

島根原子力発電所第2号機 審査資料	
資料番号	NS2-添 1-066 改 04
提出年月日	2022年7月20日

VI-1-8-1-別添2 コリウムシールドの設計

2022年7月

中国電力株式会社

本資料のうち、枠囲みの内容は機密に係る事項のため公開できません。

目 次

1. コリウムシールドの概要及び設置目的	1
2. コリウムシールド材料の選定	4
3. コリウムシールド構造	6
3.1 コリウムシールド設計条件	6
3.2 コリウムシールド基本構造	7
3.3 コリウムシールド各部寸法	8
3.4 スリット部の構造について	10
4. コリウムシールドの施工について	12
4.1 コリウムシールドの施工手順	12
4.2 製造公差について	13

1. コリウムシールドの概要及び設置目的

島根原子力発電所第2号機における、熔融炉心・コンクリート相互作用（以下「MCCI」という。）の影響抑制を目的に設置するコリウムシールドの概要を以下に示す。

原子炉格納容器内には、原子炉格納容器内で発生した廃液を集水し、ポンプによって原子炉格納容器外へ移送するためにドライウェル機器ドレンサンプ及びドライウェル床ドレンサンプ（以下「ドライウェルサンプ」という。）が図1-1、図1-2のとおり配置されており、原子炉格納容器下部床とドライウェルサンプはドレン配管にて接続されている。

炉心損傷後に原子炉圧力容器底部が破損し、原子炉格納容器下部への熔融炉心の落下に至り、落下してきた熔融炉心がドライウェルサンプ内に流入する場合、ドライウェルサンプ壁面と圧力容器ペデスタル（外側鋼板）までの距離及びドライウェルサンプ底面から原子炉格納容器バウンダリである鋼製ライナまでの距離が短いことから、サンプ壁面及びサンプ底面コンクリートの侵食により熔融炉心が外側鋼板及び鋼製ライナに接触し、原子炉圧力容器の支持機能及び原子炉格納容器のバウンダリ機能が損なわれるおそれがある。ドライウェルサンプへの熔融炉心の流入を抑制し、かつペデスタル代替注水系他と合わせて、サンプ壁面及びサンプ底面のコンクリートの侵食を抑制し、熔融炉心が原子炉格納容器バウンダリに接触することを防止するために、原子炉格納容器下部にコリウムシールドを設置する。

図1-3に、コリウムシールドの外観を示す。また、表1-1に、コリウムシールドの仕様を示す。

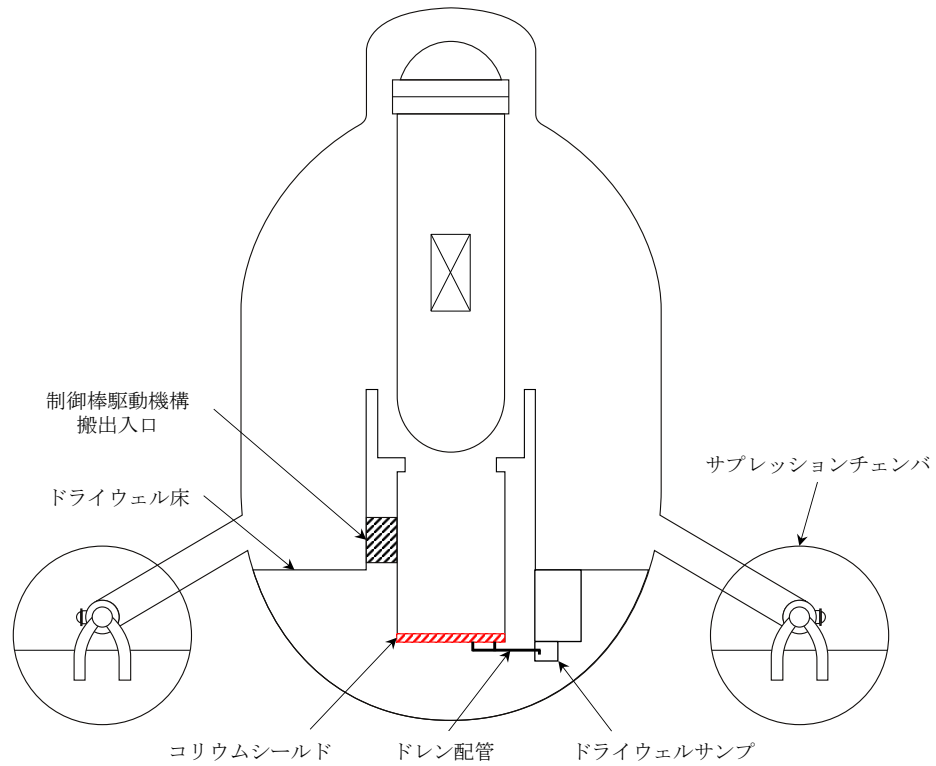


図 1-1 原子炉格納容器の概要図

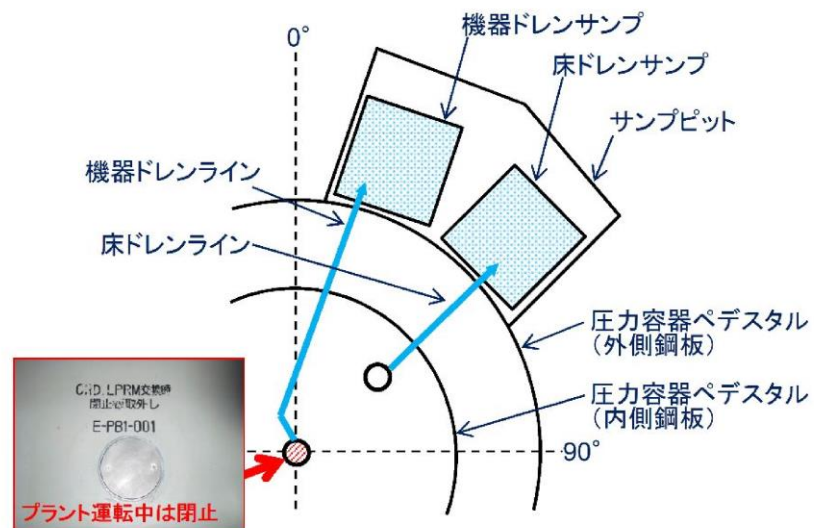


図 1-2 ドライウェルサンプの配置

表 1-1 コリウムシールド仕様

項目	仕様
耐熱材材質（サンプル防護材，犠牲材）	ジルコニア（ZrO ₂ ）
耐熱材厚さ*1	0.13m（公称値）以上
目地材	ジルコニアを主成分とした モルタル及びスタンプ材
基本厚さ*2	<input type="text"/> m（公称値）

注記*1：設置箇所によって耐熱材の厚さが異なることから，最も薄くなる箇所の厚さを示す。

*2：耐熱材，目地材及びライニングプレートの厚さを含む。



図 1-3 コリウムシールド外観

2. コリウムシールド材料の選定

コリウムシールドの材料としては、模擬溶融炉心を用いた種々の試験結果を基に、高融点でかつ化学的安定性に優れており、溶融炉心に対して高い耐性を有していることが確認された ZrO_2 を選定した。表 2-1 に、試験の概要を示す。

表 2-1 コリウムシールド材料の選定に係る試験の概要*

試験の種類	概要
溶融 Zr による耐熱材侵食試験	<p>試験目的：耐熱材の各候補材の耐侵食性を確認。</p> <p>模擬溶融炉心として、侵食量が大きくなる 100mol% Zr をるつぼ内で 2000℃～2200℃の所定温度に昇温・溶融し、<input type="text"/>, <input type="text"/>, ZrO_2 の耐熱材試験片を上部から挿入し 5 分間保持した後、取り出して残存状態を確認。</p> <p>侵食量は <input type="text"/> > <input type="text"/> > ZrO_2 となり、ZrO_2, <input type="text"/>, <input type="text"/> の順に耐侵食性に優れていることを確認 (図 2-1)。</p>
模擬溶融炉心による耐熱材侵食試験	<p>試験目的：ZrO_2 耐熱材の侵食開始温度として設定している 2100℃までの溶融炉心温度範囲における耐熱材の耐侵食性を確認。</p> <p>るつぼ内に円柱状に加工した ZrO_2 耐熱材と模擬溶融炉心粒子 (UO_2-ZrO_2-Zr : 30mol%-30mol%-40mol%) を装荷し、模擬溶融炉心を 2000℃～2100℃に昇温・溶融し 10 分間保持した後、るつぼを切断し断面を確認。</p> <p>ZrO_2 耐熱材の厚さは試験前から変化せず、模擬溶融炉心による ZrO_2 耐熱材の有意な侵食がないことを確認 (図 2-2)。</p>
耐熱材への模擬溶融炉心落下試験	<p>試験目的：耐熱材に溶融炉心が接触した際の短期的な相互作用を確認。</p> <p>ZrO_2 耐熱材を内張りしたコンクリートトラップに、2450℃以上に加熱した模擬溶融炉心 (UO_2-ZrO_2-Zr : 30mol%-30mol%-40mol%) を落下させ、耐熱材の侵食状況等を確認。</p> <p>模擬溶融炉心接触部から最大約 1cm の範囲で ZrO_2 耐熱材が黒色化し、その周辺部が白色化していることが確認されたものの、顕著な耐熱材の侵食及び急激な入熱 (熱衝撃) による耐熱材の割れが生じていないことを確認 (図 2-3)。</p> <p>黒色化した部分について X 線回折分析を行った結果、耐熱材表面の組成に有意な変化がないことを確認。</p>

注記*：本試験は、中部電力 (株)、東北電力 (株)、東京電力ホールディングス (株)、北陸電力 (株)、中国電力 (株)、日本原子力発電 (株)、電源開発 (株)、(一財) エネルギー総合工学研究所、東芝エネルギーシステムズ (株)、日立 GE ニュークリア・エナジー (株) が実施した共同研究の成果の一部である。

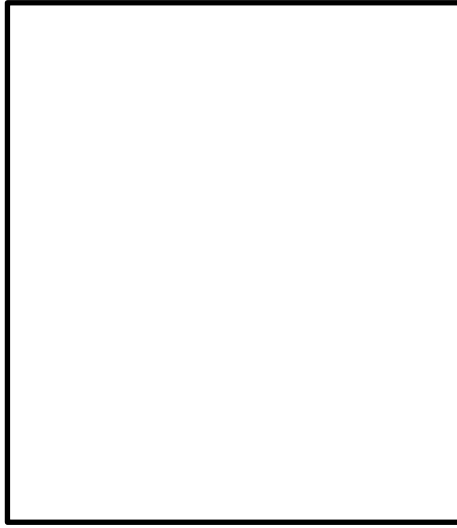


図 2-1 溶融 Zr による耐熱材侵食試験後の断面写真

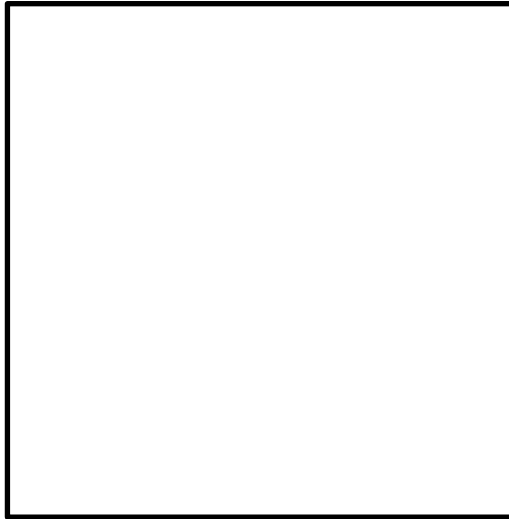


図 2-2 模擬溶融炉心による耐熱材侵食試験後の断面写真



図 2-3 耐熱材への模擬溶融炉心落下試験後の断面写真

3. コリウムシールド構造

コリウムシールドは、MCC I の影響抑制を目的としており、溶融炉心のドライウェルサンプへの流入を防ぐため、原子炉格納容器下部床面全体を覆う構造とし、耐熱材厚さ 0.13m 以上（公称値）のものを設置する。また、コリウムシールドについては、ドライウェルサンプの漏えい検出機能を維持するため、スリットを設けることからスリット部が溶融炉心のドライウェルサンプへの流入経路とならないよう考慮する。以下に、これらコリウムシールドの設計の考え方を示す。

3.1 コリウムシールド設計条件

(1) 想定する事故シナリオ

コリウムシールドを設計するための前提条件となる事故シナリオは以下のとおりである。

- ・高圧・低圧注水機能喪失及び重大事故等対処設備による原子炉注水失敗を想定（令和 3 年 9 月 15 日付け「原規規発第 2109152 号」をもって許可を受けた「島根原子力発電所発電用原子炉設置変更許可申請書（以下「設置変更許可申請書」という。）添付書類十 3.2.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」における MCC I シナリオと同様）

「設置変更許可申請書 添付書類十 3.2.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」での MAAP 解析結果及びシュラウド下部の構造から、溶融した炉心は直下の炉心支持板を損傷し、下部プレナムに落下、それに伴い原子炉圧力容器下部鏡板の中央部（炉底部）における熱的な損傷が大きくなり、原子炉圧力容器が破損、溶融炉心が原子炉圧力容器外に流出（落下）すると想定される。原子炉圧力容器から落下した溶融炉心はそのほとんどが垂直に落下し原子炉格納容器下部に到達。その後、原子炉格納容器下部床面を水平方向に拡散し、ファンネルへ流入すると想定される。溶融炉心の総量は約 t と想定される。

表 3-1 溶融炉心組成内訳

--

(2) コリウムシールド設計要求事項

- ・崩壊熱レベル : 事故後約 5.4 時間後に原子炉圧力容器が破損することを考慮し、事故後 5 時間相当とする。(ジルコニウム-水反応熱も考慮)
- ・床面積 : 原子炉格納容器下部床面全体を覆うものとして、 \square m²とする。
- ・熔融炉心質量 : 原子炉圧力容器内の主要設備(表 3-1 に記載)の熔融を考慮し、約 \square t とする。
- ・熔融炉心初期温度 : 「設置変更許可申請書 添付書類十 3.2.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」での M A A P 解析における、原子炉圧力容器が破損し、熔融炉心が原子炉格納容器下部に落下した直後の温度、 \square °C とする。
- ・熔融炉心除熱量 : 「設置変更許可申請書 添付書類十 3.2.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」にて用いている値(800kW/m²)よりも保守的な \square kW/m² とする。
- ・初期水張条件 : 原子炉圧力容器破損前から原子炉格納容器下部に注水を行うことを考慮し、M C C I の観点から保守性を持たせた高さ 1m とする。

3.2 コリウムシールド基本構造

コリウムシールドの外形及び基本構造を図 3-1 及び図 3-2 に示す。コリウムシールドは熔融炉心のドライウェルサンプへの流入を抑制するため、原子炉格納容器下部床面全体を覆う構造とする。なお、コリウムシールドの下部には、スリットを設置する。スリット部の断面の概略を図 3-3 に示す。



図 3-1 コリウムシールド外形

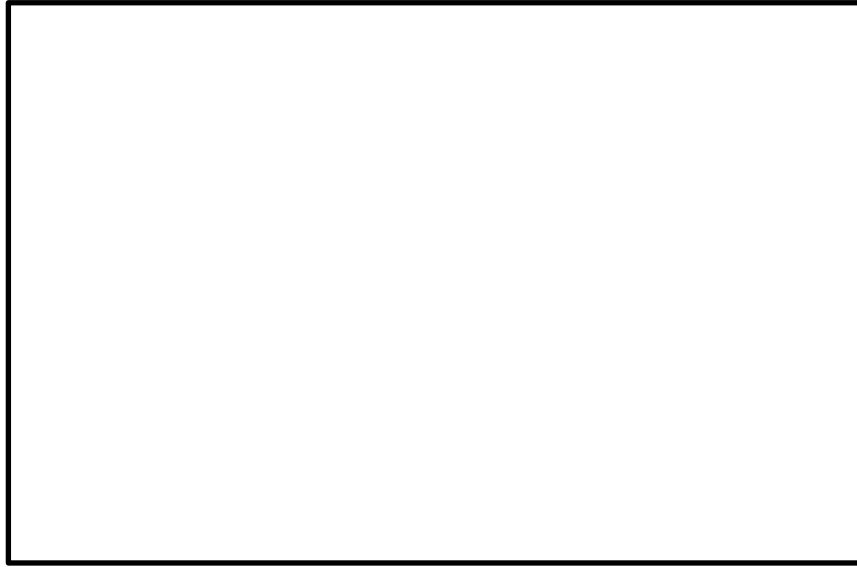


図 3-2 コリウムシールド基本構造



図 3-3 スリット部断面概略図

3.3 コリウムシールド各部寸法

(1) 耐熱材厚さについて

図 3-2 に示すとおり耐熱材は溶融炉心との接触に伴う熱衝撃対策として二層構造（サンプル防護材：厚さ m + 犠牲材：厚さ m）とし、 ZrO_2 製のモルタルにて互いを接着する。サンプル防護材の厚さについては、図 3-4 に示す耐熱材厚さ方向の熱伝導評価により、溶融炉心と接触する部分の温度時間変化を求め、最高温度が耐熱材材質である ZrO_2 の融点を超えない厚さとする。

ZrO_2 融点については、 ZrO_2 単体では 2677°C であるが、共晶反応及び酸化還元反応・合金化反応により融点が下がることを考慮し、 2100°C とした。

一般に UO_2-ZrO_2 の共晶温度は約 2500°C であることが知られており、 UO_2-ZrO_2 の共晶温度を考慮しても十分に低い融点を設定している。また、耐熱材の熱伝導評価においては保守的に、図 3-5 に示すとおり溶融炉心と接触する耐熱材表面の温度として、溶融炉心初期温度を上回る $^\circ\text{C}$ を初期条件として与えている。加えて、溶融炉心の水への除熱量を、「設置変更許可申請書 添付書類十 3.2.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」にて用いている値 ($800\text{kW}/\text{m}^2$) よりも小さい kW/m^2 とすることで、溶融炉心が高温である時間が長くなり、より侵食量が増える評価条件としている。解析コード「MAAP」を使用し、溶融炉

心の温度変化を求める。本評価に用いる解析コードの検証及び妥当性確認等の概要については、VI-5「計算機プログラム（解析コード）の概要」に示す。

なお、図3-6に示す評価結果から耐熱材の侵食量は \square m 以下であるが、コリウムシールド設計においては耐熱材の厚さに十分な余裕を見込み、サンプル防護材の厚さは \square m とする。

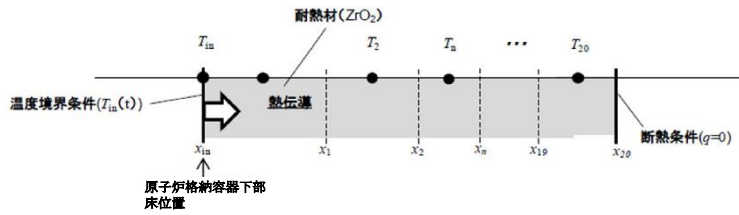


図3-4 耐熱材の熱伝導解析モデル

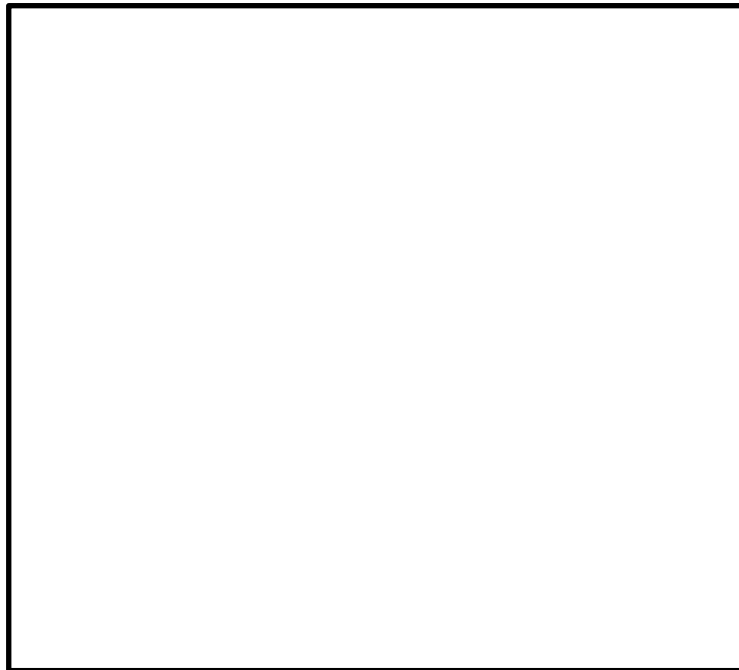


図3-5 溶融炉心温度変化（温度境界条件 $T_{in}(t)$ ）

実線：コリウムシールド設計用MAAP解析結果

破線：解析結果を包絡する評価用温度を表す



図 3-6 溶融炉心と接触するノードの温度変化

犠牲材については、あくまでも熱衝撃を吸収するためのもの（熱衝撃による割れを許容するもの）であることから、耐熱材製造上の最小厚さ \square m とする。

3.4 スリット部の構造について

原子炉格納容器下部床面に設置するコリウムシールドについては、ドライウェルサンプの漏えい検出機能を維持するため、コリウムシールド上部（床面）から床ドレンファンネルの間にスリットを設置する（図 3-1 参照）。スリット寸法については、スリット内の溶融炉心が構造物への伝熱によりドレン配管に流入する前に凝固し、水路を閉塞することを確認する。

(1) スリット内の溶融炉心凝固評価について

溶融炉心のスリット内凝固評価は実溶融炉心を用いた試験による確認が困難であることから、複数の評価モデルで凝固評価を実施し、各々の結果を包絡するようにスリット長さを決定する。なお、凝固評価においては、事前注水成功によりスリット内に水が存在すると考えられるものの、スリット部が非常に狭隘であることから、水による冷却を考慮しない保守的な評価となるよう水は存在しないものとして評価を行った。

凝固評価に用いたモデルを表 3-2 に、各モデルでの凝固評価結果を表 3-3 に示す。モデルの違いにより溶融炉心の凝固評価結果に多少の差異があるものの、高さ \square mm のスリットであれば溶融炉心の流動距離は最大でも約 1.3m あれば溶融炉心はスリット内で凝固することから、溶融炉心の凝固距離に余裕を見込んで、スリット長さを \square m 以上とする。

表 3-2 溶融炉心凝固評価モデル比較

評価モデル	概要	適用実績
US-ABWR DCD モデル	平行平板間の溶融炉心が凝固し流路が平衡することを想定したモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・米国NRCに認可されたモデル ・US-ABWR は本モデルに基づき標準設計認証を取得
Epstein モデル	円管内での溶融炉心の流動距離を評価するモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・MAAPのRPV下部プレナムにおける核計装配管等の貫通部配管での溶融炉心凝固評価に用いられている。 ・EPRIによって行われた模擬溶融炉心の凝固試験結果と、本モデルの評価結果とが、おおよそ一致していることが確認されている。
Flemings モデル	流路周長全体を伝熱面とし、壁面への伝熱を評価するモデル	<ul style="list-style-type: none"> ・鋳造分野で使用されている。

表 3-3 スリット内溶融炉心凝固評価結果

評価モデル	流動距離（凝固するまでの距離）
US-ABWR DCD モデル	0.25m
Epstein モデル	1.3m
Flemings モデル	0.55m

4. コリウムシールドの施工について

4.1 コリウムシールドの施工手順

図 4-1 に施工手順の概念図を示す。

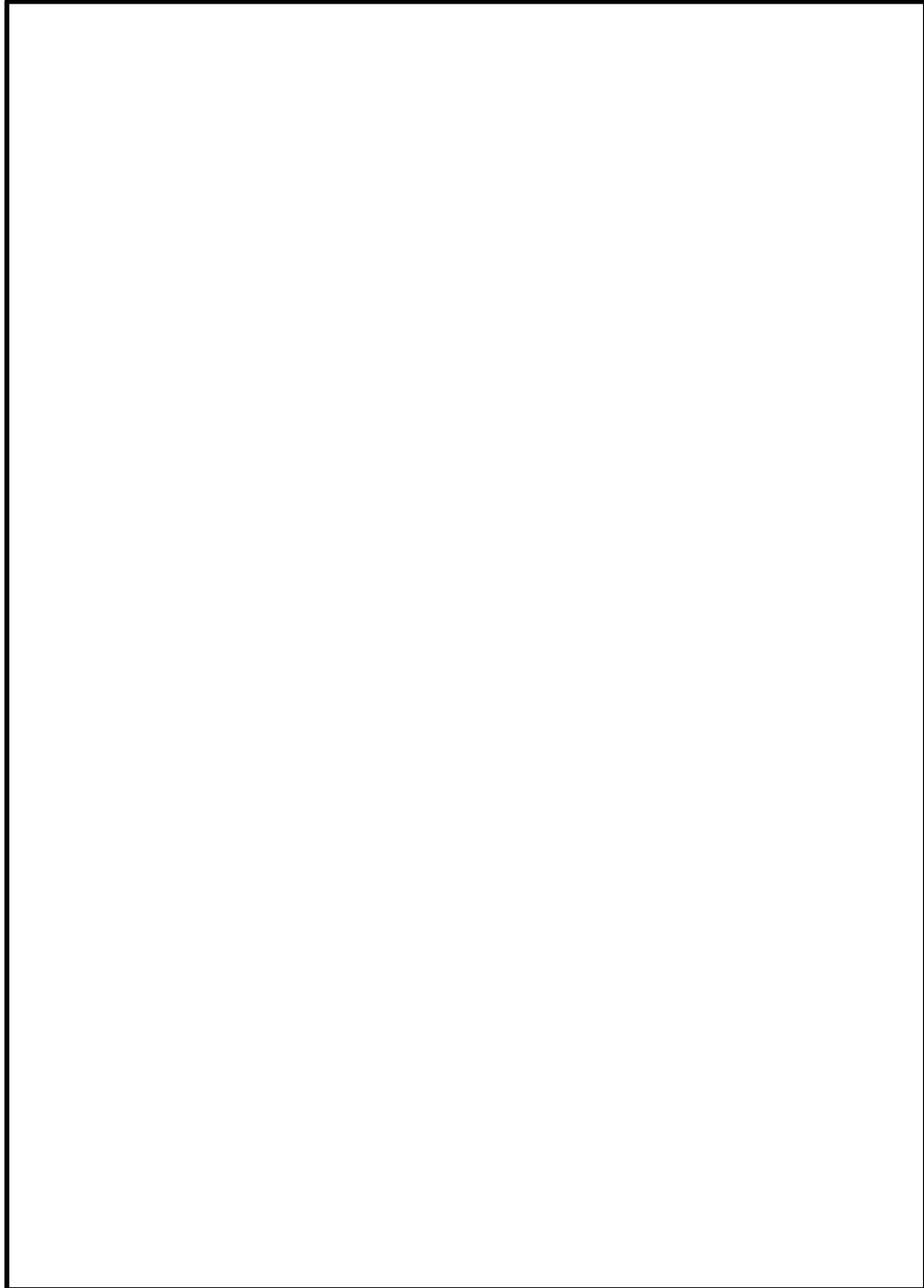


図 4-1 コリウムシールドの施工手順概念図

4.2 製造公差について

コリウムシールドの製造公差を表 4-1 に示す。また、製造公差による各種評価への影響を表 4-2 に示す。各部位の製造公差を考慮した場合でも、各種評価結果への有意な影響はない。

表 4-1 コリウムシールド各部位の製造公差

項目	主要寸法(mm)*		許容公差	根拠	備考
コリウムシールド	基本厚さ			製造能力, 製造実績を考慮したメーカー許容値	ライニングプレート厚さ <input type="text"/> mm を含む
スリット	鋼材厚さ			製造能力, 製造実績を考慮したメーカー許容値	
	幅			製造能力, 製造実績を考慮したメーカー許容値	
	高さ			製造能力, 製造実績を考慮したメーカー許容値	

注記* : 公称値を記載

表 4-2 製造公差と各種評価への影響 (1/3)

項目	コリウムシールド基本厚さ
公称値 (製造公差)	<input type="text"/> mm (<input type="text"/> mm 以上)
溶融炉心堆積高さ・冠水維持評価	コリウムシールドが厚くなると、溶融炉心の堆積高さが増加するが、水面高さも同様に増加するため、有意な影響はない。
溶融炉心による侵食量評価	コリウムシールドが厚くなると、溶融炉心による侵食量に対する裕度が増加するため、影響なし。
溶融炉心による熱影響評価	コリウムシールドが厚くなると、溶融炉心からコンクリートへの熱伝達が緩和され裕度が増加するため、影響なし。
溶融炉心の凝固停止評価	コリウムシールド等の原子炉格納容器下部の構造物は考慮せず、原子炉格納容器下部に堆積した溶融炉心が直接スリットに流入するモデルとしているため、影響なし。

表 4-2 製造公差と各種評価への影響 (2/3)

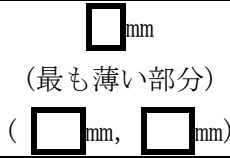
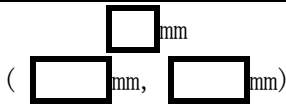
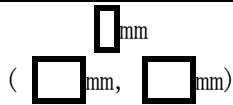
項目	スリット鋼材厚さ
公称値 (製造公差)	 (最も薄い部分) (8 mm, 12 mm)
溶融炉心堆積高さ・冠水維持評価	影響なし。
溶融炉心による侵食量評価	影響なし。
溶融炉心による熱影響評価	単位体積当たりの熱容量はコンクリートよりもスリット鋼材 (SUS) の方が大きいため、スリット鋼材が厚くなると熱影響 (温度上昇) は小さくなり、裕度が増加する。 スリットが薄くなる場合、熱影響は大きくなるが、有意な影響はない。
溶融炉心の凝固停止評価	影響なし。

表 4-2 製造公差と各種評価への影響 (3/3)

項目	スリット幅	スリット高さ
公称値 (製造公差)	 (8 mm, 12 mm)	 (8 mm, 12 mm)
溶融炉心堆積高さ・冠水維持評価	影響なし。	
溶融炉心による侵食量評価	影響なし。	
溶融炉心による熱影響評価	スリットの高さや幅が大きくなると、スリット内の溶融炉心の量 (発熱量) が増加するが、評価モデルは 2 次元軸対象であり床スラブ内の水平面全面にスリットが存在するモデルとなっているため、この保守性に包絡される。スリットの高さや幅が小さくなると、スリット内の溶融炉心の量が減少するため、裕度が増加する。	
溶融炉心の凝固停止評価	スリット厚さが 10 mm, スリット幅が 10 mm 大きくなった場合、スリット内の単位長さ当たりの溶融炉心の量は約 1.2 倍となる。これにより、溶融炉心が冷却され凝固停止するまでの距離が 1.4 倍となったとしても*, その距離は約 1.8m であり、スリット長さの範囲内に留まる。	

注記* : スリット厚さ及び幅が増加すると溶融炉心からスリットへの除熱面積も増加するため、実際には凝固停止距離は 1.4 倍より小さくなる。