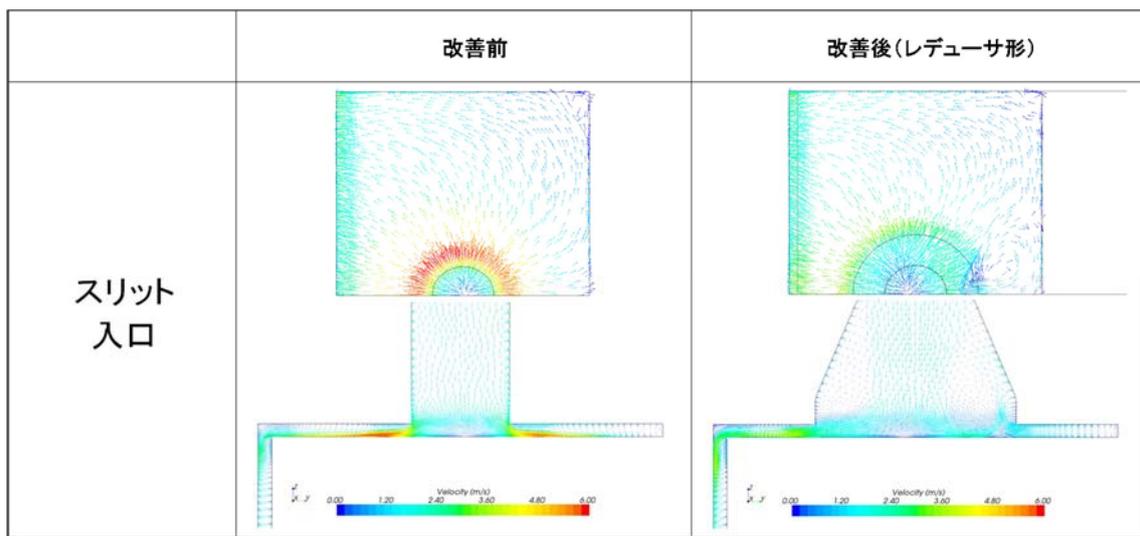


図 1 0 - 3 改善前後の流動解析結果

## 10.2 排水時間低減

排水時における上部タンク（床ドレン模擬）の水位と時間の関係を図10-4に示す。

水位が導入管頂部に達すると、図10-5に示すようにベント穴から大量の空気を吸込み、排出流量が低下する事象が確認された。

本事象を改善するため、ベント穴形状、位置を改善することとした。

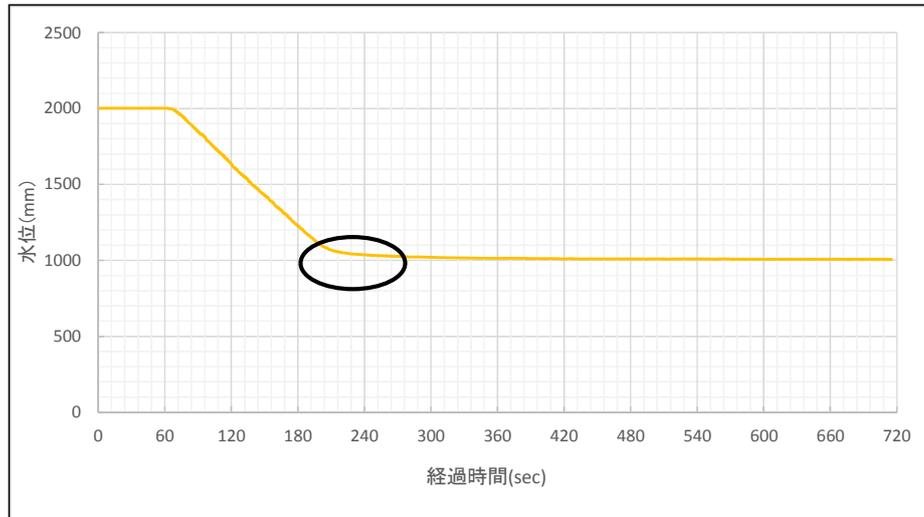


図10-4 試験結果（水位－時間の関係）

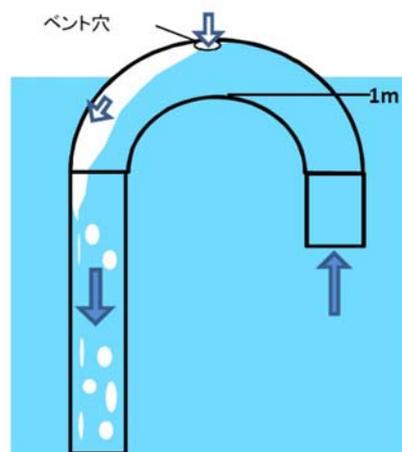


図10-5 水位がベント穴に達した時の状況（模式図）

水位が導入管頂部に達した際のベント穴から大量の空気を吸込むことを防止するため、図10-6に示すようにベント穴（エア抜き穴）径を縮小し、更に、サイフォンブレイク穴を左右2か所に設置することとした。

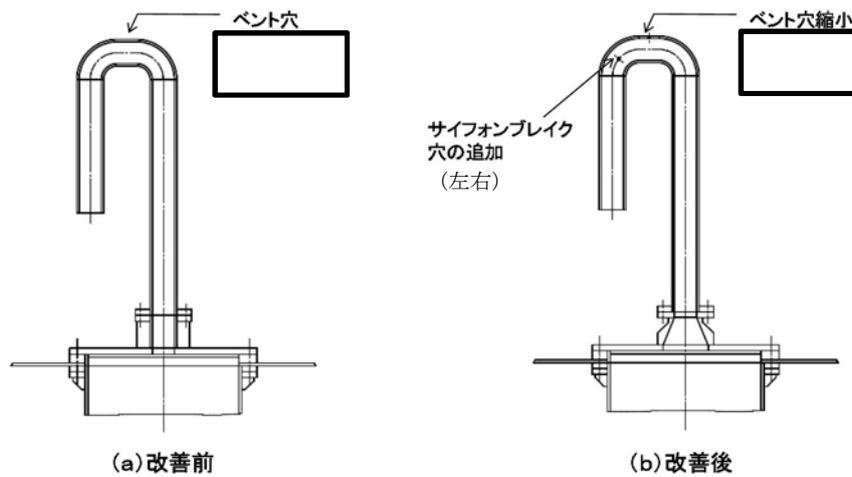


図 10-6 導入管（スワンネック）のベント穴の改善

### 10.3 改善後の試験結果

改善前後における排水試験時のタンク水位と時間変化の例を図 10-7 示す。

接続部形状の変更による水位低下速度の向上が確認された。また、導入管のベント穴縮小及びサイフォンブレイク穴の追加により、水位 1m まで低下速度が低下することなく、また水位 1m 到達時に速やかに排水が停止することを確認した。

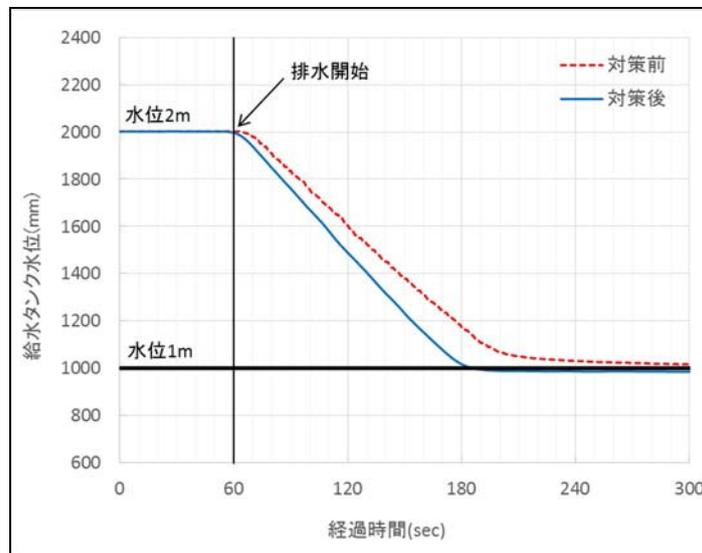


図 10-7 改善前後の試験結果（水位－時間の関係）（モックアップ部）

## 1 1. 実機評価

### 1 1. 1 実機評価の考え方

試験結果を踏まえた実機評価の考え方を以下に示す。

- ・ 排水ラインの圧損は、モックアップ試験結果及び机上評価により確認する。
- ・ 流路としての実績、圧損評価実績のないスリットは、導入管と共に実機寸法を模擬したモックアップ試験により圧損を確認する。（実際には、保守的に導入管～スリット（紫線）に加え試験装置のスリット出口配管～排出弁（水色線）までの圧損から評価。）
- ・ 評価実績のある通常の鋼管、弁で構成される下流配管については、実機配管ルート計画（安全弁設置ラインを含む。）をふまえた机上評価により確認する。
- ・ 経路全体の圧損を確認し、ペDESTALからの排水時間の評価に適用する。

実機評価に用いる圧損係数の考え方を表 1 1 - 1 に示す。

表 1 1 - 1 実機評価に用いる圧損係数

評価部位	圧損係数 (m/(m <sup>3</sup> /h))	圧損値 (m)
導入管入口～ スリット出口		
スリット出口～ ベント管排出口		
流路全体の値 ( ) 内は設置許可時の値		

注※：日本機械学会編 機械工学便覧

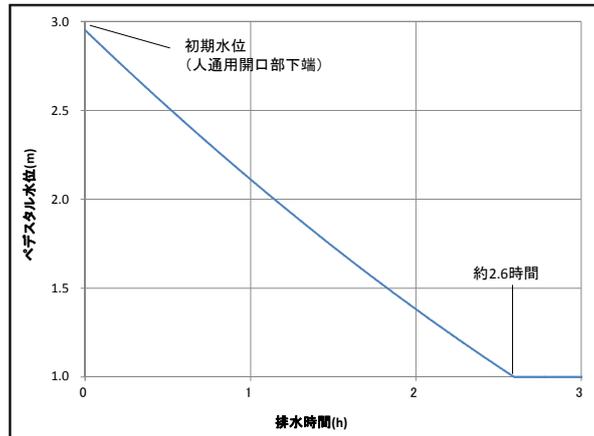
### 1 1. 2 実機排水評価

実施した試験結果を踏まえ、流路等の改善を反映した試験を実施し、試験結果を基にした実機体系における排水時間を評価した。

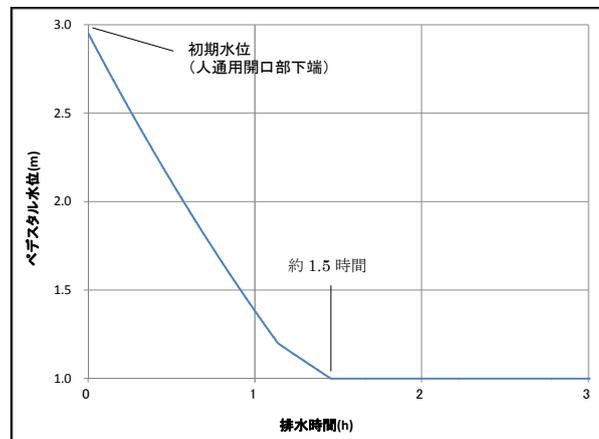
評価結果を図 1 1 - 3 に示すが、床ドレン流路からの排水により、ボトムドレン L O C A 時、R P V 破損までの間（約 2.7 時間）にペDESTAL 水位 1m までの排水が可能なことを確認した。

また、床ドレンに加え機器ドレンも考慮した場合、排水時間は約 1.5 時間となる。

排出時間の制限には、事象の保守的な組合せ及び水蒸気爆発の現象の不確かさを考慮した保守的な条件での評価を行って設定していることから 2.7 時間以内に排水出来れば余裕が含まれている。



(a) 床ドレン流路のみを考慮した場合



(b) 床ドレン及び機器ドレン流路を考慮した場合

図 1 1 - 3 実機排水時間評価

### 1 1 . 3 スラッジ模擬試験

6項で検討した想定する異物であるスラッジ模擬材 ( $\text{Fe}_3\text{O}_4$ ) を投入した試験を実施した。

投入するスラッジ模擬材は、全量がスリット部を通過するよう図 1 1 - 4 に示す位置に全量投入した。

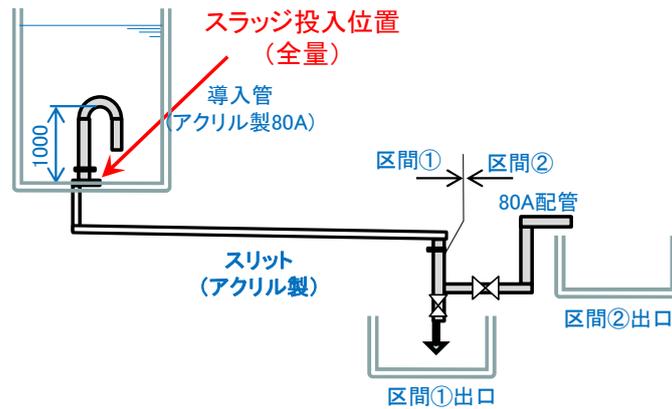
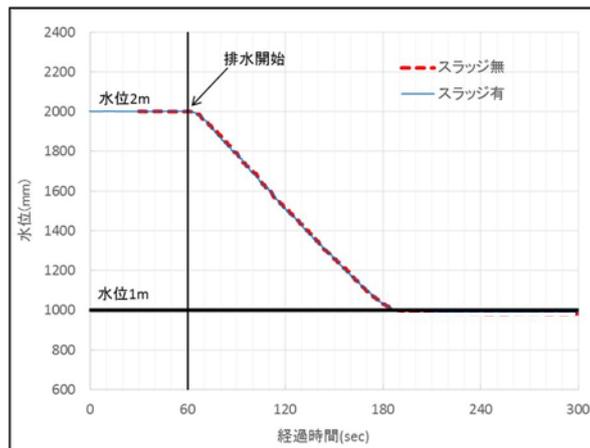


図 1 1 - 4 スラッジ模擬材投入位置

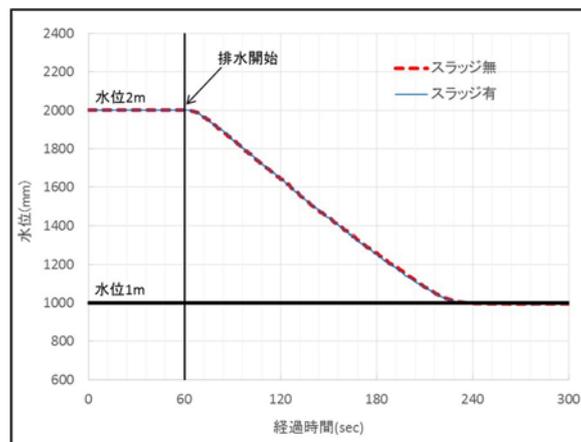
スラッジ模擬試験の結果を図 1 1 - 5 に示す。

区間①及び区間②から排出した場合共にスラッジ有無で排出時間の相違はなく，圧損への影響がないことを確認した。

スラッジ模擬試験におけるスラッジの流動状況を表 1 1 - 1 及び表 1 1 - 2 に示す。



(a) 区間①の試験結果



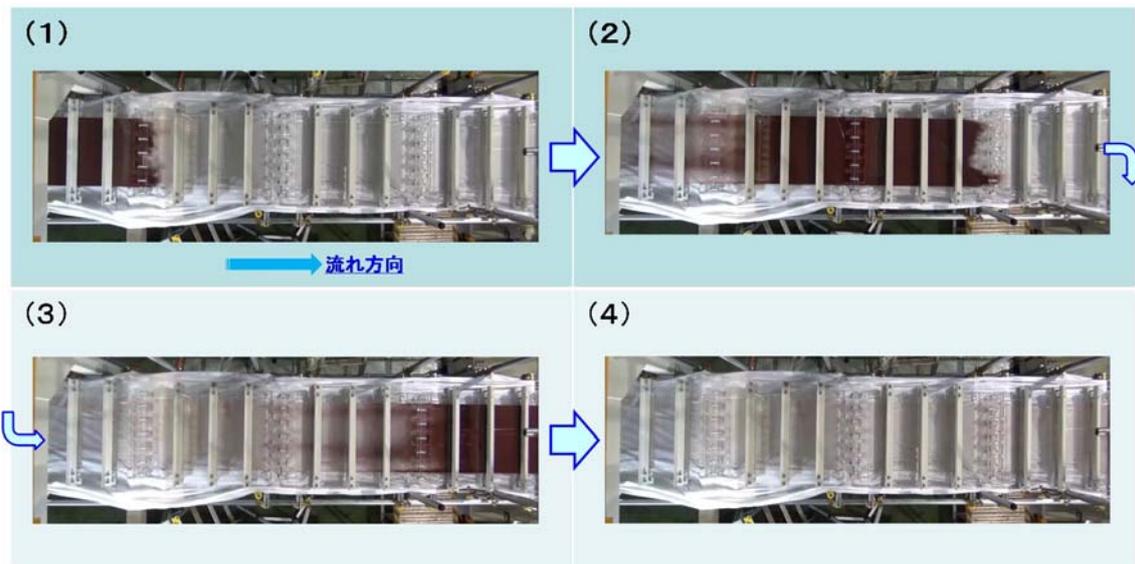
(b) 区間②から排出時の試験結果

図 1 1 - 5 スラッジ模擬試験結果

表 1 1 - 1 スラッジ模擬試験のスラッジ流動状況

	排水前	排水中	排水後
導入管部			
垂直スリット部			

表 1 1 - 2 スラッジ模擬試験のスラッジ流動状況 (水平スリットを真上から見た状態)



#### 1 1 . 4 導入管カバー影響試験

落下物に対する導入管保護，導入管への異物混入防止として設置する導入管カバーの圧損への影響を確認するため，導入管カバーを設置した試験を実施した。

試験用の導入管カバーは，流動状況を確認可能なようにスリットと同じアクリル製（図 1 1 - 6 参照）とし，図 1 1 - 7 に示す位置に設置した。



図 1 1 - 6 試験用導入管カバー

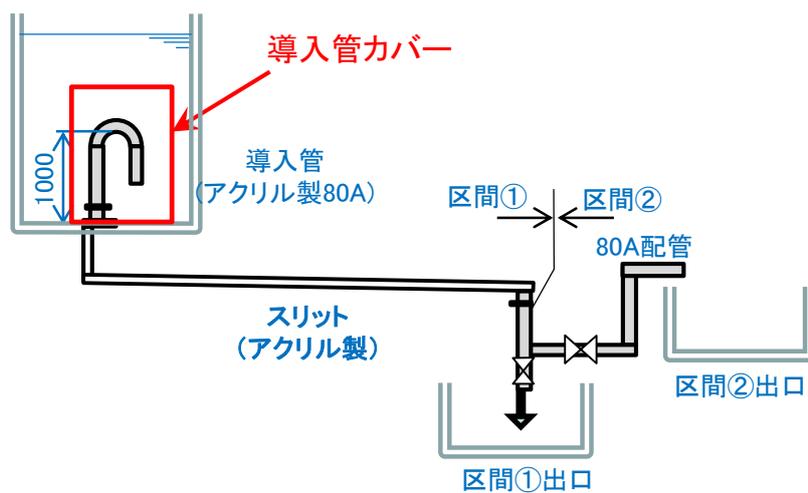


図 1 1 - 7 導入管カバー設置入位置

導入管カバーを設置した場合及び設置しない場合の試験結果を図11-8に示す。

図11-8に示すように導入管カバーの有無で排出時間の相違はなく、圧損への影響がないことを確認した。

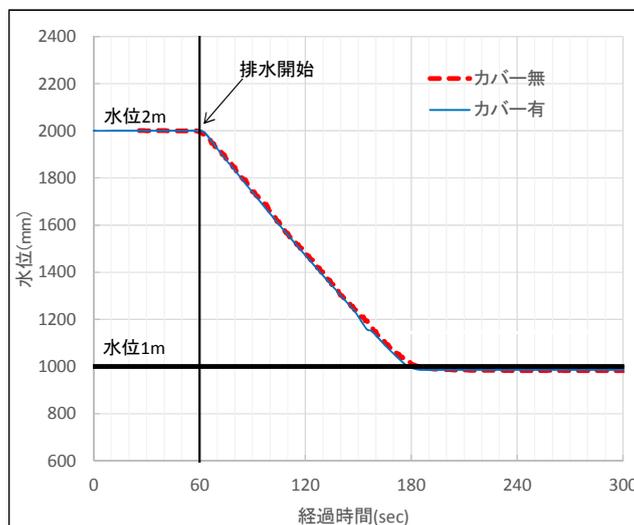


図11-8 導入管カバー試験の結果

## 12. まとめ

採用実績、圧損評価実績のないスリット部の流動状況、圧損係数を把握し、実機排水評価のため、スリットモックアップ試験を実施した。

試験の結果、ボトムドレンLOCA時において、ペDESTAL内が満水（人通口開口部下端まで）になった際、RPV破損までの間（約2.7時間）に床ドレン流路からの排水によりペDESTAL水位1mまでの排水が可能であることを確認した。

事故が発生し炉心が損傷した場合、格納容器下部注水配管から水位1mを超過する（1.05m）まで注水を実施し、その後排水することにより、RPV破損時に確実に水位1mを確保する運用としている。その際に5cm分の排水に要する時間を約5分としていたが、試験結果を踏まえ約6分と設定した。当運用に要する時間は約30分（注水開始操作に要する時間約17分、水位10cm分の注水に要する時間約3分、注水停止作業に要する時間約3分、注水停止操作に要する時間約4分及び5cm分の排水に要する時間約6分）と想定され、炉心損傷後のペDESTAL注水開始からRPV破損までの約1.8時間（事象進展の早い大破断LOCA時の例）の間に余裕をもって実施可能であることを確認した。

また、スラッジ及び導入管カバーによる圧損への影響を確認する試験を実施し、スラッジ及び導入管カバーは圧損への影響が無いことを確認した。

以上