

本資料のうち、枠囲みの内容は、機密事項に属しますので公開できません。

柏崎刈羽原子力発電所第6号機 設計及び工事計画審査資料	
資料番号	KK6 添-1-052-3 改0
提出年月日	2023年11月30日

VI-1-8-1-別添2 コリウムシールドの設計

2023年11月
東京電力ホールディングス株式会社

VI-1-8-1-別添2 コリウムシールドの設計

目 次

1. コリウムシールドの概要及び設置目的	別添2-1
2. コリウムシールド材料の選定	別添2-4
3. コリウムシールド構造	別添2-6
3.1 コリウムシールド設計条件	別添2-6
3.2 コリウムシールド基本構造	別添2-8
3.3 コリウムシールド各部寸法	別添2-9
3.4 スリット部の構造について	別添2-13
4. コリウムシールドの施工について	別添2-14
4.1 コリウムシールドの施工手順	別添2-14
4.2 製造公差について	別添2-15

1. コリウムシールドの概要及び設置目的

柏崎刈羽原子力発電所第6号機における、溶融炉心・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。

原子炉格納容器下部の床面には、原子炉格納容器内で発生した廃液の収集のために、図1-1及び図1-2のとおり高電導度廃液サンプル（以下「HCWサンプル」という。）と低電導度廃液サンプル（以下「LCWサンプル」という。）が設置されている。

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溶融炉心の落下に至り、落下してきた溶融炉心がHCWサンプル及びLCWサンプル（以下「ドライウェルサンプル」という。）内に流入する場合、ドライウェルサンプル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小さいことから、サンプル底面コンクリートの侵食により溶融炉心が鋼製ライナに接触し、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ルへの溶融炉心の流入を抑制し、かつ格納容器下部注水系と合わせて、サンプル底面のコンクリートの侵食を抑制し、溶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。

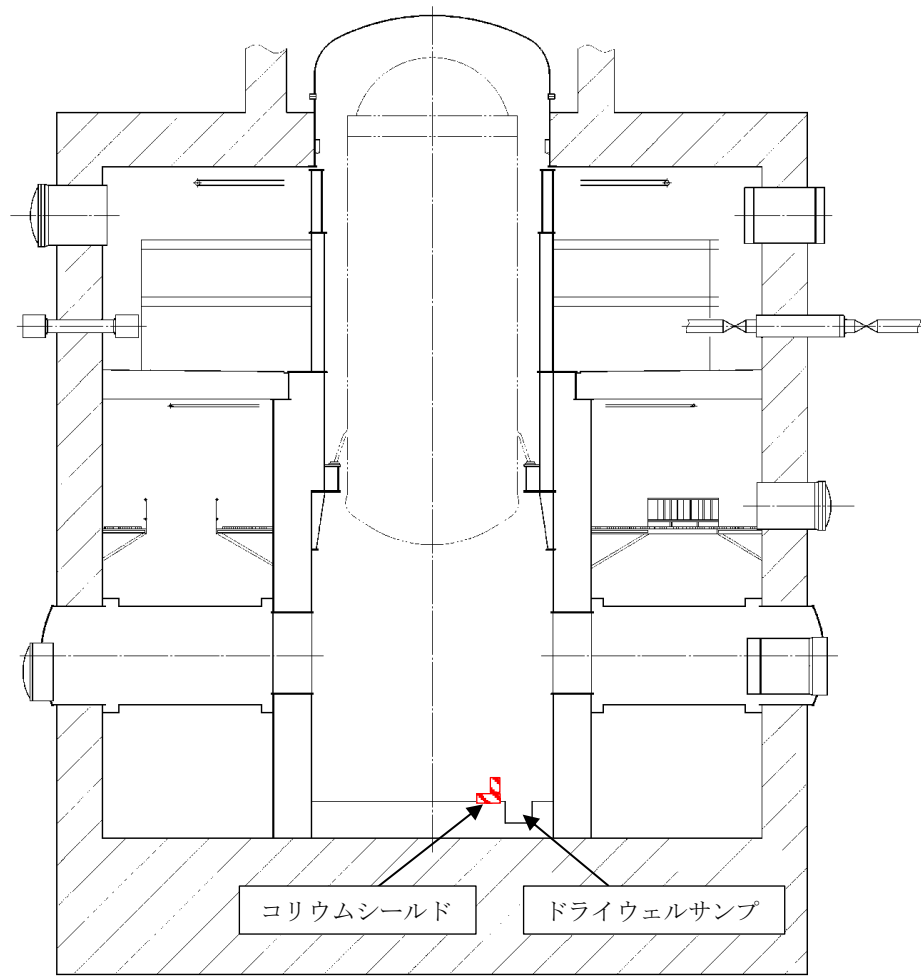


図1-1 原子炉格納容器の概要図

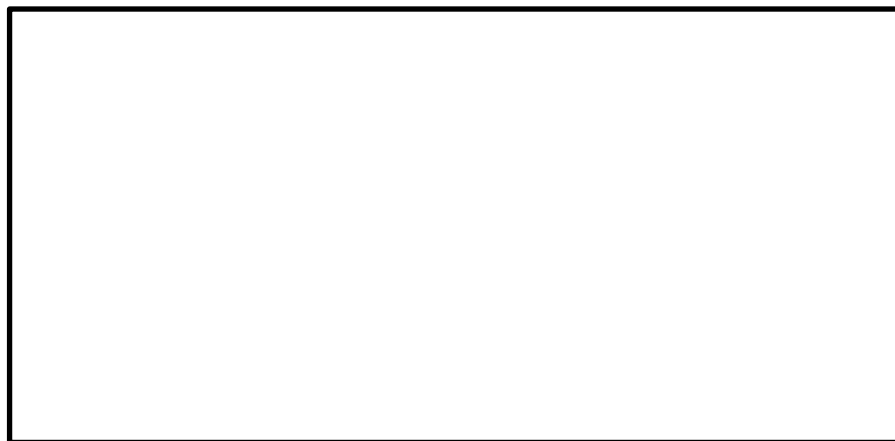


図1-2 ドライウェルサンプルの配置

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)
高さ	0.85m
厚さ	0.13m

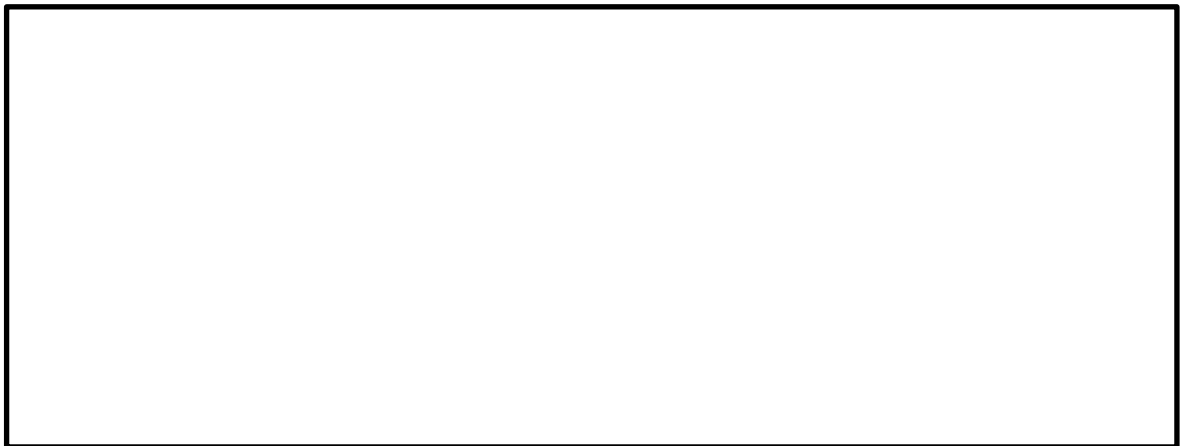


図1-3 コリウムシールド外観

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、模擬熔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、熔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
熔融 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>模擬熔融炉心として、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・熔融し、<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>
模擬熔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℃までの熔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耐熱材と模擬熔融炉心粒子（UO_2-ZrO_2-Zr：30mol%－30mol%－40mol%）を装荷し、模擬熔融炉心を2000℃～2100℃に昇温・熔融し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、模擬熔融炉心によるZrO_2耐熱材の有意な侵食がないことを確認（図2-2）。</p>
耐熱材への模擬熔融炉心落下試験	<p>試験目的：耐熱材に熔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熔融炉心（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>模擬熔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。

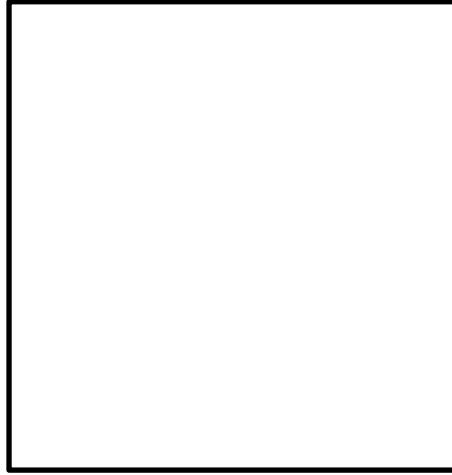


図2-1 熔融Zrによる耐熱材侵食試験後の断面写真

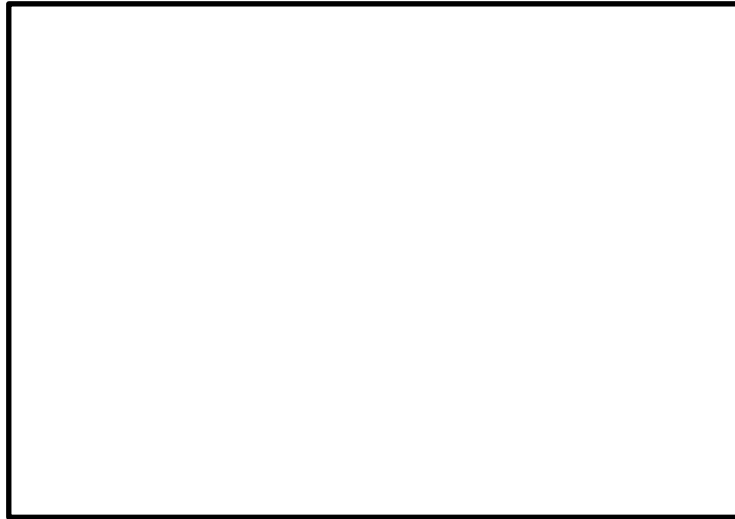


図2-2 模擬熔融炉心による耐熱材侵食試験後の断面写真

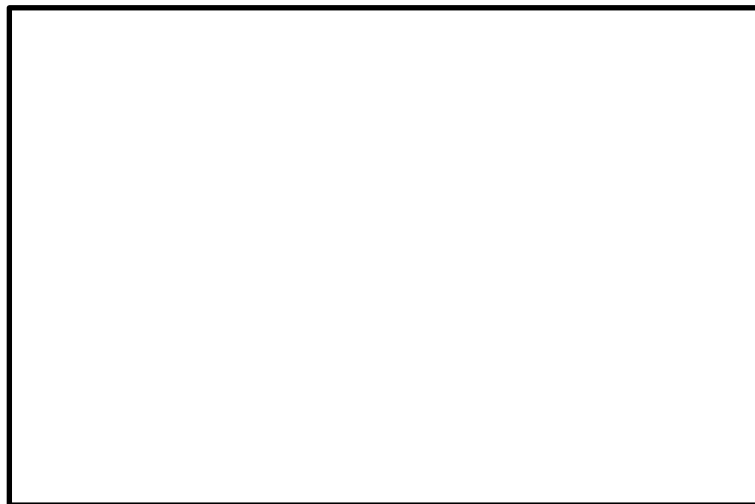


図2-3 耐熱材への模擬熔融炉心落下試験後の断面写真

3. コリウムシールド構造

コリウムシールドは、MCC I の影響抑制の目的で設置するが、原子炉格納容器下部の設備配置上、設置高さに制限があり、これを考慮した上で、原子炉压力容器から落下する熔融炉心を全量保持でき、かつ、MCC I の影響も抑制できるよう、その厚さ、高さを設定する必要がある。これを踏まえ、コリウムシールドは、高さ0.85m、厚さ0.13mとすることとした。また、コリウムシールドについては、HCW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熔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

(令和元年6月19日付け「原規規発第1906194号」をもって許可を受けた「柏崎刈羽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 7.2.5 熔融炉心・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 7.2.5 熔融炉心・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、熔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、それに伴い原子炉压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、原子炉压力容器が破損、熔融炉心が原子炉压力容器外に流出（落下）すると想定される。原子炉压力容器から落下した熔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、ドライウェルサンプへ流入すると想定される。熔融炉心の総量は約 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7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6時間相当とする。(ジルコニウム-水反応熱も考慮)
- ・床面積 : コリウムシールド設置による床面積減少分を考慮し、60m²とする。
- ・溶融炉心質量 : 原子炉圧力容器内の主要設備(表3-1に記載)の溶融を考慮し、約 tとする。
- ・溶融炉心初期温度 : 「設置変更許可申請書 添付書類十 7.2.5 溶融炉心・コンクリート相互作用」でのMAAP解析における、原子炉圧力容器が破損し、溶融炉心が原子炉格納容器下部に落下した直後の温度、 °Cとする。
- ・溶融炉心除熱量 : 「設置変更許可申請書 添付書類十 7.2.5 溶融炉心・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 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、高さ2m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ルへの流入を抑制するため、ドライウェルサンプルを囲うように設置する。また、耐熱材を鋼製の補強フレーム（支持材）にて支持する構造とする。ここで、支持材を耐熱材の熔融炉心接触面と反対側（ドライウェルサンプル側）に配置することにより、支持材と熔融炉心が接触しない構造とする。

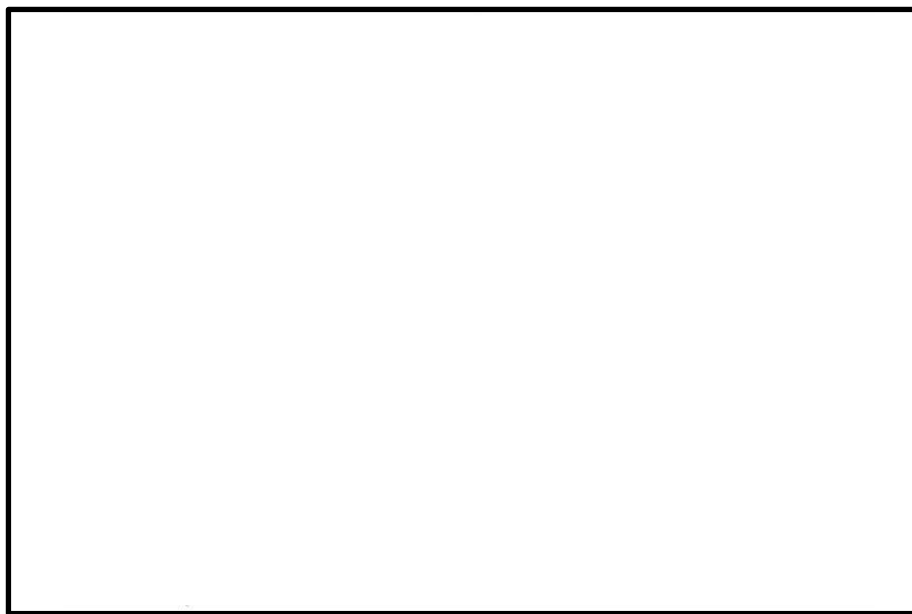


図3-1 コリウムシールド外形



図3-2 コリウムシールド基本構造

3.3 コリウムシールド各部寸法

(1) 堰の高さについて

原子炉格納容器下部に落下する溶融炉心の総量は約 t と想定しており、以下の条件設定において落下した溶融炉心がコリウムシールドを乗り越えてドライウェルサンプルに流入することがないように、堰の高さを決定する。溶融炉心の組成は表3-1のとおりであるが、原子炉圧力容器の下部には制御棒駆動機構等の既設設備が存在しており、溶融炉心が原子炉圧力容器から流出した際には、既設設備の一部が溶融し、溶融炉心の総量が増加する可能性がある。溶融炉心の堆積高さの算出式を以下に示す。

$$H_d = \frac{\frac{m_d}{\rho_d} + \frac{m_m}{\rho_{SUS}} + V_s}{A_{pd}}$$

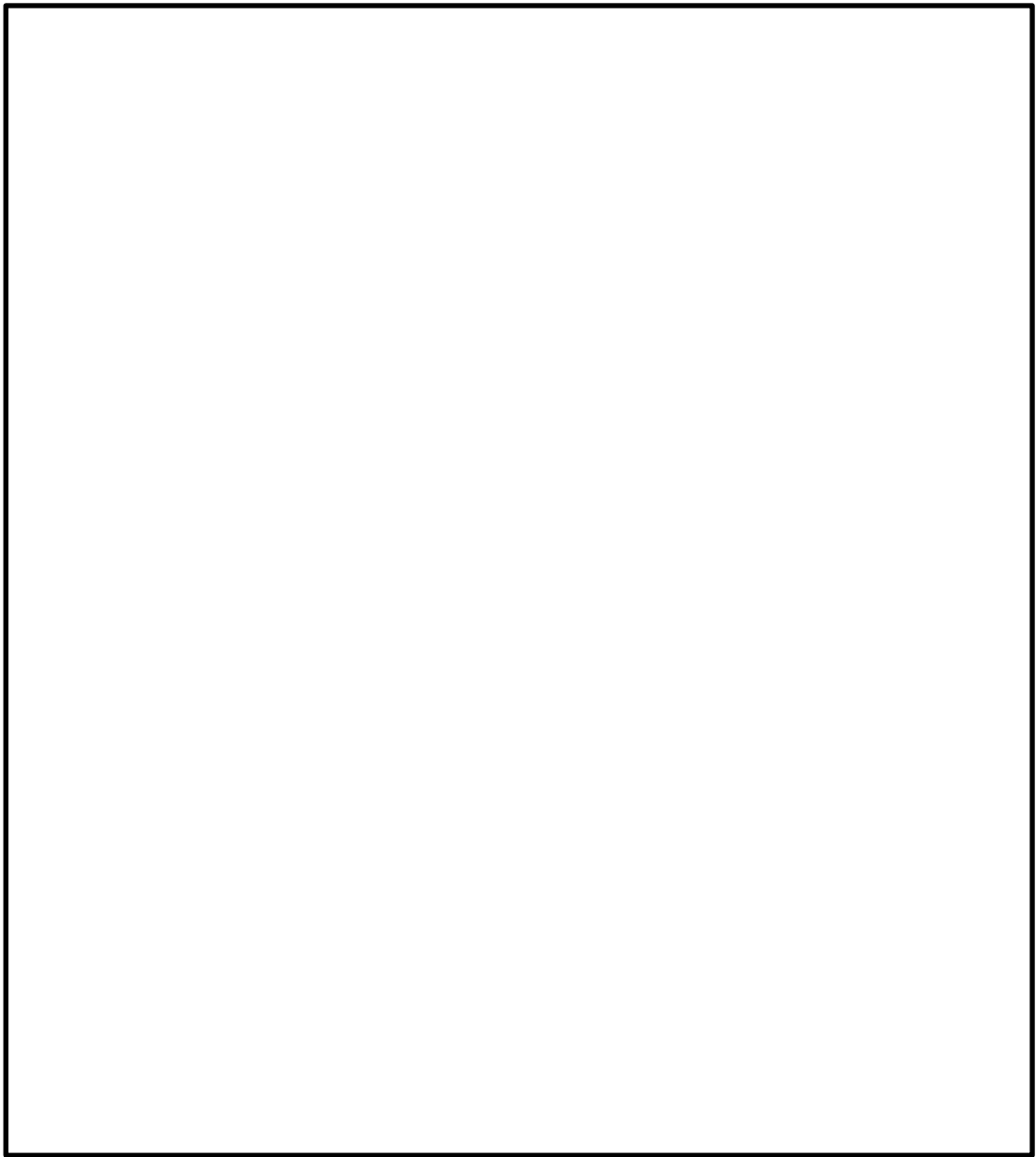
ここで、 H_d ：溶融炉心堆積高さ[m]、 m_d ：溶融炉心総量[kg]、 ρ_d ：溶融炉心密度[kg/m³]、 m_m ：原子炉圧力容器の下部に存在する機器重量[kg]、 ρ_{SUS} ：SUS密度[kg/m³]、 A_{pd} ：コリウムシールド及びコリウムシールドに囲われる部分の面積を除いた原子炉本体の基礎床面積[m²]、 V_s ：溶融炉心に埋没する耐熱材容積[m³]とする。

上記の式に各値を代入した結果を表3-2に示す。ただし、 $m_d = \text{}$ kg、 $\rho_d = \text{}$ kg/m³、 $m_m = \text{}$ kg、 $\rho_{SUS} = \text{}$ kg/m³、 $A_{pd} = \text{}$ m²、 $V_s = \text{}$ m³とする。

表3-2より、制御棒駆動機構等、原子炉格納容器の下部に存在する主要設備が溶融した場合の、溶融炉心の堆積高さは、0.84mとなる。

なお、溶融炉心の粘性が非常に小さく、落下経路に存在する原子炉圧力容器下部の既設設備に長時間接触する可能性は低いと考えられること、また、原子炉格納容器下部には原子炉圧力容器破損前に水張りがされており、かつ継続的に注水されていることにより、落下した溶融炉心は冷却され、原子炉格納容器の下部に存在する主要設備が全て溶融する可能性は低いと考えられることから、コリウムシールドの堰の高さを0.85mとする。

表3-2 溶融する構造物の量に対する溶融炉心堆積高さ (単位 : m)



K6 ① VI-1-8-1-別添2 R0

図3-3 原子炉压力容器の下部に存在する機器

(2) 耐熱材厚さについて

図3-2に示すとおり耐熱材は熔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 製の耐熱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、熔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 $2677^{\circ}C$ 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、 $2100^{\circ}C$ とした。

一般に UO_2-ZrO_2 の共晶温度は約 $2500^{\circ}C$ 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に示すとおり熔融炉心と接触する耐熱材表面の温度として、熔融炉心初期温度を上回る $^{\circ}C$ を初期条件として与えている。加えて、熔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 7.2.5 熔融炉心・コンクリート相互作用」にて用いている値（ $800kW/m^2$ ）よりも小さい kW/m^2 とすることで、熔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、熔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、別紙「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 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 mとする。

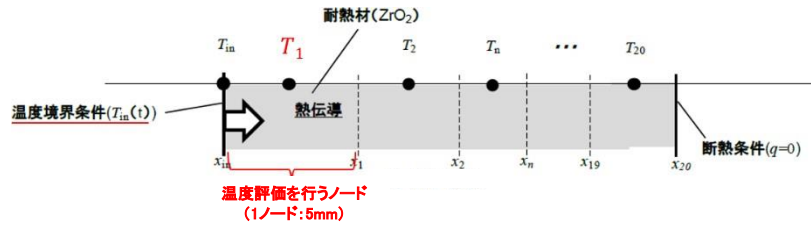


図3-4 耐熱材の熱伝導解析モデル



図3-5 溶融炉心温度変化（温度境界条件 $T_{in}(t)$ ）
 注：破線：コリウムシールド設計用MAAP解析結果、
 実線：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 mとする。

3.4 スリット部の構造について

HCWサンプの前に設置するコリウムシールドについては、HCWサンプの漏えい検出機能を維持するため、コリウムシールド下部（床面との間）にスリットを設置する。スリット寸法については、溶融炉心のサンプへの有意な流入経路とならないことを確認する。

(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3-3に、各モデルでの凝固評価結果を表3-4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、最大でも0.3m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 mとする。

表3-3 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	平行平板間で溶融炉心が凝固し流路が閉塞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。 ・EPR I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3-4 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	0.24m
Epsteinモデル	0.21m
Flemingsモデル	0.30m

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。

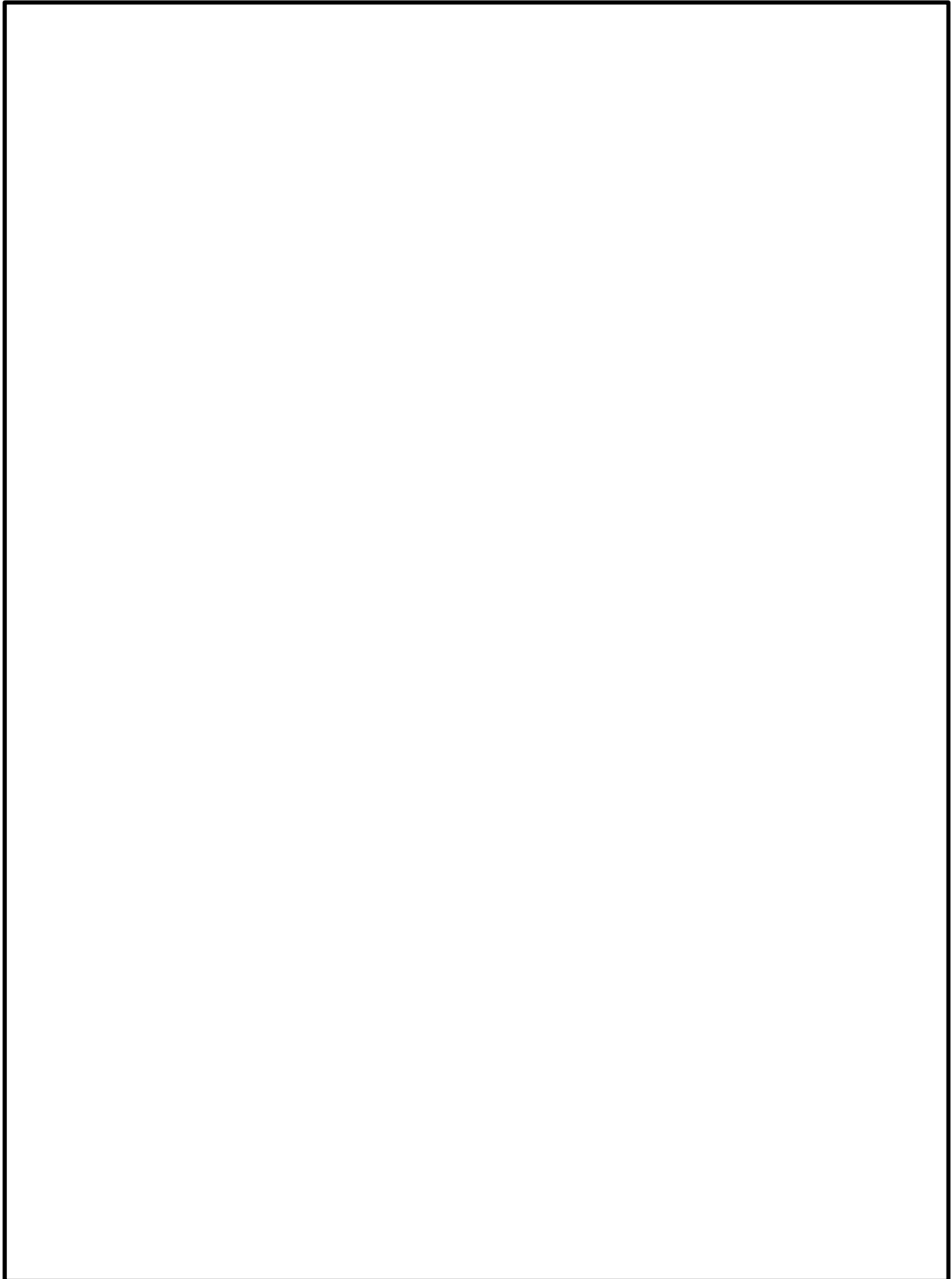


図4-1 コリウムシールドの施工手順概念図

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 [mm]	根拠	備考
コリウムシールド	高さ		製造能力、製造実績を考慮したメーカー許容値	カバープレート厚さ□mmを含む
	サンプル防護材厚さ		製造能力、製造実績を考慮したメーカー許容値	
	犠牲材厚さ		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 製造公差による各種評価への影響

項目	コリウムシールド高さ	サンプル防護材厚さ	犠牲材厚さ
公称値 (製造公差)			
溶融炉心堆積高さ評価	コリウムシールドが高くなると、溶融炉心堆積高さ評価結果に対する裕度は大きくなる。	コリウムシールドが厚くなると、溶融炉心の堆積面積が小さくなるが、保守的に□mm厚くなった場合でも、その変化率は0.06%以下であり、溶融炉心堆積高さへの影響は小さい。 コリウムシールドが薄くなると、溶融炉心の堆積面積が大きくなるため、溶融炉心堆積高さは小さくなり、裕度は増加する。	
耐熱材の侵食量評価	影響なし	サンプル防護材厚さが厚くなると、溶融炉心と上面プール水との接触面積が減少するが、□mm厚くなった場合でも面積減少率は0.06%以下であり、有意な影響はない。 サンプル防護材が薄くなる場合でも、侵食量の□mmに対して十分な厚さがあることから有意な影響はない。	犠牲材厚さが厚くなると、溶融炉心と上面プール水との接触面積が減少するが、□mm厚くなった場合でも面積減少率は0.03%以下であり、有意な影響はない。 犠牲材が薄くなる場合でも、熱衝撃保護の目的に対して厚さは影響しないことから、有意な影響はない。