

安全研究成果報告（案）

説明資料

重大事故時の原子炉格納容器の 終局的耐力評価に関する研究

事後評価 説明資料

令和4年4月

原子力規制庁長官官房技術基盤グループ

システム安全研究部門

シビアアクシデント研究部門

地震・津波研究部門

目次

1. 背景・目的
2. 研究概要
3. 研究期間を通じた主要成果
4. まとめ
5. 成果の活用について
6. 成果の公表等
7. 成果目標に対する達成状況

1. 背景・目的

- 「実用発電用原子炉及びその附属施設の位置、構造及び設備の基準に関する規則」の解釈では、格納容器の破損防止対策の有効性評価として、重大事故時の圧力・温度が、格納容器の機能を維持できる限界圧力・温度*1を下回ることを確認を求めている。

*1 有効性評価では、2Pd(Pd:設計圧力)、200°Cを限界値として設定

- 格納容器の機能喪失に対する終局的耐力の評価で考慮すべき破損形態としては、鋼製部材の過圧による局部破損*2、電気ペネトレーション等のシール部樹脂部材の過温による分解・損傷がある。

*2 構造不連続部の塑性変形の進行に伴い応力三軸度(応力の多軸性の強さ)が上昇し、破損する限界ひずみが減少する現象

- 格納容器鋼材の局部破損の試験データはほとんどなく、終局的耐力に係る知見は少ない。
また、重大事故時のシール部の気密性に関して公表されている試験データは少なく、格納容器の局所的な過温による損傷の可能性についても知見は少ない。



本研究(2017~2021年度)では、重大事故時における格納容器の破損防止対策の有効性評価の妥当性確認に資するため、格納容器の過圧・過温に対する限界条件について検討を行い、技術的知見を取得する。

2. 研究概要

格納容器の過圧

3.1 局部破損に関わる要素試験

- ・ 局部破損の破損クライテリア(限界条件)に係る材料データの取得

3.2 終局的耐力評価手法の検討

- ・ 取得データに基づく限界線図による評価手法及び損傷力学解析手法(詳細評価)の検討
- ・ 重大事故時の格納容器の破損防止対策の有効性評価における限界圧力(2Pd)の妥当性評価

格納容器の過温

3.3 電気ペネトレーションのシール挙動試験

- ・ 電気ペネトレーションの漏えいに対する限界条件の把握:有効性評価における限界温度(200°C)

3.4 局部環境を考慮した終局的耐力評価

- ・ 局所的な過温に対する格納容器の閉じ込め性の評価

3. 研究期間を通じた主要成果

- 3.1 局部破損に関わる要素試験
- 3.2 終局的耐力評価手法の検討
- 3.3 電気ペネトレーションのシール挙動試験
- 3.4 局部環境を考慮した終局的耐力評価

要素試験の流れ

[切欠付丸棒試験片]

局部破損に関する基礎特性データの取得

- ・ $\phi 10$ mm
- ・ 母材、溶接継手、HAZ模擬材
- ・ 室温、200 °C



[切欠付平板試験片]

実機形状に近い試験片でのデータ取得

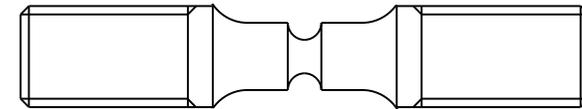
- ・ 板厚 10 mm
- ・ 全幅切欠、部分切欠
- ・ 母材、溶接継手
- ・ 室温、200 °C



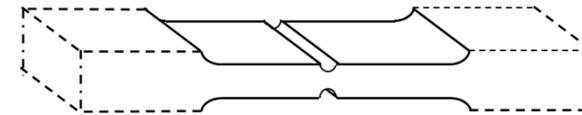
[実厚相当切欠付平板試験体]

小型試験片での取得データの妥当性確認

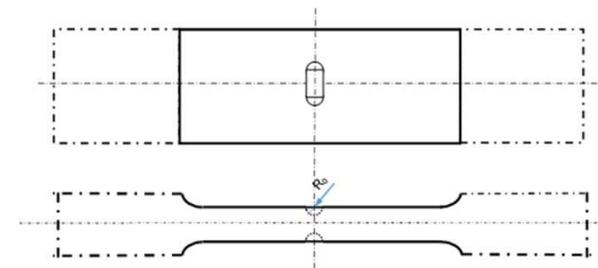
- ・ 板厚 34 mm
- ・ 全幅切欠、部分切欠
- ・ 母材、溶接継手
- ・ 室温



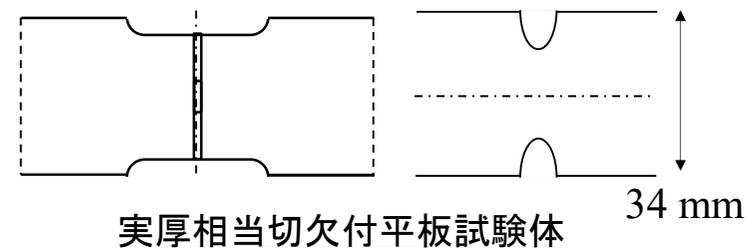
切欠付丸棒試験片



切欠付平板試験片(全幅切欠)



切欠付平板試験片(部分切欠)



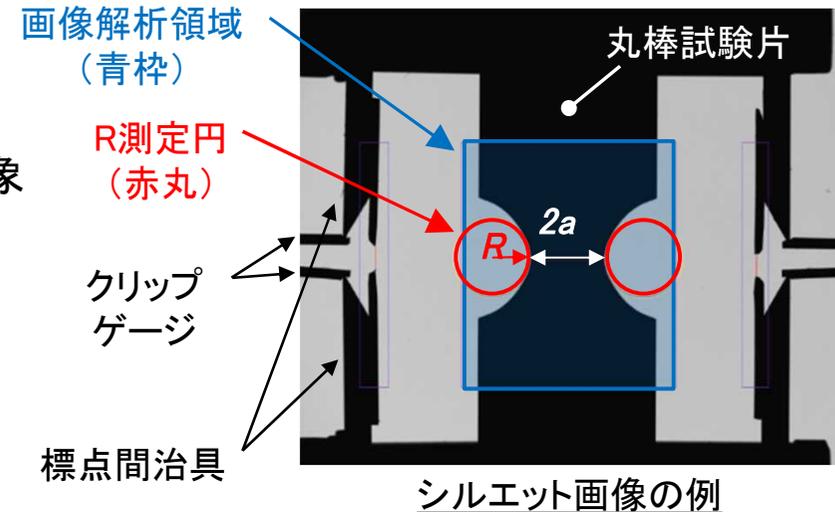
実厚相当切欠付平板試験体

34 mm

試験概要

試験方法

- 試験片切欠部の初期の曲率 R を変えた引張試験
- 国内格納容器の主要鋼材 (SGV480、SPV490等) を対象
- 試験中の試験片切欠部の最小半径 a 、曲率 R を連続観察 (丸棒: シルエット画像、平板: レーザー計測)

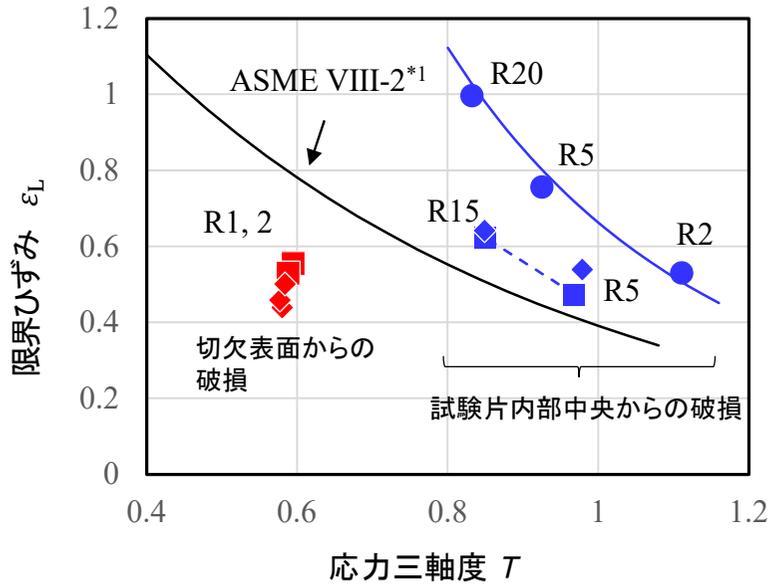


試験結果の整理

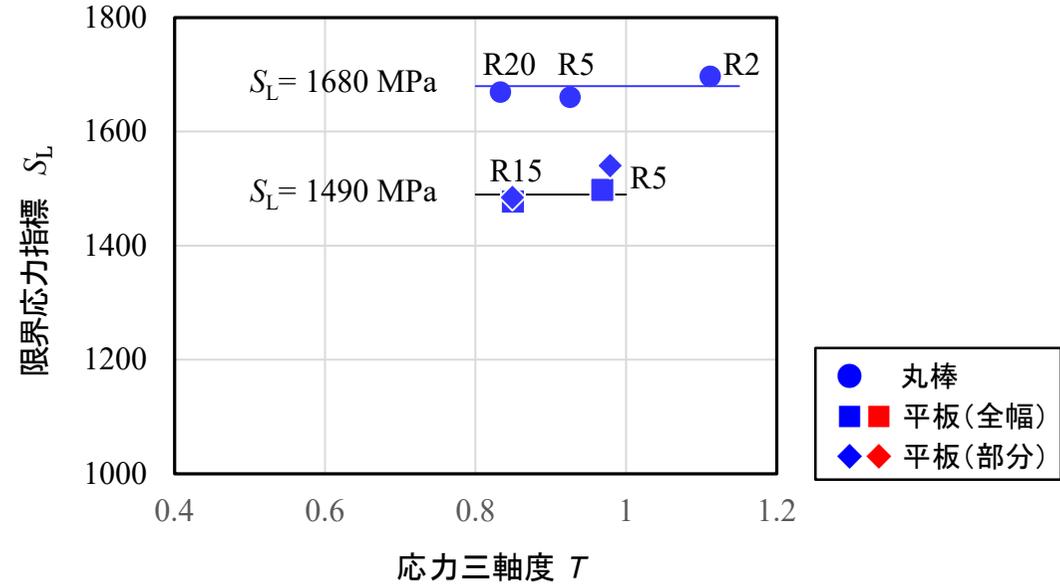
- ① 引張試験により試験中の荷重、変位を取得 (公称応力、公称ひずみ)
- ② シルエット画像又はレーザー計測結果から、試験中の切欠部の最小半径 a 、曲率 R を取得
- ③ ①,②の結果を基に弾塑性FEMによる試験の追解析を実施し、試験中の応力三軸度、相当応力、平均応力を算出
- ④ 公称応力-公称ひずみ線図における屈曲点*でのひずみ (限界ひずみ ε_L) 及び限界応力指標 S_L (相当応力と平均応力の和、本研究独自) を応力三軸度により整理

* 応力ひずみ線図において応力が急激に減少する点、局部破損の限界点 (延性破壊の開始点)

限界ひずみ線図及び応力指標線図を用いた局部破損評価法 (1/2)



限界ひずみによる整理 (SGV480、室温)



限界応力指標による整理 (SGV480、室温)

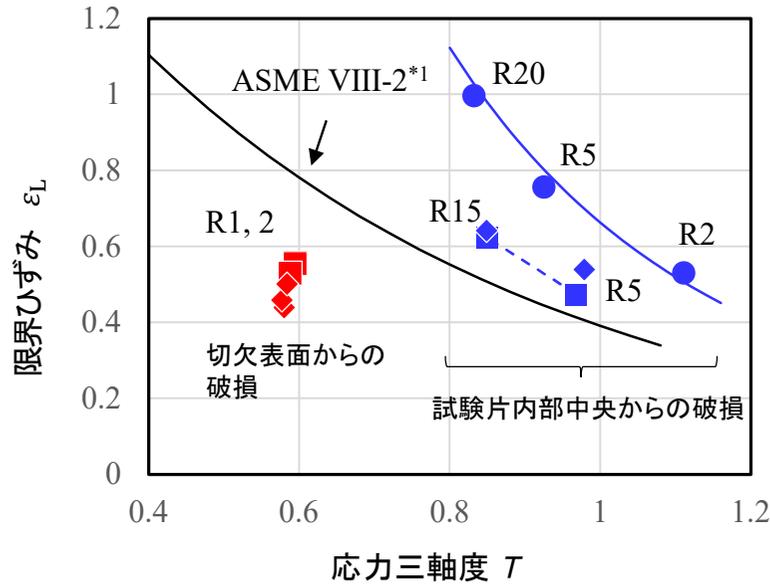
注) R の後ろの数字は試験片切欠部の初期の曲率 (mm) を示す。

- 国内格納容器主要鋼材の局部破損の開始条件を示す材料データを取得した。
- 限界ひずみ及び限界応力指標により限界条件を整理した。
 - 限界応力指標 S_L : 相当応力 σ_e と平均応力 σ_m の和、丸棒でほぼ一定*2

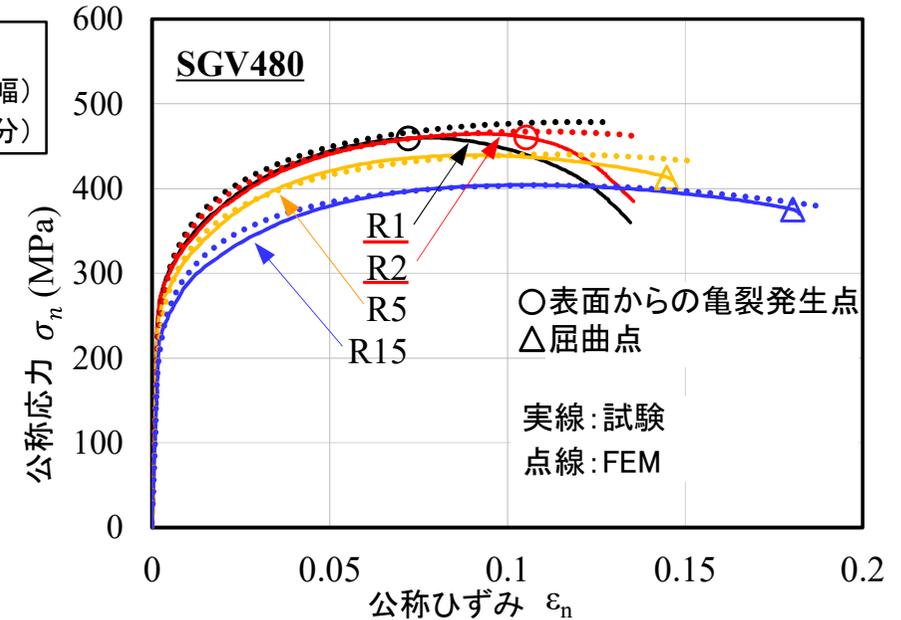
*1 ASME VIII-2 (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII division 2) : 局部破損防止規定の一つ

*2 SGV480、SPV490で同様の傾向を示した。

限界ひずみ線図及び応力指標線図を用いた局部破損評価法 (2/2)



限界ひずみによる整理 (SGV480、室温)



公称応力-公称ひずみ線図 (SGV480、室温)

- 切欠付丸棒 (引張型延性破壊) の限界ひずみ線図は、ASME VIII-2線図を大きく上回った*2。
- 切欠付平板, 初期曲率R大: 限界ひずみ線図は丸棒より低下したが、ASME VIII-2線図を上回った*2。
- 切欠付平板, 初期曲率R小: 亀裂の発生点は、ASME VIII-2線図より下であったが、公称応力の最大値 (右図) はR大の値を上回った (切欠強化) *2。

*1 ASME VIII-2 (ASME Boiler and Pressure Vessel Code Section VIII division 2): 局部破損防止規定の一つ

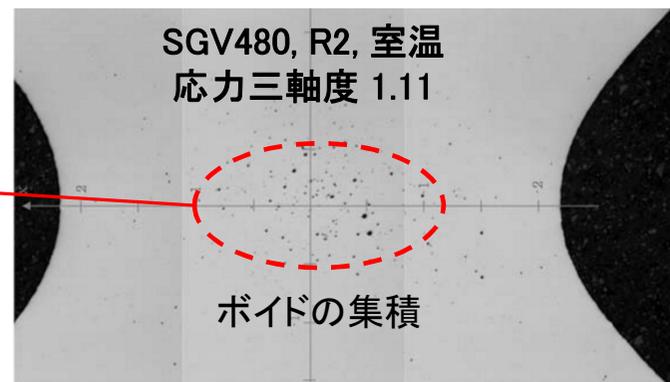
*2 SGV480、SPV490で同様の傾向を示した。

試験片・応力三軸度の違いによる破損形態の比較

- 切欠付丸棒試験片

切欠中心部から破損開始

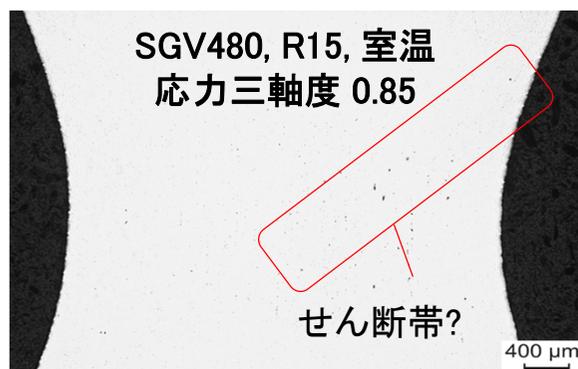
引張型延性破壊*



- 切欠付平板試験片

切欠の初期曲率R大: せん断型延性破壊、切欠底に亀裂は発生せず、突然破断*

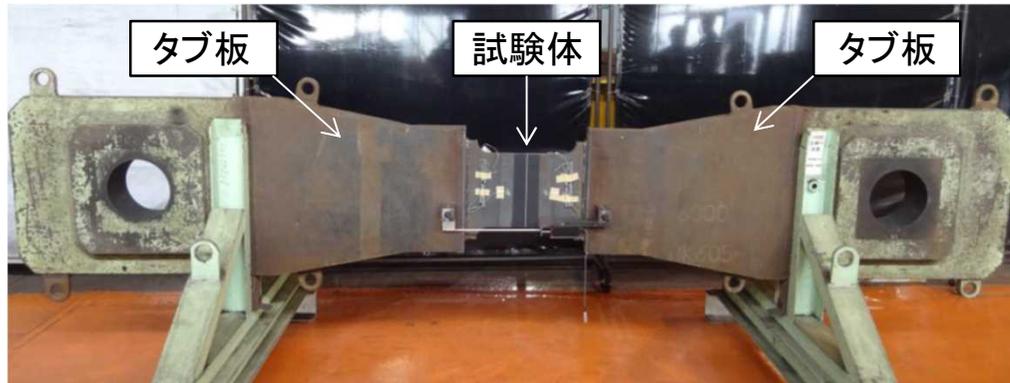
切欠の初期曲率R小: 延性亀裂進展、切欠底から亀裂が進展後、破断*



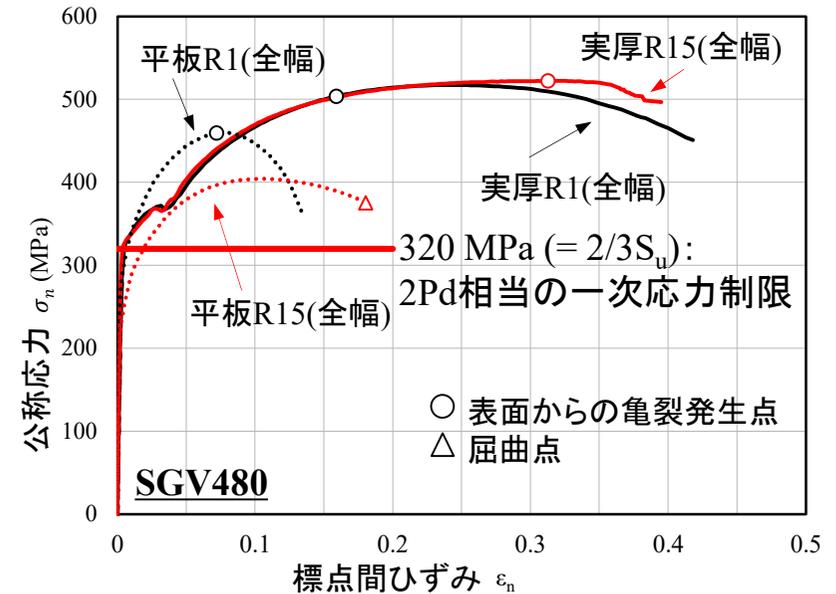
切欠付平板試験片の断面観察結果

* SGV480、SPV490で同様の傾向を示した。

小型試験片データ及び有効性評価における設定値の妥当性確認



実厚相当切欠付平板試験体



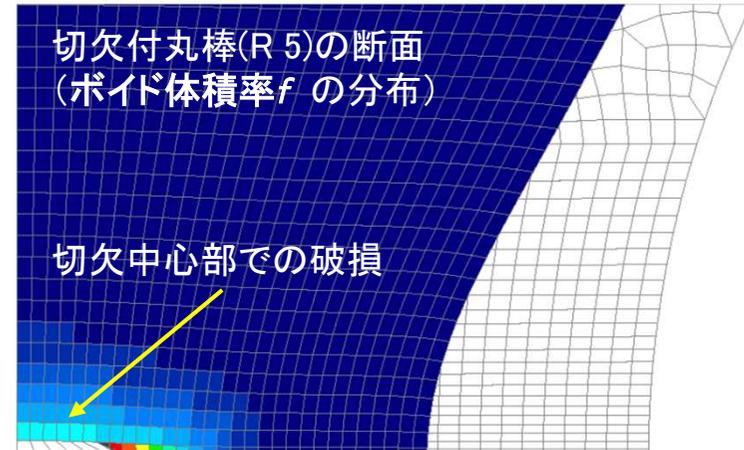
実厚相当の試験体と小型試験片(平板)の比較

- 実厚相当切欠付平板試験体の公称応力-標点間ひずみ線図は、板厚10 mmの切欠付平板試験片に比べて高応力側に位置し、試験範囲において、小型試験片は保守的な結果を示した*。
- 切欠付平板試験片の最大公称応力は、2Pd相当の一次応力制限 ($P_m \leq 2/3S_u$ (設計引張強さ)) を上回っており、**局部破損は2Pdより大きい圧力において生じる**と評価される*。

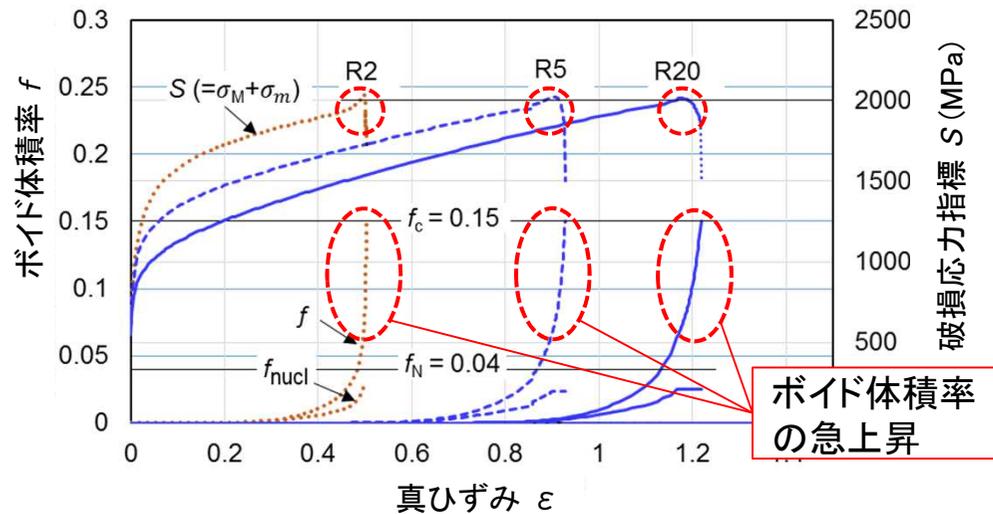
* SGV480、SPV490で同様の傾向を示した。

損傷力学解析手法

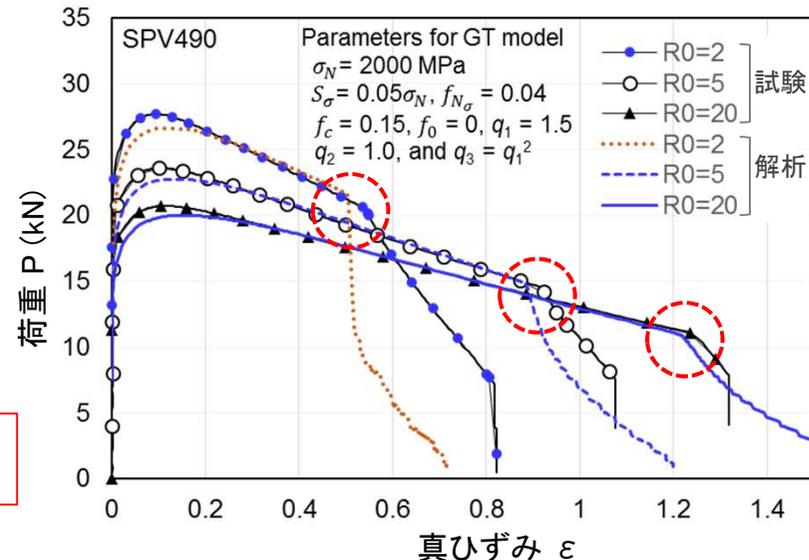
- 構造不連続部における損傷の進行を含む詳細評価手法の整備
- 修正型ガルソンモデル(独自); 破損の直前の急速なボイド生成を表す項の追加
- 切欠付丸棒試験片の破損及びCT試験片の延性亀裂進展を再現



破損点(屈曲点):



切欠付丸棒のボイド体積率 f と破損応力指標 S の遷移



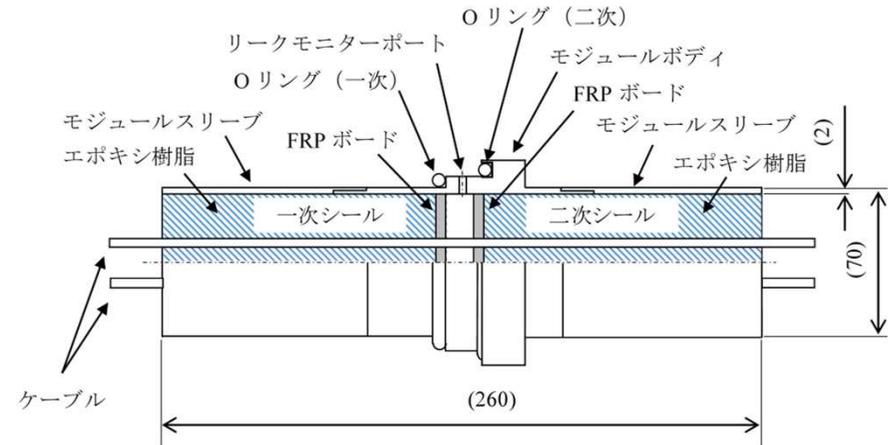
切欠付丸棒試験の破損点の再現

3. 研究期間を通じた主要成果

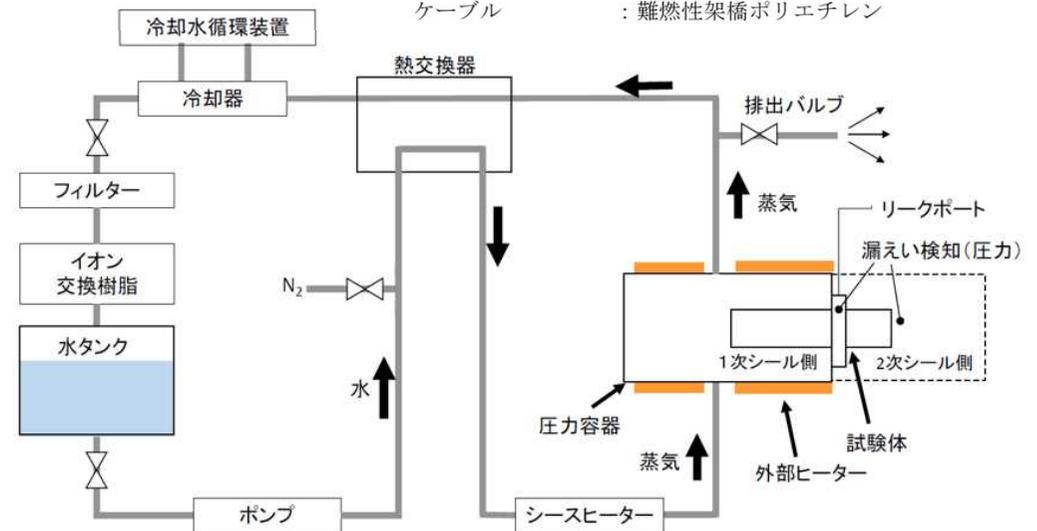
- 3.1 局部破損に関わる要素試験
- 3.2 終局的耐力評価手法の検討
- 3.3 電気ペネトレーションのシール挙動試験**
- 3.4 局部環境を考慮した終局的耐力評価

シール挙動試験の概要

- 重大事故時の高温・高圧環境下での電気ペネトレーションのシール性を確認するための試験
- 現行BWRプラントの低電圧用モジュール（制御・計装用、動力用）を模擬した試験体
- シール部材質はエポキシ樹脂
- 一次シール側を200 °C、0.854 MPa(2Pd程度)で168時間(7日)保持後、350 °Cまで昇温
350 °Cで24時間経過後も漏えいしない場合、400 °Cまで昇温
- γ 線800 kGy(60年間通常運転+重大事故の線量を包絡)の事前照射あり・なしで実施
- リークモニタ圧力の上昇、下降でそれぞれ一次シール、二次シールの漏えいを判定

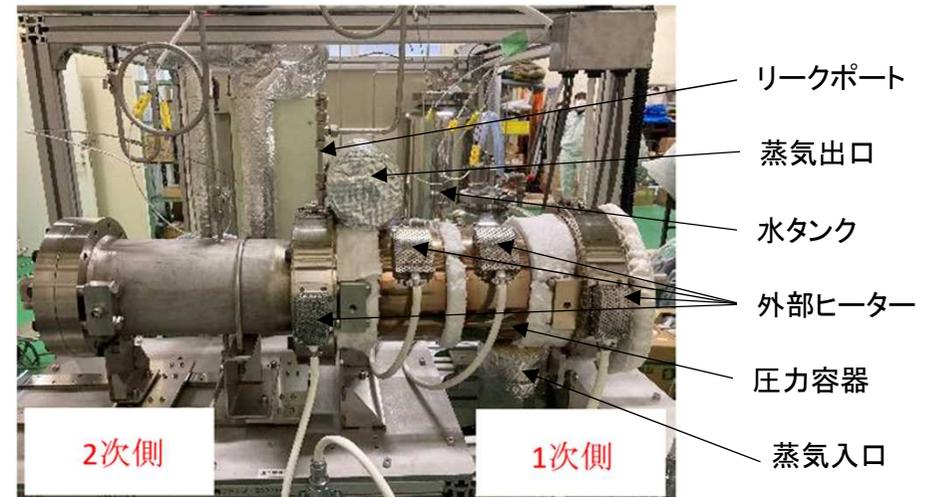
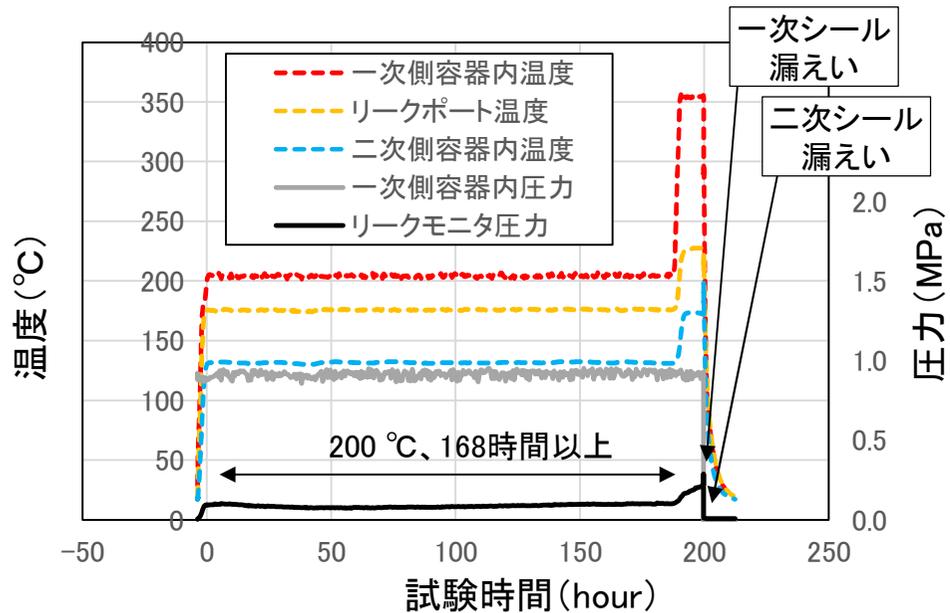


モジュールボディ : ステンレス鋼
モジュールスリーブ : ステンレス鋼
Oリング : エチレン・プロピレンゴム
ケーブル : 難燃性架橋ポリエチレン



シール挙動試験の試験体及び試験装置

シール挙動試験の結果



試験結果の例(制御・計装用モジュール、事前照射あり)

試験装置

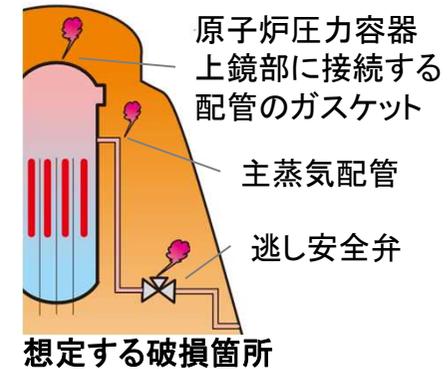
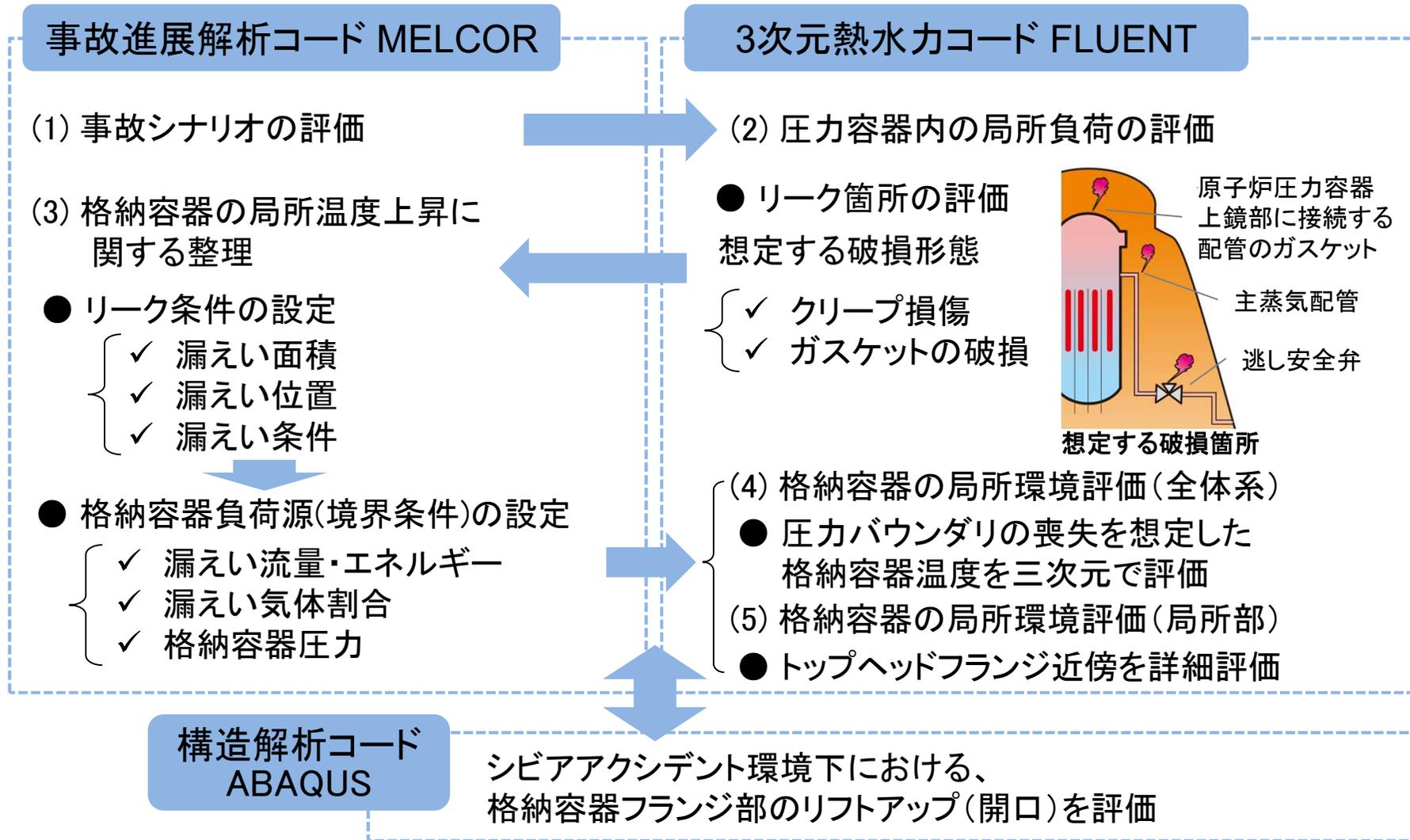
- 事前照射ありの制御・計装用モジュール及び動力用モジュールでは、200 °C 168時間では一次側、二次側ともに漏えいせず、350 °Cで二次側まで漏えいした。
- 事前照射なしのモジュールの二次側までの漏えい温度は、制御・計装用で400°C、動力用で350 °Cであった。
- 有効性評価の限界値として設定している200 °Cに対し、十分に余裕があることを示した。

3. 研究期間を通じた主要成果

- 3.1 局部破損に関わる要素試験
- 3.2 終局的耐力評価手法の検討
- 3.3 電気ペネトレーションのシール挙動試験
- 3.4 局部環境を考慮した終局的耐力評価

局所環境を考慮した終局的耐力評価の流れ

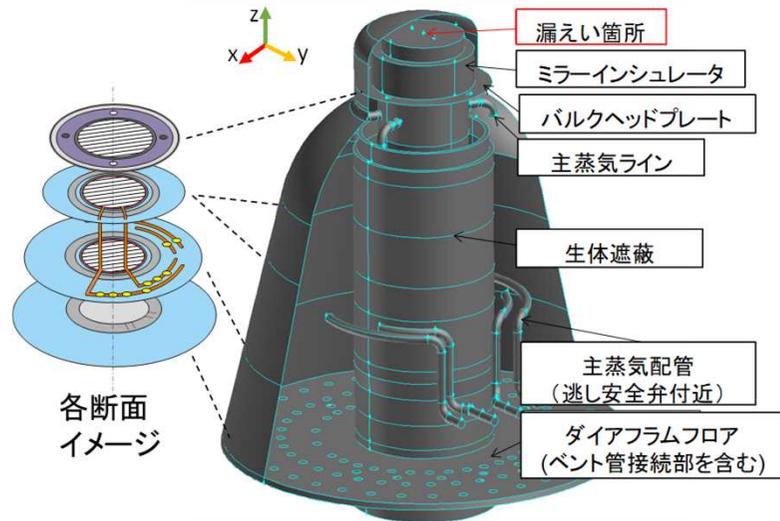
原子炉冷却材圧力バウンダリの破損 ⇒ 格納容器が局所的に高温となる可能性



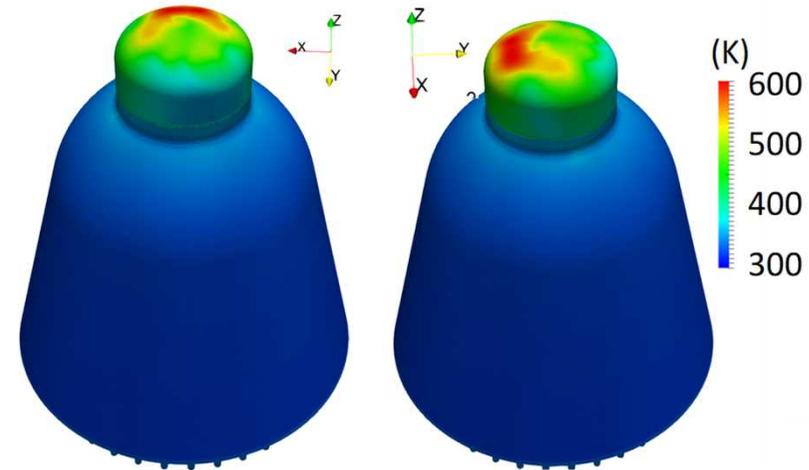
構造解析コード
ABAQUS

シビアアクシデント環境下における、格納容器フランジ部のリフトアップ(開口)を評価

格納容器の局所環境評価(全体系)



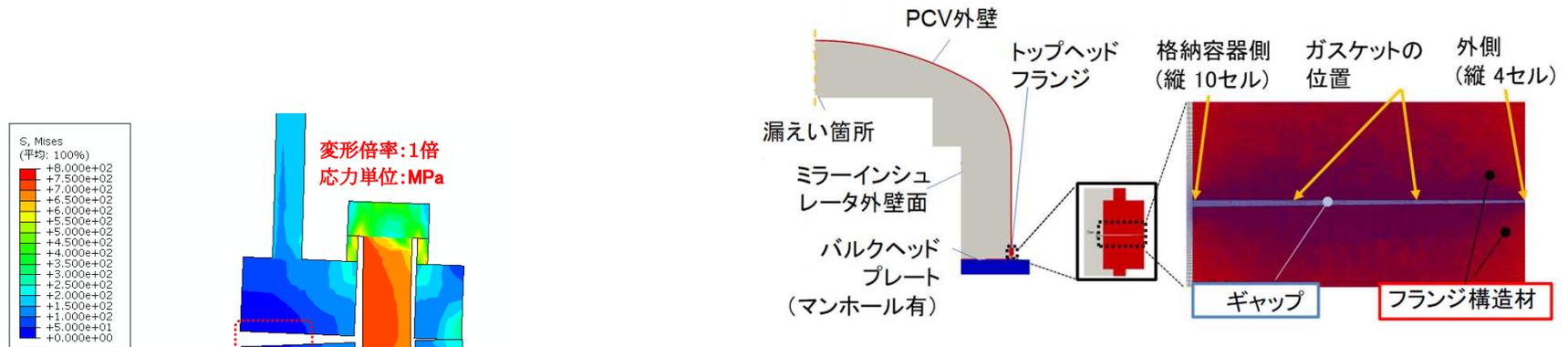
BWR-5型Mark II改良型格納容器の解析モデル



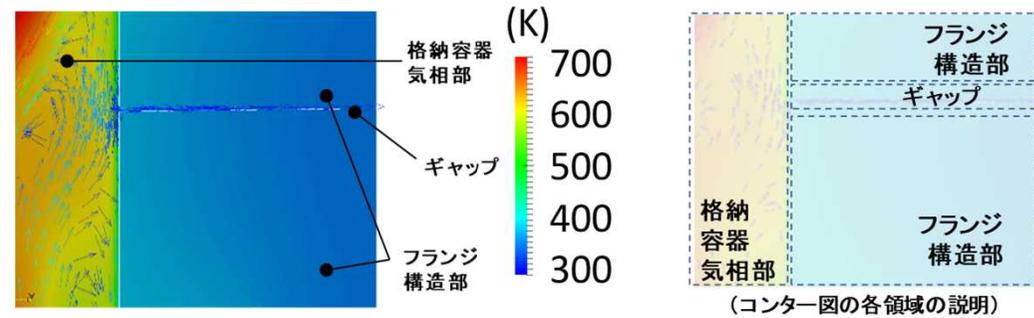
想定事故時の格納容器内壁面における
温度分布の例(1,800秒)

- 発生確率は小さいものの、圧力バウンダリ(圧力容器上鏡部に接続する配管フランジのガスケット)が損傷し、格納容器トップヘッド空間へ漏えいが1,800秒継続することを想定した場合、格納容器トップヘッドの上鏡部において、過温破損のクライテリアとされる473 K(約200 °C)を上回る領域が発生することが確認された。

格納容器の局所環境評価(局所部)



格納容器トップヘッドのリフトアップの評価例
(ボルト中心断面、温度400 °C・圧力1.2 MPa)



設計漏えい相当(0.5%/day)でのトップフランジの温度分布
(1,800秒)

- より詳細な評価として、前頁と同様に圧力バウンダリから高温高圧の漏えいが発生し、格納容器のトップヘッドが一定程度リフトアップした状態における構造物の温度挙動を評価した。
- その結果、本評価で想定した圧力バウンダリの破損の規模では、設計漏えい相当の漏えい量においても、格納容器トップヘッドフランジのガスケットの温度は局所的にも限界温度に到達しなかった。

4. まとめ

格納容器の過圧

- 国内格納容器の主要鋼材に対して、切欠付試験片を用いた系統的な引張試験により、局部破損の開始条件を示す材料データを取得した*。
 - 限界ひずみ及び限界応力指標(独自)による材料データの整理
 - 切欠付平板試験片の限界線図：切欠付丸棒試験片よりも低下
切欠の初期曲率Rが大きい場合はせん断破壊、Rが小さい場合は延性亀裂進展
 - ASME VIII-2の限界ひずみ線図と比較した。
 - 切欠付丸棒試験片：ASME線図を上回った。
 - 切欠付平板試験片：R大はASME線図を上回った。
R小の亀裂発生点はASME線図を下回るが、最大公称応力はR大より増加。
 - 有効性評価における限界圧力(2Pd)の妥当性確認；切欠付平板試験片(実厚、小型)
 - 最大公称応力 $>$ 2Pd相当の一次応力制限 ($P_m \leq 2/3S_u$ (設計引張強さ))
- 局部破損は2Pdより大きい圧力において生じると評価される。

4. まとめ

格納容器の過温

- 電気ペネトレーションは350 °C以上で漏えいしており、有効性評価の限界値として設定している200 °Cに対し十分に余裕があることを示した。
- 局所環境を考慮した終局的耐力評価において、発生する可能性は小さいものの、圧力容器頂部における圧力バウンダリの損傷が生じたシナリオを考慮した場合には、格納容器トップヘッド区画では473 K(約200 °C)を超える領域がある結果を得た。
この条件下において、格納容器のトップヘッドが一定程度リフトアップした状態においても、設計漏えい相当の一定の漏洩量においては、格納容器トップヘッドフランジのガスケットの温度が局所的に限界温度に到達しない結果を得た。

5. 成果の活用について

5.1 プロジェクト期間内

- ・ 規制業務へ直接反映した事項は無し

5.2 今後の見通し

- ・ 有効性評価における限界圧力・温度に対する裕度を改めて評価したことから、規制業務への当面の反映事項はないが、将来的にさらに詳細な評価が必要となった場合には、本研究で整備した手法の適用が可能である。
 - － 局部破損についての評価手法は、終局的な耐力を定量的に評価する場合に適用できる。
 - － 本研究で取得した電気ペネトレーションの限界温度により、有効性評価における評価温度に対する裕度を改めて把握できる。
 - － 格納容器の局所構造に関する局所温度の評価方法については、確率論的リスク評価の高度化により、有効性評価におけるシナリオ選定の高度化に活用できる。

6. 成果の公表等

論文(査読付)

- ・ H. Nakamura, “Consideration of a stress-based criterion for local failure and its implementation in a damage mechanics model,” *ASME, Journal of pressure vessel technology*, vol. 141, p. 041405, 2019.
- ・ H. Nakamura, K. Arai, M. Kikuchi, “Experimental evaluation of local failure criterion and its implementation in a damage mechanics model,” *International journal of pressure vessels and piping*, 2021.

国際会議のプロシーディング(査読付)

- ・ KOJO Retsu, HOTTA Akitoshi, “Analytical Approach to Measurement of Local and Bulk Temperatures under High Temperature Accident Sequences of BWRs”, SAMMI-2020-1040, *OECD/NEA Specialist Workshop on Advanced Measurement Method and Instrumentation for enhancing Severe Accident Management in an NPP addressing Emergency, Stabilization and Long-term Recovery Phase*, December 7-10, 2020

その他

- ・ 荒井, 中村, 菊池, “原子炉格納容器鋼材の局部破損条件に関する検討(溶接部の切欠付丸棒及び母材の切欠付平板試験片の引張試験),” 日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス, オンライン, 2021.
- ・ 中村, 荒井, 菊池, “原子炉格納容器鋼材の局部破損に関する検討(ライナ鋼材の三軸応力における限界特性),” 日本機械学会 M&M2021 材料力学カンファレンス, オンライン, 2021.

7. 成果目標に対する達成状況

まとめで示したように、格納容器の終局的耐力の評価手法及び限界条件に関する以下の重要な複数の知見を取得し、知見の蓄積という目的を高い水準で達成した。

格納容器の過圧

- 国内格納容器の主要鋼材に対する局部破損の破損クライテリア(限界条件)に係る材料データを取得した。
- 局部破損に対する応力三軸度に基づく限界線図を用いた評価手法及び詳細評価を可能とする損傷力学解析手法を整備した。
- 重大事故時の格納容器の破損防止対策の有効性評価における設定値の妥当性を評価した。

格納容器の過温

- 電気ペネトレーションの漏えいに対する限界条件を確認した。
- 局所的な過温に対する格納容器の閉じ込め性を評価した。