

「模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発」の進捗状況概要

平成 24 年 9 月 24 日
日本原子力研究開発機構

1 平成 24 年度主要目標

- デブリ特性の把握：炉内でのデブリ生成状況の推定結果を提示する。また、(U,Zr)O₂ 系模擬デブリの硬度データを取得するとともに、MCCI 生成物に対する検討手順を示す。
- デブリ処置技術の開発：デブリ処理に係るシナリオ検討に必要なデータおよび検討条件の設定の考え方を整理する。また、既存処理技術の適用性検討に係るデータ蓄積を図り、技術的課題を提示する。

2 平成 24 年度の進捗状況

2.1 デブリ特性の把握(2-③-1)

- ① 福島情報の調査・整理
 - ・炉内情報及び炉内解析 PJ からの情報収集を適宜実施中である。
- ② 模擬デブリ作製条件の検討
 - ・TMI-2 事故処理の情報を基に1F デブリ取出に用いられる機器類を推定し、それらの機器の特徴から機器開発に影響する物性値を特定、物性値整理表を作成した。尚、物性値及び模擬試験体等の考え方について、適宜、メーカー各社と協議し、コメントを反映。また、これらの成果は、模擬デブリを用いた特性評価へ反映している。
 - ・国内外の研究機関との情報交換を通じて MCCI 生成物に係る技術情報を収集した。

研削加工の概念図

切削温度、硬さ、切削抵抗、工具摩耗、引張強さ、切屑処理性、伸び、切屑処理性

(K, ρ)^{-0.5}

取出し機器	主な対象	形状	粒径	密度	硬さ	弾性率	曲げ強さ	破壊じん性	熱伝導率	比熱	融点	溶解度
①カッピング用ツールA (衝撃破壊)	塊状デブリ			○		○	●	○				
②カッピング用ツールB (せん断)	ピン状構造物				●	●	●	●				
③カッピング用ツールC (溶融切断)	板状の構造物			●					●	●	●	○
④燃料回収用ツール (換み取り)	粒子状デブリ	○	○	●								
⑤吸引システム (固液輸送)	粒子状デブリ	○	○	●								
⑥コア・ポリング装置 (研削)	塊状デブリ			●	●	●	○	●	●	●	●	

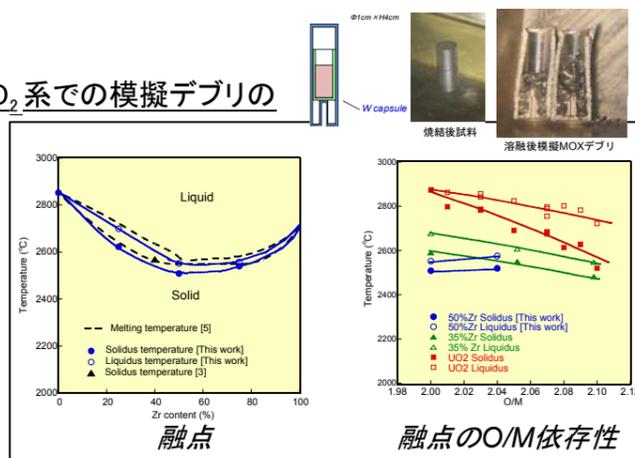
●： 機器設計に大きな影響を与える物性値。(実デブリサンプルにおける測定の可能性も考慮)
○： その他の物性値で代替可能または推定が困難な物性値。

注) 本表は現時点での暫定版であり、今後の新しい知見により変更が生じる可能性があります。

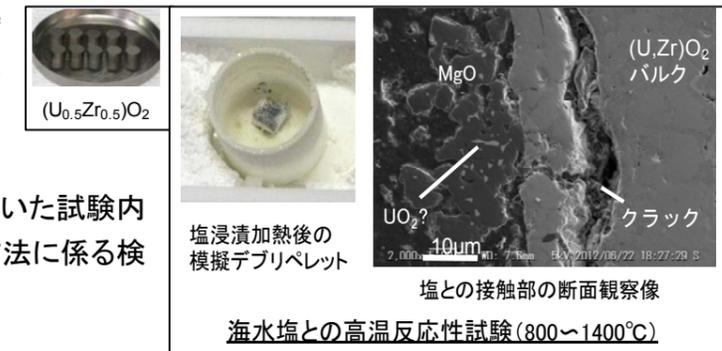
新たに取得すべき物性 SA研究等による知見も活用

③ 模擬デブリの特性評価

- ・(U,Zr)O₂ 系模擬デブリに加え、(Pu,U,Zr)O₂ 系での模擬デブリの基礎物性(融点、膨張率、熱伝導等)を取得中。
- ・(U,Zr)O₂ 系模擬デブリの機械的物性データについて取得準備中。
- ・福島特有事象の把握として、(U,Zr)O₂ 系模擬デブリを用いた海水塩との高温反応に係る基礎データを取得した。また、



海水塩との高温反応時におけるデブリ表面での Mg、Ca の固溶化や腐食生成ガス (HCl, SO_x) の発生について検討中。



④ TMI-2 デブリとの比較

- ・ JAEA 内保管の TMI-2 デブリを用いた試験内容の検討及び JAEA 施設間輸送方法に係る検討を実施中。

⑤ 実デブリ特性の推定

- ・ 今後、上記の検討結果を踏まえ、炉内デブリの種類とその特性に係る暫定リストを作成する。

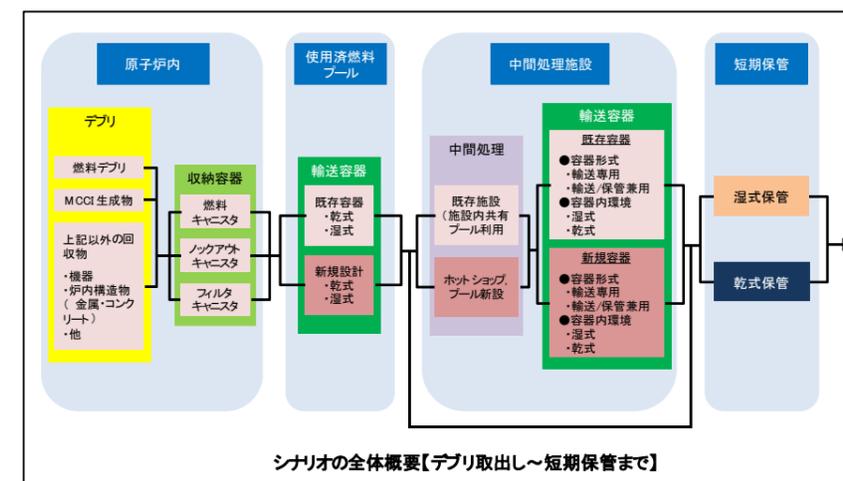
⑥ 国際協力(共同研究)の検討

- ・ KIT との MCCI に係る情報交換会議を開催し、MCCI 反応等に関する情報を入手した。その他、欧米研究機関へ共同研究を打診し、内容の調整を実施中。

2.2 デブリ処置技術の開発(2-③-3)

① シナリオ検討に向けた技術的要件の整理

- ・燃料デブリの取出しから処置(保管・処理・処分等)について、処置シナリオ素案を作成した。
- ・一部の工程(デブリ貯蔵)について得失評価を実施した。
- ・シナリオ案の比較検討に必要なデータ(物性値、評価用の諸数値等)を収集中。また、検討条件(比較評価項目・評価指標等)の設定の考え方を整理中。



② 既存処理技術の適用性検討

- ・難溶性デブリの分析技術として、各種溶解法に係る基礎データを取得中。これまでに ZrO₂、ZrSiO₄ を用いた基礎データを取得。
- ・模擬デブリを用いて、湿式・乾式処理技術の基礎データを取得中(電力中央研究所との共同実施項目を含む)。

3 まとめ、H24 年度下期の予定

各研究開発は、概ね計画通り進捗している。H24 年度下期は引き続き、(U,Zr)O₂ 系模擬デブリを用いた硬度、B₄C 反応等の基礎データ取得、シナリオ検討条件(比較評価項目・評価指標等)の設定の考え方の整理等を進める。

平成24年度主要目標

- ・デブリ特性の把握：炉内でのデブリ生成状況の推定結果を提示する。また、(U, Zr)O₂系模擬デブリの硬度データを取得するとともに、MCCI生成物に対する検討手順を示す。
- ・デブリ処置技術の開発：デブリ処理に係るシナリオ検討に必要なデータおよび検討条件の設定の考え方を整理する。また、既存処理技術の適用性検討に係るデータ蓄積を図り、技術的課題を提示する。

平成24年度の実施内容

1. デブリ特性の把握

① 福島情報の調査・整理

- ・炉内情報を収集し、炉内状況把握・解析SWTと連携を図り、デブリ生成状況を推定する。

② 模擬デブリ作製条件の検討

- ・現場ニーズを把握し物性リスト案を作成、硬度データ取得に向けて模擬デブリ作製条件を暫定的に設定する。
- ・MCCI生成物に係るアプローチ検討を行い、MCCI生成物で想定すべきデブリの範囲を暫定的に設定し、模擬デブリ作製条件とスケジュールを提示する。

③ 模擬デブリの特性評価

- ・機械的特性(硬度等)取得に着手し、(U,Zr)O₂系模擬デブリの強度データを取得する。
- ・福島特有の事象を把握する基礎データを取得する。(模擬デブリと海水塩、B₄C反応)。
- ・その他デブリ特性評価については、現場ニーズ等も踏まえ柔軟に対応する。

④ TMI-2デブリとの比較

- ・JAEA内保管のTMI-2デブリを用いた試験内容を検討し、実施施設を特定するとともに輸送方法の検討に着手する。また、実デブリ・サンプル取扱い時の課題検討を開始する。

⑤ 実デブリ特性の推定

- ・上記の検討結果を反映し、炉内デブリの特性リスト(暫定版)を作成する。

⑥ 国際協力(共同研究)の検討

- ・海外のコリウム・データベースへのアクセスや情報交換会議を開催する。

2. デブリ処置技術の開発

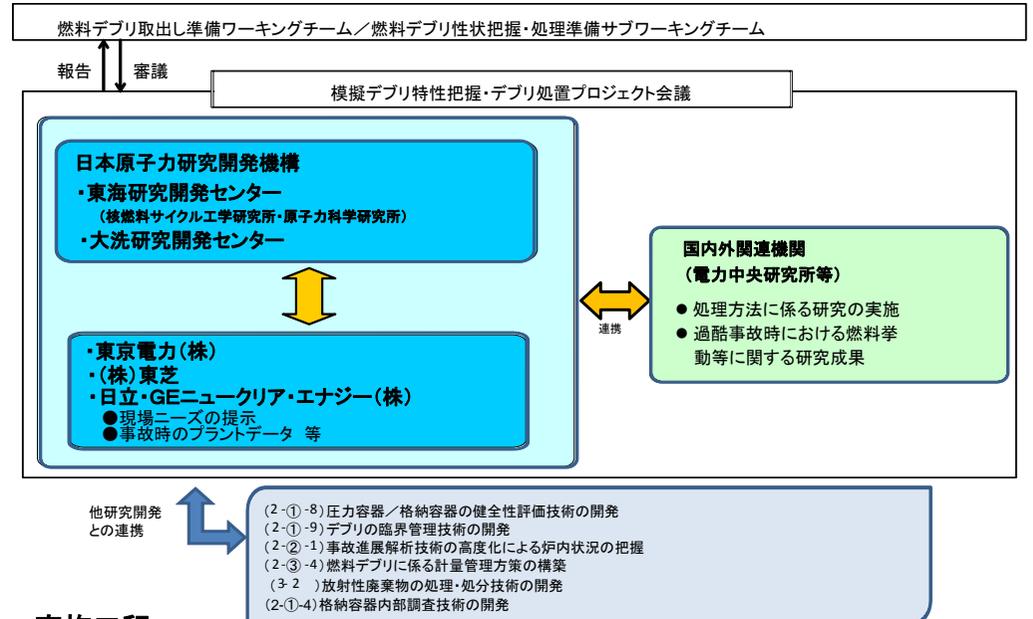
①シナリオ検討に向けた技術的要件の整理

- ・シナリオ検討に必要なデータ(物性値、評価用の諸数値等)および検討条件(比較評価項目・評価指標等)の設定の考え方を整理する。

②既存処理技術の適用性検討

- ・各種模擬デブリを用いて、湿式・乾式処理技術の評価を進め、技術的な課題点と上記技術要件の整理を受けた計画を提示する。

実施体制



実施工程

事項/年度	2011	2012年度				2013
		4月	7月	10月	1月	
1. デブリ特性の把握		炉内情報を収集、炉内状況把握・解析SWTと連携を図り、デブリ生成状況を推定				
①福島情報の調査・整理		サンプリング・取出し方法の調査				
②模擬デブリ作製条件の検討		模擬デブリ作製条件検討、MCCIデブリ条件・計画検討				
③模擬デブリの特性評価		設備整備、基礎データ取得				
④TMI-2デブリとの比較		機械的物性(硬度)の測定、福島特有事象の影響評価				
⑤実デブリ特性の推定		実施内容検討及び実施施設の選定、準備作業				
⑥国際協力の検討		実デブリの特性リスト(暫定版)の作成				
2. デブリ処置技術の開発		技術調査				
		国際協力の調整(海外コリウムデータベースへのアクセス、情報交換会議、他)				
		技術検討				
		シナリオ検討に向けた技術的要件の整理、既存処理技術の適用性検討				

1. 「模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発」実績(9月時点): 1/3

1. デブリ特性の把握

① 福島情報の調査・整理

• 炉内情報及び炉内解析Pjからの情報収集を適宜実施中。

② 模擬デブリ作製条件の検討

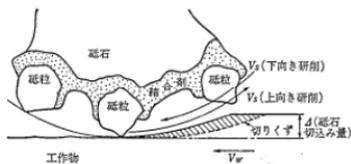
• TMI-2事故処理の情報を基に1Fデブリ取出に用いられる機器類を推定した。また、それらの機器の特徴を分類し、機器開発に影響する物性値を特定、整理表を作成した。

• 一例として、コアボーリング装置等の研削機器の場合、熱特性(熱伝導度、比熱、融点)に加えて、硬さ、弾性率、破壊じん性が主要な物性値となることを確認。これらの物性値及び模擬試験体等の考え方について、適宜、メーカ各社と協議し、コメントを反映。これらの成果は、模擬デブリを用いた特性評価へ反映している。

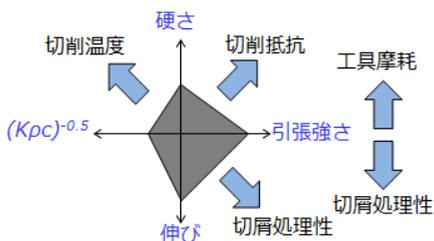
• 国内外の研究機関(CEA, KIT, JNES)との情報交換を通じてMCCI生成物に係る技術情報を収集した。これらを基に研究開発計画を策定中。



TMI-2で用いられたボーリングビット

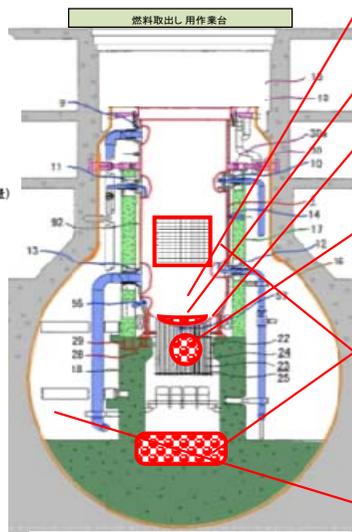


研削加工の概念図



切削性を表すレーダーチャート

[8] 山根, 関谷, 精密工学会誌, 70(3), (2004), 407-411.



1号機の溶融燃料の分布状態の推定 (2,3号機についても別途推定)

[2] "原子カプラーの機器搬出方法" 特許番号: 4276808
[3] 東京電力株式会社, "MAAPコードによる炉心・格納容器の状態の推定", 平成24年3月12日(2012)

取出装置と燃料デブリの相互作用の推定結果

取出し機器	主な対象	形状	粒径	密度	硬さ	弾性率	曲げ強さ	破壊じん性	動的破壊じん性	熱伝導度	比熱	融点	熔融潜熱
①カッティング用ツールA (衝撃破壊)	塊状デブリ			○		○		●	○				
②カッティング用ツールB (せん断)	ピン状構造物				●	●		●					
③カッティング用ツールC (溶融切断)	板状の構造物			●						●	●	●	○
④燃料回収用ツール (掻み取り)	粒子状デブリ	○	○	●									
⑤吸引システム (固液輸送)	粒子状デブリ	○	○	●									
⑥コア・ボーリング装置 (研削)	塊状デブリ			●	●	●	○	●		●	●		

注) 本表は現時点での暫定版であり、今後の新しい知見により変更が生じる可能性があります。

新たに取得すべき物性

SA研究等による知見も活用

●: 機器設計に大きな影響を与える物性値。(実デブリサンプルにおける測定の可能性も考慮)
○: その他の物性値で代替可能または推定が困難な物性値。

取出し工程	主成分	形状	取出し機器
①溶融した炉心下部構造物(炉心支持板、制御棒案内管等)の撤去	構造材材料: SUS	構造材が溶融変形	• カッティング用ツールB • 燃料回収用ツール • 吸引システム
②圧力容器底部に堆積したデブリの取出し	(U,Zr,Fe)O _{2-x} , U-Zr-Fe-Alloy	粒子状デブリ	• 燃料回収用ツール • 吸引システム
③圧力容器底板の撤去	圧力容器材料: 鉄鋼	構造材が溶融変形	• カッティング用ツールC • 燃料回収用ツール • 吸引システム • コア・ボーリング関係
④制御棒ハウジング、ICMハウジングの撤去	構造材材料: SUS デブリ: (U,Zr,Fe)O _{2-x} , U-Zr-Fe-Alloy	構造材が溶融変形、デブリが固着	• カッティング用ツールB • 燃料回収用ツール • 吸引システム
⑤MCCI生成物の取出し	MCCI生成物: SiO ₂ , Fe _x SiO _y , (U,Zr,Fe)O _{2-x} , (U,Zr)SiO _{4-x}	粒子状デブリ、溶融固化したデブリ	• カッティング用ツールA • 燃料回収用ツール • 吸引システム • コア・ボーリング関係
⑥アニュラス部に堆積したデブリの取出し	シュラウド: 鉄鋼 デブリ: (U,Zr,Fe)O _{2-x} , U-Zr-Fe-Alloy	粒子状デブリ	• カッティング用ツールC • 吸引システム
⑦冷却系や格納容器内に分布したデブリの回収	(U,Zr,Fe)O _{2-x} , U-Zr-Fe-Alloy	コロイド状デブリ、微細デブリ	• 炉外(Ex-Vessel)燃料取出し

1Fにおける燃料取出し工程・取出機器の評価推定

1. 「模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発」実績(9月時点): 2/3

1. デブリ特性の把握

③ 模擬デブリの特性評価

• (U,Zr)O₂系模擬デブリに加え、(Pu,U,Zr)O₂系(4%及び8%Pu-MOXとZrO₂より調整)での模擬デブリの基礎物性(融点、膨張率、熱伝導度等)を取得した。

• (U,Zr)O₂系模擬デブリの機械的物性データを取得準備中。

• 福島特有事象の把握として、(U,Zr)O₂系模擬デブリを用いた海水塩との高温反応の基礎データを取得した。また、高温反応時における、デブリ表面でのMg、Caの固溶化や腐食生成ガス(HCl, SO_x)の発生について検討中。現在、B₄Cの影響について基礎データを取得中。

④ TMI-2デブリとの比較

• TMI-2デブリを用いた試験内容を検討中。

• TMI-2デブリの輸送/保管用キャスクに関する検討を実施中。

⑤ 実デブリ特性の推定

• 今後、上記検討結果を踏まえて、炉内デブリの種類とその特性に関する暫定リストを作成する。

⑥ 国際協力(共同研究)の検討

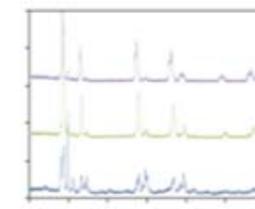
• KITと情報交換会議を開催し、MCCI反応等に関する情報を入手した。MCCI生成物の特性はコンクリートやデブリ等の組成の他、注水等の事故時の経緯に大きく影響を受けることから、これらを考慮して試験計画を策定中。

• 欧米研究機関(CEA、INL)への共同研究を打診、内容を調整中。

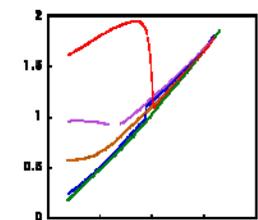
• OECD/NEAの国際熱力学データベースPJに関する情報を収集。



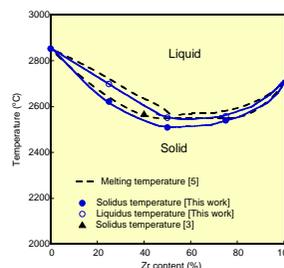
模擬デブリの外観



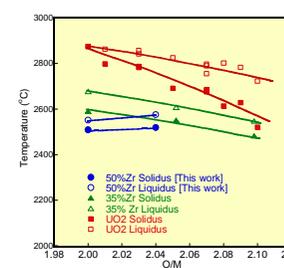
X線回折パターンの変化



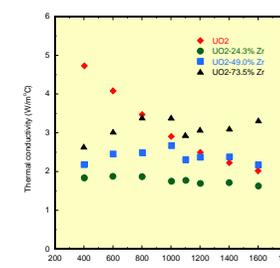
降温時の長さ変化



融点

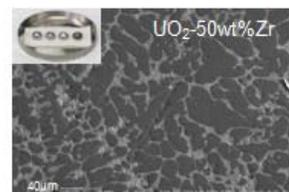


融点のO/M依存性



熱伝導率

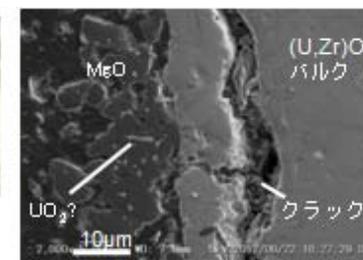
UO₂、MOXデブリの熱特性



α-Zr(O)+UO₂+U、デンドライト状



塩浸漬加熱後の模擬デブリペレット

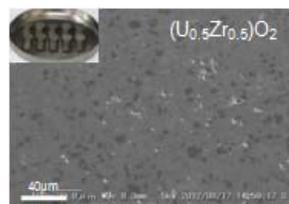


塩との接触部の断面観察像

海水塩との高温反応性試験(800~1400°C)

海水塩: NaCl + MgCl₂·xH₂O + MgSO₄·yH₂O + CaSO₄·zH₂O + KCl

塩の熱分解で腐食性ガス(HCl, SO_x)発生、MgO堆積
パルク内部への拡散は認められない(ペレットの塩浸漬)
CaとMgの一部が固溶することを確認(粉末混合系)



面心立方晶+正方晶+単斜晶

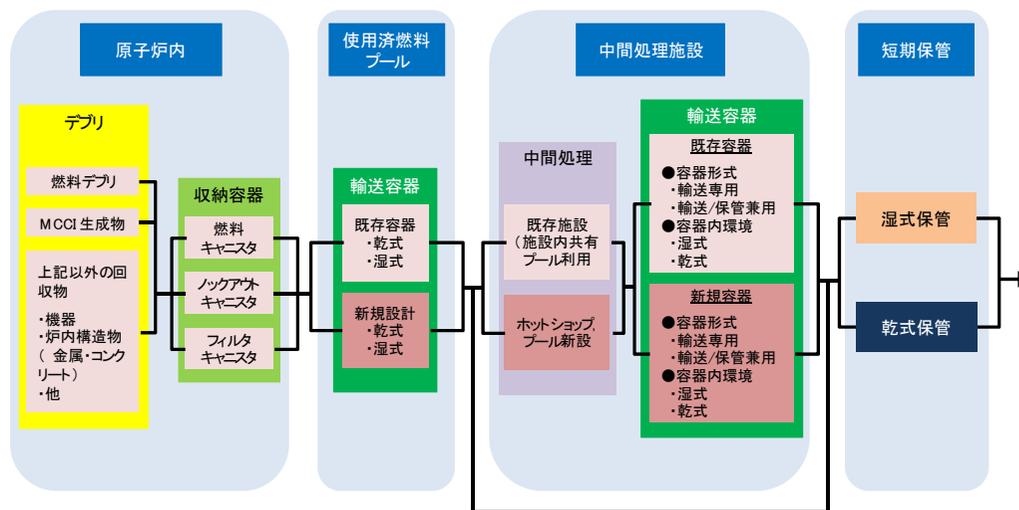
•アーク溶解法: UO₂+Zr (+ZrO₂) ⇒ 完全溶融
•焼結法: UO₂+ZrO₂ (+Zr) ~1750°C ⇒ ~95%TD

1. 「模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発」実績(9月時点): 3/3

2. デブリ処置技術の開発

①シナリオ検討に向けた技術的要件の整理

- TMI-2の実績を参考に、燃料デブリの取出しから処置(保管・処理・処分等)について、処置シナリオの素案を作成した。
- 各シナリオの定性的な得失評価等を実施中であり、全体シナリオを構成する各工程の一部(デブリ貯蔵工程)を対象に、想定される複数の方式案について得失を評価した。
- シナリオ案の比較検討に必要なデータ(物性値、評価用の諸数値等)を収集中。また、検討条件(比較評価項目・評価指標等)の設定の考え方を整理中。



シナリオの全体概要【デブリ取出し～短期保管まで】

②既存処理技術の適用性検討

- 難溶性デブリの分析技術として、アルカリ溶融法、オートクレーブ溶解法等の適用性について検討を実施中。これまでに、試験装置の整備を完了し、 ZrO_2 、 $ZrSiO_4$ を用いたコールド試験により基礎データを取得した。
- 湿式/乾式処理: U模擬デブリを用いた溶解性試験を実施中。(電中研との共同実施項目を含む)

難溶性デブリの分析技術の検討状況

溶融塩との反応による手法

アルカリ溶融法、アンモニウム塩融解法

➢融解した過酸化ナトリウム、炭酸ナトリウムの強い反応性により、難溶性試料を分解し、酸に可溶性の物質を生成する。

➢放冷後、塩酸によって溶解試験を行っているが分解反応が十分進んでいれば、原理的に硝酸にも可溶。

- 1) Na_2O_2 , 850°C, 5 min → ZrO_2 、 $ZrSiO_4$ とも完全溶解
- 2) $NaOH$, 500°C, 1.5 h → ZrO_2 は溶解液が白濁、溶解率75%、 $ZrSiO_4$ は完全溶解
- 3) Na_2CO_3 , 1000°C, 1 h → ZrO_2 、 $ZrSiO_4$ とも溶解液が白濁、残渣を NH_4HSO_4 にて融解処理すると完全溶解
- 4) NH_4HSO_4 , 400°C, 30 min → ZrO_2 は完全溶解、 $ZrSiO_4$ は溶解液が白濁

➡ 溶解法として有望、模擬デブリを使用し系統的にデータを取得

加圧加熱状態での強酸による溶解

オートクレーブ溶解法

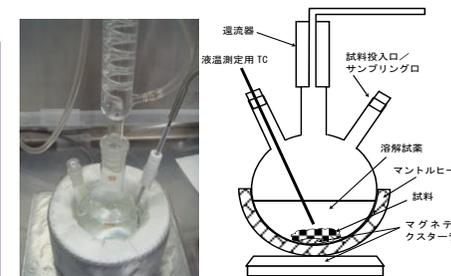
➢溶融塩を使用する方法に比べ低温である

➢王水に溶解することになり、一度の溶解操作で完了する。

電気炉
圧力容器
テフロン製容器
王水
水
 ZrO_2 、 $ZrSiO_4$

➢180°C、72hにて、 ZrO_2 、 $ZrSiO_4$ とも、溶解率15%程度

➡ 溶解操作に適用は困難



溶解試験装置



溶解残渣量比較
(U割合大 ⇔ Zr割合大)

2. 「模擬デブリを用いた特性の把握、デブリ処置技術の開発」 H24年度下期の予定

<今後の計画>

1. デブリ特性の把握

① 福島情報の調査・整理

- 東電殿から入手するMAAP解析情報等を参考とし、1Fで生成しているデブリ特性を推定する。

② 模擬デブリ作製条件の検討

- MCCII生成物に関する研究計画を策定する。

③ 模擬デブリの特性評価

- ウラン模擬デブリについて機械的特性(硬度等)の測定を行う。
- Uを用いた小規模(gオーダー)の試験により、 B_4C の高温反応データを取得する。

④ TMI-2デブリとの比較

- TMI-2デブリを用いた試験計画を策定し、利用施設を特定する。
- TMI-2デブリの輸送/保管用キャスクに関する情報を整理する。

⑤ 実デブリ特性の推定

- 実デブリの推定に着手する。

⑥ 国際協力(共同研究)の検討

- 仏国CEAとのMCCIIに関する情報交換を実施する。

2. デブリ処置技術の開発

① シナリオ検討に向けた技術的要件の整理

- シナリオ検討に必要なデータを収集し、検討条件(比較評価項目・評価指標等)の設定の考え方を整理する。

② 既存処理技術の適用性検討

- デブリ分析技術及び湿式・乾式処理技術の評価を進め、技術的な課題点と上記技術要件の整理を受けた計画を提示する。