

東海第二発電所

重大事故等対策の有効性評価 審査会合における指摘事項の回答

平成30年5月23日
日本原子力発電株式会社

1. 審査会合(2018年5月15日)での指摘事項及び回答事項
2. RPV破損時のデブリ流出状況の推測
3. デブリ堆積高さの評価条件及び評価結果
4. デブリがコリウムシールド高さを超えた場合の影響
5. まとめ

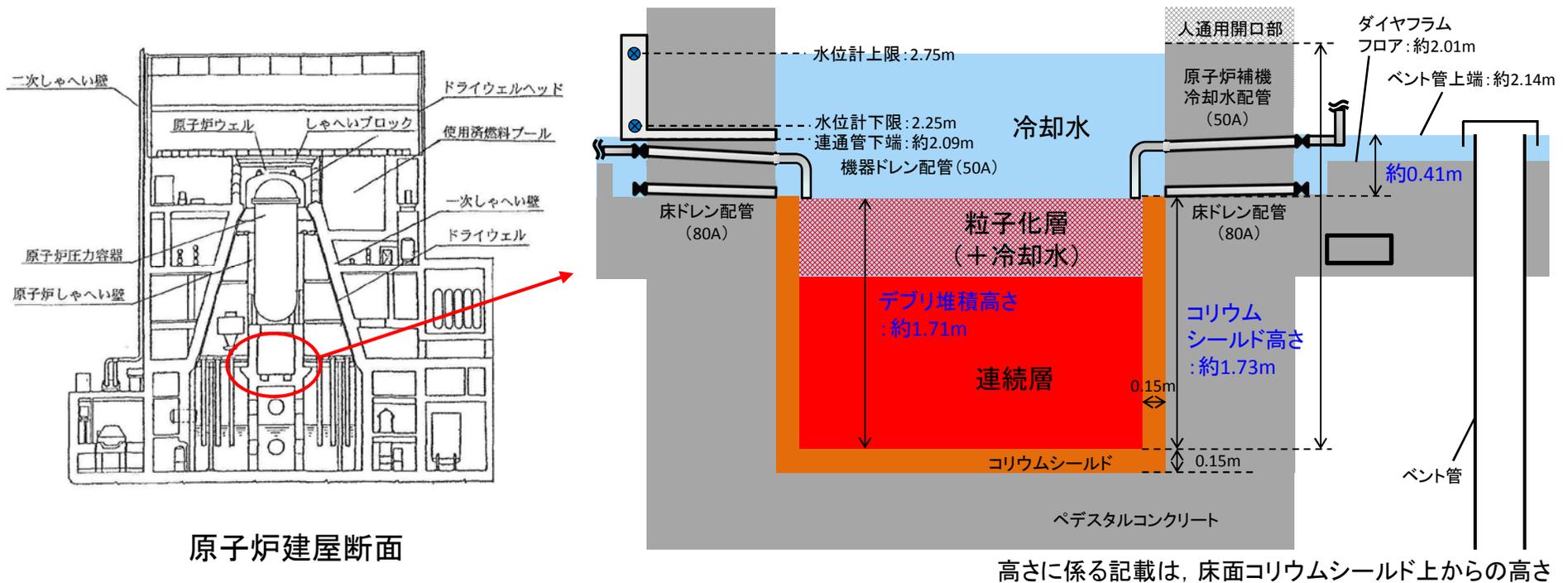
1. 審査会合(2018年5月15日)での指摘事項及び回答事項

● 審査会合(2018年5月15日)での指摘事項

- ・デブリ堆積高さの最確条件ケースと感度ケースについて、各ケースの条件を含め整理すること。

● 回答事項

- ・原子炉圧力容器(以下「RPV」という。)破損時のデブリ流出状況の推測を踏まえ、デブリ堆積高さの最確条件を設定し、感度ケース等を含め、各パラメータの条件設定の考え方及び各ケースの評価結果について整理しました。
- ・コリウムシールド高さを超えるような極端なデブリ堆積高さを想定した場合も想定し、この場合の影響について整理しました。

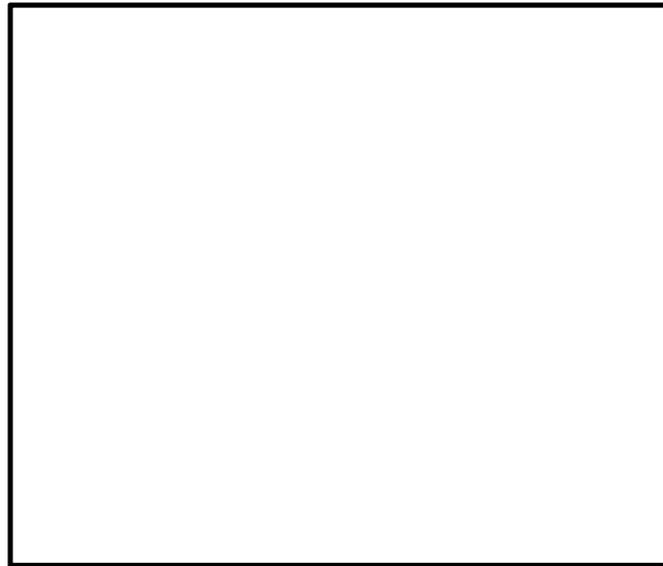


2. RPV破損時のデブリ流出状況の推測(1/2)

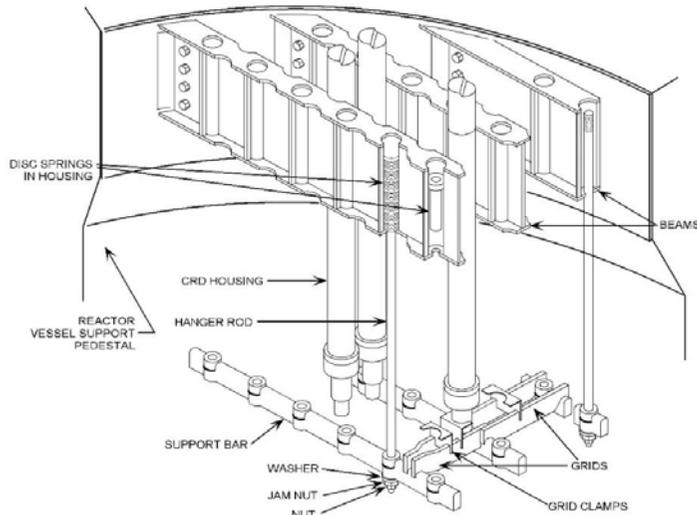
RPV下部の構造等を踏まえ、表のとおり整理

	推測	理由
デブリ流出箇所	<ul style="list-style-type: none"> ➤ CRDや核計装管の溶接部 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 複数個所の可能性あり 	<ul style="list-style-type: none"> • RPV下鏡部(板厚:15cm程度)等よりも, CRDや核計装管の溶接部(厚さ:1.2cm以下)の方が先に溶融及び貫通し, 隙間が生じると考えられる • この場合, CRDハウジング, CRDについては, CRDハウジングサポートにより逸出しない <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • CRDや核計装管の溶接部は複数有るため, 溶融炉心が溜まった下部プレナムの状況によっては, 複数個所からデブリが流出する可能性はあると考えられる
デブリとなる構造物	<ul style="list-style-type: none"> ●RPV内 ➤ 炉心位置に存在する構造物 <ul style="list-style-type: none"> • 燃料集合体, 下部炉心支持板, 制御棒案内管 等 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> ➤ 下部プレナムに存在する構造物 <ul style="list-style-type: none"> • RPV下鏡部, CRDハウジング, 核計装管の一部 <hr/> <ul style="list-style-type: none"> ●RPV外 ➤ RPV外側の構造物 <ul style="list-style-type: none"> • CRDハウジング, CRDハウジングサポート, 核計装管の一部 ➤ RPVからのデブリ流出箇所の直下に存在するペDESTAL(ドライウェル)内構造物 <ul style="list-style-type: none"> • ケーブル, サポート, 配管, 新設設備等(デブリ流出箇所によって, デブリとなる構造物が決まる) 	<ul style="list-style-type: none"> • 炉心位置に存在する構造物は, 炉心損傷及び溶融に伴い溶融すると考えられる <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • CRDや核計装管の溶接部の溶融及び貫通までに, RPV内のRPV下鏡部, CRDハウジング, 核計装管等はある程度溶融すると考えられる • ただし, 溶融炉心が下部プレナムに移行後も, 一時的にCRDハウジング内に存在する冷却水の冷却効果により, CRDハウジング及びCRD全てが溶融する可能性は低いと考えられる <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • RPVからのデブリ流出時, デブリはCRDハウジング, CRDハウジングサポート, 核計装管により冷却されること, デブリはこれらの構造物と一時的に接触後にペDESTAL(ドライウェル)床面に落下することから, これらの構造物が全て溶融する可能性は低いと考えられる <hr/> <ul style="list-style-type: none"> • デブリはRPV下部の構造物と一時的に接触後にペDESTAL(ドライウェル)床面に落下することから, デブリ流出箇所の直下に存在するペDESTAL(ドライウェル)内構造物は一部溶融するものの, 全て溶融する可能性は低いと考えられる

2. RPV破損時のデブリ流出状況の推測(2/2)

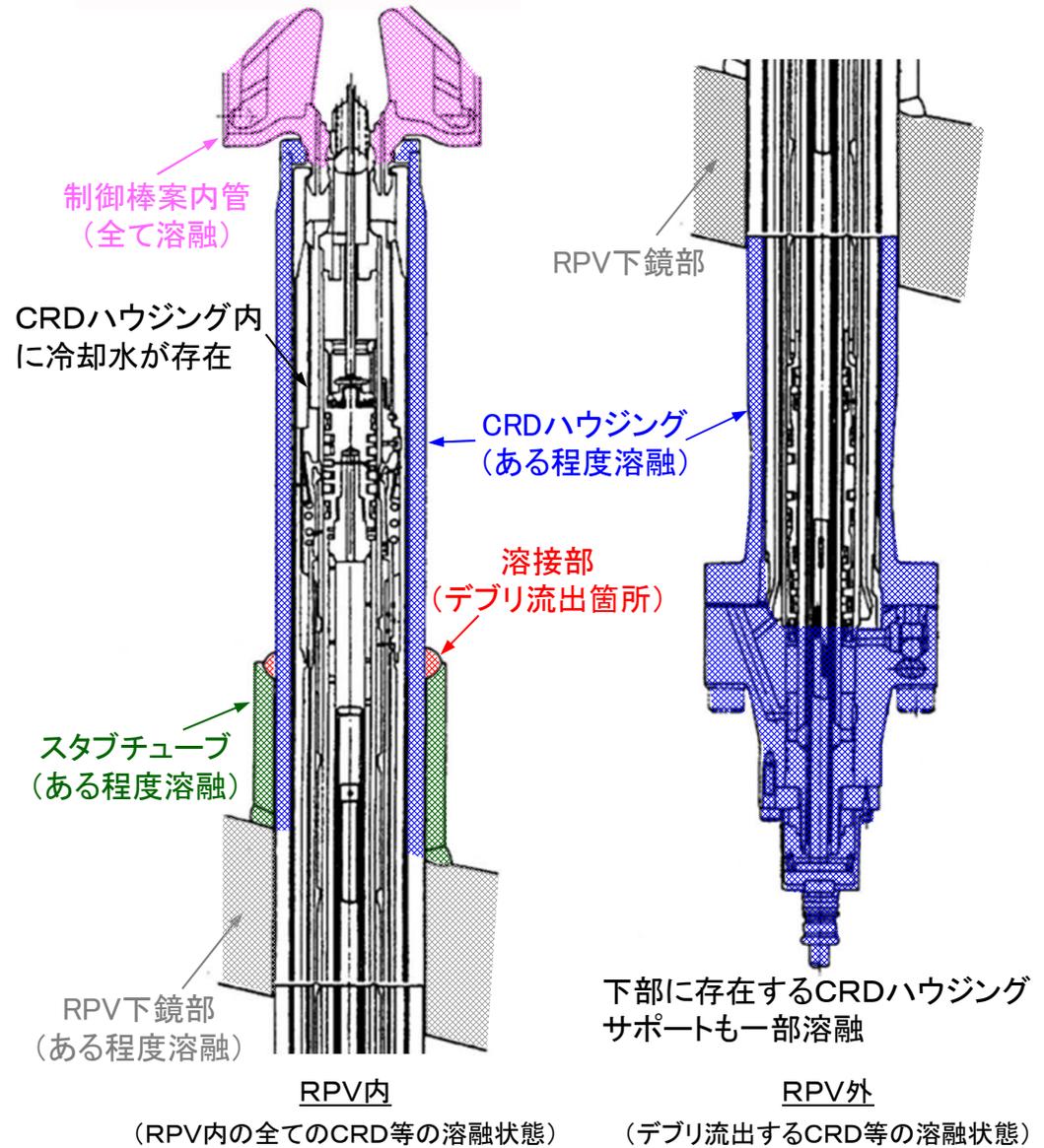


<原子炉圧力容器下部構造図>



<CRDハウジングサポート構造俯瞰図>

出典: General Electric Systems Technology Manual Chapter
2.1 Reactor Vessel System, USNRC HRTD, Rev 09/11



<CRD等概要図>

3. デブリ堆積高さの評価条件及び評価結果(1/5)

(1)デブリ堆積高さの評価ケースについて

本資料にて説明するデブリ堆積高さの評価ケースは以下のとおり

- I **最確条件**:「2. RPV破損時のデブリ流出状況の推測」を踏まえ、現実的なデブリ堆積高さを想定した場合
- II **ベースケース**: I に対して、不確かさが大きいと考えられるペDESTAL(ドライウェル部)内構造物の体積を保守的に設定した場合
- III **感度条件①, ②, ③**:デブリ堆積高さの評価条件(①デブリ体積, ②デブリの粒子化割合, ③粒子化層のポロシティ)を、II に対してそれぞれ保守的に設定した場合
- IV **コリウムシールド高さ, 厚さ設定条件**:コリウムシールドの高さ, 厚さを設定するため、II に対して感度条件①及び③の重ね合わせを考慮した場合
- V **感度条件①+②+③**:デブリ堆積高さがコリウムシールドを超えた場合の影響評価のため、II に対して感度条件①, ②及び③の重ね合わせを考慮した場合

(I ~ V では、これまでの実験の知見より、デブリは均一化されていることを前提)
- VI **感度条件①+②+③(中心位置で円錐状に堆積)**:デブリ堆積高さを極端に高くする想定として、V のケースにおいて、ペDESTAL(ドライウェル部)の中心位置で円錐状にデブリが堆積することを想定した場合
- VII **感度条件①+②+③(偏心位置で円錐状に堆積)**:デブリ堆積高さを更に極端に高くする想定として、VI のケースにおいて、ペDESTAL(ドライウェル部)の中心軸から偏心した位置に落下・堆積することを想定した場合

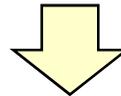
⇒コリウムシールドの設計においては、IV のケースにて条件設定することで十分保守性が確保されていると考えるが、デブリ堆積高さが極端に高くなる V, VI, VII のケースも想定し、デブリがコリウムシールド高さを超えた場合の影響を評価

3. デブリ堆積高さの評価条件及び評価結果(2/5)

(2)「I 最確条件」と「II ベースケース」の考え方

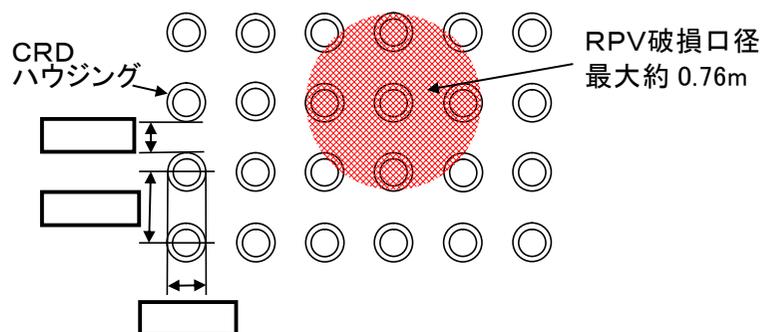
「2. RPV破損時のデブリ流出状況の推測」を踏まえ、デブリとなる構造物を以下のとおり推測。②～④は、複数流出により増加

- ①炉心位置に存在する構造物全て
- ②RPV下鏡部, CRDハウジング, 核計装管の一部(RPV内外ともに)
- ③CRDハウジングサポートの一部
- ④ケーブル, サポート, 配管, 新設設備等のペDESTAL(ドライウエル部)内構造物のうち, デブリ流出箇所の直下に存在する構造物



以上を踏まえ、「I 最確条件」及び「II ベースケース」のデブリ体積の考え方は、表のとおり設定

対象	I 最確条件	II ベースケース
炉心位置に存在する構造物	全て考慮	同左
RPV下鏡部, CRDハウジング, CRD, 核計装管, CRDハウジングサポート	MAAP解析でのアブレーションによる最大口径:0.76mの範囲(CRD6本※)を考慮して設定 ※:一部溶融のCRD4本を計1本としてカウント	MAAP解析でのアブレーションによる最大口径:0.76mを包絡する範囲(CRD9本分)を保守的に考慮
ケーブル, サポート, 配管, 新設設備等のペDESTAL(ドライウエル部)内構造物	ターンテーブルより下部の構造物が溶融するものとして設定(ターンテーブルより上部の構造物は, 位置的に溶融炉心に巻き込まれる可能性が低いため, 考慮せず)	RPVより下部に存在するペDESTAL(ドライウエル部)内の構造物全てを保守的に考慮



ターンテーブル
(人通用開口部)
の下端高さ
付近に設置



3. デブリ堆積高さの評価条件及び評価結果(3/5)

(1) 「Ⅰ 最確条件」と「Ⅱ ベースケース」の考え方(続き)

●デブリ体積:

最確条件:RPVから落下する溶融炉心 36m^3 (MAAP解析結果)+ペDESTAL内構造物

ベースケース: RPVから落下する溶融炉心 36m^3 (MAAP解析結果)+ペDESTAL内構造物 3m^3

構造物	Ⅰ 最確条件		Ⅱ ベースケース	
	体積 $[\text{m}^3]$	考え方	体積 $[\text{m}^3]$	考え方
制御棒駆動機構(以下「CRD」)ハウジング		MAAP解析でのアブレーションによる最大口径の範囲(CRD6本分)		MAAP解析でのアブレーションによる最大口径を包絡する範囲(CRD9本分) (添付1)
CRD				
核計装管				
CRDハウジングサポート		溶融炉心の落下部のみが溶融しデブリに加わると想定し、アブレーションによる最大口径の範囲		アブレーションによる最大口径を包絡する条件として、一辺1mの正方形の範囲
ターンテーブル				
その他(ケーブル, サポート, 配管等の構造物)		ターンテーブルより下部の構造物		RPVより下部に存在するペDESTAL(ドライウェル部)内の構造物全てを保守的に考慮
格納容器下部水位等の新設設備		新設設備(計器, スワンネック, サポート等)を考慮		新設設備(計器, スワンネック, サポート等)を考慮
合計		—		総量に保守性を見込み, 3m^3 を設定

●粒子化層の堆積高さ

各種の実験に基づいた値を設定しており, 最確条件とベースケースで同じ値を設定

➤ デブリの粒子化割合:17.3%(MAAP推奨範囲の最確値のエントレインメント係数 を基に算出。添付2)

➤ 粒子化層のポロシティ:0.35(各実験でのポロシティの平均的な値として設定。添付3)

3. デブリ堆積高さの評価条件及び評価結果(4/5)

(2)「Ⅲ感度条件①, ②, ③」の考え方

ベースケースのうち、不確かさの存在する以下の条件を対象に感度条件を設定

●デブリ体積

- ・ペDESTAL内構造物については、デブリ体積の更なる保守性の確保のため4m³と設定【感度条件①】

●粒子化層の堆積高さ

➤ デブリの粒子化割合:22.7%(添付2)

- ・MAAP推奨範囲の最大値のエントレインメント係数 による粒子化割合を、感度条件と設定【感度条件②】

➤ 粒子化層のポロシティ:0.50(添付3)

- ・単純立方格子のポロシティ(0.48)及び各実験のポロシティを包絡する、0.50を感度条件と設定【感度条件③】

(3)「Ⅳコリウムシールド高さ, 厚さ設定条件」の考え方

以下のとおり、デブリ堆積高さの想定に十分な保守性を確保

- ・「デブリ体積」及び「粒子化層の堆積高さ」それぞれに感度条件を設定した場合のデブリ堆積高さを考慮
- ・デブリ体積については、感度条件①(デブリ体積:4m³)を設定
- ・「粒子化層の堆積高さ」については、感度条件②(粒子化割合:22.7%)よりも感度の大きい感度条件③(ポロシティ:0.50)を設定

コリウムシールドは、MCCIの影響抑制の目的で設置するものであり、連続層を保持することで目的は達成可能と考えるが、上記の条件でデブリを保持可能とする

その上で、デブリ堆積高さがコリウムシールドを超えない範囲でコリウムシールドを厚くし、コンクリートへの熱負荷を軽減する設計方針

3. デブリ堆積高さの評価条件及び評価結果(5/5)

(4) II～IVのケースの評価条件及び評価結果

ケース	デブリ体積	粒子化層の堆積高さ		条件設定の考え方	堆積高さ	評価
		粒子化割合 (エントレインメント 係数)	ポロシティ			
ベースケース	炉内: 36m ³ 炉外: 3m ³	17.3% □	0.35	ノミナル条件	約1.57m 連続層: 約1.22m 粒子化層: 約0.36m	堆積高さは、コリウムシールド範囲内 (コリウムシールド頂部より0.16m下)
感度条件① (デブリ 体積関連)	炉内: 36m ³ 炉外: 4m ³	17.3% □	0.35	デブリ体積の保守性の確保の ため、炉外構造物量を追加	約1.61m 連続層: 約1.25m 粒子化層: 約0.36m	堆積高さは、コリウムシールド範囲内 (コリウムシールド頂部より0.12m下)
感度条件② (粒子化層の 堆積高さ関連)	炉内: 36m ³ 炉外: 3m ³	22.7% □	0.35	エントレインメント係数をMAAP 推奨範囲の最大値に変更	約1.61m 連続層: 約1.14m 粒子化層: 約0.47m	
感度条件③ (粒子化層の 堆積高さ関連)	炉内: 36m ³ 炉外: 3m ³	17.3% □	0.50	単純立方格子等を包絡するポ ロシティとして設定	約1.68m 連続層: 約1.22m 粒子化層: 約0.46m	堆積高さは、コリウムシールド範囲内 (コリウムシールド頂部より0.05m下)
コリウムシールド 高さ、厚さ 設定条件 (①+③)	炉内: 36m ³ 炉外: 4m ³	17.3% □	0.50	「デブリ体積」及び「粒子化層 の堆積高さ」それぞれに感度 条件を設定 「粒子化層の堆積高さ」につい ては、ポロシティ: 0.50を設定	約1.71m 連続層: 約1.25m 粒子化層: 約0.46m	堆積高さは、コリウムシールド範囲内 (コリウムシールド頂部より0.02m下)

赤字: 感度条件

青字: コリウムシールド頂部までの余裕

4. デブリがコリウムシールド高さを超えた場合の影響(1/5)

(1)デブリ体積高さを極端に高くする想定(V, VI, VIIのケース)

●感度条件①, ②及び③の重ね合わせを考慮

- ▶デブリ体積:RPVから落下する溶融炉心 36m^3 (MAAP解析結果)+ペDESTAL内構造物 4m^3 【感度条件①】
- ▶デブリの粒子化割合:22.7%【感度条件②】+粒子化層のポロシティ:0.50【感度条件③】

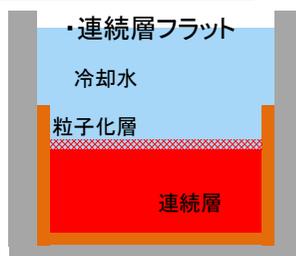
●円錐状の堆積や偏心位置での堆積の想定

▶実現象

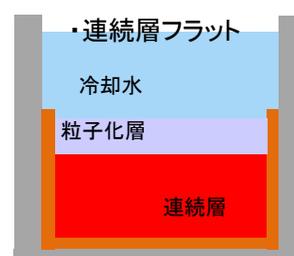
- ・PULiMSは溶融物の拡がりを確認したものであり、実機より厳しい条件※でもアスペクト比が1:16程度(添付4)
- ・粒子化層はより均一に拡がりやすく、実機で最も考え得る状態は、アスペクト比1:16より緩やかな凹凸のある連続層(溶融物)に粒子化層が被さった状態と考えられる
- ・福島第一原子力発電所2号炉の状況を考慮すると、中心軸から偏心した位置で堆積する可能性も考えられる

※ 実機条件に比べて、PULiMS実験条件は溶融物過熱度及び比熱が低く、PULiMS実験条件の方がデブリが固化しやすいこと、PULiMS実験では崩壊熱を模擬していないこと等

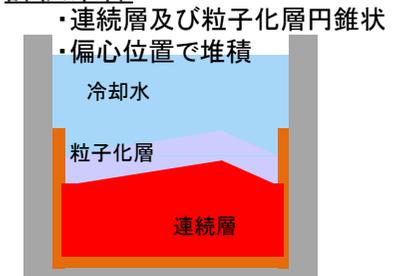
粒子化層が薄い場合



粒子化層が厚い場合



評価条件



▶評価条件

- ・デブリ全体に対して、保守的にPULiMSのアスペクト比1:16を設定
- ・円錐状に加え、RPV内の最外周のCRD(コリウムシールド壁面から約0.6m内側)からデブリが落下し、その直下を頂点として偏心位置で堆積する可能性も考慮(RPV下部ヘッドの曲率を考慮すると、偏心位置でのデブリ落下量は減少するが、保守的に偏心位置から全量落下するものとして堆積高さを評価)

4. デブリがコリウムシールド高さを超えた場合の影響(2/5)

(2) V, VI及びVIIのケースの評価条件及び評価結果

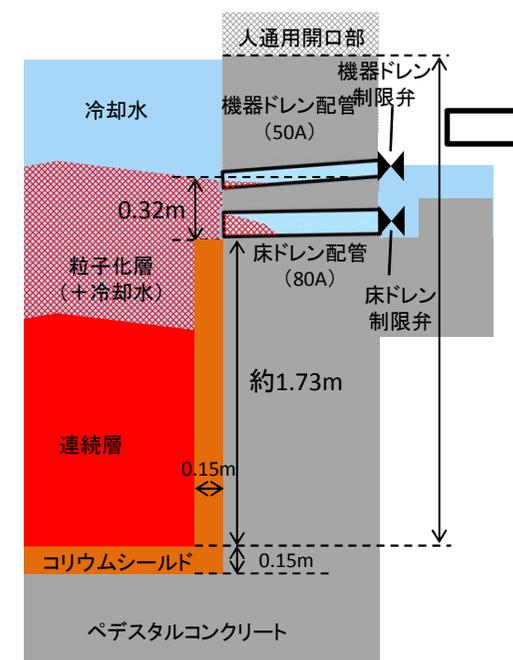
ケース及び条件	均一化して堆積	中心位置で円錐状に堆積 円錐部分のアスペクト比1:16	偏心位置で円錐状に堆積(添付5) コリウムシールド壁面から60cm内側に偏心
ベースケース ・溶融物量 炉内: 36m ³ 炉外: 3m ³ ・粒子化割合: 17.3% ・ポロシティ: 0.35	● 堆積高さ: 約1.57m 連続層: 約1.21m 粒子化層: 約0.35m ・コリウムシールド頂部より約0.16m下 ・ベント管上端に対して約0.57m下	● デブリ堆積高さ(壁面): 約1.45m ・コリウムシールド頂部より 約0.28m下 ● デブリ堆積高さ(頂点): 約1.81m ・ベント管上端に対して約0.33m下	● デブリ堆積高さ(壁面): 約1.87m ・コリウムシールド頂部より 約0.14m上 ● デブリ堆積高さ(頂点): 約1.95m ・ベント管上端に対して約0.19m下
コリウムシールド高さ、 厚さ設定条件 ・溶融物量 炉内: 36m ³ 炉外: 4m ³ ・粒子化割合: 17.3% ・ポロシティ: 0.5	● 堆積高さ: 約1.71m 連続層: 約1.25m 粒子化層: 約0.46m ・コリウムシールド頂部より約0.02m下 ・ベント管上端に対して約0.43m下	● デブリ堆積高さ(壁面): 約1.59m ・コリウムシールド頂部より 約0.14m下 ● デブリ堆積高さ(頂点): 約1.96m ・ベント管上端に対して約0.18m下	● デブリ堆積高さ(壁面): 約1.98m ・コリウムシールド頂部より 約0.25m上 ● デブリ堆積高さ(頂点): 約2.05m ・ベント管上端に対して約0.09m下
感度条件 ①+②+③ ・溶融物量 炉内: 36m ³ 炉外: 4m ³ ・粒子化割合: 22.7% ・ポロシティ: 0.5	「V感度条件①+②+③」 ● 堆積高さ: 約1.78m 連続層: 約1.18m 粒子化層: 約0.60m ・コリウムシールド頂部より約0.05m上 ・ベント管上端に対して約0.36m下	「VI感度条件①+②+③(円錐状)」 ● デブリ堆積高さ(壁面): 約1.66m ・コリウムシールド頂部より 約0.07m下 ● デブリ堆積高さ(頂点): 約2.03m ・ベント管上端に対して約0.11m下	「VII感度条件①+②+③(偏心)」 ● デブリ堆積高さ(壁面): 約2.05m ・コリウムシールド頂部より 約0.32m上 ● デブリ堆積高さ(頂点): 約2.12m ・ベント管上端に対して約0.02m下

⇒次頁以降では、壁面において、デブリがコリウムシールド高さを超えて堆積した場合(赤字)の影響を評価

4. デブリがコリウムシールド高さを超えた場合の影響(3/5)

(3)コリウムシールドを超えたデブリによる影響評価

- デブリの円錐状及び偏心位置での堆積を考慮すると、コリウムシールド高さ(約1.73m)を粒子化層が最大0.32m超過。この粒子化層によるペDESTAL側壁コンクリートの侵食量を評価(p.12)
- 床ドレン配管は、以下のとおり、現実的には粒子状デブリの流入は少なく、また、粒子化デブリによる侵食はほとんど生じないと考えられるが、床ドレン制限弁が損傷した場合も想定し、その場合の影響を評価(p.13)
 - ・床ドレン配管は、ほぼ水平(約1度の傾斜)であり、デブリ侵入前に配管内には冷却水が流入
 - ・配管内の粒子状デブリは、連続層から発生した蒸気の影響を受けず、セルフレベルリング等の駆動力は小さいため、配管内への流入は少ないと考えられる
 - ・粒子状デブリは水により急速に冷却されるため、配管内に流入するまでに配管の融点を十分下回ると考えられる
- 機器ドレン配管は、イメージ図のとおり、配管下端が粒子化層の堆積範囲に入る可能性があるが、以下を考慮すると、配管の一部は侵食する可能性はあるものの、機器ドレン制限弁はデブリの影響を受けないと考えられる
 - ・機器ドレン配管の傾き(ペDESTALの内外で約4.5cmの高低差)及び粒子状デブリの駆動力が小さいことを考慮すると、粒子状デブリが堆積する範囲は機器ドレン配管内の限定した範囲となる(機器ドレン制限弁まで到達しない)



コリウムシールド高さを粒子化層が超えた場合のデブリ堆積イメージ

4. デブリがコリウムシールド高さを超えた場合の影響(4/5)

(3)コリウムシールドを超えたデブリによる影響評価(続き)(添付6)

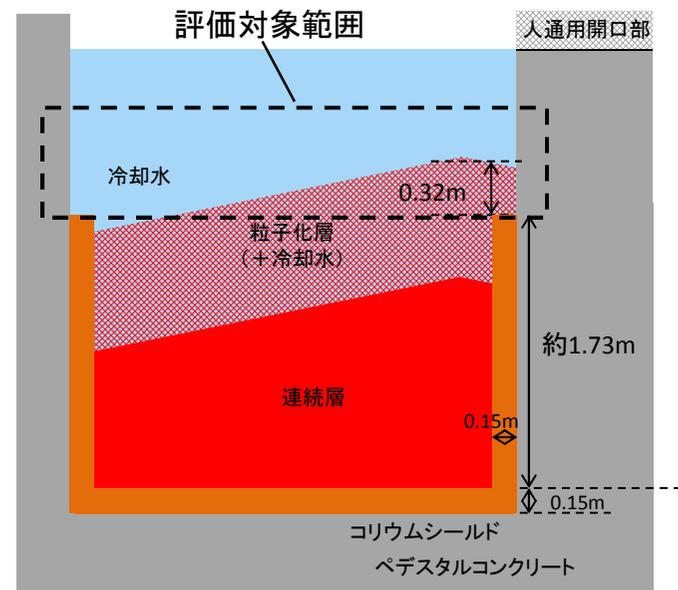
ペDESTAL側壁コンクリートの侵食量評価の主な条件

- ・崩壊熱: 事象進展の早い大破断LOCAにおけるRPV破損時の崩壊熱。また、コリウムシールド高さ超過分の粒子状デブリの崩壊熱を考慮
- ・粒子状デブリ量: コリウムシールドを超えた部分に相当する体積のデブリ量を想定
- ・粒子状デブリ初期温度: ベースケースは固相線温度(約 °C), 保守的ケースは連続層を含むデブリ平均温度(°C)
- ・冷却水への熱流束: コリウムシールド高さを超えるデブリ量を多くする観点からポロシティ:0.5を設定し、この場合の熱流束 $2.8\text{MW}/\text{m}^2$ を設定(Lipinski-0Dモデルにより設定)

評価結果

- ・側壁コンクリートの侵食量は、ベースケースで約0mm及び保守的ケースで約5mm
- ・ただし、粒子化デブリは水により急速に冷却されるため、ペDESTAL側壁のコンクリートに接触した場合の粒子化デブリの温度はベースケースの固相線温度より低く、実際は侵食は生じないと考えられる

	側壁コンクリート侵食量 (側壁コンクリート厚さ: 約 <input type="text"/> m)
ベースケース	約0mm
保守的ケース	約5mm



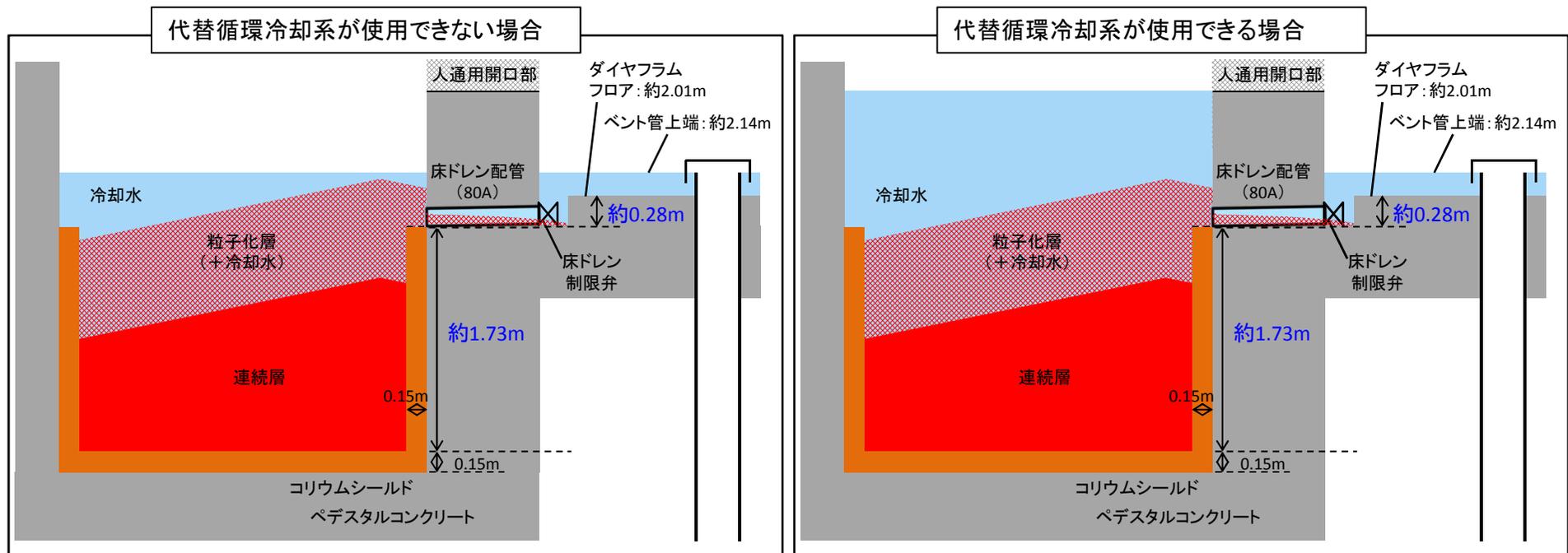
デブリ影響評価条件での
デブリ堆積イメージ

4. デブリがコリウムシールド高さを超えた場合の影響(5/5)

(3)コリウムシールドを超えたデブリによる影響評価(続き)

▶ 床ドレン制限弁の損傷を仮想した場合の影響評価

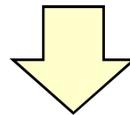
- ・流入した粒子状デブリが床ドレン配管の奥まで流入し、制限弁を損傷させることを更に仮想した場合にも、粒子化層の堆積高さはダイヤフラムフロアの床ドレンが集積する溝の高さの範囲内にとどまると考えられる
- ・ダイヤフラムフロア上には、ベント管上端高さまでスプレイ水等が存在し(コリウムシールド上端から約0.41m)、流出した粒子状デブリの冷却は維持される
- ・床ドレン制限弁は180° 方向に2弁設置される。制限弁が損傷した場合には、ベント管上端高さまで水位が下がる可能性があるが、デブリの冠水及び冷却は維持される。また、代替循環冷却系が使用できる場合には、制限弁2弁がともに損傷した場合でも、ペDESTAL内には供給される冷却水により、ペDESTAL内の水位は人通用開口部に維持され、一部の冷却水は人通用開口部よりドライウェル側に流出する(添付7)



床ドレン制限弁損傷時のイメージ

5. まとめ

- ・東海第二発電所では、最悪条件に十分な保守性を考慮したデブリ堆積高さをコリウムシールドの高さ、厚さの設計条件として設定
- ・さらに、デブリ堆積高さを極端に高くする想定として円錐状の堆積及び偏心位置での堆積等を考慮し、デブリ堆積高さがコリウムシールドを超える場合の影響を評価した結果、コリウムシールドを超えたデブリによる影響が小さいことを確認
- ・コリウムシールドを超えたデブリによる床ドレン制限弁の損傷を仮想した場合にも、デブリの冷却及び冠水は維持されることを確認



以上より、東海第二発電所のコリウムシールドの高さ、厚さの設定は妥当性であり、デブリ堆積高さがコリウムシールドを超える極端な場合を想定しても、デブリの冷却及び冠水の維持等に影響はないことを確認した