

【別添】ドライ型コアキャッチャの設計方針について

➤ 本資料では、以下の3つの溶融炉心の冷却の各機能（役割）に着目して、設計に必要となる項目を整理する。

- ① 溶融炉心の保持と低融点化・低粘性化
- ② 溶融炉心の拡散・冷却
- ③ 溶融炉心への注水

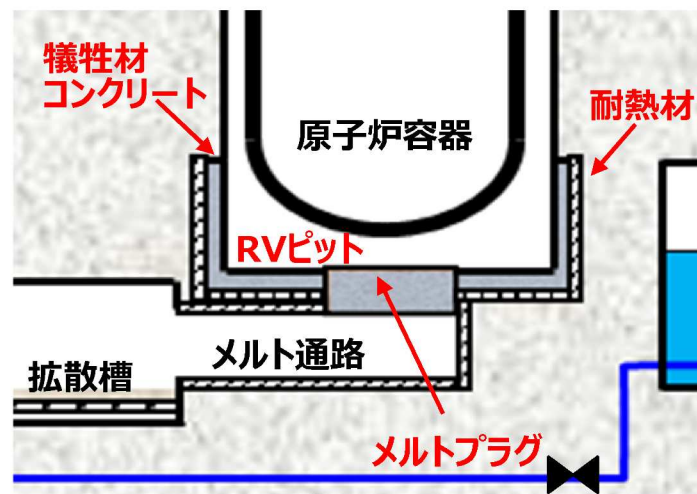
【設計に必要となる項目】

- 主要な構成設備に対する設計要件
 - ・・・各機能を実現するために各構成設備に求められる要求事項
- 主要な構成設備に対する設計方針
 - ・・・設計要件を満足する設計の考え方
- 妥当性確認の方針
 - ・・・各機能の成立性を検証・確認する方法

熔融炉心の保持と低融点化・低粘性化

- 溶融炉心の保持と低融点化・低粘性化に係る主要な構成設備の機能は、RV破損により放出される**溶融炉心を一時的に受け止め**、犠牲材コンクリートと溶融混合することにより、**低融点化・低粘性化を図る**ことである。
- 上記を達成するべく主要な構成設備に対して、それぞれ設計要件を定める。

主要な構成設備	設計要件
RVピット	①原子炉容器から溶融炉心が全量流出するまでの間、 溶融炉心の全量を保持できる十分な容積 をもたせること ② CVスプレイ水等がRVピットに流入しない構造 とすること
犠牲材コンクリート	①溶融炉心と混合すること ② 溶融炉心を低融点化・低粘性化 すること
耐熱材	①溶融炉心と構造材コンクリートを接触させることなく 溶融炉心を保持 できること
メルトプラグ	①溶融炉心がメルト通路経由で 拡散槽に流出するための流出口 となること



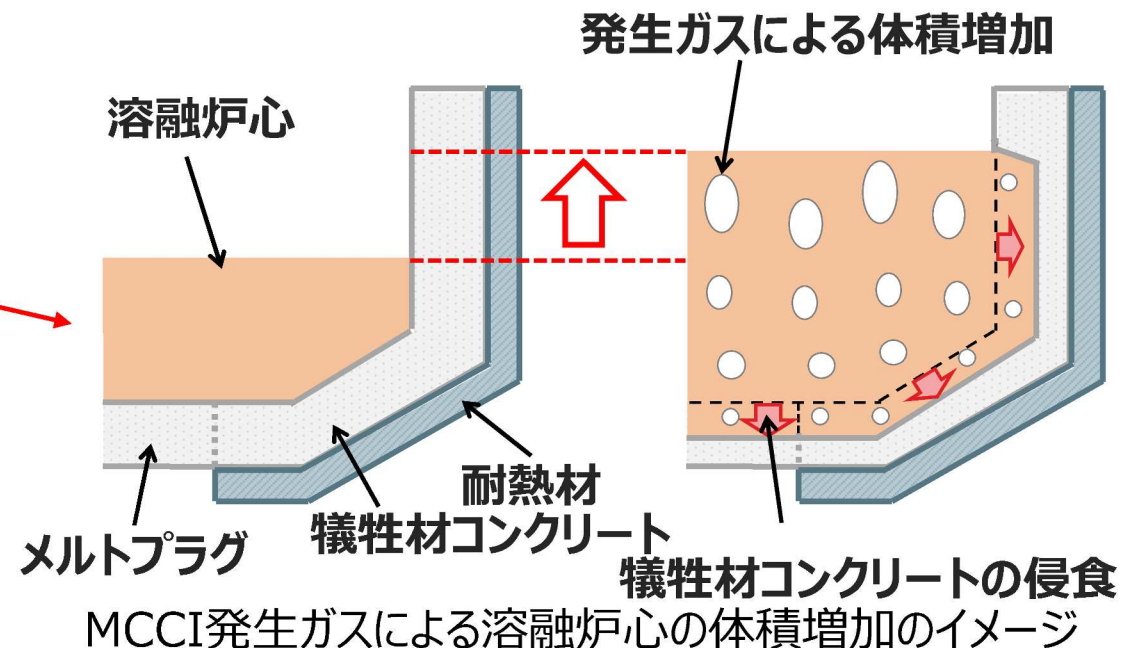
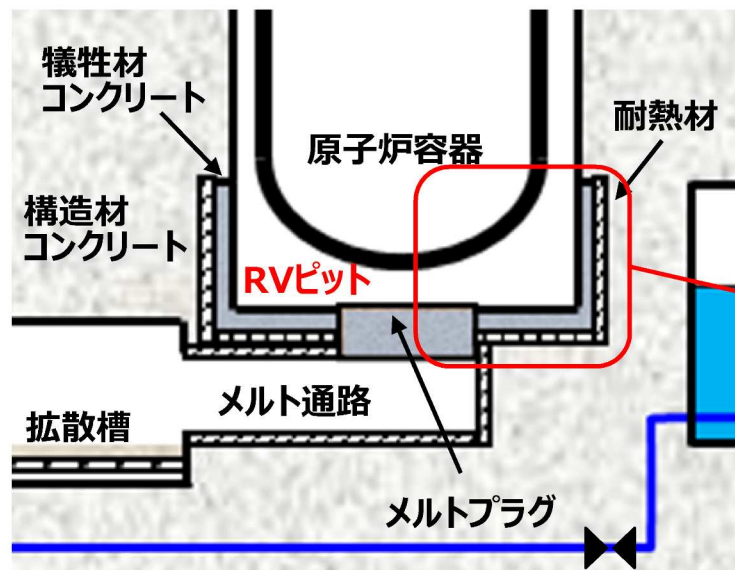
- RVピットの設計要件に対する設計方針は以下の通り。

要件①：原子炉容器から溶融炉心が全量流出するまでの間、**溶融炉心の全量を保持できる十分なRVピット容積を確保**すること

・・・溶融炉心の全量は**燃料集合体、炉心下部構造物、RV下部鏡を考慮**し、またMCCIによる発生ガス混合による体積増加を考慮しても問題ない**RVピット容積を確保**する方針。

要件②：**CVスプレイ水等がRVピットに流入しない構造**とすること

・・・RVピットに接続する開口部を通じてCVスプレイ水等が流入しないように、開口端の高さは事故時水没レベルよりも高い位置とし、また開口端に堰を設ける等の流入を防止する設計とする方針。



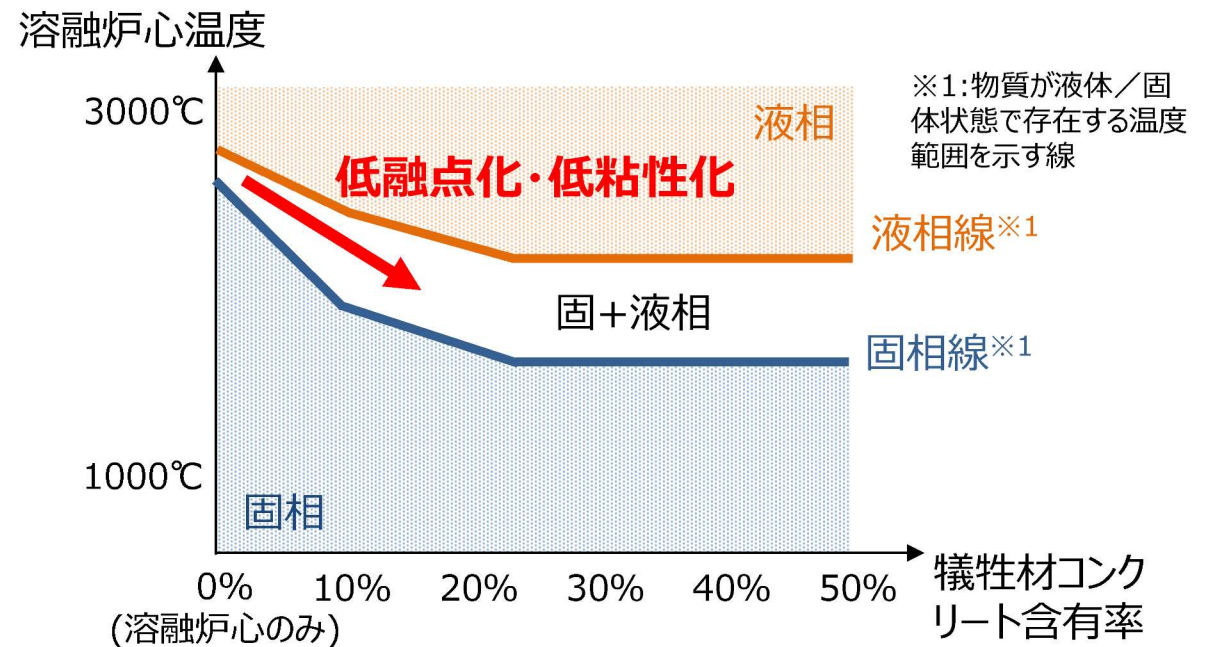
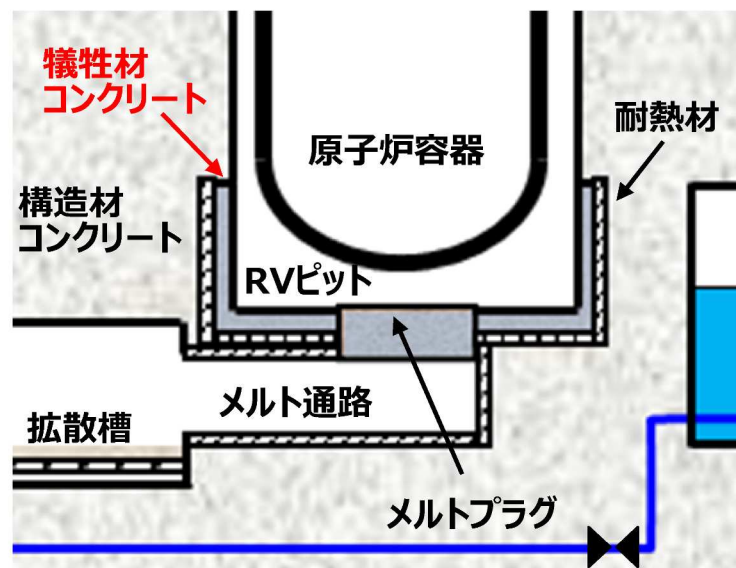
- 犠牲材コンクリートの設計要件に対する設計方針は以下の通り。

要件①：溶融炉心と混合すること

・・・犠牲材コンクリートをRVピットの底部・側面に敷設し、**溶融炉心の全量と混合**させる方針。

要件②：溶融炉心を低融点化・低粘性化すること

・・・骨材に酸化鉄を用いることで、溶融炉心（ UO_2 と ZrO_2 ）を酸化鉄と混合させることで溶融炉心の**低融点化・低粘性化**を図る。これにより溶融炉心の固化を抑制し、かつ、拡散槽への拡散が適切に行えるように**犠牲材コンクリートの組成や必要な物量を設計**する方針。



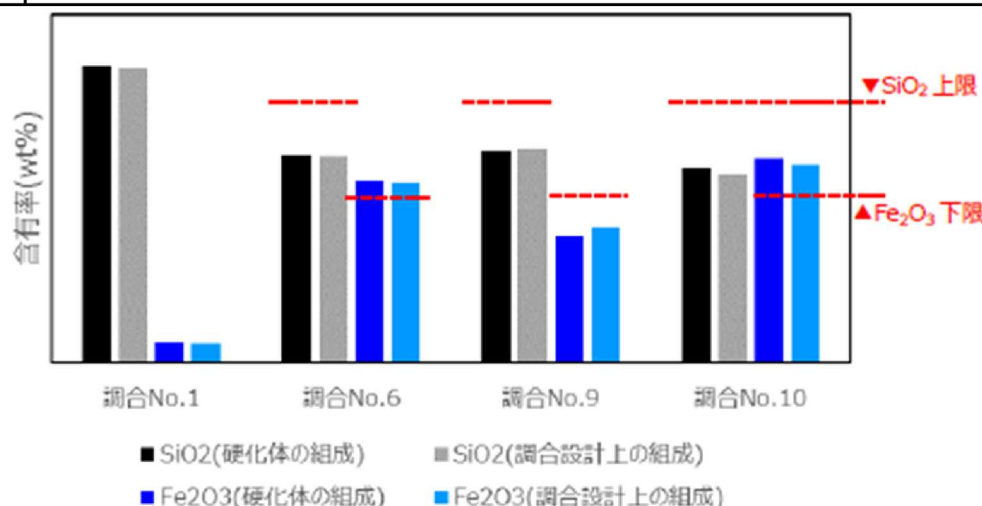
犠牲材コンクリートによる低融点化・低粘性化の概念図

- **国内のサプライチェーン構築及び供給信頼性確保の観点から、犠牲材コンクリートの国産化に取り組****み中**。これまで、実機適用を見据えた犠牲材コンクリートの成分検討・調合設計と材料試作・検証試験等を実施し、成立性確認済（引き続き、長期安定性や施工性等の検討に取り組み中）。
- 酸化鉄を含まない参照材料（調合No.1）に対し、酸化鉄成分を含みセメントや骨材等の比率を変えた3調合（調合No.6、9、10）に対する試作・各種測定を実施し、**2調合で全ての要求を満足**することを確認。

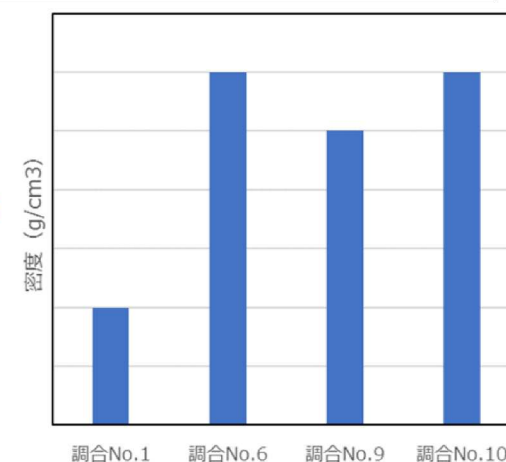
測定項目（代表例）	データ取得結果
圧縮強度	材料安定性確認の観点から硬化後の圧縮強度を計測し、 全て要求を満足 。
組成分析	硬化体の化学組成が調合設計上の組成と概ね同等である 2調合（No.6, 10）が要求（高粘性のSiO₂上限値以下、低粘性化成分のFe₂O₃下限値以上）を満足 。
密度測定	酸化鉄粉を含む犠牲材コンクリートは密度が大きくなる傾向。
熱物性測定	既往知見との比較において妥当 な結果である事を確認。



犠牲材コンクリート（硬化体）



材料試験の例（組成分析）

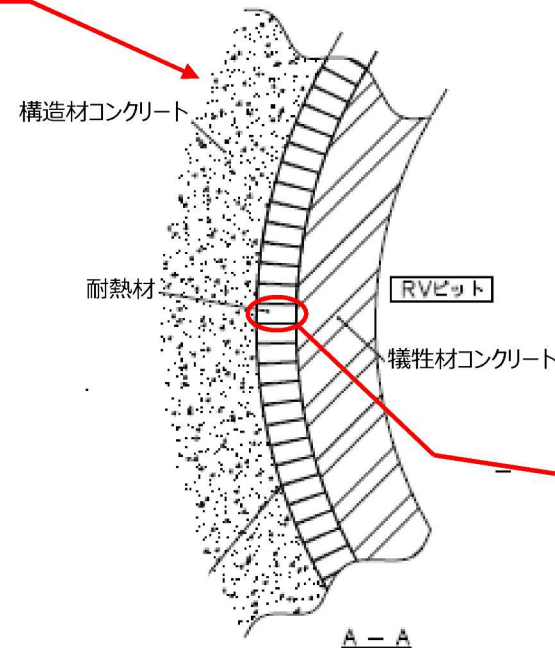
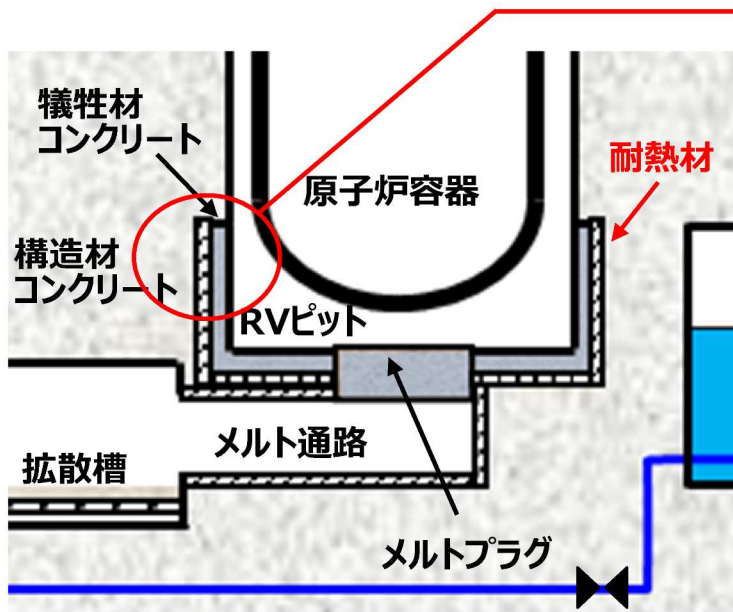


材料試験の例（密度測定）

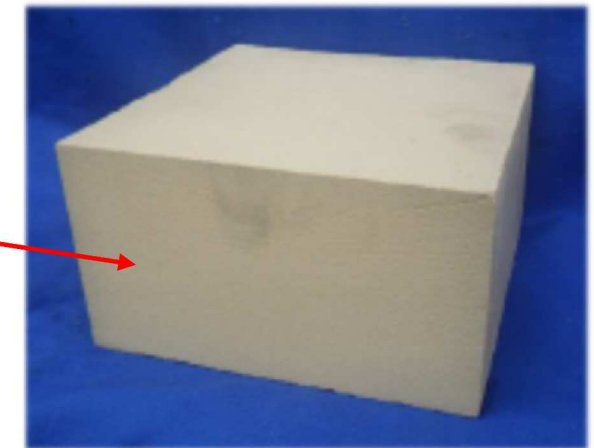
- 耐熱材の設計要件に対する設計方針は以下の通り。

要件①：溶融炉心と構造材コンクリートを接触させることなく溶融炉心を保持できること

- ・・・耐熱材をRVピットの底部及び側面に敷設し、犠牲材コンクリートが溶融し、耐熱材が溶融炉心に直接接触する場合においても、耐熱材により溶融炉心を保持できるよう耐熱材の材質や厚みを設計する方針。



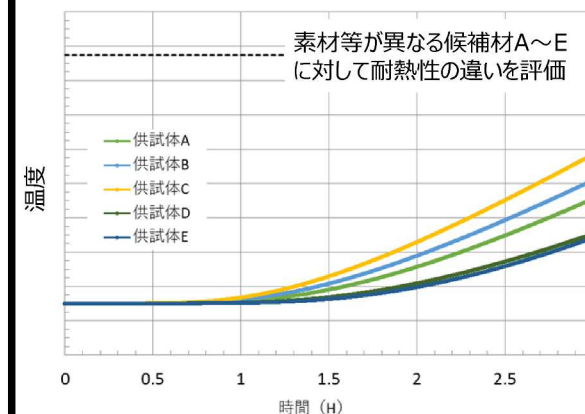
RVピットにおける耐熱材の配置イメージ



ジルコニア耐熱材（ブロック）

- **国内のサプライチェーン構築及び供給信頼性確保の観点から、耐熱材の国産化に取り組市中。**これまで、実機適用を見据えた材料選定、試作・検証試験等を実施し、成立性確認済。
- 要求を満足した材料から、実績や調達性等の観点も考慮し**ジルコニア性耐熱材の候補材を選定済。**引き続き、長期安定性や耐放射線性確認試験等の各種検討に取り組市中。

項目	耐熱材の主な要求機能
耐熱性	熔融炉心を一定時間熔融侵食することなく保持できること
	熔融炉心を一定時間保持した時の耐熱材の裏側温度を躯体の要求温度以下とすること
断熱性	熔融炉心の保持期間中の温度変動に対して、低い熱伝導率を維持すること
耐侵食性	熔融炉心との化学反応により断熱性能が劣化しないこと
耐放射線性	放射線照射に対して、化学的、熱的性能や強度の劣化がないこと
強度	RVピットを構成する外殻構造として熔融炉心の落下荷重に耐えられること



耐熱材裏面温度の推移
(熱伝導解析結果)

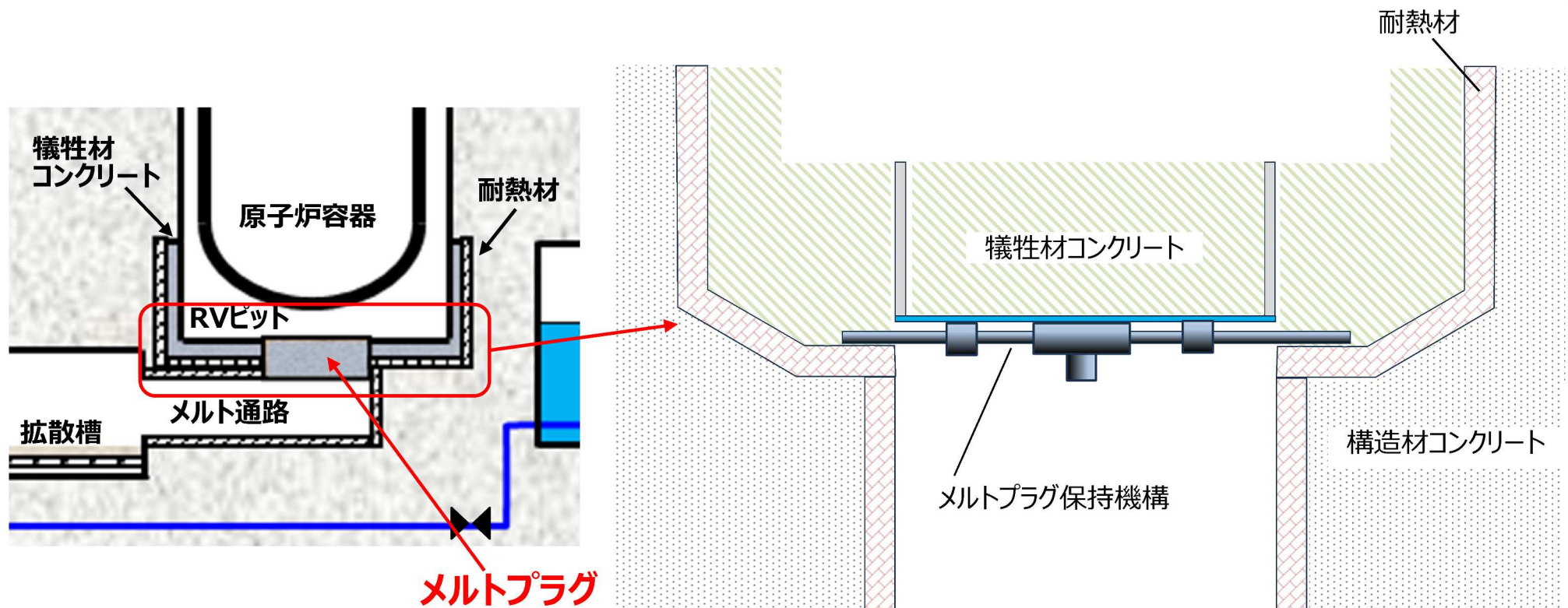
材料試験の例（侵食試験）

- メルトプラグの設計要件に対する設計方針は以下の通り。

要件①：溶融炉心がメルト通路経由で拡散槽に流出するための流出口となること

・・・材質は犠牲材コンクリートと同じとし、溶融炉心が**全量落下するまで、RVピットで保持**できるように**メルトプラグの厚みを設計**する方針。

また、メルトプラグの貫通後、溶融炉心が速やかに流出する形状・面積とし、メルトプラグの下部は耐熱材で覆わない設計とする方針。

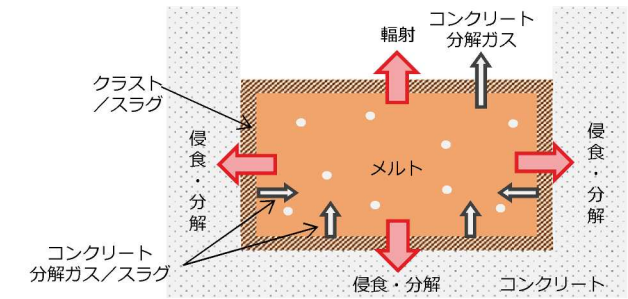


RVピットにおけるメルトプラグの構造イメージ

- 「**熔融炉心の保持と低融点化・低粘性化**」について、主要な構成要素がそれぞれの設計方針等を踏まえ設計された結果、RVピット等が設計要件を満足することを**解析コード等を用いて確認**する方針。

■ RVピット等で生じる重要物理現象および解析コードの妥当性確認

- ✓ 熔融炉心の層状態（補足1）
- ✓ 熔融炉心と犠牲材コンクリート混合物の組成や物性変化（補足1）
- ✓ 犠牲材コンクリートの侵食異方性（補足2）
- ✓ 犠牲材コンクリートへの対流伝熱やその他構造物へのふく射



RVピットでのMCCI評価モデルの例

⇒ **上記の重要物理現象を適切に取扱い可能な解析コードを用いる。加えて、解析コードにより、これまで実施されている実験の再現解析を行い、解析コードの妥当性を確認する。**

■ 犠牲材コンクリートや耐熱材に求められる機能に関わる物性の取得

- ✓ 組成、強度、密度、熱物性（融点、比熱、熱伝導率、融解潜熱等）
- ⇒ **各種文献で実施されている実験結果等も参考に、不足するデータがあれば必要に応じて確認する。**

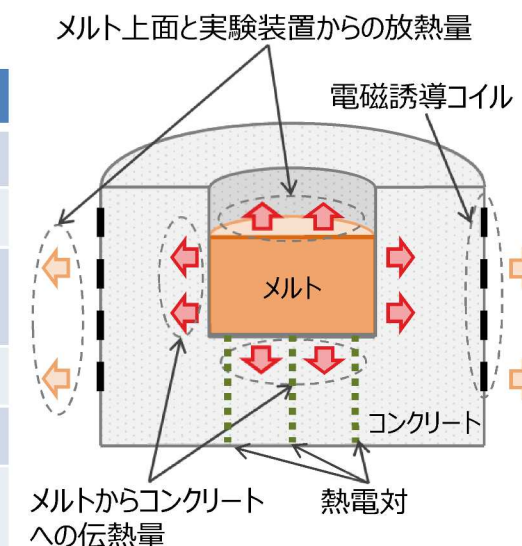
RVピット等で生じる重要物理現象を再現可能な解析コードに、犠牲材コンクリートや耐熱材の物性等のデータをインプットすることで、RVピット等の主要な構成要素がそれぞれの設計要件等を満足することを確認する。

- RVから流出した溶融炉心は、犠牲材コンクリートの侵食が進むとコンクリート由来の成分も含まれることで、熱伝導率や粘度が変わり、犠牲材コンクリートへの熱伝達が変わるため、犠牲材コンクリートの侵食速度に影響が生じると想定される。
- また、溶融炉心の層状態が異なると、犠牲材コンクリートと接触する溶融炉心の組成が変わるため、犠牲材コンクリートの侵食速度に影響が生じると想定される。

⇒ RVピットでの溶融炉心保持に係る知見として、以下に示すようなMCCI実験にて、様々な溶融炉心の組成、層状態に対するコンクリート侵食速度影響が分析されている。

MCCI実験の例^[3]

実験	ケース	装置	溶融物	コンクリート	ドライ/ウェット条件
コンクリートの挙動や鉛直方向の侵食を分析する目的で実施された往年の主なMCCI実験					
BETA	v5.1~3	2D	金属	Siliceous	ドライ
SURC	1~4	1D	酸化物 または金属	Limestone, Siliceous, Basaltic, 等	ドライ
MACE	M0~4	2D	酸化物	Limestone/Common-Sand	ウェット
水平方向の侵食やクラスト形成による侵食への影響を分析する目的で実施された近年の主なMCCI実験					
OECD/MCCI (CCI)	1,2,3	2D	酸化物	Limestone/Common-Sand または、Siliceous	ドライ→ウェット
VULCANO	VB-U1~7	2D	酸化物	Siliceous	ドライ

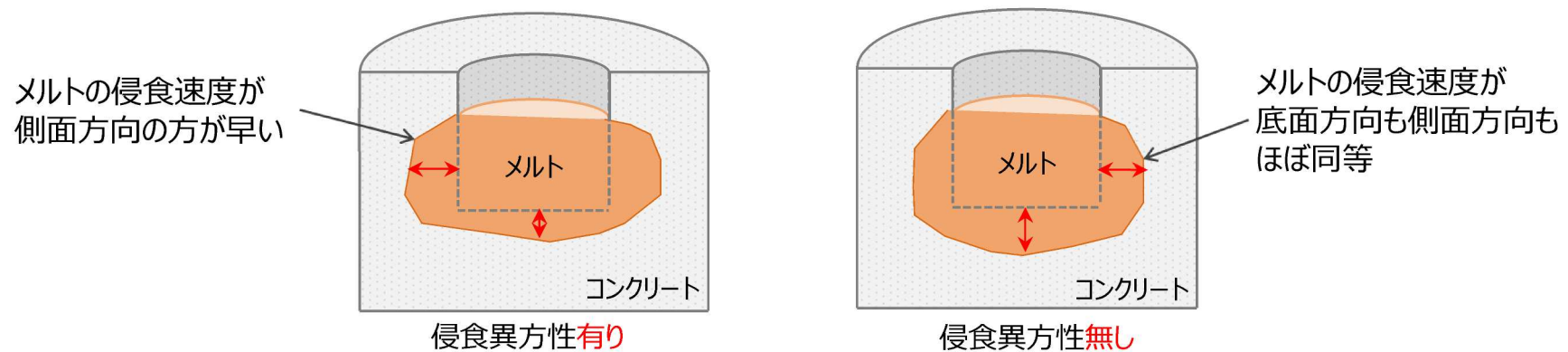


MCCI実験(2D)装置イメージ

[3] : "State-of-the-Art Report on Molten Corium Concrete Interaction and Ex-Vessel Molten Core Coolability" NEA/CSNI/R(2016)15.

- RV内から流出した溶融炉心はRVピットの底面及び側面に敷設した犠牲材コンクリートを侵食していくが、底面と側面で侵食速度に差異（異方性）が出る可能性がある。
- ⇒ 各種MCCI実験にて、コンクリートの種類によっては底面に比べ側面の侵食が進む侵食異方性が発生していることが確認されている。

MCCI実験のコンクリート侵食イメージ



OECD/MCCI (CCI)試験^[4]における侵食異方性の有無

実験ケース	溶融物	コンクリート	侵食異方性
CCI-1	酸化物	Siliceous (US)	有り
CCI-2	酸化物	Limestone/Common-Sand	無し
CCI-3	酸化物	Siliceous (EU)	有り

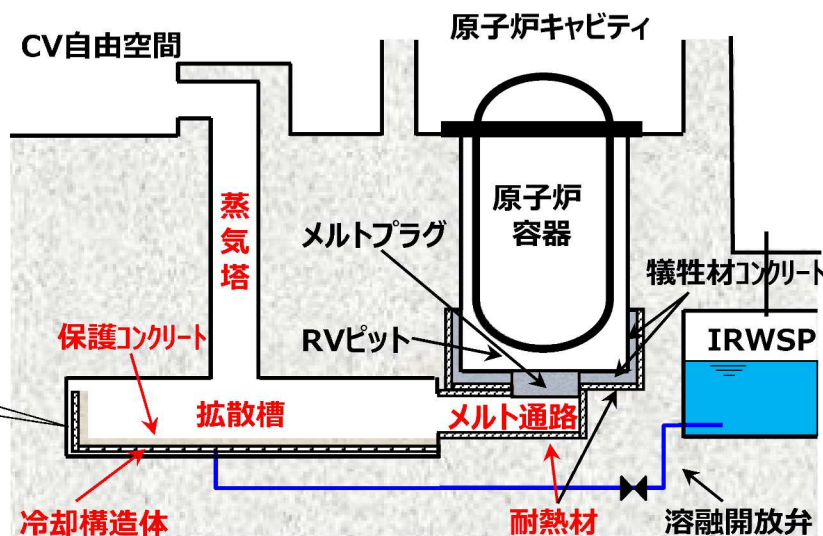
[4] : M. T. Farmer, et. al., "OECD MCCI Project Final Report", OECD/MCCI-2005-TR06, 2006.

熔融炉心の拡散・冷却

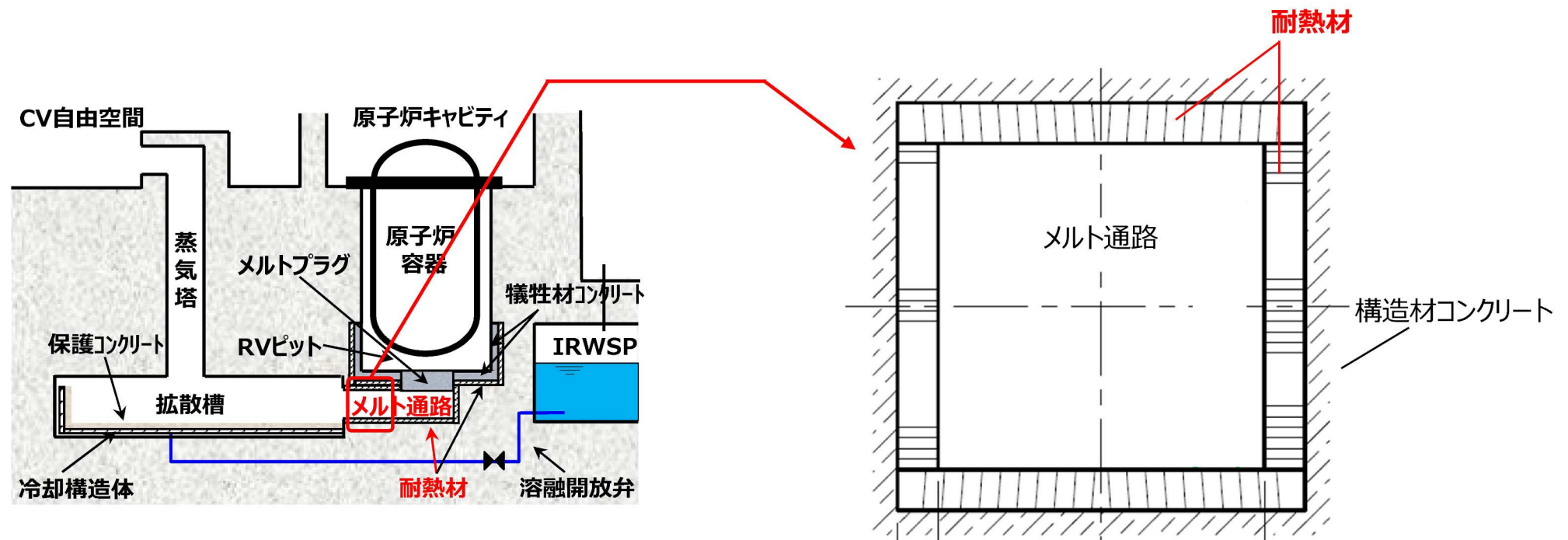
- 拡散・冷却に係る主要な構成設備の機能は、溶融炉心をRVピットから**拡散槽へ導き**、低融点化・低粘性化された溶融物を**広く拡散させて冷却し**、**その際発生する水蒸気をCV雰囲気へ放出すること**である。
- 上記を達成するべく主要な構成設備に対して、それぞれ設計要件を定める。

主要な構成設備	設計要件
メルト通路	①RVピットで低融点化・低粘性化された溶融炉心を、その状態を保ちつつ 拡散槽に導く こと
拡散槽	①溶融炉心を 拡散槽全体に拡げ 、注水により溶融炉心を 上下面から冷却 できること ②溶融炉心を 拡散槽内に保持 できること
蒸気塔	①溶融炉心が拡散槽に流入する前に、蒸気塔を通じてCVスプレイ水等が流入しないこと ②溶融炉心により発生する水蒸気を拡散槽から放出できること

冷却構造体を介して下面から除熱し、拡散槽の外周部にあるIRWSPから注水・冠水させ、最終的には溶融炉心を上下面から冷却する



- メルト通路の設計要件に対する設計方針は以下の通り。
- 要件①：RVピットで低融点化・低粘性化された溶融炉心を、その**状態を保ちつつ拡散槽に導くこと**
…メルトプラグから溶融炉心が流出後に溶融炉心が通過する通路であり、**RVピットと拡散槽を接続する。溶融炉心から構造材コンクリートを保護するため、耐熱材をメルト通路に敷設する方針。**



メルト通路における耐熱材の配置案イメージ（断面図）

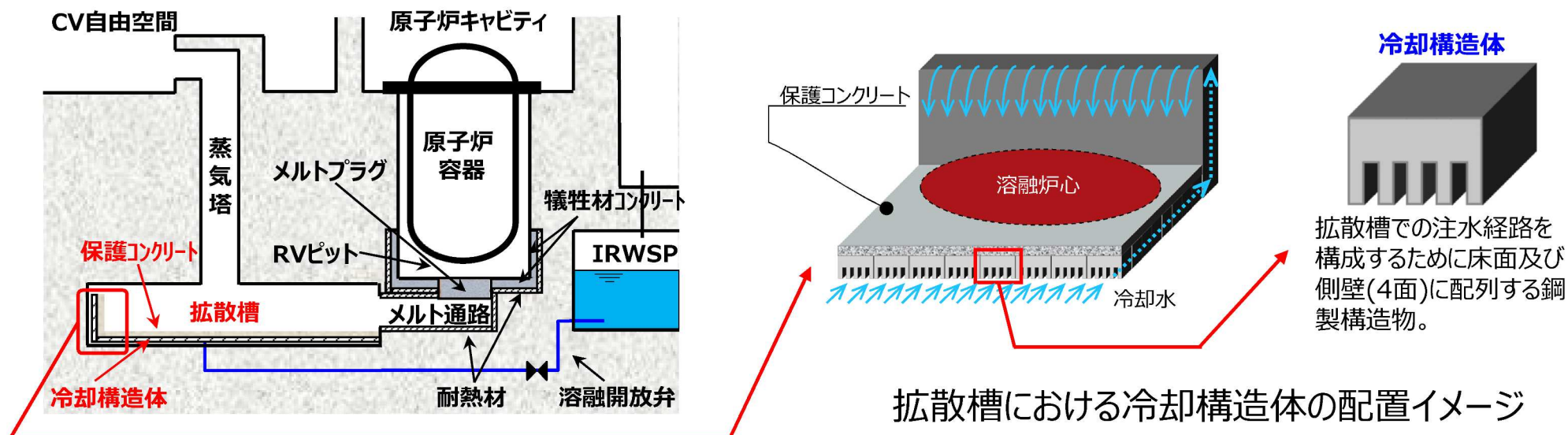
- 拡散槽の設計要件に対する設計方針は以下の通り。

要件①：溶融炉心を拡散槽全体に拡げ、**注水により溶融炉心を上下面から冷却**できること

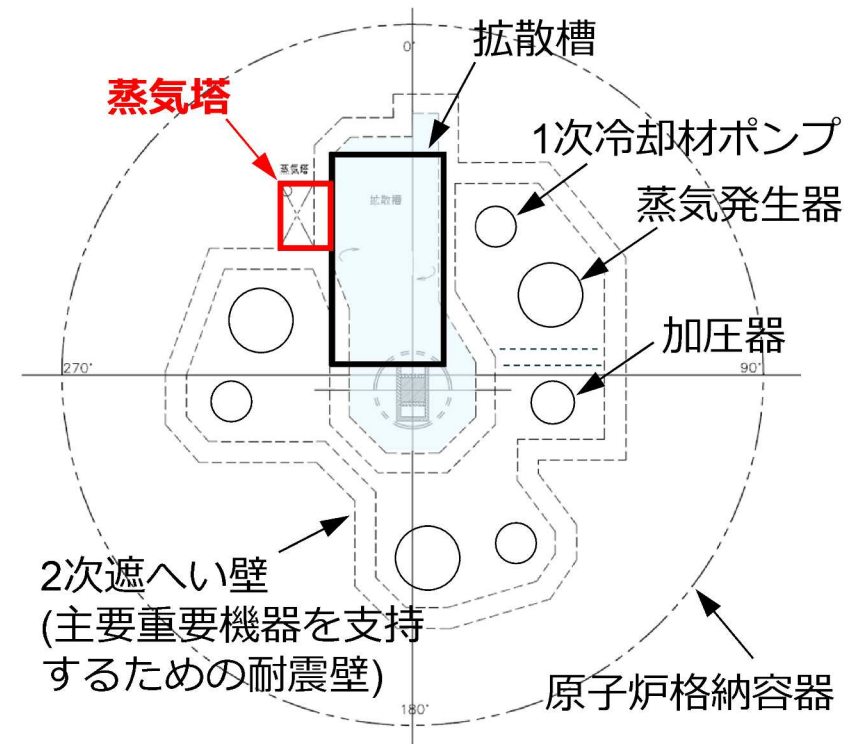
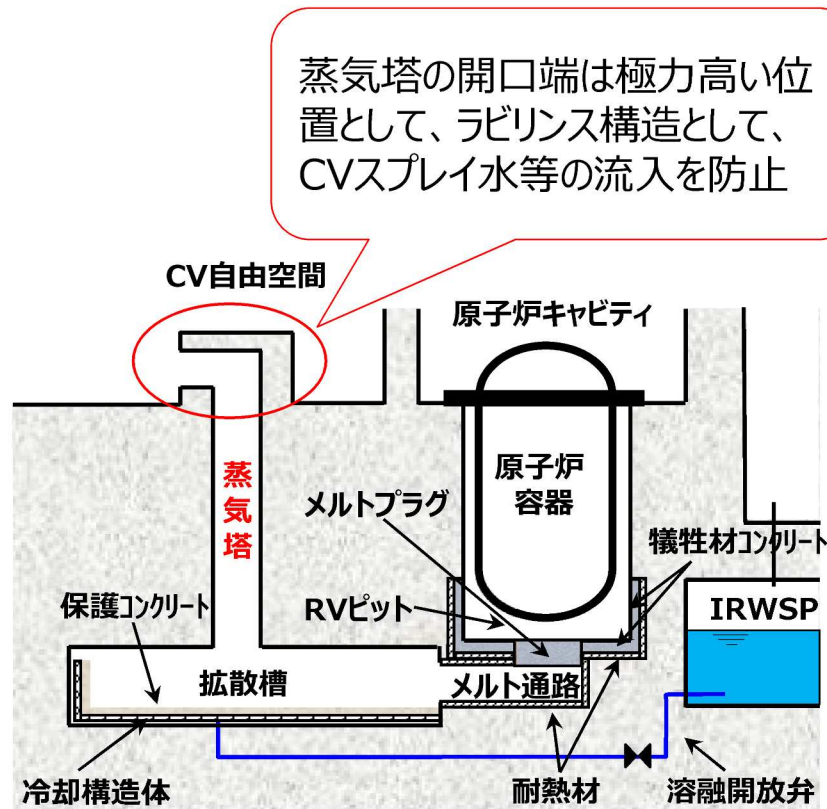
- ・・・拡散槽内に**冷却構造体を設置し、除熱性能の高い冷却チャンネル**を冷却構造体下面に設ける方針。また、冷却水は冷却チャンネルを通過後、冷却構造体の外周部頂部から拡散槽上面に注水される構造とし、溶融炉心の上面からの冷却により崩壊熱を除去できるよう**拡散槽の床面積を設計**する方針。なお、注水開始から拡散槽上面への流入まで、一定の時間遅れを持たせることで、溶融炉心が拡散槽内で拡がる時間を確保する。

要件②：溶融炉心を拡散槽内に保持できること

- ・・・注水開始以前において、冷却構造体が溶融炉心に直接接触しないよう、敷設する**保護コンクリートの厚さを設計**する方針。また、冷却構造体と拡散槽上部の構造材コンクリートは、溶融炉心からの熱等に対しても有意な強度低下がない設計とする方針。



- 蒸気塔の設計要件に対する設計方針は以下の通り。
- 要件①：溶融炉心が拡散槽に流入する前に、蒸気塔を通じてCVスプレイ水等が流入しないこと
…蒸気塔出口をラビンス構造等にして、**CVスプレイ水等の流入を防止する**方針。
- 要件②：溶融炉心により発生する水蒸気を拡散槽から放出できること
…拡散槽内で発生する水蒸気を適切に放出できるよう**蒸気塔の流路を確保した設計**とする方針。



蒸気塔のCV内における配置イメージ

- 「溶融炉心の拡散・冷却」について、主要な構成要素がそれぞれの設計方針等を踏まえ設計された結果、拡散槽等が設計要件を満足することを**解析コード等を用いて確認**する方針。

■ 拡散槽等で生じる重要物理現象および解析コードの妥当性確認

- ✓ 溶融炉心の拡散（補足 1）
- ✓ 溶融炉心の上面冷却（補足 2）
- ✓ 拡散槽冷却構造体の下面からの冷却（補足 3）

⇒ **上記の重要物理現象を適切に取扱い可能な解析コードを用いる。加えて、解析コードにより、これまで実施されている実験の再現解析を行い、解析コードの妥当性を確認する。**

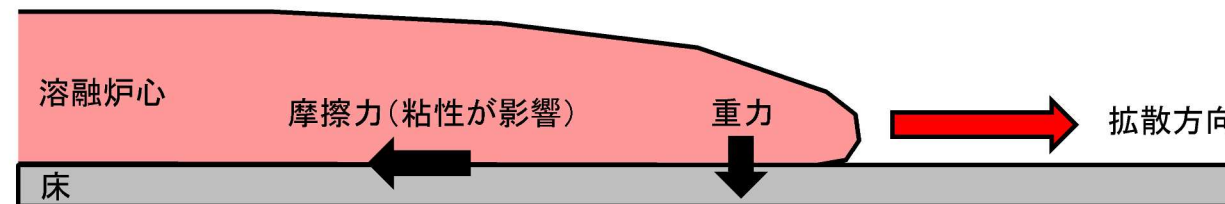
■ 冷却構造体に求められる機能に関わる試験データ等の取得

- ✓ 下面からの冷却性能、冷却チャンネルにおける流動抵抗等

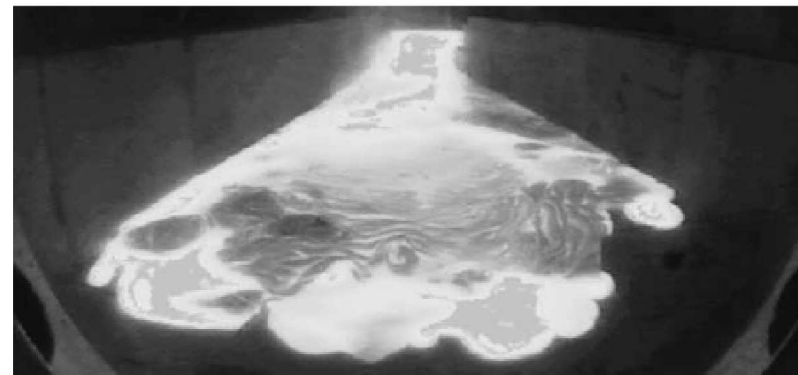
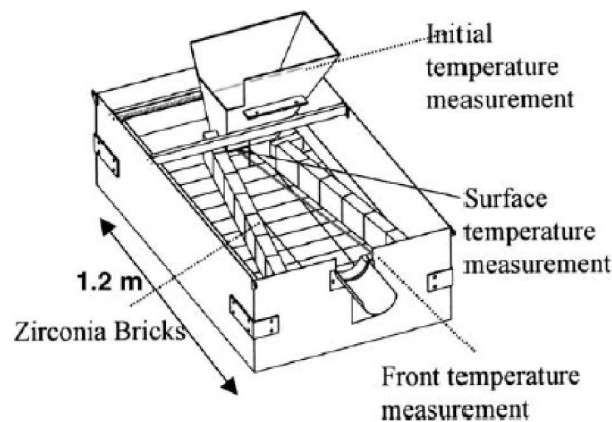
⇒ **各種文献で実施されている実験結果等も参考に、不足するデータがあれば必要に応じて確認する。**

拡散槽等で生じる重要物理現象を再現可能な解析コードに、耐熱材や冷却構造体、RVピットで低融点化・低粘性化された溶融炉心の物性等のデータをインプットすることで、拡散槽等の主要な構成要素がそれぞれの設計要件等を満足することを確認する。

- メルトプラグの開放後、溶融炉心はメルト通路を通して拡散槽へと流出する。
拡散槽での溶融炉心の冷却のため、溶融炉心がメルト通路、拡散槽内を滞りなく拡散する必要がある。
- 溶融炉心は重力を駆動力とした水平方向の流れによって拡散していく。
重力による拡散は粘性の影響が大きいいため、RVピット内で溶融炉心に犠牲材コンクリートを溶かし込み、溶融炉心を低粘性化させている。また、低融点化により溶融炉心が広がる前に凝固することを防ぐ。
- VULCANO 実験等において、溶融物の拡散挙動が確認されている。



溶融炉心拡がりに対する支配要因の例



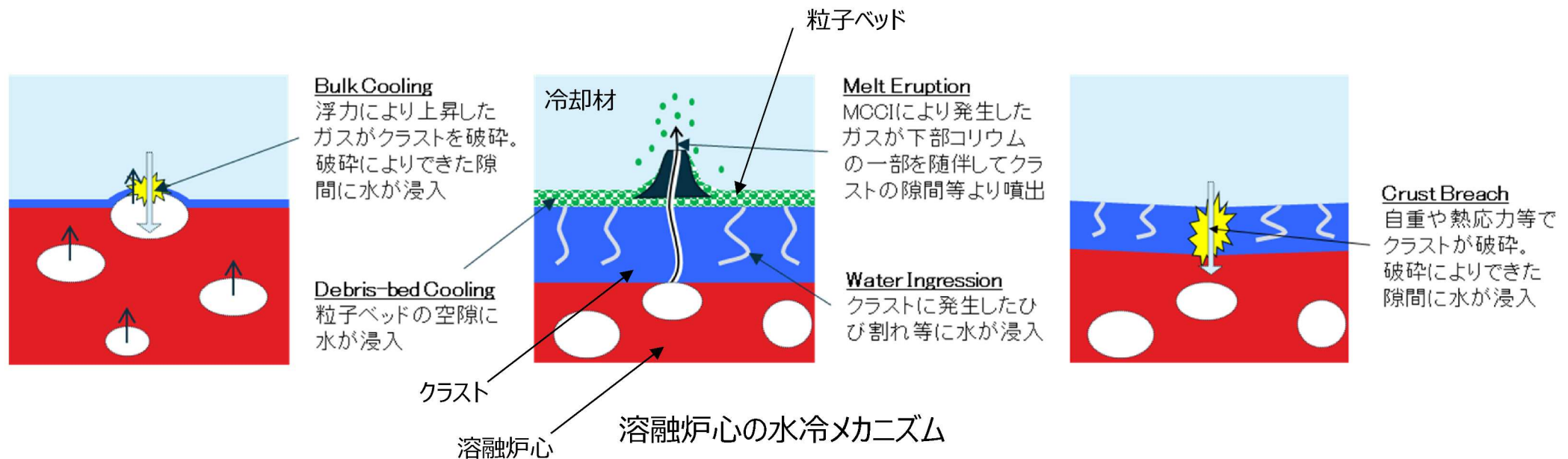
溶融物組成

組成	割合
UO ₂	44wt%
ZrO ₂	23wt%
SiO ₂	21wt%
FeO _x	12wt%

犠牲材と混合した溶融物の拡散挙動に関するVULCANO試験の例^[5]

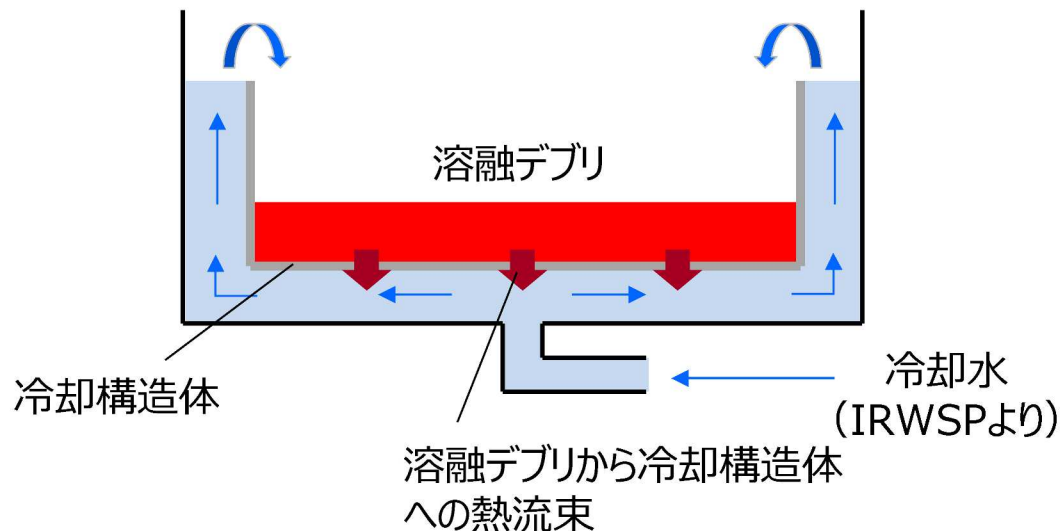
[5] : C. Journeau, et. al, "Ex-vessel corium spreading: results from the VULCANO spreading tests", Nuclear Engineering and Design 223 (2003) 75-102.

- 溶融炉心の崩壊熱のうち上方へ伝わる熱を、溶融炉心注水系により注入した冷却材で除去する。溶融炉心を上面から水冷する際、溶融炉心と冷却水の界面にクラストが形成されることで水冷が阻害される可能性がある。
- この溶融炉心の水冷について、OECD/MCCIプロジェクト^[4]による知見が参考になる。OECD/MCCIプロジェクトは、溶融炉心の冷却性に関する課題解決のために実施されたプロジェクトであり、SSWICS実験やCCI実験がその一環で実施されている。ウェット条件の実験の主要な目的の一つは溶融炉心の水冷の有効性を確認することであり、以下のような水冷メカニズムが挙げられる。

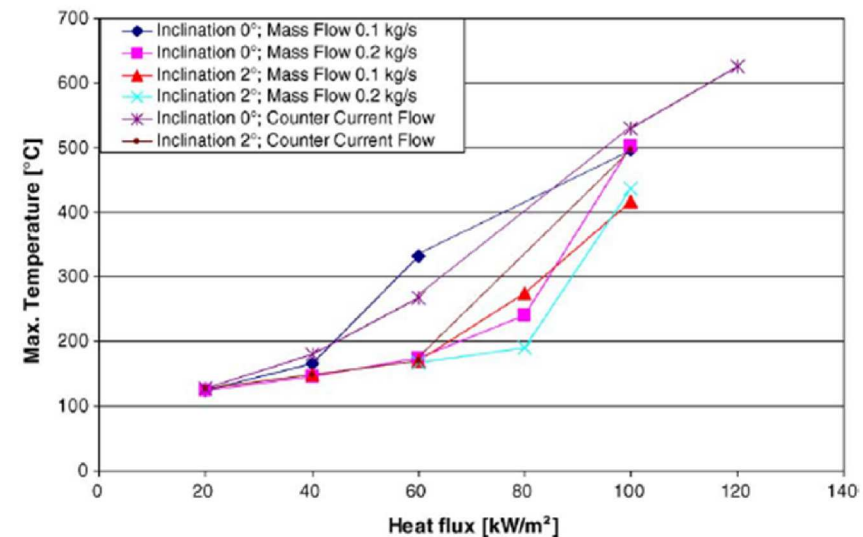


[4] : M. T. Farmer, et. al., "OECD MCCI Project Final Report", OECD/MCCI-2005-TR06, 2006.

- 保護コンクリートが溶融した場合、溶融炉心の崩壊熱のうち下方へ伝わる熱を、溶融炉心注水系により注入した冷却材で除去する。この際、溶融炉心を適切に除熱できるように、拡散槽冷却構造体の下面は除熱性能を考慮した形状とする。
- この拡散槽冷却構造体の下面からの水冷については、EPR型コアキャッチャの拡散槽冷却構造体の下面による除熱能力を確認する目的で実施されたBENSON実験^[6]の知見が参考になる。
- 本実験は、いくつかの条件（流路傾斜、冷却水流量、水と蒸気の流れの向き（同方向、逆方向））における、冷却構造体上面加熱に対する下面からの水冷を模擬して実施されており、最大 $120\text{kW}/\text{m}^2$ の下面熱流束に対しても、十分な冷却性能を発揮し、冷却構造体の構造温度が安全な範囲に維持されることが確認されている。



拡散槽冷却構造体のイメージ



下面熱流束に対する冷却構造体温度の変化^[6]

[6] : M. Fischer, "Demonstration of the Heat Removing Capabilities of the EPR Core Catcher", Nuclear Engineering and Design 235, 2005.