

福島第一原発の機器の健全性評価に関する基盤的研究

機器や状況に対して、横断的な課題の一つ

- ・ FRC提案、研究開発課題の議論に向けて

福島工業高等専門学校

實川資朗

燃料の溶解に伴う圧力容器の破損の結果、格納容器が放射性物質の主な障壁となっている。格納容器の健全性、及びこれに影響を与え得る機器(例；圧力容器及びペデスタル)の健全性は、廃炉作業の安全性に重要である。

1Fの廃炉工程においては、ガンマ線レベルが高いため機器が受けた損傷の評価が困難であり、これが機器の部材の強度及び欠陥の評価を高めることを難しくしている。このため、放射性物質の障壁の健全性を長期間維持するためには(廃炉には40年以上を要する)、機器への力学的負荷に関する余裕を大きくする必要がある。一方、廃炉作業の効率化、放射性ダストの飛散低減(セメント及びジオポリマーによる燃料デブリの固化)及び放射線遮蔽(水を満たすことが効果的)のために、力学的負荷に関する余裕を切り詰めることが期待されている；余裕の低減は、機器がもはやエネルギー生産に用いられない点で合理性がある。このように、互いに矛盾する要求を緩和するための技術開発は重要と考えられる。

少なくとも、遠隔操作による部材の強度及び欠陥の検出能力の向上は、サンプリング法開発と同様に有用であろう。損傷を受けた機器(エネルギー生産に使われない)の健全性を合理的に評価する手法の開発は、これに寄与する基盤的な技術開発と同様に有用と考える。特徴的な技術の開発について検討する(R&Dが進められている事故過程解析及び大型の遠隔操作機器開発は含めない)。

[複数の多様な状況の機器に関する横断的な課題 損傷機器の強度への取組みは限られる]

鍵となる技術の一つは、現在の構造設計概念の対象外である、

(i)材料の延性が限られる場合の破壊の防止法である。

これは、使用済み燃料に加える力の範囲の判断に利用可能と考えられる。損傷を受けた使用済み燃料の破損の防止も範囲に入れる。

以下の項目も重要な研究開発項目と考える。

(ii)遠隔操作による強度及び欠陥の評価の技術

燃料デブリ取り出し法にも関係する、サンプリング法も含む。これは燃料デブリ切削に伴うダストの基礎研究にも有用と思われる。

(iii)ホットラボ用の微小試験片による材料評価法

破壊防止のための、破壊モードに基づく、

(iv)亀裂伝播を軽減するための監視法(破壊及び変形検出)

また、損傷機構に対応する、

(v)補強法

構造物の損傷と損傷状態の評価(損傷が大きいと推測される構造物)

(1)圧力容器

- ・ 損傷/変化: 加熱*による材料特性変化、機械的負荷**による変形
- ・ 例(推定): 底部及びスカート部の接合ボルトの加熱による材料特性変化

(2)ペDESTAL

- ・ 損傷/変化: 加熱*による材料特性変化、水による特性回復、機械的負荷**による変形
- ・ 例(推定): 圧力容器スタッドボルト、コンクリートの加熱による材料特性変化(圧力容器底部燃料及び床上の燃料による数週間以上の加熱の可能性)、水中での特性回復

(3)格納容器

- ・ 損傷/変化: 加熱*による材料特性変化、機械的負荷**による変形
- ・ 例(推定): 加熱及び急速冷却による鋼材の軟化及び脆化、腐食の作用を含む欠陥の形成

(4)使用済み燃料(使用済み燃料プール内)

- ・ 損傷/変化: 照射損傷(水素化物生成含む)による材料特性変化、機械的負荷**による変形
- ・ 例(推定): 水素化物生成を含む事故前の照射損傷による硬化と脆化及び事故時のコンクリート片の衝突による過大な変形や割れ発生

*加熱：溶融燃料からの輻射及び接触/伝熱による過度な温度上昇、冷却水による急冷

**機械的負荷：地震動、破片の衝突(水素爆発時)、事故時の熱応力及び廃炉過程での荷重(過度な変形及び割れ発生をもたらす)

損傷を受けた構造物の健全性推定の方法と強度の考え方(課題の提案)

- ・ 溶融燃料による加熱
- ・ 水素爆発などによる荷重
- ・ 廃炉工事に伴う荷重

事故時等の損傷

損傷を受けたコンポーネント

- ・ 圧力容器(炉内機器)
- ・ ペDESTAL
- ・ 格納容器
- ・ 使用済み燃料(プール内)

効率的な廃炉作業

廃止の過程(非原子力施設)

損傷状態評価



荷重分布評価



補修/補強



廃止作業

(欠陥計測、
サンプリング検査、
実験/数値シミュレーション)

(廃止作業中負荷推定含む)

(必要があれば)

損傷を受けた構造物の健全性推定の方法と強度の考え方(課題の提案)

- ・ 溶融燃料による加熱
- ・ 水素爆発などによる荷重
- ・ 廃炉工事に伴う荷重

事故時等の損傷

損傷を受けたコンポーネント

- ・ 圧力容器(炉内機器)
- ・ ペDESTAL
- ・ 格納容器
- ・ 使用済み燃料(プール内)

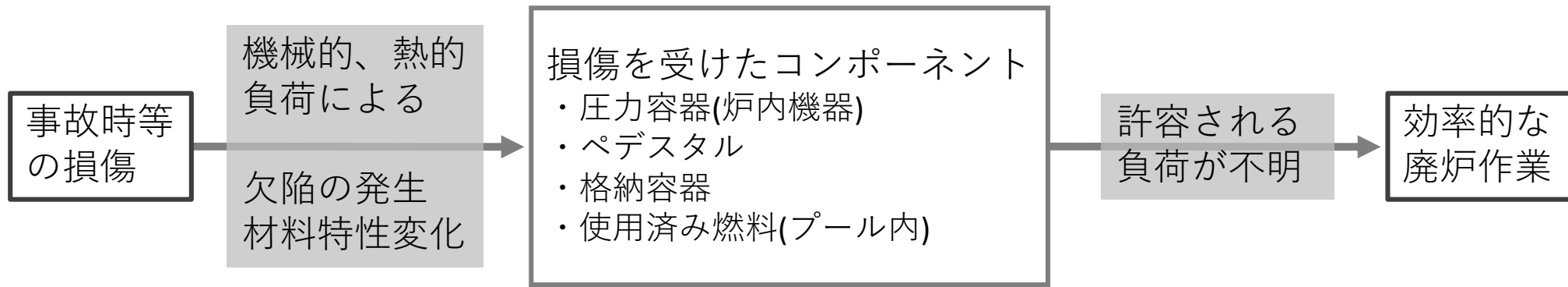
効率的な廃炉作業

- ・ 安全性確保のため、高い信頼性での評価が必要になる(長期間の作業の可能性)

しかし、

- ・ 損傷の検出や影響評価が難しい(遠隔での判断などの能力向上を要する)

損傷を受けた構造物の健全性推定の方法と強度の考え方(課題の提案)

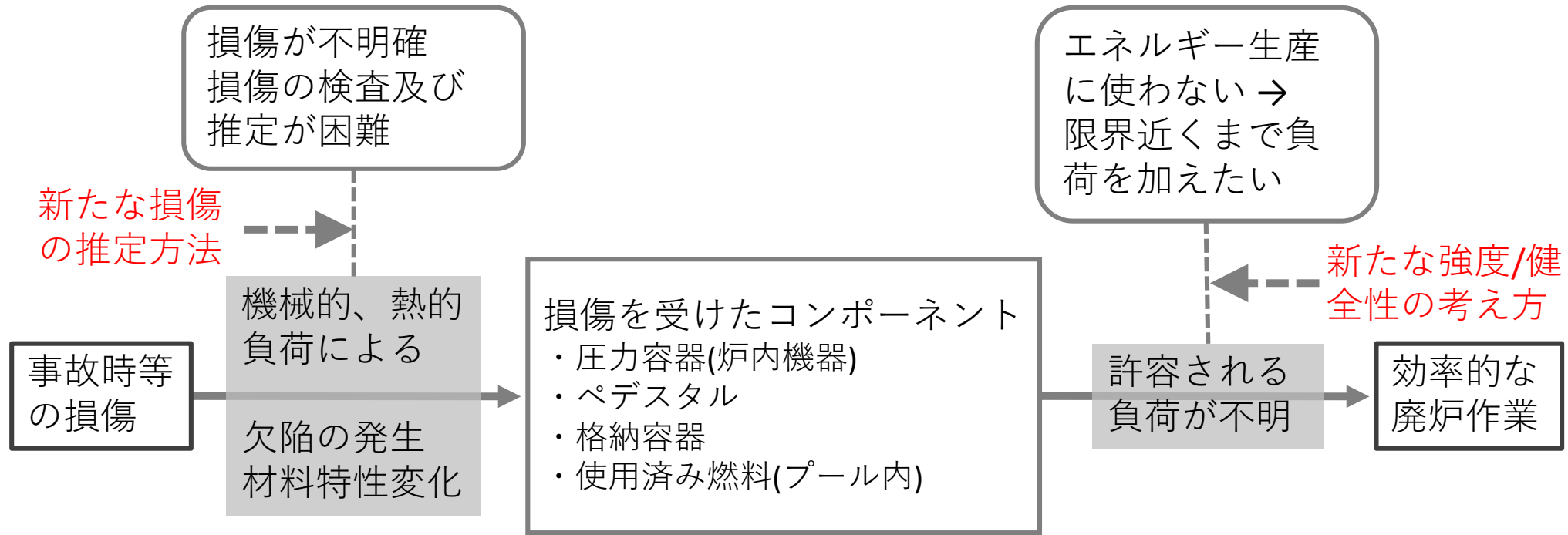


- ・ 安全性確保のため、高い信頼性での評価が必要になる(しかし、困難)
- ・ 損傷の検出や影響評価が難しい(遠隔での判断などの能力向上を要する)

さらに、

- ・ 厳しい要求もある； 効率的な作業のため、なるべく限界まで負荷を加えたい(実際の強度 --- エネルギー生産には使わないので、許容される変形量を上げたい)

損傷を受けた構造物の健全性推定の方法と強度の考え方(課題の提案)



- ・ 安全性確保のため、高い信頼性での評価が必要になる(しかし、困難)
- ・ 損傷の検出や影響評価が難しい(遠隔での判断などの能力向上を要する)
- ・ 厳しい要求もある； 効率的な作業のため、なるべく限界まで負荷を加えたい

結局、(多くの妥協が必要になるだろうが、少しでもこの方向に進むべく)

- ・ 新たな強度/健全性の考え方、新たな損傷(欠陥、材料特性変化)の推定法が必要
- ・ 安全確保のため、作業の監視方法(想定される破壊に適合が必要)、遠隔補修方法

表 損傷構造物の状況と課題概要

	損傷原因	損傷の検出と評価の方法	健全性について (例 合理性を高める許容応力の検討)	監視法 補強/補修法
概略	加熱(a) 機械的負荷(b).	遠隔操作による観察とサンプリング(c). 微小な試験片/サンプルによる評価(d).	軟化、脆化、割れ発生及びこれらの低い評価精度のため、破壊防止のためのマージンを増やす必要が見られるが、一方、もはやエネルギー生産に利用しない機器である点からマージン低減の要請がある。少なくとも、事故による強度の不均質さの発生への対応方法が要求されよう。	強度に大きな不均質性が推定され、破壊機構を考慮した監視方法が重要になるう。
RPV	同上	同上 (底部への加熱は大きかったと推定できよう)	同上	同上 (変形及び破壊の監視の必要性の推定)
ペDESTAL	同上 (水没による強度の回復が生じ得る --- 水中養生)	同上 (RPVのスタッドボルト領域への強い加熱が推定され、打撃法などによる弾特性評価が強度低下の推定に有効と期待される)	同上 (水中養生による強度回復への考慮が必要と考えられ、鉄筋コンクリートの引張荷重下での評価の導入によりマージンを低下させ得るかも知れない)	同上 (変形/破壊、アコースティックエミッション、動的弾性挙動による監視法、セメントミルクによる補強の有効性評価)
格納容器	2行目と同様	2行目と同様 (減肉などの腐食の影響も考慮を要する)	2行目と同様 (腐食の影響への考慮を要し、廃炉作業に伴い変形の影響についても検討を要す)	2行目と同様 (減肉などの腐食の影響も考慮を要する)
使用済み燃料(使用済み燃料プール中)	照射損傷(+水素脆性)及び機械的負荷(b)	水素爆発に伴う建屋ガレキによる衝撃などの影響に関する、遠隔操作による観察と評価	許容応力の決定には、変形の影響を受けた照射材の降伏応力と破壊応力が重要と思われ、水素脆化については実験的な評価が必要になるう	安全性向上のためには、作業時の変形、割れ発生、アコースティックエミッション、放射性核種の漏洩の監視が有用であろう。

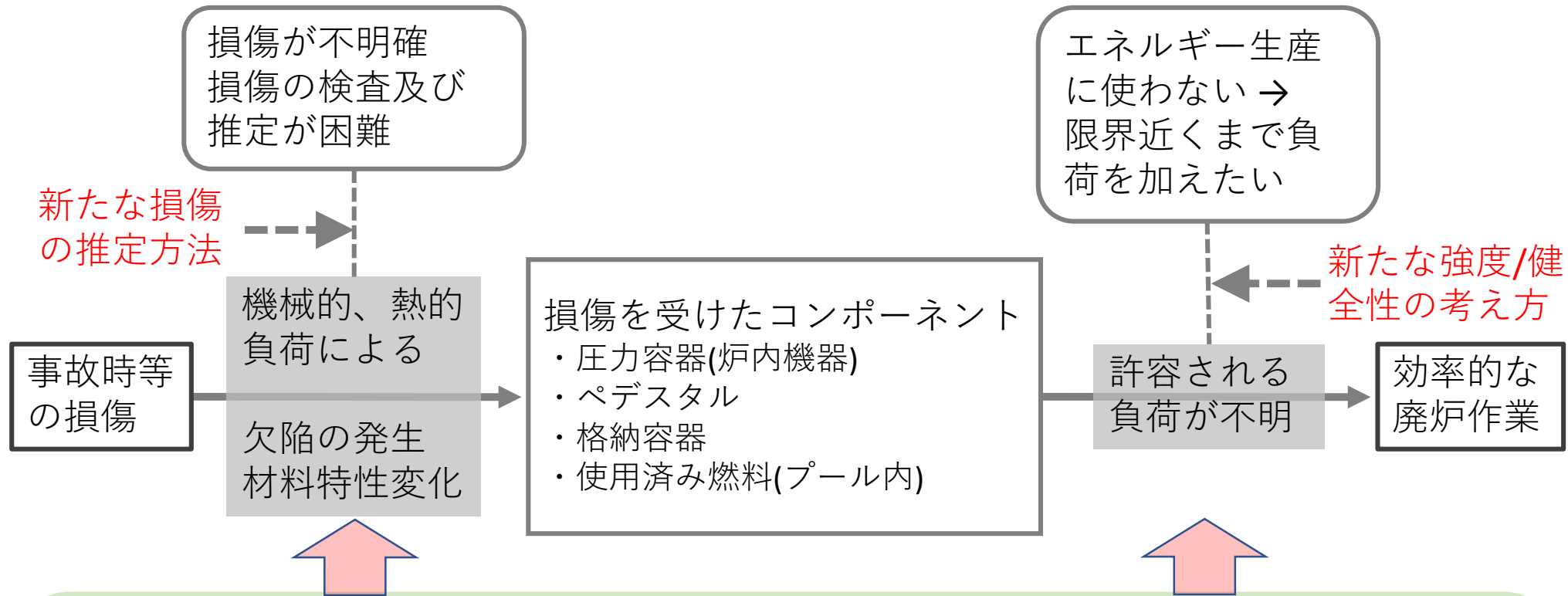
(a)格納容器内の温度について、300°Cの状態が300時間程度まで持続したとされている(限られた本数のセンサーによる結果であり、局部的にはさらに高温であったと推定される)。加えて、途中から注入された冷却水が急冷とマルテンサイト変態を生じさせた可能性はあろう。

(b)地震動、水素爆発に伴う衝撃荷重(建屋コンクリート片の衝突)、廃炉作業時の機械的負荷による、局所的な塑性変形の導入を考慮すべきであろう。

(c)IRIDによるJET/ITER型の大型の遠隔操作装置が導入される方向である。但し、大型装置に取り付けて使用する機器の検査、診断、サンプル採取のためのアタッチメントの開発は有用と思われる。

(d)これまで格納容器の内部から、極めて小さいサンプルの採取しか実現していないが、このような状況は、今後も新たな局面では生じ続けると考えられる。小型の試験片を用いたホットラボ用の測定や解析法の開発は、有用であろう。

損傷を受けた構造物の健全性推定の方法と強度の考え方(課題の提案)



- (i) 欠陥検査方法(遠隔などによる)
衝撃+振動測定(レーザー+耐放射線機器)
色彩などによる劣化診断
- (ii) 材料特性検査方法
微量サンプリングと微小試験片試験技術

- (iii) 合理的な強度基準
低延性/脆性材料の機器の破壊条件
- (iv) 破壊防止の監視技術(モニタリング)
破壊機構に対応した監視(AE, 放射線)
- (v) 補修/材質回復の方法

これらを内容とする提案(基盤的研究)

特徴: 幅広く多様な材料特性変化への対応

表 構造と材料の強度評価の手法と開発の必要性

	損傷原因	材料強度及びクラックの推定	健全性について (例 合理性を高める許容応力の検討)	検査(測定)、監視、補修/補強の方法
概略	加熱 機械的負荷	TEPCOが少量の燃料デブリのサンプルを採取し、化学成分と結晶構造の評価を行なった。サンプリング法開発が必要。 格納容器鋼の強度への熱影響については、IRID、東北大学、福島高専が別々に評価を行なった(a)。 ホットラボ用の微小試験片技術の開発がさらに必要と思われる(b)。	事故による強度の不均質性の発生とクラックの導入は、機器の健全性評価に関する問題と考えられる --- なお、健全性の評価は、荷重条件が定まらなければ効果的に行えないと考えられる(廃炉過程での負荷が不明確)。 部分的に損傷を受けた機器の破壊条件評価はR6法及び損傷機器の材料強度がわかれば可能な部分がある。 照射及び変形によって硬化した機器の許容応力については検討し得ると思われる。	これまで打撃法などによる動的弾性挙動の有用性が指摘されたが、技術開発は進んでいない。変形、クラック発生(成長)、アコースティックエミッション、放射性物質の放出に関する作業時の監視方法の開発が必要(例えば、使用済み燃料のプールからの取り出し)。 これまで、多くの補修方法が指摘されたが、開発の活動は不十分なレベルと思われる。
RPV	同上	サンプルは採取されておらず、RPV鋼については、限られた推定しか行われていない。	同上	TEPCO/IRIDにより遠隔操作型のCCDカメラを用いて、ある程度の画像が取得された。
ペDESTAL	同上 (水中養生の影響の考慮を要する)	2行目と同様 水中養生の効果の評価例もある	2行目と同様 クラックの検出が重要事項である 水中養生による強度回復の影響を考慮する必要がある 鉄筋コンクリートの強度評価に破壊靱性及び引張強度を用い、合理性の高める試みは有用と思われる	同上 動的弾性特性評価機器の開発を検討する セメントミルクによる補強の可能性も指摘されている
格納容器	2行目と同様	2行目と同様	2行目と同様(腐食の影響も考慮する) 廃炉過程で変形が生じ得る。変形(塑性歪みの影響評価も進められている) --- 予歪みは破壊靱性に強い影響を持つようである	RPVと同様
使用済み燃料(使用済み燃料プール中)	照射損傷(+水素脆性)及び機械的負荷	IRID/JAEAが照射材(福島第一原発の材料ではない)の引張試験を実施した。結果は出版されていない。	2行目と同様 水素脆化に関する実験的評価が必要	遠隔操作型CCDカメラにより、上方からの画像は得られているが、変形量の詳細の評価は困難である

(a)試験片は炉から採取したものでなく、加熱の影響が評価されている(部分的に変形の影響も)。今後、圧力容器、格納容器の鋼材、コンクリート、冷間加工で硬化させたジルカロイの評価を行う方向で考える

(b)微小試験片技術(SSTT)による試験及び微細組織観察、ナノ硬さ測定、圧子による破壊靱性値評価(脆性材料)を、小さめの試験片(断面が1mm角で長さ3-10mm程度)を用いた通常の引張試験や曲げ試験とともに実施することになる。

(c)この課題に関する方法を共同研究者が示している(K.Suzuki, et al., Nuclear Engineering and Design(2010)1290)

R&D項目 遠隔操作法 1/2 --- 遠隔操作によるサンプリング法、評価手法の開発

- (a) 観察(割れや変形の検出)、サンプリングと分析(小試料からの強度特性評価; 燃料デブリの評価とも重なる)及び打撃による強度低下/欠陥評価のための遠隔操作法
- (b) ホットラボでの小型試料の評価法

評価を要する項目(重要評価項目)

(1) 圧力容器

- ・ 底部及びスカート部の接合ボルトのサンプリングと材料特性評価、欠陥評価

(2) ペDESTAL

- ・ 圧力容器スタッドボルト及びコンクリートのサンプリングと特性評価、打撃試験、欠陥評価

(3) 格納容器

- ・ 加熱/冷却による鋼材の軟化及び脆化評価、欠陥評価(腐食の作用を含む)

(4) 使用済み燃料(使用済み燃料プール内)

- ・ コンクリート片衝突による変形及び割れ(欠陥)評価、水素化物+照射による硬化/脆化の評価

遠隔操作による観察技術開発は、他のプログラムでも進められている。遠隔操作によるサンプリング方法、打撃法などによる検査方法などの開発例は限られる(耐放射線性の高い機器が必要)。他の方法の開発も検討(弾性率、色彩による温度履歴推定方法など)。サンプルの代表性確保の考慮を要す。表面酸化物と共に、内部からのサンプリングも必要(特に、小試料)。

サンプリングした試料のホットラボでの遠隔操作試験法の開発が必要、特に、これまでの実績から、サンプリング試料の採取箇所や量が限られる場合への対応も重要(例：量が限られる場合には、微細組織から強度などを推定する --- 微小試験片試験法の適用)

(c) ホットラボ用の微小試験片技術 (大きい試料であっても試料作製法、試験法開発を要す)

(1) 圧力容器

・ 試験片寸法が限られる場合の靱性測定法(試験片作製法を含む)、電子顕微鏡試料作製法、燃料との反応生成物の分析法(組成、相及び組織)

(2) ペDESTAL

・ コンクリート及び燃料との反応生成物の分析法(強度、組成、相及び組織)、圧力容器スタッドボルトは圧力容器と同様

(3) 格納容器 --- 圧力容器と同様

(4) 使用済み燃料(使用済み燃料プール内)

・ 遠隔操作による観察で取得する項目を強化 (スケジュールが厳しいため)

実験及び計算によるシミュレーションを行い、材料特性の変化範囲、微細組織と強度の相関を把握する。遠隔操作による観察結果の強化 (例 打撃及び色彩評価と小型試料の結果の比較); サンプリング箇所選定の基盤技術。

R&D項目 強度基準 --- 低マージン化の検討を含む

- (a) エネルギー生産に使われない機器なので、マージンの小さい許容応力の設定が望まれているが、欠陥の見落とし、サンプリングが不可能な場合にマージンを大きくする必要がある。
- (b) 照射硬化材への許容応力の考え方の検討を行ったことがあるが、この方法は、使用済み燃料及び作業中の負荷により塑性変形が生じる場合に適用できるであろう(引張強及び伸び値を使わず、絞り値をパラメータとした)。
- (c) コンクリートへの負荷は、圧縮強度で定められているが、亀裂進展(破壊力学)、鉄筋の効果を含む引張荷重下での挙動も範囲とすることで、合理化の可能性を探る。

(1) 圧力容器

- ・ 事故が導入した熱影響、欠陥による強度分布の扱い方、及びマージンの削減可能性

(2) ペDESTAL

- ・ 圧力容器スタッドボルトの強度低下の扱い方、及びコンクリートの強度の合理的取り扱い

(3) 格納容器

- ・ 圧力容器と同様、なお、作業中の負荷増大の許容範囲の検討も有用(少しの塑性変形で破壊靱性値が低下する傾向)

(4) 使用済み燃料(使用済み燃料プール内)

- ・ 照射硬化+水素脆化+衝撃による変形の扱い、照射硬化+衝撃による変形への開発した手法の適用性の実証的評価

R&D項目 作業の監視方法及び補修方法

(a)熱影響、機械的負荷(欠陥影響を含む)の評価での不明確さへの対処方法として、破損の機構に適合した監視方法(亀裂拡大などの防止)の開発が必要

(b)補修により効果的に問題が軽減される可能性と方法も重要である

(1)圧力容器

・熱影響による強度低下領域及び欠陥部分の補修、作業中の変形の監視(耐放射線性の高い機器を要する)

(2)ペDESTAL

・作業中の変形やAEの監視(耐放射線性の高い機器を要する)、水による養生、遠隔操作によるセメントミルク注入による割れ補修方法の検討

(3)格納容器

・圧力容器と同様に、熱影響及び欠陥部分の補修、作業中の変形の監視(耐放射線性の高い機器を要する)

(4)使用済み燃料(使用済み燃料プール内)

・照射硬化+水素脆化+衝撃による変形領域での破損の拡大を抑制するための作業中の変形検出、AE発生及びRI放出の監視(耐放射線性の高い機器を要する)

構造物の受けた損傷と損傷状態評価 補 (「表 損傷構造物の状況と課題概要」の要素)

(1)圧力容器

加熱による材料特性変化、機械的負荷による変形

底部および、スカート部の接合ボルト、ペDESTALのスタッドボルト材料の加熱による特性変化

(2)ペDESTAL

加熱による材料特性変化、水による特性回復、機械的負荷による変形

圧力容器を停めるスタッドボルト、鉄筋コンクリート部分の材料の加熱による特性変化(圧力容器底部の燃料が長期間の加熱をもたらした可能性)、水中での特性回復、機械的な負荷による割れ発生

(3)格納容器

加熱による材料特性変化、機械的負荷による変形

溶融燃料の加熱及び注水による急速冷却による鋼材の軟化及び脆化、腐食の作用を含む欠陥の形成

(4)使用済み燃料(使用済み燃料プール内)

照射損傷(腐食による水素化物生成を含む)による材料特性変化、機械的負荷による変形

水素化物生成による脆化を含む事故前の照射損傷による硬化と脆化及び事故時のコンクリート片の衝突

- ・ 加熱：溶融燃料からの輻射及び接触/伝熱による過度な温度上昇、冷却水による急冷
- ・ 機械的負荷：地震動、破片の衝突(水素爆発時)、事故時加熱による熱応力及び廃炉過程での負荷による、変形及び割れ発生
- ・ 照射損傷及び水素脆化：事故前に生じている

加熱、機械的荷重による損傷など

材料特性変化、欠陥発生

もはやエネルギー生産に使われないことを考慮し、既存の強度の考え方よりも低マージン化?

作業中の破損の検出(検査、監視) --- 材料特性変化などから推測する破壊様式に合わせた破損の検出/監視方法の提案

(1)圧力容器

溶融燃料による加熱(輻射、接触/伝熱)、デブリ取り出し時の機械荷重(地震動など)

特に、底部および、スカート部の接合ボルト、ペDESTALのスタッドボルトの加熱による軟化/脆化

(2)ペDESTAL

溶融燃料による加熱(輻射、接触/伝熱)、デブリ取り出し時の機械荷重(地震動など)

圧力容器のスタッドボルトの加熱による軟化/脆化、機械的な負荷(デブリ取出し時の機械的負荷、地震動など)の影響、さらに底部に堆積した溶融燃料からの伝熱による強度低下が大きいことが推定される

(3)格納容器

溶融燃料による加熱(輻射、接触/伝熱)、デブリ取り出し時の機械荷重(地震動など)

溶融燃料の加熱、急速冷却などによる鋼材の軟化/脆化、さらに、腐食の作用を含む欠陥の形成

(4)使用済み燃料(使用済み燃料プール内)

照射損傷による材料特性変化、ガレキの衝突による変形

・作業のフロー概要

(i)材料特性+欠陥検出 → (ii)機械的負荷の分布 → (iii)許容される負荷と比較し、破損条件を推定する →
(iv)取り出し工事 → (v)損傷管理のための監視(検査) 赤字; 関与できそうな領域/項目

・損傷及び作業上の要請についての例

(i)加熱、荷重による損傷(材料特性変化、欠陥発生)

(ii)低マージン化した強度の考え方への要請?

・研究開発の課題領域例

(i)損傷機構の推定(加熱、変形)

(ii)損傷状態の検出と推定(観察/測定による欠陥や損傷箇所の検出、加熱/塑性変形/照射損傷を受けた材料の強度特性、マクロ欠陥の分布、構造の変形)

(iii)強度基準の検討(強度分布発生への対応、マージン削減)、限界荷重推定(荷重の分布推定、破壊防止)

(iv)補修/補強(遠隔操作)

(v)破壊監視(遠隔操作、RI放出検出、RI飛散防止)

・提案の特徴(上記に付加)

(i)材料特性(小サンプル、推定)+欠陥検出(遠隔操作への適合性) → (ii)機械的負荷の分布評価 → (iii)破損防止できる負荷範囲の設定(合理的にマージン低減?) → (iv)取り出し工事(遠隔操作、RIの飛散防止) → (v)損傷管理のための監視(破壊様式に合わせた破損の検出/監視方法、遠隔操作への適合性)

研究開発項目の提案例

(1) 「もはやエネルギー生産には使わない構造物が持つべき健全性」

通常的设计基準よりもどれほどゆるくできるかについての基礎的知見を取得し、強度の基準につながる指摘を行う(照射+機械損傷後の破壊の考え方、鉄筋コンクリートに引張力を許容する場合や破壊力学的評価を導入する場合での余裕の拡大の可能性。(照射、塑性歪み導入を除き、経験が限られる領域)

(2) 「損傷の結果生じる、材料強度特性変化範囲(熱履歴、照射効果などの関数として)」

熱履歴や機械的損傷などを与えた材料の強度を評価する。コンクリートについては、破壊靱性評価、損傷を受けた鉄筋入りコンクリートの引張荷重下での強度評価も含める。炉内機器や使用済み燃料集合体を想定し、照射による損傷(加熱、変形が重畳された場合)も範囲に含める。これまでの実績の延長範囲

(3) 「損傷の結果生じた、部材の特性劣化、微細な欠陥(画像で検出が困難な)の遠隔操作による評価手法」

レーザーによる衝撃と耐放射線性の高いセンサーによる動的弾性挙動評価による微細な欠陥などの評価、コンクリートの色彩変化による熱履歴と強度劣化の推定など。(これまでの実績の延長範囲)

(4) 「微小なサンプルからの評価法」

これまでの実績からは、電子顕微鏡試料程度の微小な試料しかサンプリングできない可能性がある。微小な試料から、微細組織、硬さ、圧縮荷重による靱性評価などの強度や被削性を評価する手法を提案する。ホットラボでの試験法の開発である。(これまでの実績の延長範囲)

(5) 「損傷による特性変化をもたらす微視的機構」

上記の項目、特に(4)の基盤形成のための材料特性変化機構のうち、特に、微視的状态と材料特性変化の関係を評価する。例えば、鋼材における照射損傷+熱履歴による微細組織変化と強度変化の相関や、コンクリートのマイクロケミストリー変化と強度特性変化などを内容とする。(これまでの実績の延長範囲)

(6) 「作業時の監視方法」

破損などに伴い漏洩する、気体などの放射性物質の検出、アコースティックエミッション、構造体の動的弾性挙動の連続測定など。(新たな項目だが、原理的には目処がある項目あり)