

# 材料劣化・高経年化対策技術に関する研究

安全研究センター  
原子炉施設安全評価研究ユニット  
機器・構造信頼性評価研究グループ

鬼沢 邦雄

## 研究の位置付け（目的・意義）

高経年機器の健全性確認に資するため、放射線による材料劣化挙動の機構論的な経年変化予測手法を整備するとともに、確率論的破壊力学解析手法を整備する。

## 設定目標（期待される成果、達成時期）




- 放射線場における材料劣化の機構論的な予測評価手法、監視試験片による原子炉圧力容器の破壊靱性評価手法、及び確率論的破壊力学(PFM)解析に基づく構造信頼性評価手法を整備(H18年度以降)
- 上記の成果を基にした高経年化に対する安全規制(定期安全レビュー、リスク評価等)に関わる手法を提案(H21年度を目標)

# 研究の進め方（実施体制、手順、手法）

## 実施体制

- ・材料経年劣化研究： 安全研究センター、原子力基礎工学研究部門、システム計算科学センター、施設管理部門（原子力科学研究所 WASTEF、大洗研究開発センター JMTR・ホットラボ） 【保安院、JNES受託】
- ・構造健全性評価研究：安全研究センター 【保安院受託】

## 手順、手法

	2005	2006	2007	2008	2009
材料経年劣化研究	放射線による材料劣化の機構解明と評価手法の高度化				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 監視試験片による破壊靱性評価</li> <li>・ 原子炉压力容器鋼の中性子照射脆化</li> <li>・ 炉内構造材料の照射誘起応力腐食割れ</li> <li>・ 原子力用ステンレス鋼の応力腐食割れ</li> </ul> }原子力基礎工学研究部門で実施				
	 高経年化対策に関する技術基準（ガイドライン、指針等）や学協会規格の整備への貢献				
	原子炉構造機器の確率論的破壊力学解析手法の整備				
構造健全性評価研究	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 原子炉压力容器の健全性評価</li> <li>・ 圧力バウンダリ配管等の地震時信頼性、検査の合理化</li> </ul>				
	<ul style="list-style-type: none"> <li>・ 貫通部等の複雑部評価法</li> </ul>				
	 高経年化技術評価の適切性評価への貢献  P S A手法の高度化、リスク情報を活用した検査計画の評価等への貢献				

# 成果

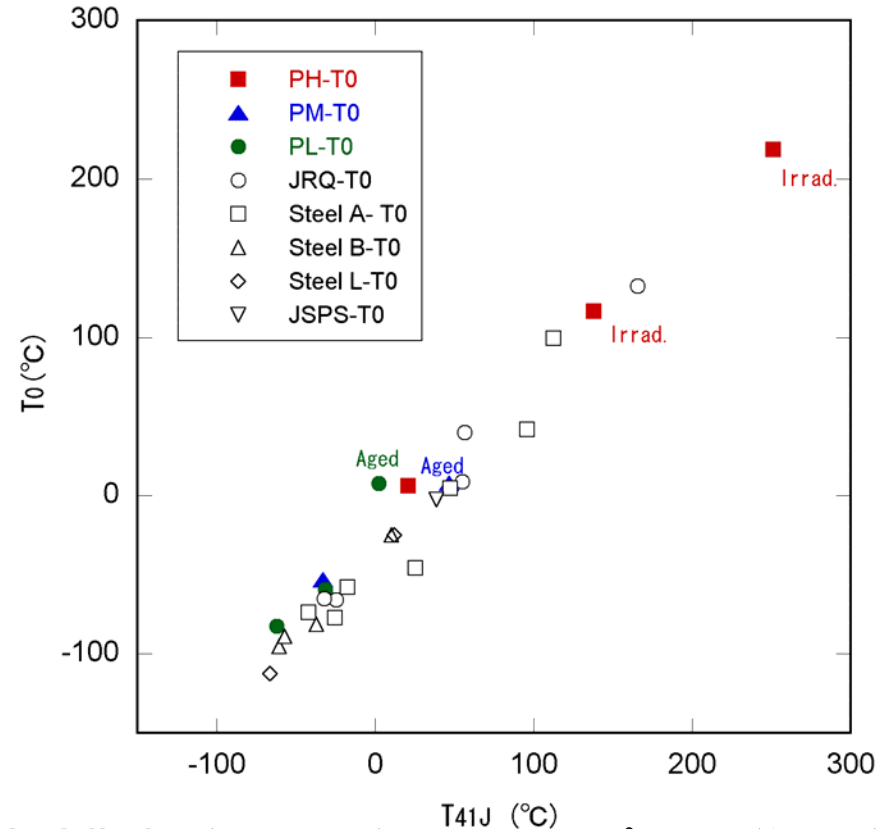
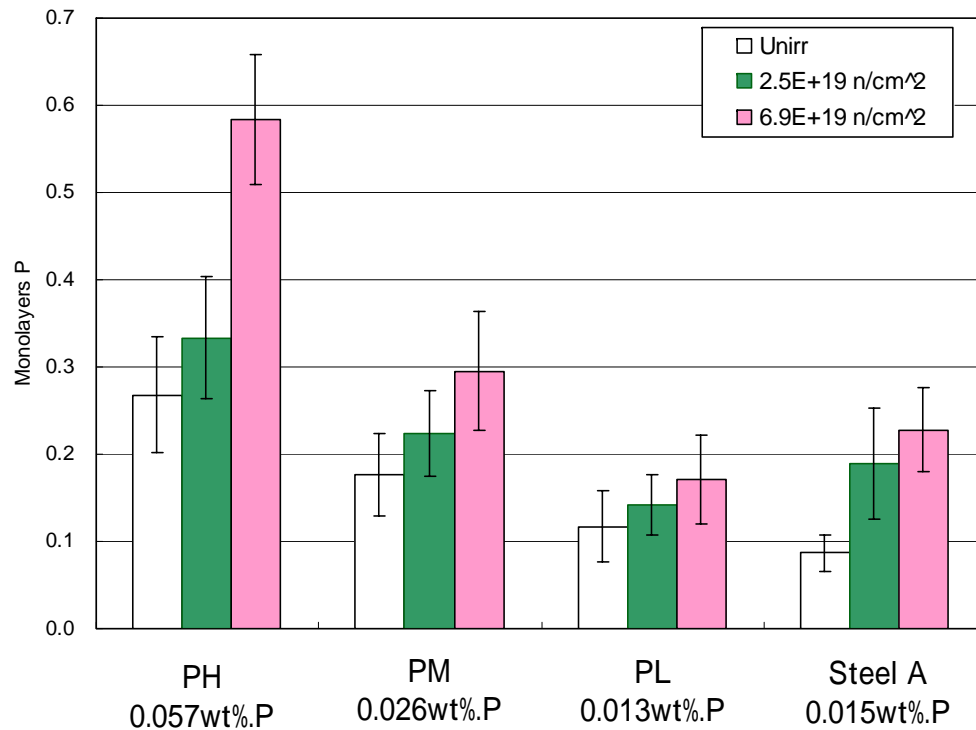
**JMTR照射材の粒界破面分析データを取得、粒界破壊材に対する破壊靱性評価の知見を取得**

**原子炉压力容器の標準的PFM解析手法を整備**

**地震時における経年配管の構造健全性評価  
コードを公開**

# JMTR照射材の粒界破面分析と破壊靱性評価

- オージェ電子分光分析装置による中性子照射材の粒界破面分析
- 破壊靱性マスターカーブ法に基づく粒界脆化材の破壊靱性評価



中性子照射による粒界P濃度の変化

破壊靱性参照温度とシャルピー遷移温度との関係

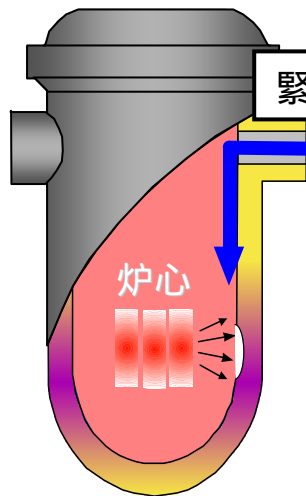
➤ 中性子照射に伴う粒界脆化材の破壊靱性評価手法をとりまとめ

# 原子炉压力容器標準的PFM解析手法

## 原子炉压力容器PFM解析コードPASCAL ver.2の開発と応用例

### PASCAL 2の機能

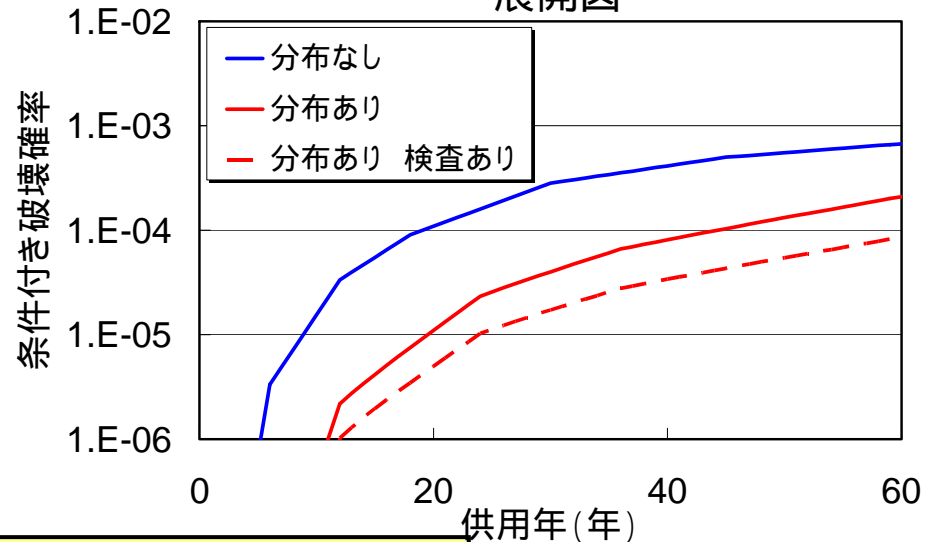
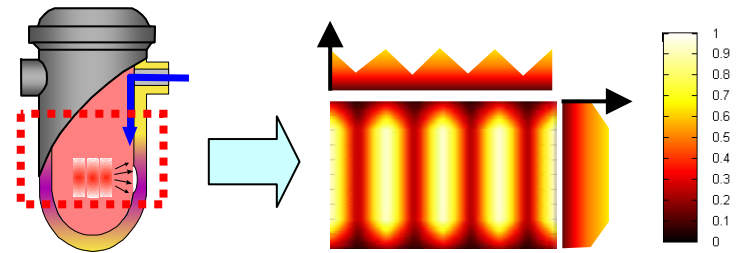
PTS(加圧熱衝撃)発生時の  
条件付き破壊確率の算出



#### 解析条件

- ✓ 容器幾何形状
- ✓ 初期き裂形状
- ✓ 破壊靱性低下  
(中性子照射脆化)
- ✓ 非破壊検査

炉心領域部の中性子照射量分布を考慮



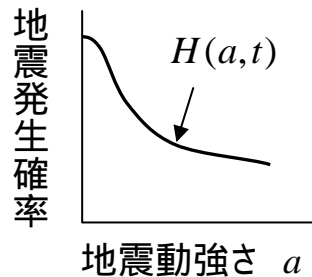
- 各種解析機能の改良による精度向上
- 重要パラメータの感度解析
- ➡ 標準的PFM解析手法のとりまとめ

# 地震時における経年配管の構造信頼性評価手法

## Phase 1

断層モデルによる地震ハザード評価

地震ハザード曲線

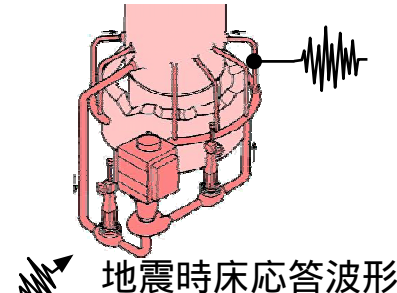


SHEAT-FM

## Phase 2

A. 対象機器の地震応答解析

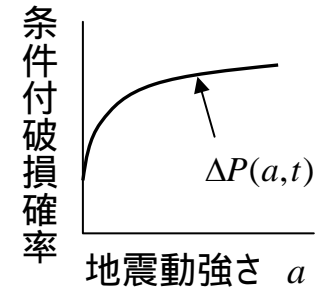
配管の地震時応力波形



DYNEQ, RESP

B. 経年化配管の地震時損傷度評価

地震時損傷度曲線

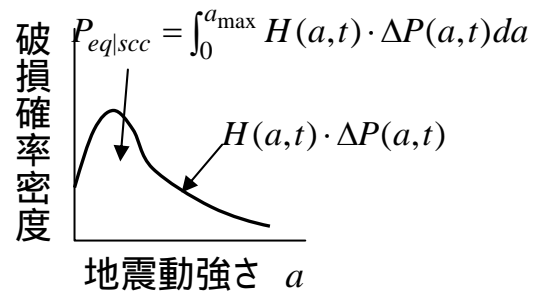


PASCAL-SC, EQ

## Phase 3

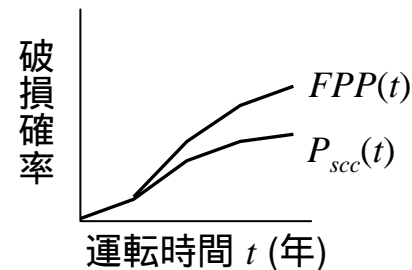
経年化配管の地震時信頼性評価

$t$  年の地震リスク密度



経年化配管の破損確率 (FPP)

$$FPP(t) = P_{scc}(t) + P_{eq|scc}(t)$$



本手法を学会論文に公表。  
解析コードの開発を完了し、PRODASに公開登録。

\* SCC: 応力腐食割れ Stress Corrosion Cracking

# 成果のまとめ

成果(1): 中性子照射による原子炉压力容器鋼中のリンの粒界偏析挙動を明らかにするとともに、粒界脆化材の破壊靱性評価に対する破壊靱性マスターカーブ法の適用性を示した。また、原子炉压力容器の加圧熱衝撃事象を対象としたPASCAL ver.2コードを整備し、標準的PFM解析手法をとりまとめた。【原子力安全・保安院受託】

成果(2): 地震時における経年配管の構造信頼性評価手法を整備し、地震ハザード評価コード(SHEAT-FM)、応答解析コード(RESF)、及び経年配管PFM解析コード(PASCAL-SC, EQ, EC)を整備し、平成17年度中に原子力機構プログラム等検索システムPRODASに公開登録した。

成果(3): 原子力压力容器鋼を模擬したモデル合金について、イオン照射研究施設において電子線照射試験を実施し、照射損傷機構に関する知見を得た。また、中性子照射脆化の非破壊検出手法に関して、原子炉压力容器鋼の磁氣的性質及び機械的性質の照射による変化に関するデータの分析を進めた。



# 成果の活用

- 原子炉圧力容器のPFM解析手法、破壊靱性評価手法及び照射脆化予測評価手法については、高経年機器の健全性確認に資するため、電気協会の技術規程や維持規格の改訂に当たって成果を活用することを今後の目標とする。
- プログラム検索等システムPRODASへの公開登録手続きを行った経年配管PFM解析コードについては、平行してJNESとの安全解析コード相互利用協定に基づき、JNESからの入手申込に対応。今後、実機PFM解析や安全解析への適用に向けた技術的支援を行う。
- 日本機械学会におけるリスクベース検査に関する規格策定へ向けて、PFM解析手法の技術基盤を提供する。
- 成果の公表等
  - 学術論文：3編
  - JAEA報告書等：9編
  - 外部発表：6件

# 用語解説

## ✓照射脆化

中性子などの照射で、材料の破壊に対する裕度が低下する現象。原子炉圧力容器では、監視試験片により裕度を確認し、安全な運転を確保している。

## ✓破壊靱性マスターカーブ法

フェライト鋼のように低温で脆性破壊を示し、高温で延性破壊を示す鋼材に対して、その延性脆性遷移温度域で破壊靱性試験を行い、破壊発生時のJ積分値に基づいて破壊靱性値の平均とばらつきを評価する。得られる破壊靱性値は鋼種によらず、マスターカーブと呼ばれる一定の温度依存性を示すことから、評価結果を基に破壊靱性値の参照温度を求めることにより、破壊靱性の延性脆性遷移挙動を評価できる。

## ✓確率論的破壊力学(PFM)

破壊力学は、材料中にき裂の存在あるいは発生を想定し、機器・構造物の破壊に対する裕度を評価する工学的手法。確率論的破壊力学は、き裂形状など破壊現象に影響する種々のパラメータに、確率的な分布を与えて評価する手法。統計的なばらつきや不確実性がより合理的に評価できるものとして期待されている。

## ✓地震ハザード

ある地点での大きな地震が発生する確率がどれほどあるかを数値で表したものの。地震危険度ともいう。通常、地殻の構造、活断層、過去の地震発生記録などから評価される。

## ✓応力腐食割れ

材料が、引張り応力が働いた状態で、腐食環境下にさらされることで、き裂の発生や進行が生じる現象。オーステナイト系ステンレス鋼の溶接部近傍では、溶接時の熱により、応力腐食割れを起こす条件を満たし易くなることがある。