日本原子力学会 2020年秋の大会

サンプスクリーン下流側影響の LOCA後炉心長期冷却に係る検討

(4) 炉心入口部の冷却材供給流路に関する2体燃料集合体試験

*東 慧,緒方智明,福田龍,坂田英之 (三菱重工業)

白土 雄元 (MHI NSエンジニアリング)

2020.9.17

中野 利彦 (関西電力)

三菱重工業株式会社

本検討は、関西電力、北海道電力、四国電力、九州電力、日本原子力発電による電力共同委託の成果の一部である



目次



- 1. 背景
- 2. 全体計画
- 3. 基礎試験
 - ・下部ノズル2体(2019年度成果)
 - ・下部ノズル+下部グリッド(2020年度成果)
- 4. 燃料集合体2体を用いた流動試験
- 5. 1/4下部ノズル試験(2020年度成果)
- 6. 今後の計画
- 7. まとめ



1. 背景

1. 背景(1/3) -サンプスクリーン下流側影響の概要-

🙏 三菱重工



1. 背景(2/3) 大LOCA時の被覆管温度&炉内流速の挙動 🚣 三菱重工



1. 背景(3/3) -再循環モード RV内流動 低温側配管大破断の例- 🙏 三菱重工



- 炉心への冷却材供給の駆動力
 - ▶ ダウンカマと炉心の水頭差が駆動力となる:約20kPa (① ② ③)
 - 炉心有効長下端より上のダウンカマ水頭(①)
 - ボイドを含む炉心有効長における水頭(②)
 - 炉心発生蒸気によるループ圧損(③:炉心出口からSGを経由し蒸気が破断口から流出)
- クライテリア:デブリによる炉心圧損増加(@炉心入口流速10mm/s程度) < 約20kPa*</p>

*高温側配管大破断では許容圧損は約100kPa以上に増加。

先行する米国(PWR)での取り組み



解析及び試験による(繊維)デブリ発生源量に対する制限による長期の炉心冷却性確保





2. 全体計画

2. 全体計画

🙏 三菱重丁



2. 全体計画 【参考】代替流路(AFP)の有効性 (解析結果例)







3. 基礎試験 - 概要 -



3. 基礎試験 -試験装置(試験ループ)-





試験装置概略図



3. 基礎試験 -試験装置(テストセクション)-





3. 基礎試験 -試験条件-



【試験条件】

•流量 :炉心流速約10~30mm/s(CLB条件)

- •温度、圧力 :常温、常圧
- ・デブリ条件 :国内代表プラントのデブリ濃度を基準として投入

種類	濃度(kg/m ³)
繊維デブリ	約0.4
粒子デブリ	約1.2





3. 基礎試験

・下部ノズル2体(2019年度成果)



3. 基礎試験:下部ノズル2体-試験条件-



【試験ケース】

- ▶ 下部ノズルへのデブリ影響を確認
- ▶ 下部ノズル、下部ノズル-テストセクションのギャップをパラメータとした試験を実施

ケース No.	下部ノズル間 ギャップ	下部ノズル流路孔	テストセクション間 ギャップ	体系	P/F (粒子デブリ量 /繊維デブリ <u>量</u>)	
1	Open	Close	Close			
2	Open	Open	Close	下部ノズル	約3	
3	Open	Close	Open	(2体)	(国内プラント相当)	
4	Open	Open	Open			





(2019年度成果)

3. 基礎試験:下部ノズル2体-試験結果-



- ▶ ケース1、ケース3:下部ノズル間ギャップが閉塞せず、デブリ投入開始から 終了まで一定の流量が確保された
- ▶ ケース2、ケース4:ギャップ部に加え、下部ノズル流路孔の一部が開口しており、冷却水の供給流路となった





3. 基礎試験

・下部ノズル+下部グリッド2体



3. 基礎試験:下部ノズル+下部グリッド2体-試験条件-

🙏 三菱重工

【試験ケース】

- ▶ 下部ノズルに加え、グリッド部(+(短尺)燃料棒)へのデブリ付着状況を確認
- ▶ 粒子デブリと繊維デブリの重量比(P/F比)を変えて感度を確認







<u>供試体外観</u>

3. 基礎試験: 下部ノズル+下部グリッド2体-試験結果(1/3)- よ三菱重工



- ▶ ケース5はケース4に比べ、グリッドへのデブリ付着に相当する分の差圧増加が見られた
- ▶ しかしながら、ケース5における差圧増加量は1kPa以下

詳細な付着状況は下記の通り

- ✓ 下部ノズル間ギャップ:非化学デブリを投入しても閉塞なし
- ✓ 下部グリッド間ギャップ:グリッドストラップの凹凸にデブリが捕捉されギャップの大半が閉塞
- ✓ 下部グリッド内部:
- デブリ投入直後、グリッド内部の流路の一部が閉塞
- 閉塞の進行に伴いグリッド内部の流速が増加
- ・ 流速増加により流路にデブリが捕捉されにくくなる(一定の流路が確保される)

3. 基礎試験:下部ノズル+下部グリッド2体-試験結果(2/3)- よ三菱重工



- 差圧はP/F=10(ケース6)>P/F=3(ケース5)であるが、その差は高々0.2kPa
- 本試験の性質上、デブリの作成・投入等を同一条件で試験したとしてもデブリの堆積状況は試験ごとに異なり、差圧の測定結果は試験毎にある程度バラつきが生じると考えられる。
- 上記のことを勘案し、今回の試験結果はケース間で差圧が僅かに異なっているものの両者は不確か さの範囲で一致しており、本試験体系におけるP/Fの影響は軽微と判断できる。

3. 基礎試験:下部ノズル+下部グリッド2体-試験結果(3/3)- 🙏 三菱重工

デブリ付着状況 <u>ケース5</u> 【試験終了後の試験体観察】

ALC: N AN AN







ノズル側面はデブリ 付着が有意でないが、 グリッド側面はデブリ 付着が確認される。





グリッド・燃料棒の断面

にもデブリが閉塞せず

安定した冷却材の流路

が確保されている箇所 (光る部分)が確認。

👤 三莽重 T

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験



4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験装置-



★ 三菱重工

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験条件-

【試験条件】

- ·流量 :炉心流速 約10mm/s(CLB再循環時流速条件)
- •温度、圧力 :常温、常圧
- ・デブリ条件 :国内代表プラントのデブリ総量(濃度)を投入

種類	デブリ総量	濃度
繊維デブリ (ロックウール)	約1.6 kg/FA	約0.4 kg/m ³
粒子デブリ (塗装、潜在粒子、 ケイ酸カルシウム)	約4.9 kg/FA	約1.2 kg/m ³

※P/F(粒子デブリ量/繊維デブリ量)=3

🙏 三 菱 重 丁

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験結果(1/3)- ^{*} ^{*} ⁻ ^{*} ⁻ ^{*} ⁻ ⁻ ⁻ ^{*} ⁻



- 燃料集合体間の差圧は最大で約0.6kPa
- CLB時の許容圧力損失(約20kPa)に対して十分な余裕あり
- 燃料集合体内に安定した流路パスが確保されることを確認
- ・ 所定のデブリ量投入後、流速を増加(10→40mm/s)させ圧損が流量にほぼ比例することを確認。

クライテリア : 炉心の流路圧損(@炉心入口流速10mm/s程度) < 約20kPa

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験結果(2/3)- ^{*} ^{*} ⁻ ^{*} ⁻ ^{*} ⁻ ⁻ ⁻ ^{*} ⁻ ^{*} ⁻ ^{*} ⁻



- 燃料集合体間の差圧は最大で約0.6kPa
- CLB時の許容圧力損失(約20kPa)に対して十分な余裕あり
- 燃料集合体内に安定した流路パスが確保されることを確認
- 所定のデブリ量投入後、流速を増加(10→40mm/s)させ圧損が流量にほぼ比例することを確認。

クライテリア : 炉心の流路圧損(@炉心入口流速10mm/s程度) < 約20kPa

4. 燃料集合体2体を用いた流動試験 -試験結果(3/3)- ^人三菱重工





5. 1/4下部ノズル試験



5.1/4下部ノズル試験 -試験装置-



(テストセクション)





国内2体試験体系断面 vs 海外試験体系(1/4)断面

🙏 三菱重工

国内2体試験体系と比較してデブリ投入後の安定した冷却流路パスが確保されにくいと予想。 ①ノズル間ギャップ、試験体周囲(試験容器との)ギャップが存在しない。

②スケール効果:断面が小さいため、デブリがノズル断面一様に付着し流路パスが確保されにくい。



5.1/4下部ノズル試験 -試験条件-



【試験条件】

•流量 : 炉心流速約10~30mm/s(CLB条件)

- ·温度、圧力 :常温、常圧
- ・デブリ条件 :繊維デブリ濃度:0.04kg/m³(繊維デブリ総量:25g)
 粒子デブリ濃度:0.4 kg/m³(粒子デブリ総量:250g)

【試験ケース】

▶ 下部ノズルアダプタープレート部に対するデブリ付着状況を確認

ケース No.	下部ノズル間ギャップ	下部ノズル流路孔	テストセクション 間ギャップ	体系	P/F (粒子デブリ量/繊維デブリ量)
7	なし	Open	Close	下部ノズル 1/4領域	約10

5.1/4下部ノズル試験-試験結果(1/2)-





※一定流量(炉心流速 約20mm/s)で制御

予想通り、デブリ投入に伴う圧損増加は 1/4断面体系 >> 2体断面体系 となった。

- 1/4下部ノズル体系では一様な流れによりデブリが運ばれ、下部ノズルの下面に一様な デブリベットが形成
- ▶ 供試体間の差圧が大幅に上昇(最終的に装置の耐圧限界200kPaに到達)
- ▶ 一方、基礎試験ケース2、4(下部ノズル2体体系)においては下部ノズル間ギャップをデ ブリが通過するため、圧損増加は1kPa以下

5.1/4下部ノズル試験-試験結果(2/2)-

★ 三菱重工







6. 今後の計画



<u>〇炉心入口部に対するパラメータ感度の把握</u>

- ▶ 基礎試験(下部ノズル+下部グリッドからなる2体体系)により 下記の非化学デブリの性状の違いに対する感度を把握
 - ・繊維デブリと粒子デブリの重量比(P/F比)
 - ・粒子デブリの粒子径、他

<u>O代替流路(バレル-バッフル流路)に関する流動試験</u>

- ▶ 化学デブリが析出後、代替流路(バレル-バッフル流路)により冷却材を供給できることを確認する必要がある
- ➤ 部分モデル試験ではバレル-バッフル流路の大きな流路孔に おいて化学デブリは閉塞せず通過することを確認済み。
- > 今後、より詳細な流動試験を実施予定

7. まとめ



- ▶ 昨年度(秋の大会)に引き続き、再循環開始直後(非化学デブ リ)における炉心入口部のデブリに対する通水性能を検討
- ▶ 実機品(下部ノズル+下部グリッド)を用いた基礎試験により、非 化学デブリを投入した際の炉心入口部の閉塞状況、及び試験パ ラメータに対する感度を確認
- ▶ また、実寸の燃料集合体を用いた試験により非化学デブリを投入しても燃料集合体内に安定した流路パスが確保され、圧損増加が許容値(20kPa)を大きく下回ることを確認した
- ▶ 今後、化学デブリが析出後において代替流路(バレル-バッフル 流路)が冷却材を供給に有効であることを確認するために流動 試験を実施予定



MOVE THE WORLD FORW>RD



【参考】全体計画 補足 再循環モード RV内流動 高温側配管大破断の例

【参考】再循環モード RV内流動 高温側配管大破断の例 🙏 三菱重工



■ 炉内への補給となる駆動力(水頭差):

・炉心有効長下端より上のダウンカマ水頭(①) – ボイドを含む炉心有効長における水頭(②)

・水頭差:低温配管破断よりも大きく、炉心を冠水させている水位を低下させないための水頭差減少の余裕(デブリ閉塞上限量の目安)も大きくなる方向。

📩 三菱重T

【参考】燃料集合体2体を用いた流動試験 補足 差圧-流量の関係 (デブリ付着前後における感度確認)

差圧-流量の関係(デブリ投入前後)



ΔP9

- デブリ投入前(供試体がクリーンな状態)及びデブリ投入後(供試体 にデブリが付着した状態)において流量を変化させ差圧を計測
- 再循環時の炉内流速(約10~40mm/s)における差圧は流量に比例





【参考】燃料集合体2体を用いた流動試験 補足 差圧-試験体系の関係

デブリ投入試験における燃料断面スケールによる圧損低下効果(概念) 🙏 三菱重工





【参考】今後の計画 補足 バレル/バッフル試験 (基礎試験 2018年度成果)

【参考】基礎試験-BB試験(2018年度成果) (1/3)





【参考】基礎試験-BB試験(2018年度成果) (2/3)



供試体の外観(写真)



○試験条件
 •流量: 一定圧力(800mmH₂O)で制御
 •デブリ濃度:実機デブリ濃度の約2倍

	濃度(kg/m ³)	
繊維デブリ	ロックウール	約0.75
粒子デブリ	塗装片	約1.9
	ケイ酸カルシウム	約0.2
	潜在粒子	約0.2
<u>化学デブリ</u>	<u>水酸化アルミニウム</u>	<u>約0.9</u>

〇計測項目:流量





【参考】試験条件 補足 非化学デブリ量のイメージ

非化学デブリ量のイメージ





(*) 繊維デブリについては、過去の社内試験より仮定。