日本原子力学会「2018年秋の大会」 岡山大学 2018.9.7

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

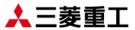
(1)最適評価コードによる炉心流路閉塞時の熱流動解析

* 寺前 哲也,福田 龍 (三菱重工業)

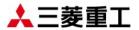
青柳 智和 (MHIニュークリアシステムズ・ソリューションエンジニアリング)

中野 利彦, 西川 武史 (関西電力)

三菱重工業株式会社



- 1. 背景•目的
- 2. 再循環サンプスクリーン下流影響(炉内)評価
- 3. LOCA後長期炉心冷却の想定されるシナリオ
- 4. 炉心入口閉塞時の LOCA 後長期冷却の評価
- 5. 解析条件
- 6. 解析結果
- 7. 炉心入口全面閉塞の仮定と代替流路(バッフル/バレル間)の有効性
- 8. 結論



- 原子炉の冷却材喪失事故(LOCA)時の破断流により、配管保温材等の破砕片等 (デブリ)がサンプ内に流れ込み、再循環冷却モードに移行後に、
 - 再循環サンプスクリーン(以下スクリーン)での目詰まり
 - スクリーンを通過した後の原子炉容器内の流路などでの目詰まり

を起こし、ECCS 機能が低下することが懸念されている

➤ LOCA時に発生するデブリ:

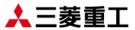
配管保温材の粉砕等	── 繊維デブリ〕 <u> ボガ デ</u>	
塗装材の粉砕・溶出等	── 繊維デブリ ── 粒子デブリ [゛] 非化学デブ	ا را
スプレイ水等による金属(Zn,Al)の溶出-	化学デブリ	

■ 米国産業界においてもスクリーン下流側のスプレイノズルやポンプシール部等の 狭隘部の閉塞による機能性への影響,炉心の閉塞による冷却性への影響について議論が継続中である

このように、デブリによる炉心閉塞問題については、

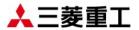
- 米国ではGSI(Generic Safety Issues) 191として、規制側と産業界との間で長年、問題解決に向けた協議が続けられている
- 国内でも原子力学会の炉心燃料の安全設計に関する技術レポートの中で、取組みが 重要な事項として挙げられている
- 本検討では、スクリーン下流側への影響のうち、炉心閉塞による冷却性に関する 熱流動解析を実施し、国内プラントへの影響につき確認することを目的とする

2. 再循環サンプスクリーン下流影響(炉内)評価の概要

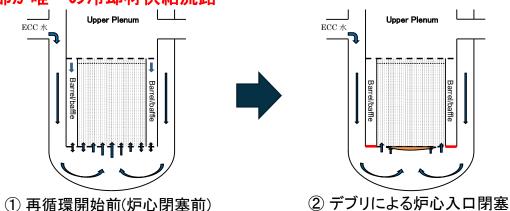


- LOCA後長期炉心冷却時, 炉心入口の閉塞が起こった場合に, 想定されるシナリオにおける炉心の熱水力挙動を解析コードによって解析し, 炉心の長期冷却の成立性を評価する
- ECCS性能評価指針
 - ECCS性能評価指針のクライテリアを満足することを確認
 - ① 最高被覆管温度が1200℃より低い
 - ② 局所最大水-金属反応量が15%以下
 - ③ 全炉心の酸化量1%未満
 - ④ 冷却可能な炉心の幾何学的形状が維持されていること
- - ⑤ 長期的な冷却が維持されること
 - 炉心の冠水状態が維持されれば長期冷却性は確保
- 再循環サンプスクリーン下流影響評価での基準:aは必須。bは目標
- a.上記の①, ②を満足しうること
 - 別途実施したクウェンチインテグラル試験等にて,再循環モードで炉心が再度露出し, 被覆管の破断が生じないことを確認済み
- b.被覆管温度が再循環冷却モードにおいて有意に増加しないこと(炉心冷却を維持)

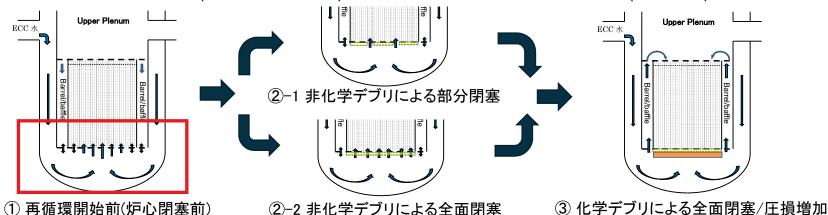
3. LOCA後長期炉心冷却の想定されるシナリオ



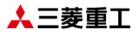
- スクリーンを通過したデブリの炉心付着の仕方で2通りのシナリオを想定
 - ケース1
 - ✓ 非化学(繊維/粒子)デブリと化学デブリが同時に炉心入口部に部分的に付着・閉塞
 - ✓ 炉心入口部が唯一の冷却材供給流路



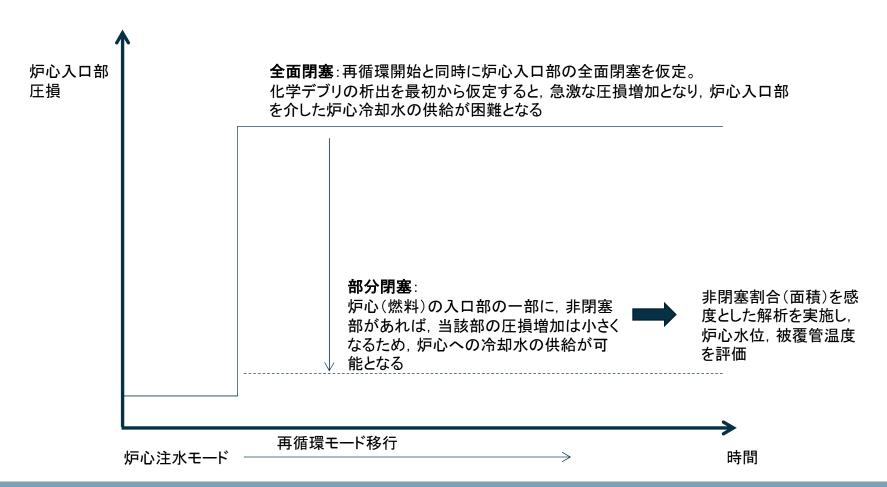
- ケース2
 - ✓ 非化学(繊維/粒子)デブリが事象前半、化学デブリは析出温度以下となる時刻以降に炉心入口部に付着
 - ✓ 流路穴の大きい箇所(バレル/バッフル間)は閉塞せず冷却材供給流路として期待(代替流路)



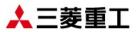
4. 炉心入口閉塞時の LOCA 後長期冷却の評価-(1)



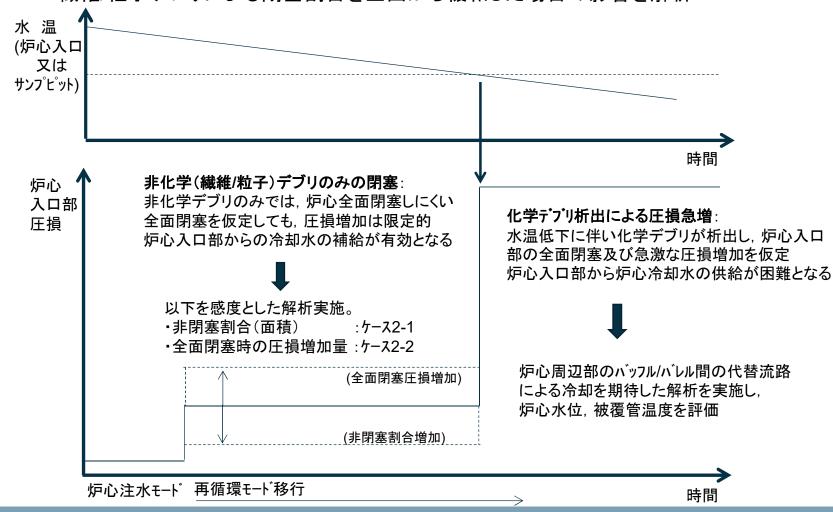
- ケース1: 非化学(繊維/粒子)デブリと化学デブリが同時に炉心入口部の一部に付着・閉塞した炉心入口の部分閉塞
 - 繊維/粒子デブリ, 化学デブリが同時に炉心入口を全面閉塞(最も厳しい仮定) ✓ 閉寒割合を全面から緩和(100%→99.8%→99.5%→)した場合の影響を解析



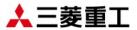
4. 炉心入口閉塞時の LOCA 後長期冷却の評価-(2)



- ケース2: 非化学(繊維/粒子)デブリが事象前半、化学デブリは析出温度以下となる時刻 以降に炉心入口部に付着
 - 繊維/粒子デブリが瞬時に炉心入口を閉塞,その後化学デブリの閉塞で圧損が急増 ✓ 繊維/粒子デブリによる閉塞割合を全面から緩和した場合の影響を解析

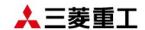


5. 解析条件



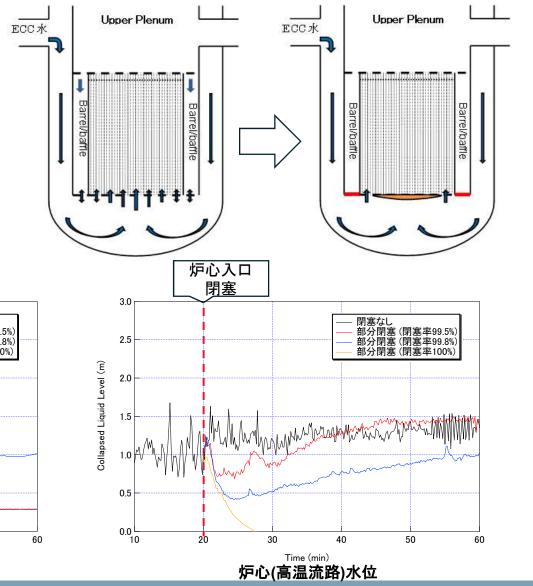
- 使用解析コード
 - 最適評価コードMCOBRA/RELAP5-GOTHIC
 - ✓ 局所的な閉塞の模擬やそのような状況下での炉心および原子炉容器内の熱水力挙動の予測
 - ✓ 炉心内流動の多チャンネルによるモデル化
- 対象プラント
 - 国内4ループPWR
- 対象とする事故事象
 - ・ 低温側配管の両端破断LOCA後の長期冷却事象 (被覆管温度評価として保守的となるケース)
- 解析条件
 - デブリによる炉心入口閉塞は再循環開始と同時に発生
 - 主要条件は国内のECCS性能評価に準じて設定

6. 解析結果 (ケース1)



②炉心入口閉塞後

- 繊維/粒子デブリと化学デブリが同時 に付着・閉塞し、ただちに圧損が急 増すると仮定
- 炉心が再ヒートアップせず冷却維持 可能な限界閉塞率を感度解析により サーベイ
- ~99.8%閉塞までは成立の見通し



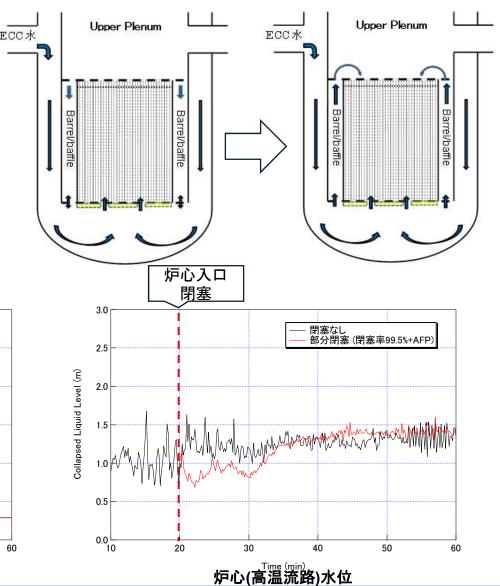
①炉心入口閉塞前

6. 解析結果 (ケース2-1:前半)

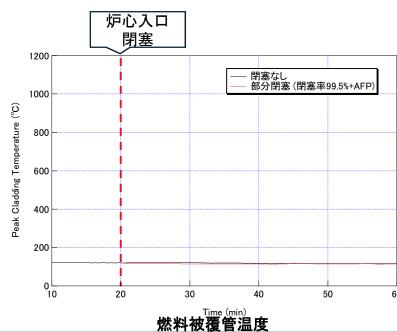
★三菱重工

②バレルバッフルの上昇流確立後

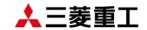
- 事象前半に非化学デブリにより<mark>部分</mark>閉塞 すると仮定
- 炉心入口部に0.5%程度の流路穴(非閉塞部)が確保されると、後半(化学デブリの析出)の前までには、被覆管の温度上昇は生じないことを確認



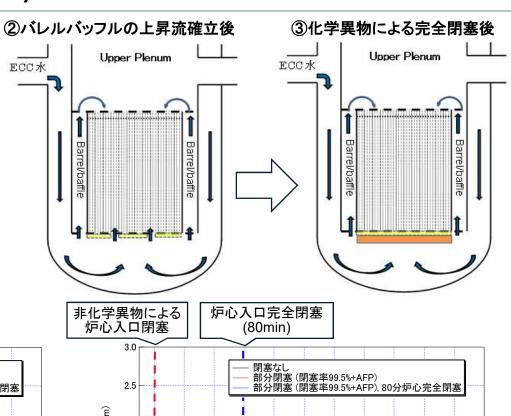
①炉心入口閉塞直後

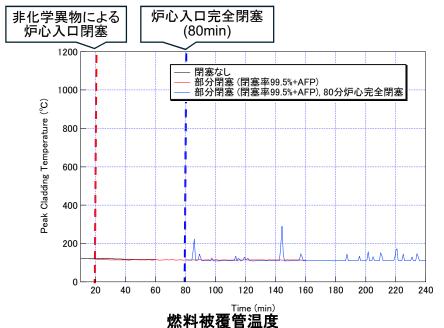


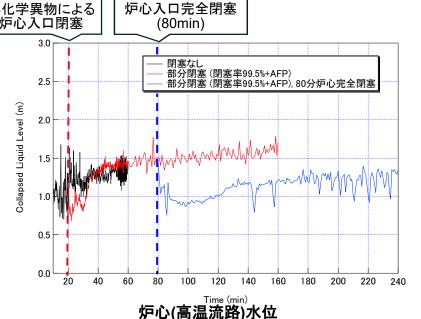
6. 解析結果 (ケース2-1:後半)



- 事象後半(再循環開始後80分を仮定) に化学デブリの析出による炉心入口部の 全面的な閉塞と大幅な圧損増加を仮定 (別途120分後の化学デブリ析出も解析)
- 炉心入口部の代替流路としての, バッフル /バレル間部からの冷却材流入により, 炉 心は上部から冷却水が供給され, 炉心 冷却は維持されることを確認



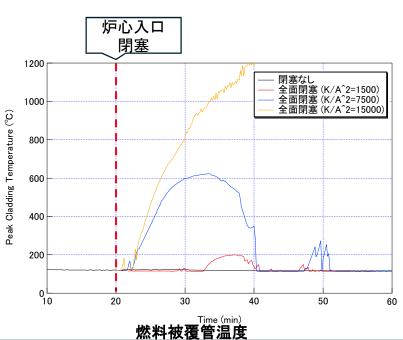


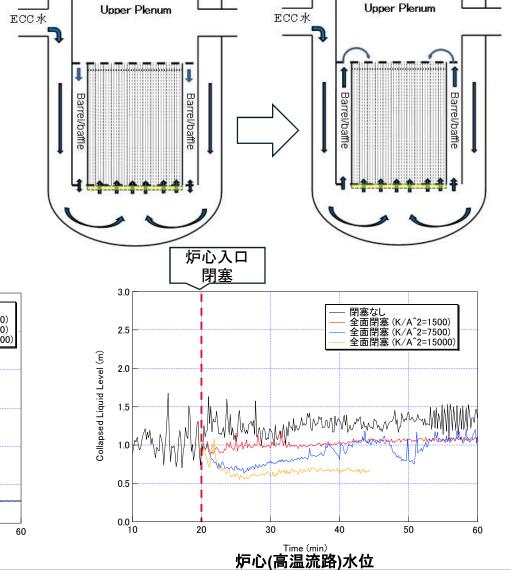


6. 解析結果 (ケース2-2:前半)



- 事象前半に非化学デブリにより全面閉塞を仮定。全面閉塞時の炉心入口圧損を 感度とした解析により被覆管温度や炉 心水位をサーベイ
- 炉心冷却成立可能な圧損の程度を確認-被覆管温度が有意に増加しない圧損
 - ~ -炉心冷却が困難(PCT>1200°C) な圧損

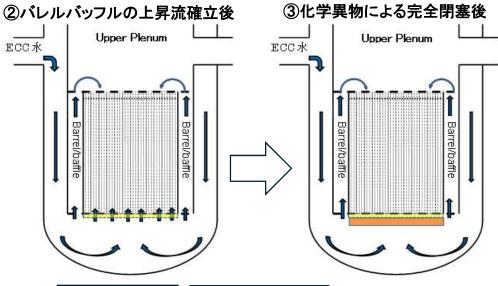


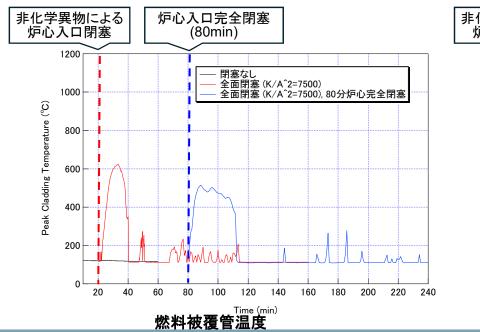


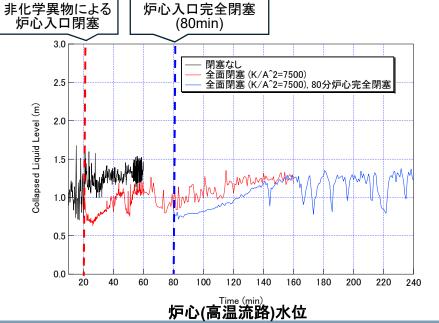
6. 解析結果 (ケース2-2:後半)



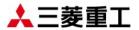
- 事象後半に化学デブリ析出による炉 心入口部の全面閉塞及び大幅な圧 損増加を仮定(ケース2-1と同様)
- バッフル/バレル間を介した代替流路が炉 心を上部から有効に冷却できることを 確認



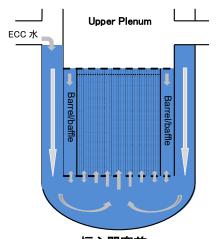




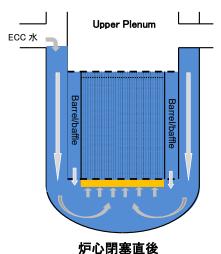
7. 炉心入口全面閉塞の仮定と代替流路(バッフル/バレル間)の有効性



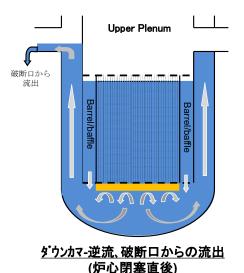
- 炉心入口部がの瞬時(ステップ状)の全面閉塞を仮定すると
- 炉心入口部の瞬時(ステップ状)の全面閉塞を仮定すると, 原子炉容器内ダウンカマー部と炉心部との水頭差が減少し, バッフル/バレル間を経由する炉心への冷却水供給が停滞する
 - ▶ この影響は、炉心崩壊熱の比較的大きい再循環直後の方で大きくなる



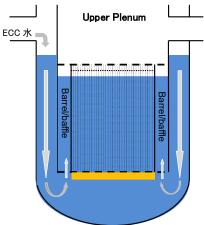
炉心閉塞前 ダウンカマ水頭により炉心下部から 冷却材が炉心へ供給される



炉心の急速な入口閉塞によりECC 注入水は、炉心入口から炉心への 給水ができなくなる。



ECC注入水は、ダウンカマーを逆流し破断口から流出。バッフル/バレル間のバイパス流路からも炉心内の冷却材が流出し、炉心水位低下。

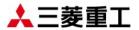


破断口からの流出停止後(ダウンカマー 水位回復途上)

ECC注入継続によりダウンカマ水位が回復に向かうが、逆流による流出により、ダウンカマー水位は炉心閉塞前より低下している。このため、ダウンカマ水頭回復までの間、バッフル/バレル間流路を経由した炉心への注水の水頭が低下し、炉心水位回の復が遅くなる

■ 再循環直後の非化学デブリの全面閉塞を緩和(ステップ状→ランプ状)できれば, ケース2-2においても, 再循環直後~化学デブリ析出の全期間において, 代替流路による冷却確保が可能

8. 結論



- ケース1: 非化学(繊維/粒子)デブリと化学デブリが同時に付着・閉塞するシナリオにおいて、部分的に閉塞していない箇所(炉心の約0.5%)からの冷却材により長期冷却維持が可能
- ケース2: 非化学(繊維/粒子)デブリが事象前半, 化学デブリは析出温度以下になって時間遅れで付着するシナリオにおいて,
 - ケース2-1 事象前半に繊維異物により部分閉塞 ✓ 部分的な開口部および代替流路からの冷却材流入の長期冷却への有効性を確認
 - ケース2-2 事象前半に繊維異物により全面閉塞✓ 繊維, 粒子デブリによる炉心入口閉塞時炉心冷却成立可能な圧損の程度を確認
- 解析の前提条件の確認:
 - ・基礎的な要素試験等で以下を確認済み(次セッション発表分)
 - ケース1: 化学デブリの析出も考慮すると部分閉塞確保を示すことは容易でない
 - ケース2: 非化学デブリのみの段階では炉心(燃料間)に流路パスの確保の見通し 化学デブリの析出後も、流路穴の大きなバッフル/バレル(B/B)間ではデブリ による閉塞は生じない見通し
- ⇒ 今後の予定:フルスケールの燃料集合体及びB/Bを隣接させた体系の試験で確証

MOVE THE WORLD FORW➤RD

MITSUBISHI HEAVY INDUSTRIES GROUP