

安全研究成果報告（中間）（案）

説明資料

実機材料等を活用した経年劣化評価・検証に係る研究 中間評価 説明資料

令和4年10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

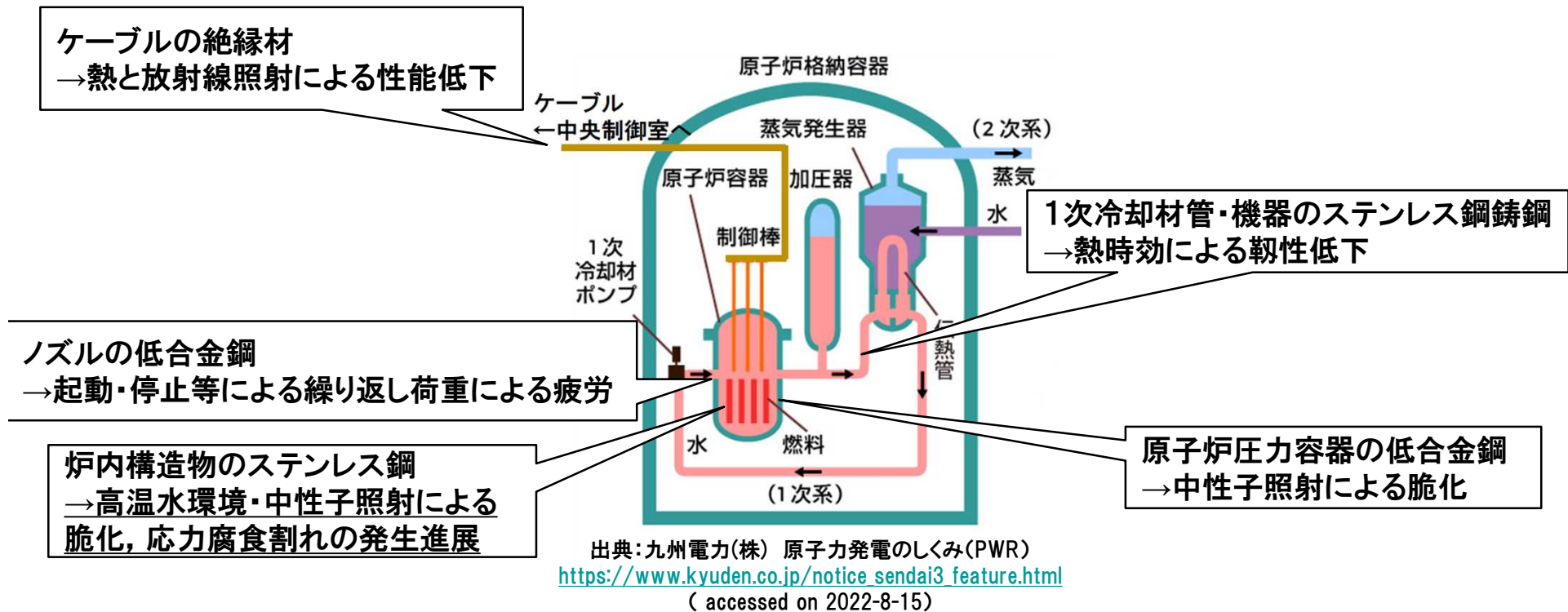
目次

1. 研究概要
2. 研究期間を通じた主要成果
3. まとめ
4. 成果の活用等
5. 成果の公表等
6. 成果目標に対する達成状況
7. 今後の展開

1. 研究概要

背景

- 過去に実施された材料研究においては、主に加速劣化試験により模擬的に経年劣化を付与した材料の特性に基づき、経年劣化評価手法が策定されている。
- しかしながら、加速劣化試験に基づき策定された経年劣化評価手法の保守性は、これまで実機環境で使用された材料の経年劣化挙動との比較によって検証はされていない。



主な機器・構造物と想定される劣化事象の例(PWR:加圧水型原子炉)

1. 研究概要（続き）

目的

- 高経年化技術評価及び運転期間延長認可申請の審査において技術的妥当性を判断するために必要な知見を蓄積する。
- 実機環境で使用された材料を用いて、加速劣化試験による経年劣化評価手法の保守性を検証する。

実施内容

本目的を達成するため、以下の4つの研究を実施する。

- (1)「原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究」では、**PWR(加圧水型原子炉)原子炉圧力容器の監視試験片(以下「監視試験片」という。)**等を用いた試験を実施する。
- (2)「電気・計装設備の健全性評価に係る研究」では、**高圧ケーブル、低圧ケーブル、電気ペネトレーション(以下「電気ペネ」という。)**及び**弁駆動部**を用いた試験を実施する。
- (3)「炉内構造物の健全性評価に係る研究」では、**BWR(沸騰水型原子炉)炉心シュラウド及び上部格子板**で使用されているオーステナイト系ステンレス鋼を用いた試験の準備を実施する。
- (4)「ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究」では、**BWR原子炉冷却材再循環ポンプ(以下「PLRポンプ」という。)**で使用されているステンレス鋼鋳鋼を用いた試験を実施する。

1. 研究概要（続き）

1.1 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究(概要)

a. 原子炉圧力容器健全性評価法の保守性に係る研究

- 監視試験片から得られた ΔT_{41J} と破壊靱性遷移曲線の移行量を比較し、現行評価手法の保守性を検証する。
- 1軸荷重応力の破壊靱性試験結果と加圧熱衝撃時に想定される実機の2軸荷重応力の破壊挙動を比較し、現行評価手法の保守性を検証する。

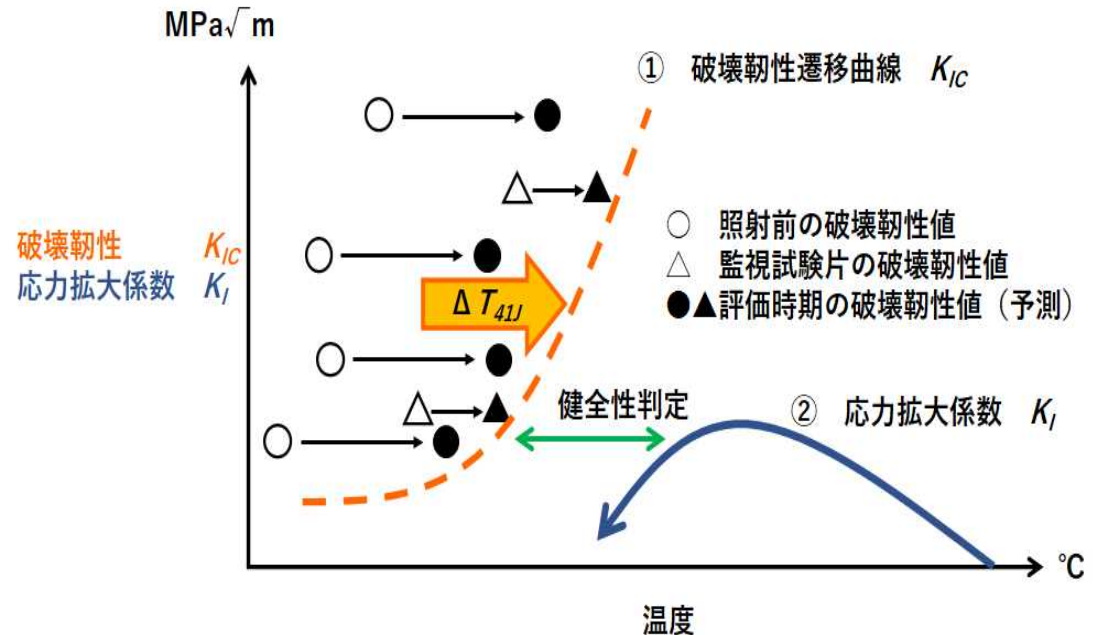


図1 加圧熱衝撃事象に対する健全性評価

b. 原子炉圧力容器健全性評価対象部位の代表性に係る研究

- 現行評価は母材で、溶接熱影響部(以下「HAZ」という。)を代表している。これは、HAZの破壊靱性及びシャルピー遷移温度移行量が母材と同等と考えられているためである。
- HAZの関連温度移行量が母材のよりも大きいプラントが出ている。長期運転により母材でHAZを代表できなくなる可能性があることから、HAZを母材で代表できるかを確認する。

1. 研究概要（続き）

1.2 電気・計装設備の健全性評価に関する研究(概要)

安全上重要な電気・計装設備の長期健全性は、供用期間中の経年劣化を模擬した加速劣化試験と設計基準事故(以下「DBA」という。)の環境を模擬した耐環境性能試験により確認している。



- 発電所で長期間使用された安全系電気・計装設備(高圧・低圧ケーブル、電気ペネ及び弁駆動部)の絶縁体の機械特性、絶縁性能データ及び実機使用環境における劣化状態調査により、現行の加速劣化試験の保守性を検証する。
- 本結果に基づき、耐環境性能試験において、通常運転時の経年劣化を模擬的に付与するために行っている加速劣化処理の保守性を検証する。
- 事故時環境下における絶縁性能データを取得し、健全性を検証する。

実施項目

- 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査
- 実機材料及びその絶縁体の劣化特性評価試験
- 事故時環境模擬試験



図2 電気ペネトレーション

1. 研究概要（続き）

1.3 炉内構造物の健全性評価に係る研究

靱性低下に係る研究(概要)

- 高経年化技術評価等は、炉内構造物の破壊靱性評価、亀裂等が生じた場合の不安定破壊について維持規格に基づき確認している。
- 中性子照射により破壊靱性が低下する可能性がある。
- 破壊靱性評価は、オーステナイト系ステンレス鋼の照射材の破壊靱性下限式を用いている。



維持規格が定めた破壊靱性下限式の保守性を検証する。

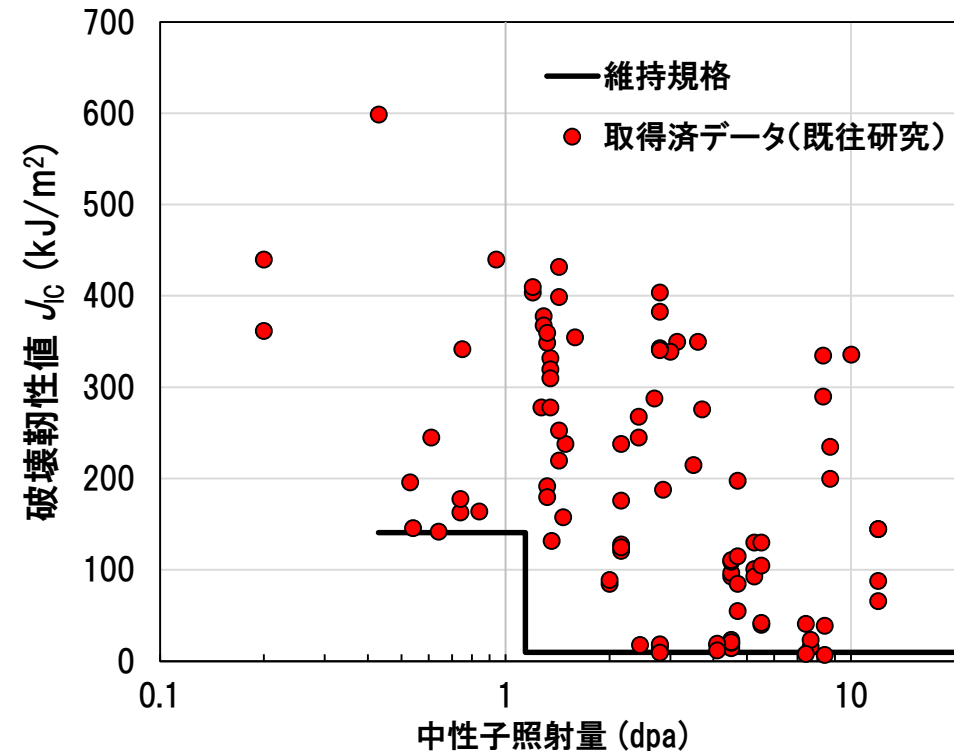


図3 オーステナイト系ステンレス鋼の照射量と破壊靱性値の関係*

(一社)日本機械学会 発電用原子力設備規格 維持規格2012年版においては、縦軸の破壊靱性値を K_{Ic} で規定されているため、JSME S 001 弾塑性破壊靱性 J_{Ic} 試験方法増補 1992, p.22 の換算式により J_{Ic} に換算した。なお、照射量データは「1dpa=7.1×10²⁴ n/m²」として換算した。

1. 研究概要（続き）

1.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

- ステンレス鋼鋳鋼の熱時効による靱性低下試験データは主に高温の加速試験(PWR)で取得している。
- 高経年化技術評価等における靱性の低下挙動評価は予測モデル(以下「H3Tモデル」という。)を用いて実施している。
- H3Tモデルは、主に加速試験(PWR)によるデータに基づき策定された。

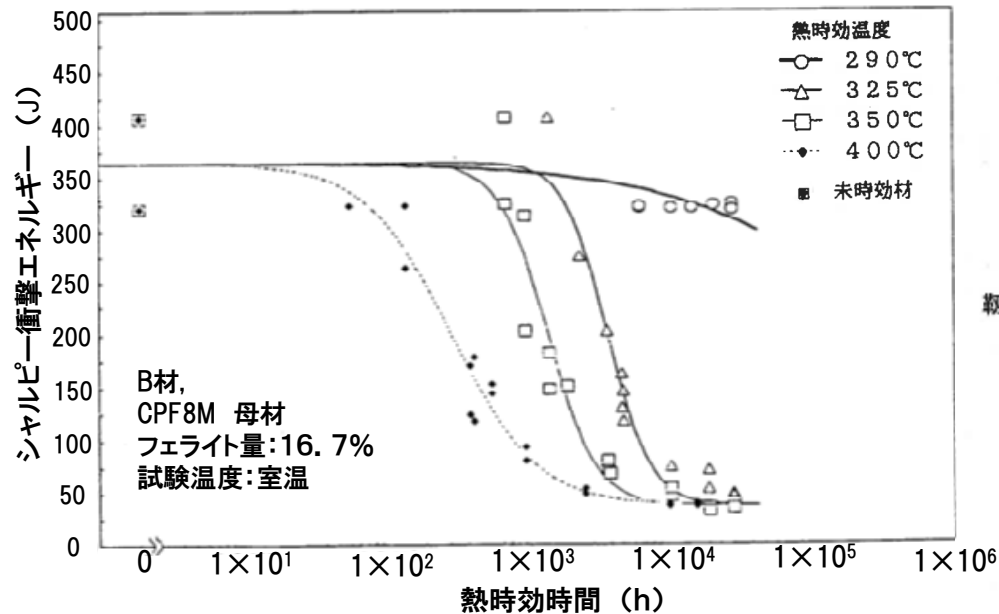


図4 熱時効によるシャルピー吸収エネルギー変化
出典:(財)発電設備技術検査協会「プラント長寿命化技術開発2相ステンレス鋼熱時効試験(PWR)」平成6年3月

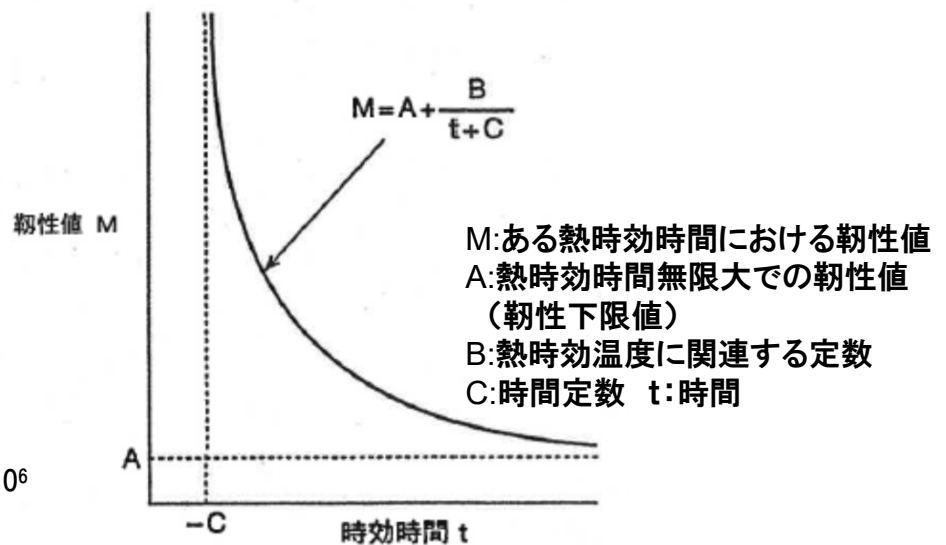
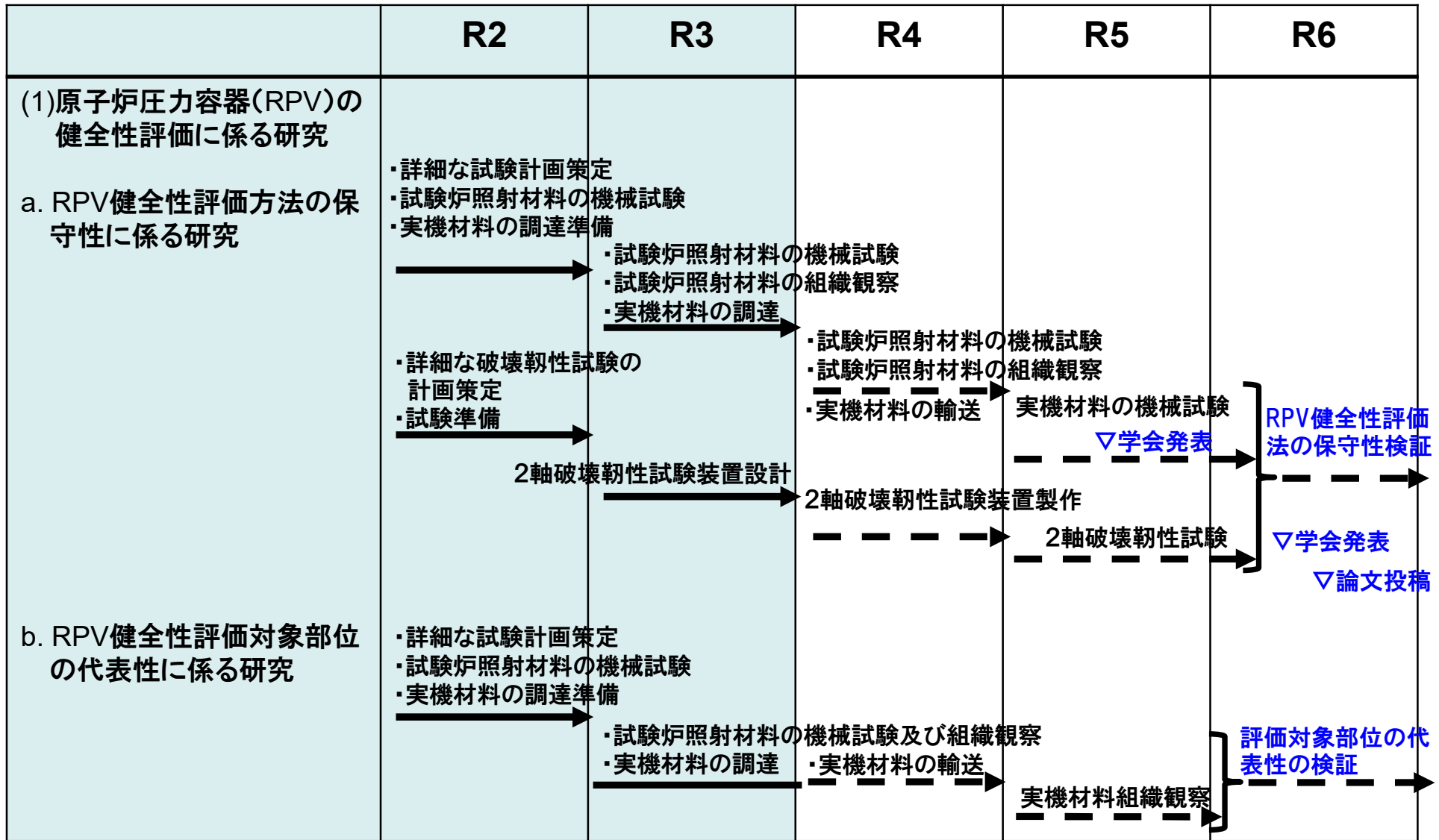


図5 H3Tモデル
出典:(財)発電設備技術検査協会「プラント長寿命化技術開発2相ステンレス鋼熱時効試験(PWR)」平成6年3月



ステンレス鋼鋳鋼製の実機材料(PLRポンプ)を用いて、BWRにおけるH3Tモデルによる靱性低下挙動評価手法の保守性を検証する。

1. 研究概要 (行程表 1/3)



青字: 規制庁は委託先が実施した試験のデータを基に分析・考察を実施する。

1. 研究概要 (行程表 2/3)

	R2	R3	R4	R5	R6
(2) 電気・計装設備の健全性評価に係る研究	a. 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査	<ul style="list-style-type: none"> ・実機材料の調査 ・実機材料試験計画策定 ・通常運転時環境調査 ・事故時環境調査 	<ul style="list-style-type: none"> ▽学会発表 ▽論文投稿 	<ul style="list-style-type: none"> ▽学会発表 ▽論文投稿 	<ul style="list-style-type: none"> ▽学会発表 ▽論文投稿
		b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験	<ul style="list-style-type: none"> ・実機材料の各種特性評価 ・新品供試体作製 ・加速劣化供試体作製 	<ul style="list-style-type: none"> ▽学会発表 ▽論文投稿 	<ul style="list-style-type: none"> ▽学会発表 ▽論文投稿
	c. 事故時環境模擬試験		<ul style="list-style-type: none"> ・電気ペネの実機材料及び加速劣化供試体の事故時模擬環境下の絶縁性能評価 ・ケーブル供試体の化学スプレー噴霧下絶縁性能の評価 		

青字：規制庁は委託先が実施した試験のデータを基に分析・考察を実施する(赤字は委託先のみ)。

1. 研究概要 (行程表 3/3)

	R2	R3	R4	R5	R6
(3) 炉内構造物の健全性評価に係る研究					
a. 靱性低下に係る研究	<p>詳細計画を検討</p> <p>→</p>	<p>実機材料の試験方法検討</p> <p>→</p>	<p>採取装置の検討</p> <p>→</p>	<p>採取工法の詳細検討</p> <p>→</p>	<p>・発電所構内における採取準備</p> <p>・試験準備</p> <p>→</p>
b. 予防保全対策技術の保守性に係る研究	<p>評価方法確立のための非照射材料試験の詳細計画検討</p> <p>・実機材料の調査/試験詳細計画検討</p> <p>→</p>	<p>・非照射材料試験の試験体作製</p> <p>・実機材料の調査</p> <p>→</p>	<p>・実機材料採取の問題点に対する検討</p> <p>・実機材料の調査</p> <p>→</p>	<p>実機材料の移送計画策定</p> <p>→</p>	<p>▽論文投稿</p> <p>・発電所構内における採取準備</p> <p>・試験準備</p> <p>→</p>
(4) ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究		<p>・詳細試験計画策定</p> <p>・実機材料の調査</p> <p>・実機材料の輸送</p> <p>→</p>	<p>・試験片の製作</p> <p>・試験の準備</p> <p>→</p>	<p>・試験の実施</p> <p>→</p>	<p>保守性の検証</p> <p>→</p>

2. 研究期間を通じた主要成果

2.1 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究*

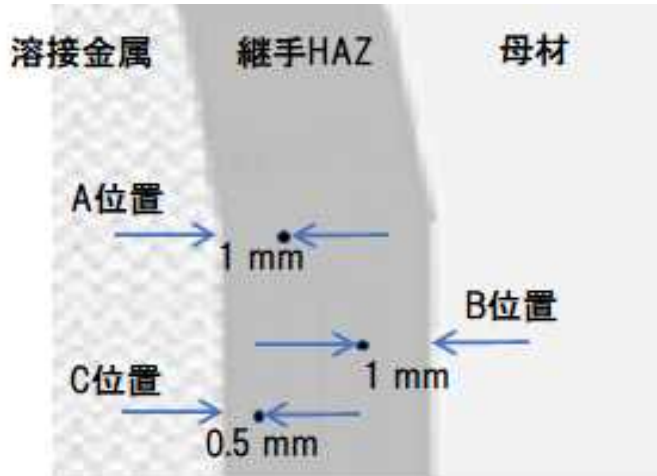
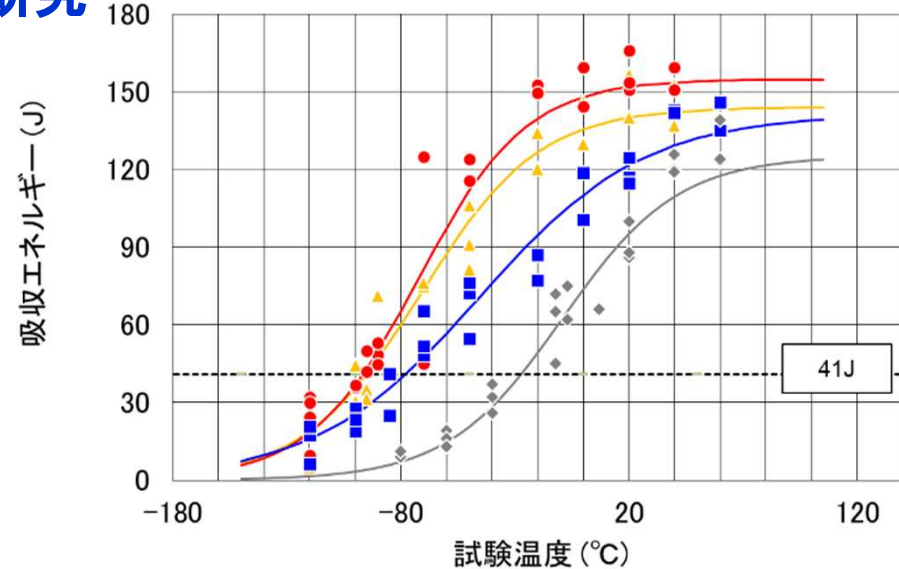


図6 HAZ試験片採取位置※1



	溶接継手HAZ のA位置 ▲	溶接継手HAZ のB位置 ■	溶接継手HAZ のC位置 ●	母材板厚1/4 位置※2 ◆
試験片数	26	26	26	24
USE(J)	147	141	155	120
T_{41J} (°C)	-94	-77	-96	-28

※2 母材板厚1/4位置のデータは既往研究で取得

図7 HAZにおけるシャルピー吸収エネルギーの遷移※1

a. 原子炉圧力容器健全性評価法の保守性に係る研究

➤ 2軸破壊試験装置の設計を実施した。

b. 原子炉圧力容器健全性評価対象部位の代表性に係る研究

➤ HAZと母材の違いによる T_{41J} に及ぼす影響確認のため、JIS Z 2242に基づくシャルピー衝撃試験を実施し、部位毎の影響を確認した(図6及び7)。

➤ 照射されたHAZ試験片の走査透過型電子顕微鏡(以下「STEM」という。)及び3次元アトムプローブ(以下「3DAP」という。)による微細組織分析を開始した。

※1出典: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和3年度原子力規制庁委託成果報告書

※2出典: 国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、平成28年度原子力規制庁委託成果報告書

2. 研究期間を通じた主要成果(続き)

2.2 電気・計装設備の健全性評価に関する研究(主要成果)

本研究では、令和3年度まで**学校法人早稲田大学**(以下「早稲田大学」という。)へ委託し、比較用ケーブル等の試験材料の調達、試験及びデータ取得を実施した。また、**原子力規制庁**(以下「規制庁」という。)は、令和3年度までに得られたデータを基に独自に分析及び考察を実施し、実機材料(低圧ケーブル)の健全性に関する知見を得た。

a. 評価対象設備の選定、使用絶縁体及び環境条件調査

- **規制庁**は、電力事業者と協議を行い、表2に示すように、実機材料を計画どおり入手できる見込みである(低圧ケーブルは入手済み)。
- 令和2年度～令和3年度は、関西電力高浜1号、高浜2号から取り出した**低圧ケーブル**を用いて、**早稲田大学は試験を実施した***。

表2 実機材料の入手計画

設備	種別	提供元	プラント名	高分子絶縁体	入手時期
低圧ケーブル	PWR	関西電力	高浜1、2号	FR-EPR	令和2年度入手済み
	BWR	東京電力		FR-EPR	令和4年度
		中国電力	島根2号	FR-EPR	令和4年度
高圧ケーブル	BWR	日本原電	東海第二	FR-CV	令和6年度
電気ペネ	BWR	日本原電	東海第二	エポキシ	令和4年度
弁駆動部	PWR	関西電力	美浜1号		令和4年度入手済み

2. 研究期間を通じた主要成果(続き)

2.2 電気・計装設備の健全性評価に関する研究(主要成果)

b. 実機材料及び高分子絶縁体の劣化特性評価試験

- 早稲田大学は、実機材料の絶縁特性を評価するとともに、難燃EPRの構造変化、機械特性及び電気特性を状態監視手法等により評価した※1。

c. 事故時環境模擬試験で得られた成果

- 早稲田大学は、実機材料及び加速劣化ケーブル実機材料を用いて、NRA技報等で規制庁がこれまでに示した事故模擬環境条件を基に、試験(SA1について2条件(SA1、2)及びLOCA)を実施し、事故時模擬蒸気暴露下での絶縁抵抗を測定した※1。
- 規制庁は、得られたデータを独自に考察した。

蒸気暴露試験中の換算絶縁抵抗は、 $10^8 \Omega \cdot m$ (SA1)及び $10^9 \Omega \cdot m$ (SA2、LOCA)程度。敷設のケーブル長さを100 mと仮定すると絶縁抵抗は $10^5 \Omega$ より大きく、生じる誤差は小さい。

⇒ 測定された換算絶縁抵抗は、十分な絶縁抵抗である。

蒸気暴露試験後の耐電圧試験に合格

⇒ 低圧ケーブルの健全性は保たれる。



低圧ケーブルの事故時環境下における健全性に関する知見を得た※2。

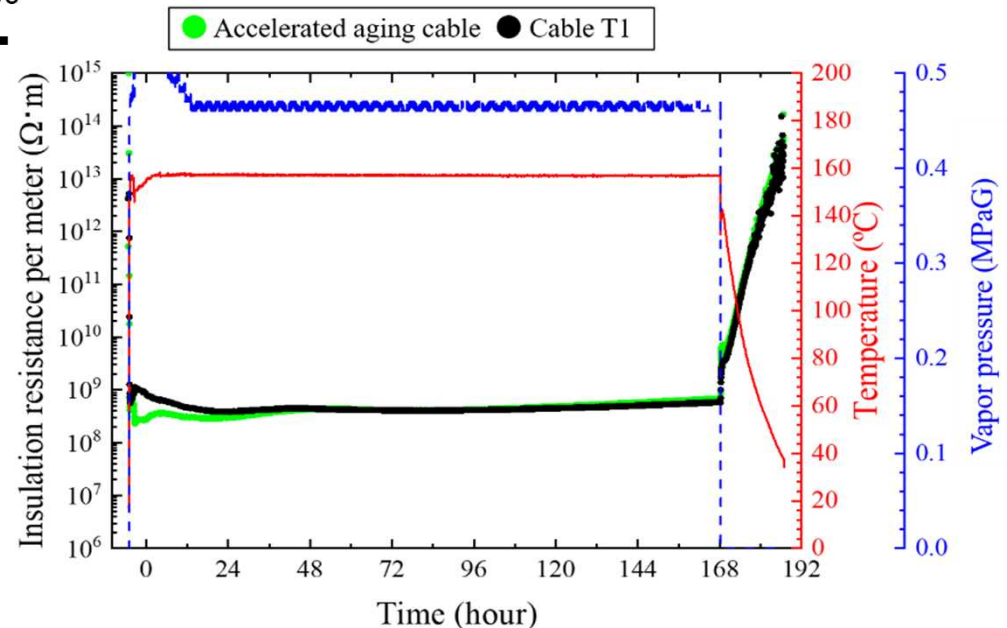


図8 SA1蒸気暴露中におけるケーブルの1m当たりの絶縁抵抗の時間変化※2

※1出典: 学校法人早稲田大学、令和3年度原子力規制庁委託成果報告書

※2出典: 渡辺藍己 他、原子力発電所から撤去されたFR-EPDMケーブルの重大事故環境下における絶縁性能

2. 研究期間を通じた主要成果(続き)

2.3 炉内構造物の健全性評価に係る研究* 靱性低下に係る研究(主要成果)

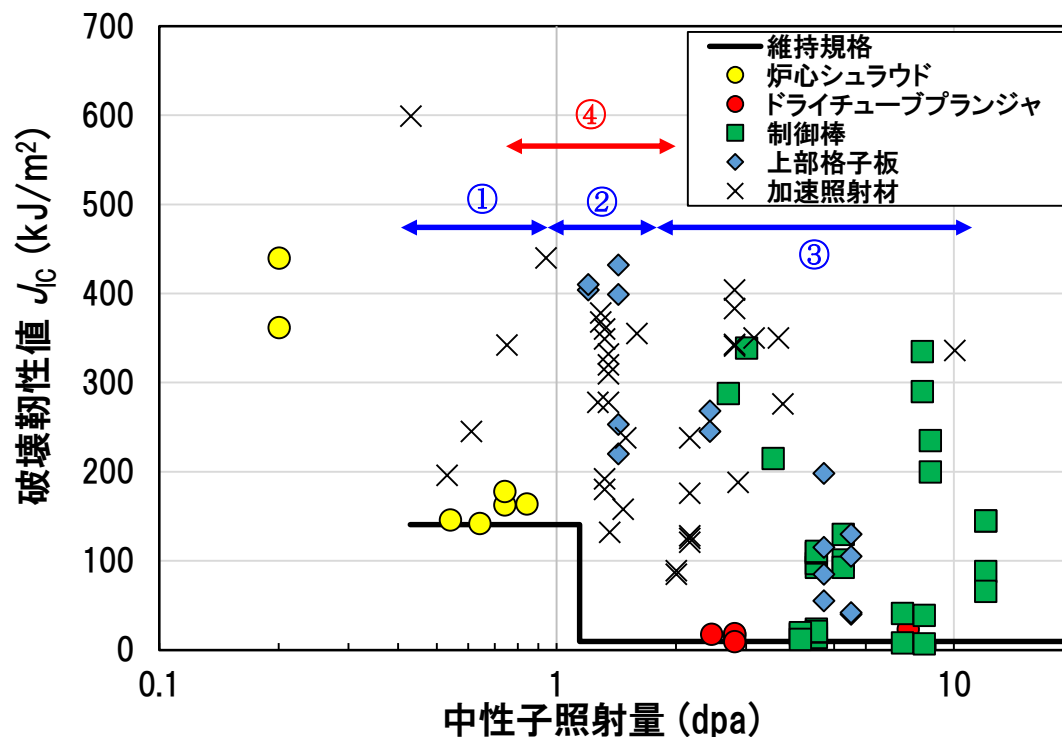


図9 採取ターゲット案*

表3 採取予定部位*

No.	中性子照射量 (dpa)	採取部位
①	約0.4~1.0	炉心シュラウド及び上部格子板
②	約1.0~2.0	炉心シュラウド及び上部格子板
③	約2.0~	炉心シュラウド及び上部格子板
④	約0.8~	炉心シュラウド

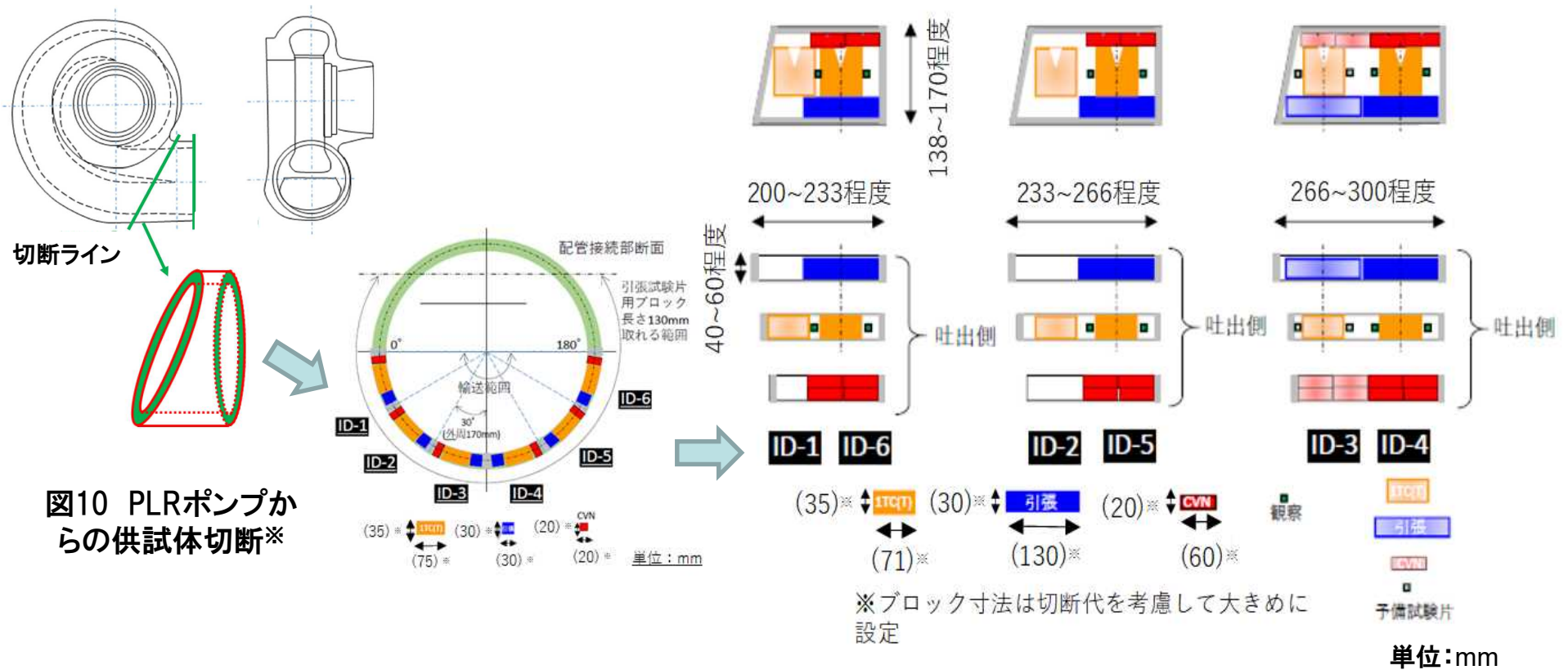
➤ 廃炉プラントにおける採取部位の検討

既往研究より、破壊靱性下限式の保守性を検証するために有効な照射量を決定した。

⇒対象となる照射量の材料が炉心シュラウド及び上部格子板から採取可能であることが確認できた。⇒採取計画及び試験マトリックスについて検討した。

2. 研究期間を通じた主要成果(続き)

2.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究(主要成果)*



➤ 浜岡1号PLRポンプから供試体取得の検討

➡ 供試体切断を終了し、研究実施機関まで輸送が完了した。

また、破壊靱性データ取得のための試験項目及び試験片採取位置を検討した。

3. まとめ

令和3年度までに実施すべき研究項目に対しては、**計画どおり進捗**している。

3.1 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究※1

- 実機を考慮した2軸荷重下における破壊試験を行うための2軸破壊試験装置の設計を実施した。
- 試験炉照射材料の溶接継手HAZから採取した試験片の機械試験を実施した。
- 中性子照射されたクラッド付き溶接継手材の母材クラッド下HAZから採取した試験片のSTEM及び3DAPによる微細組織分析を実施した。
- 監視試験片を玄海2号のRPVから取り出し、研究実施機関への輸送準備を実施した。

3.2 電気・計装設備の健全性評価に係る研究

- 早稲田大学は、高浜1号及び高浜2号で長期間使用された低圧ケーブルの絶縁体の機械特性、絶縁性能に係るデータ取得、実機使用環境における劣化状態の調査、これら実機材料を用いて事故環境下における絶縁性能に係るデータの取得、並びに蒸気暴露試験後の実機材料の劣化状況を確認を実施した※2。
- 規制庁は、早稲田大学が得たデータを独自に分析及び考察して、低圧ケーブルの実機使用環境における健全性に関する知見を取得した※3。

※1 出典：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和3年度原子力規制庁委託成果報告書

※2 出典：学校法人早稲田大学、令和3年度原子力規制庁委託成果報告書

※3 出典：渡辺藍己 他、原子力発電所から撤去されたFR-EPDMケーブルの重大事故環境下における絶縁性能

3. まとめ(続き)

3.3 炉内構造物の健全性評価に係る研究※

- 廃炉プラントから実機材料を取得するために国内外で取得されている照射ステンレス鋼の破壊靱性データを基に採取すべき炉内構造物の部位を特定した。また特定した部位からの試験片の採取計画及び試験マトリックスの策定を行った。

3.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究※

- 浜岡1号で長期間使用されたPLRポンプを実機材料として選定し、発電所構内からの切り出し作業を行い、研究実施機関まで輸送が完了した。また、本研究において実施する試験項目及び試験片採取位置の検討を行った。

4. 成果の活用等

本研究の成果は、

- 高経年化技術評価及び運転期間延長認可制度に係る劣化状況評価の審査に関する **技術的判断根拠として活用**が期待される。
- 民間規格の技術評価を実施する際の **技術的知見として活用**が期待される。

5. 成果の公表等

原子力規制庁の職員が著者に含まれる公表

論文投稿:2件

- 渡辺藍己 他、「原子力発電所から撤去されたFR-EPDMケーブルの重大事故環境下における絶縁性能」、電気学会論文誌A、Vol.142 No.9、pp368-374、2022年9月
- 芳賀明日香他、重大事故環境下での原子力発電所用安全系低圧ケーブルの絶縁特性に及ぼす酸素の影響、電気学会論文誌A(2022年7月投稿)

国際会議プロシーディングス:1件

- Aiki WATANABE, et al., Research Activities on Cables for Nuclear Power Plants, Fifth International Conference on Nuclear Power Plant Life Management, Vienna, Nov. 28-Dec.2, 2022

学会発表:3件

- 渡辺藍己 他、「実機ケーブルの重大事故環境下における絶縁性能」、電気学会第52回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、オンライン開催、2021年9月(査読なし)
- 芳賀明日香 他、「沸騰水型原子炉用電気ペネトレーションの重大事故時環境における絶縁性能」、電気学会第52回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、オンライン開催、2021年9月(査読なし)
- 芳賀明日香 他、「原子力発電所用安全系ケーブルの重大事故時環境下での絶縁特性に及ぼす酸素の影響」、電気学会第53回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、東北大学、2022年9月(査読なし)

5. 成果の公表等(続き)

委託先による公表

論文投稿:1件

- Yoshimichi Ohki, et al, “Synergism of radiation and steam on mechanical properties of cable insulation removed from a nuclear power plant”, Journal of Nuclear Science and Technology(submitted in Jul, 2022)

国際会議プロシーディングス:2件

- Yoshimichi OHKI, et al., “Degradation of a FR-EPDM Cable Removed from a Nuclear Power Plant”, IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena, Denver, Oct. 30-Nov. 2, 2022.
- Yoshimichi Ohki, et al., “Superposition of Time-dependent Data for Accelerated Aging of Nuclear Power Plant Cables and Its Validity”, 9th International Conference on Condition Monitoring and Diagnosis 2022, Kitakyusyu, Nov.13-18, 2022.

5. 成果の公表等(続き)

学会発表:8件

- 佐藤孔亮 他、「原子力発電所から撤去された難燃エチレンプロピレンジエンゴム 絶縁ケーブルの電流積分法による劣化評価」、電気学会第52回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、オンライン開催、2021年9月(査読なし)
- 平井直志 他、「原子力発電所から撤去された難燃エチレンプロピレンジエンゴム ケーブル絶縁体の機械特性」、誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会、オンライン開催、2022年3月(査読なし)
- 佐藤孔亮 他、「原子力発電所から撤去された難燃エチレンプロピレンジエンゴム 絶縁ケーブルの電流積分法による劣化評価(II)」、誘電・絶縁材料/電線・ケーブル合同研究会、オンライン開催、2022年3月(査読なし)
- 大木義路、「原子力発電所用ケーブルの劣化位置標定と重大事故環境下での劣化挙動、早稲田大学・東京都市大学 共同原子力専攻第16 回未来エネルギーフォーラムシンポジウム(2010年4月・共同原子力専攻設立からの歩み)原子力エネルギー利用と安全研究の最前線」、早稲田大学、2022年3月(査読なし)
- 大木義路 他、「原子力発電所よりの撤去ケーブルと人工劣化ケーブルの比較による加速劣化の妥当性評価」、電気学会第53回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、東北大学、2022年9月(査読なし)
- 佐藤孔亮 他、「原子力発電所から撤去された難燃エチレンプロピレンジエンゴム絶縁ケーブルの電流積分法による劣化評価 (III)」、電気学会第53回電気電子絶縁材料システムシンポジウム、東北大学、2022年9月(査読なし)
- 下平昌樹 他、“透過型電子顕微鏡を用いた原子炉圧力容器溶接熱影響部の照射欠陥分析”、日本原子力学会2022年秋の大会、茨城大学、2022年9月(査読なし)
- Yasufumi Miura, et al., “CRIEPI research activities on material aging using decommissioned reactor materials sponsored by Nuclear Regulation Authority”, Vienna, Nov.28-Dec.2, 2022.

6. 成果目標に対する達成状況

令和3年度までに実施すべき研究項目に対しては、**計画どおり進捗**している。

6.1 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究※1

- 2軸破壊試験装置の**設計が完了した**。また、試験炉照射材料を用いた**機械試験に着手した**。試験炉照射材料を活用し、HAZの照射前後の破壊靱性を確認するための**微細組織分析に着手した**。更に、監視試験片の入手に関しては研究実施機関へ輸送する準備が完了した。

6.2 電気・計装設備の健全性評価に係る研究

- 高浜1号及び高浜2号から入手した低圧ケーブルを用いた試験を実施し、劣化状況及び事故時模擬環境における絶縁性能に係るデータを取得することにより※2、**低圧ケーブルの健全性**に係る知見を得ることができた※3。

6.3 炉内構造物の健全性評価に係る研究※4

- 採取予定の部位から試験片の**採取計画及び試験マトリックス**の策定を実施した。

6.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究※4

- 浜岡1号のPLRポンプから供試体を取得し、研究実施機関まで**輸送が完了した**。また、試験項目及び試験片採取位置の検討を行った。

※1 出典：国立研究開発法人日本原子力研究開発機構、令和3年度原子力規制庁委託成果報告書

※2 出典：学校法人早稲田大学、令和3年度原子力規制庁委託成果報告書

※3 出典：渡辺藍己 他、原子力発電所から撤去されたFR-EPDMケーブルの重大事故環境下における絶縁性能

※4 出典：一般財団法人電力中央研究所、令和3年度原子力規制庁委託成果報告書

7. 今後の展開

令和4年度以降は以下を実施する。

7.1 原子炉圧力容器の健全性評価に係る研究

- 委託先においては、**監視試験片**を用いた**破壊靱性試験等**、2軸破壊試験装置による**破壊試験**、試験炉照射材料を用いた**機械試験**及びHAZの**微細組織分析**を実施する。また、原子力規制庁においては、試験から得られたデータを基に分析及び考察を実施する予定である。

7.2 電気・計装設備の健全性評価に係る研究

- 委託先においては、**実機材料(電気ペネ、弁駆動部及び高圧ケーブル)**を用いて、**状態監視手法等**による**劣化特性評価試験**及び**事故時環境模擬試験**を実施する。また、原子力規制庁においては、試験から得られたデータを基に分析及び考察を実施する予定である。

7.3 炉内構造物の健全性評価に係る研究

- 委託先においては、廃炉工程に応じて取得予定の**炉心シュラウド等**を的確に採取できるよう**準備を実施する**。また、原子力規制庁においては、検討した結果を基に、令和6年度以降に取得予定の炉内構造物を確実に採取できるよう準備する予定である。

7. 今後の展開

令和4年度以降は以下を実施する。

7.4 ステンレス鋼製機器の健全性評価に係る研究

- 委託先においては、**PLRポンプ**から採取した実機材料を用いて、破壊靱性試験、シャルピー衝撃試験等及び組織観察を実施する。また、原子力規制庁においては、試験から得られるデータを基に分析及び考察する予定である。

ご清聴ありがとうございました