

BWRプラントにおける 非延性破壊に対する評価について

2023年4月13日

原子力エネルギー協議会

はじめに

- ATENAとしては、プラントの運転実績に応じた劣化の状況を適切に把握し、長期運転における安全性を理解いただくための評価の重要性が増していくものと認識している。
- 本日は、原子力規制委員会において検討されている高経年化した原子炉に係る安全規制に関わるものとして、BWRプラント（ABWRを含む）の原子炉圧力容器（以下、RPV）における非延性破壊に対する評価に関する検討の成果※^{1,2}について、ご説明させていただきます。

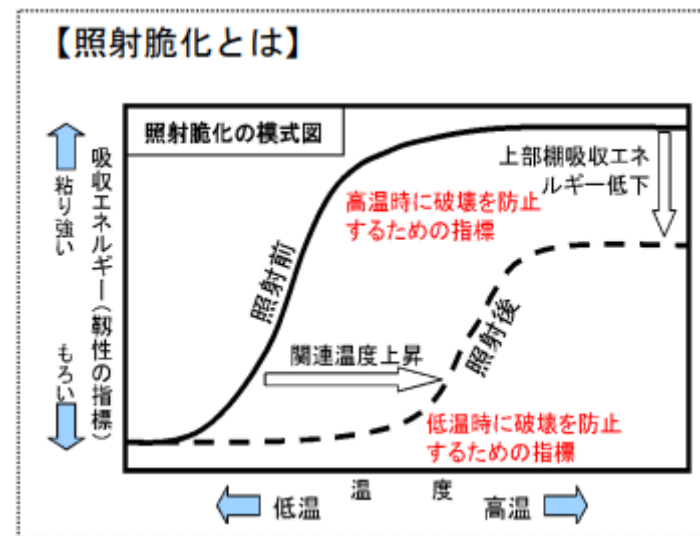
- ✓ RPVに対する健全性評価について ➡ 2 ~ 4
- ✓ BWRプラントにおける非延性破壊に対する評価に関する検討状況 ➡ 5 ~ 13

※1 （財）発電設備技術検査協会、溶接部等熱影響部信頼性実証試験に関する調査報告書
[原子炉圧力容器加圧熱衝撃試験] [総まとめ版]、平成4年3月、P.20-26

※2 柘田他、「沸騰水型原子炉圧力容器の過渡事象における加圧熱衝撃の評価」、
日本保全学会第10回学術講演会、2013,7

RPVにおける照射脆化の管理・評価について

- RPVは、運転に伴い中性子の照射を受けて徐々に材料の靱性（粘り強さ）が低下するため、この脆化の進行程度を評価・把握し、健全性を確認していくことが重要である。
- 将来の脆化の進行程度を評価・把握することを目的として、RPVの内側には予め試験片を入れた監視試験カプセルを装荷することにしており、このカプセルを計画的に取り出し、試験を行うことにしている。
- これらの監視試験の結果を踏まえて、日本電気協会の電気技術規程に定められる脆化の評価手法に基づいて、想定する運転期間に対する将来の脆化の進行程度に関する評価を行っている。
- RPVに亀裂があると仮定し、想定される荷重を受けた場合の破壊に対する評価を行うことで、RPVの健全性が十分に確保可能であることを確認している。
(例：PWRプラントにおけるPTS事象に対する評価)



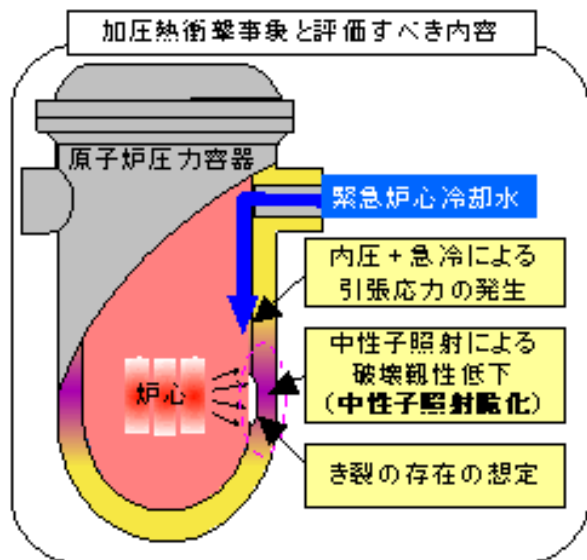
照射脆化の模式図※

RPVに対する健全性を確認するための評価

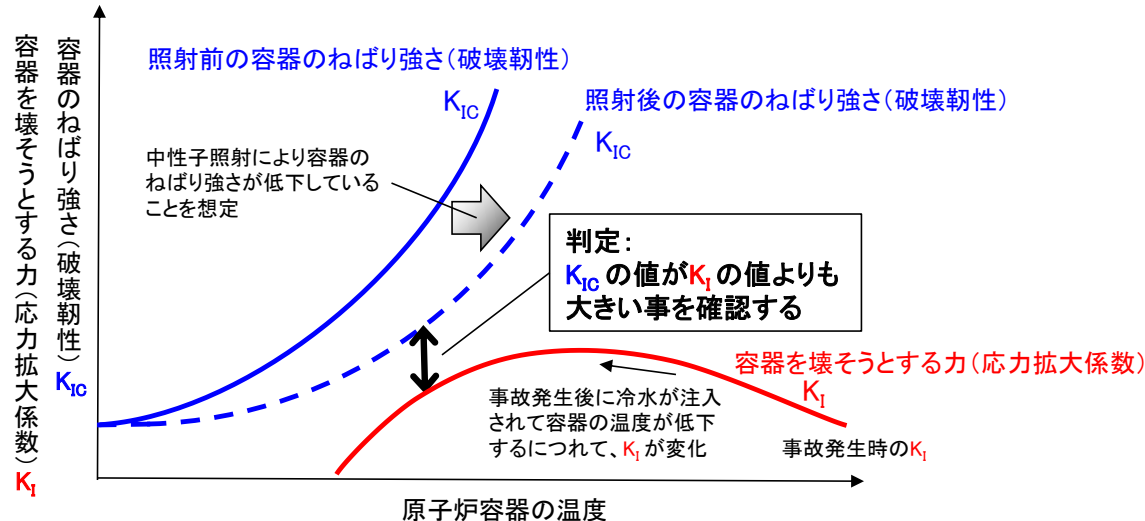
- 国内では、日本電気協会の「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」JEAC4206-2007（以下、JEAC4206）等に基づく以下の評価を実施しており、これらの評価結果を踏まえた管理・運用を実施している。
 - ✓ RPVに対する供用期間中の耐圧・漏えい試験及び運転条件の制限（耐圧・漏えい試験及び耐圧・漏えい試験を除く供用状態A及びBに対する評価）
 - ✓ RPVに対する供用期間中の破壊靱性の要求（供用状態C及びDに対する評価）
- JEAC4206における「RPVに対する供用期間中の破壊靱性の要求」では、PWRプラントのRPVの炉心領域に対する非延性破壊防止のための評価方法を規定しており、PTS（Pressurized Thermal Shock 加圧熱衝撃）事象に対する評価手法が規定されている（附属書C）。
- 一方、BWRプラントのRPVに対しては、「供用状態C及びDにおいてはPTS事象のような非延性破壊に対して厳しくなる事象はなく、供用状態A及びBに対する評価で代表できる」とされている（解説-附属書A-3120）。

加圧熱衝撃事象（PTS事象）

- 非常用炉心冷却系（以下、ECCS）の作動に伴う炉心注水等により、加圧されたRPV内面が急激に冷却されることで、RPV内外間の温度差及び内圧による膜応力が重畳した場合に高い引張応力がRPVの内表面に発生する事象をPTS事象と呼ぶ。
- PWRプラントにおけるPTS事象に対する健全性評価のイメージを以下に示す。



(a) 原子炉压力容器の概要図※1



(b) PTS事象に対する健全性評価のイメージ図※2

図 原子力压力容器のPTS事象に対する健全性評価のイメージ図

BWRプラントにおける非延性破壊に対する評価の考え方

- BWR・ABWRプラントにおいては、以下の通りRPV等の構造・システム構成からPTS事象が発生することはない。
 - ✓ 注水する系統のノズルにはサーマルスリーブ他が設けられており、冷水が直接炉壁に接することがない（次頁参照）。
 - ✓ 自由水面を持ち、飽和圧力・温度の関係にあり、原子炉圧力は蒸気温度の低下に伴い減少するため、高圧状態のまま冷却されることがない。
 - ✓ RPVと炉心の上に十分な間隔があり、供用期間中の中性子照射量が低く抑えられる設計としている。
- また、破壊力学評価の結果からも、RPV鋼材は十分な破壊靱性を有していること、供用状態A及びBに対する評価で代表可能であることが確認できていることから、JEAC4206においても、BWR・ABWRプラントに対するPTS事象に対する評価は対象外として扱われている（評価不要）と認識している。



BWRプラントにおける非延性破壊に対する評価に関する検討状況を説明する

BWRプラントの設計における特徴

- BWRプラントでは、注水系統のノズルにはサーマルスリーブが設けられており、炉心シュラウドの内側に注水されることから、冷水が直接炉壁に接することがない。

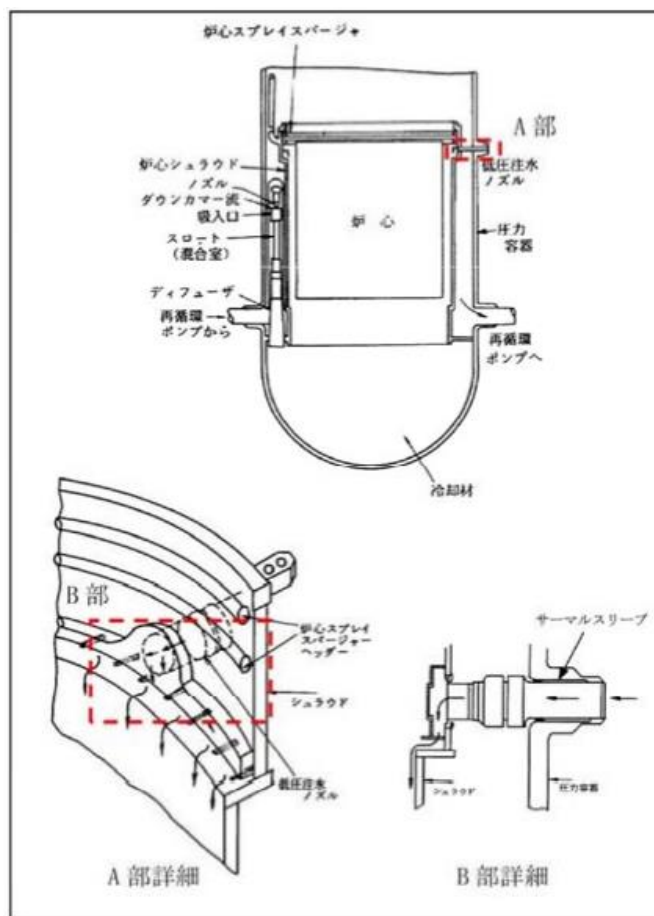
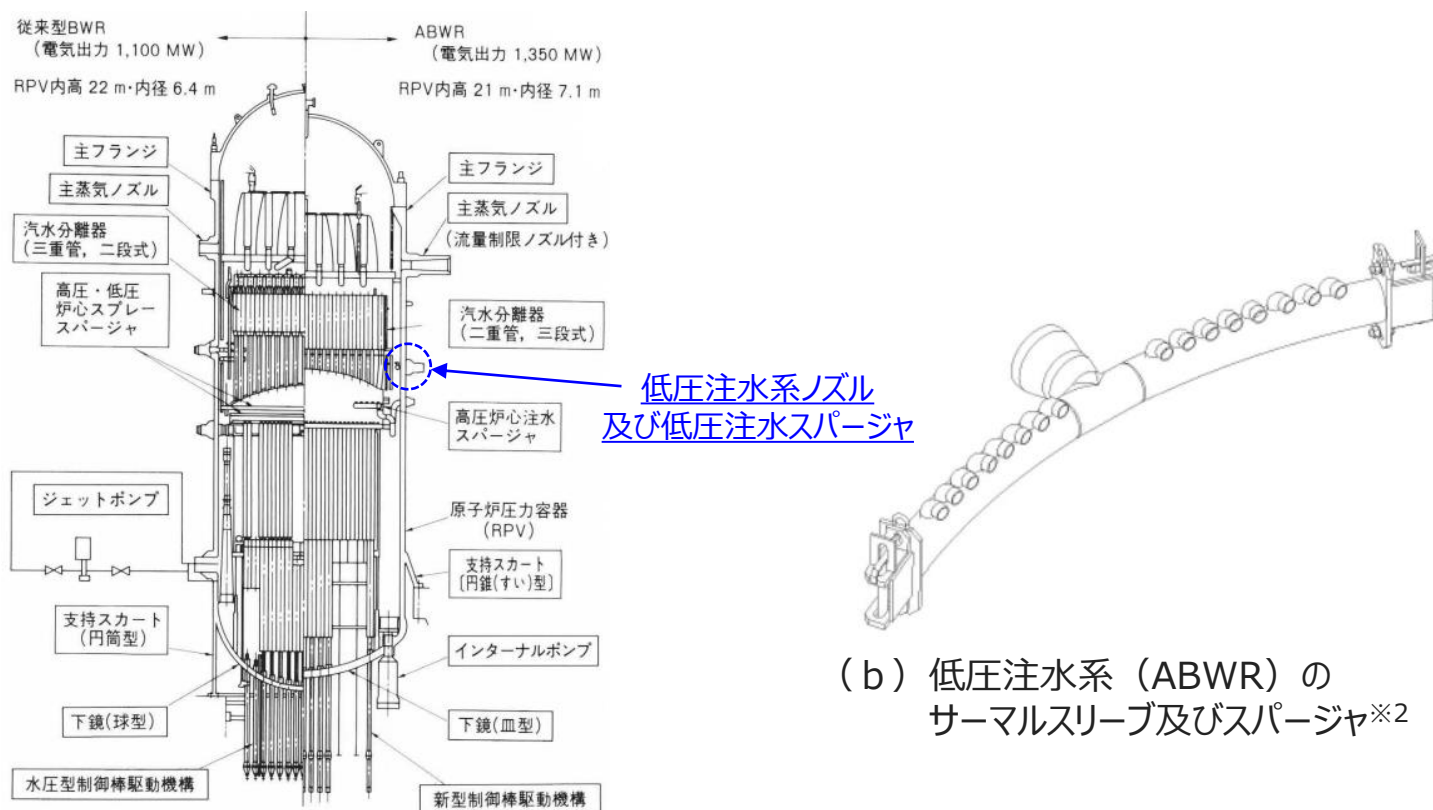


図 BWRの低圧注水系の構造の例※

ABWRプラントの設計における特徴

- ABWRプラントでは、インターナルポンプの採用により炉心より下部に大口径配管のない設計としていること、ECCS系のうち低圧注水等の系統は炉心シュラウドの外側に注水されるが、サーマルスリーブ及びスパーージャが設けられており、冷水が直接炉壁に接することがない。



(a) ABWRと従来型BWRのRPV内部構造物の比較※1

図 ABWRプラントにおけるRPV他構造の概要

BWRプラントにおける非延性破壊に対する検討（1 / 5）

- BWR（ABWR含む）プラントにおいては、供用状態A及びBにおける圧力及び温度の変化によって生じる事象を考慮した温度圧力制限曲線を設定し、運転管理を実施している。
- また、供用状態Cでは、供用状態Bで想定される事象よりも水位及び温度の変化が小さく包含されることから、供用状態D（冷却材喪失事象）を評価条件として選定する。

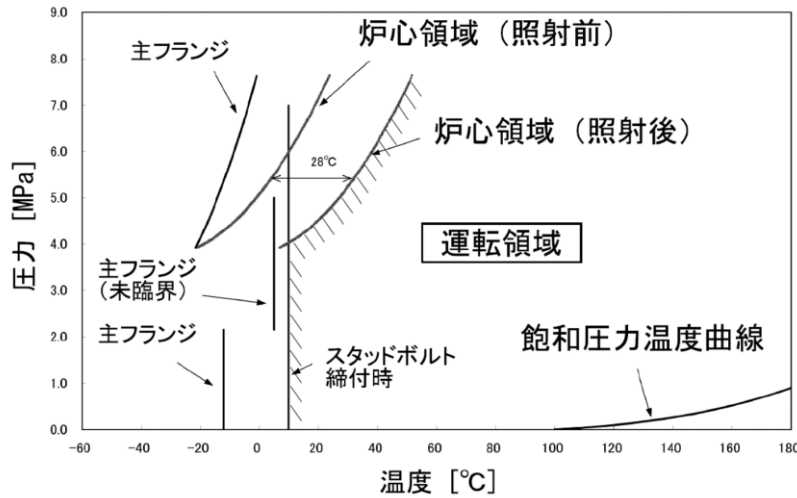


図1 温度圧力制限曲線（耐圧・漏えい試験）の例※

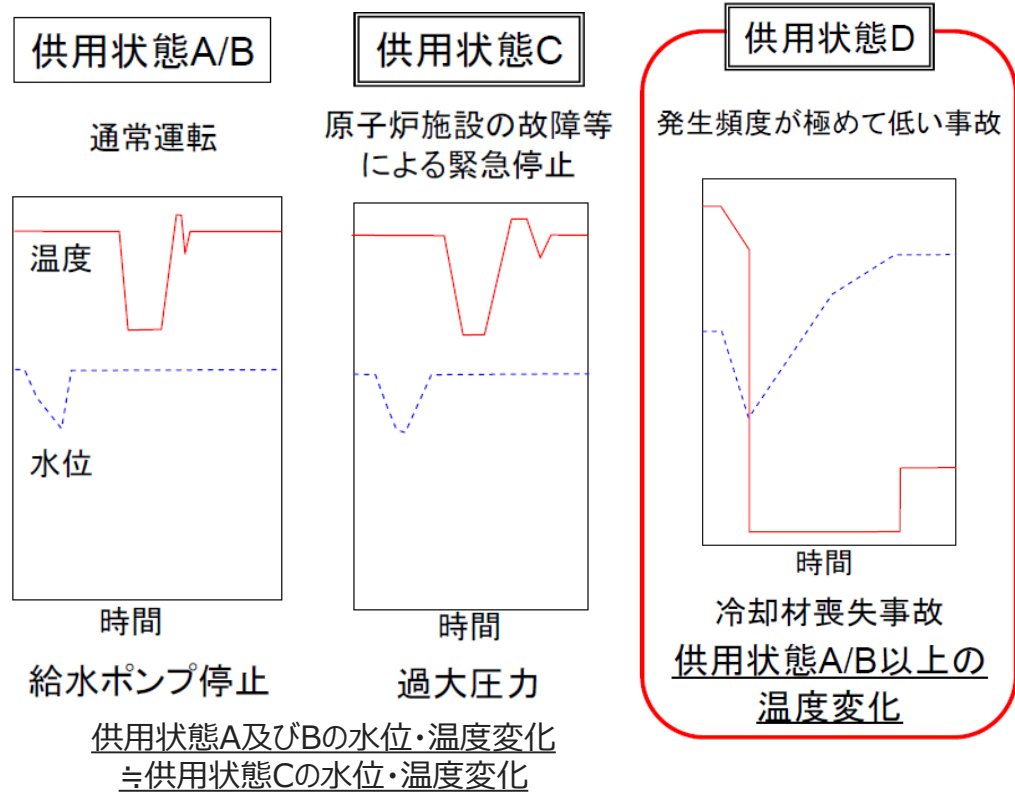


図2 評価条件の選定イメージ

BWRプラントにおける非延性破壊に対する検討（2 / 5）

- JEAC4206の附属書Cを参考とした国内BWRプラントにおける非延性破壊に対する評価フローを以下に示す。

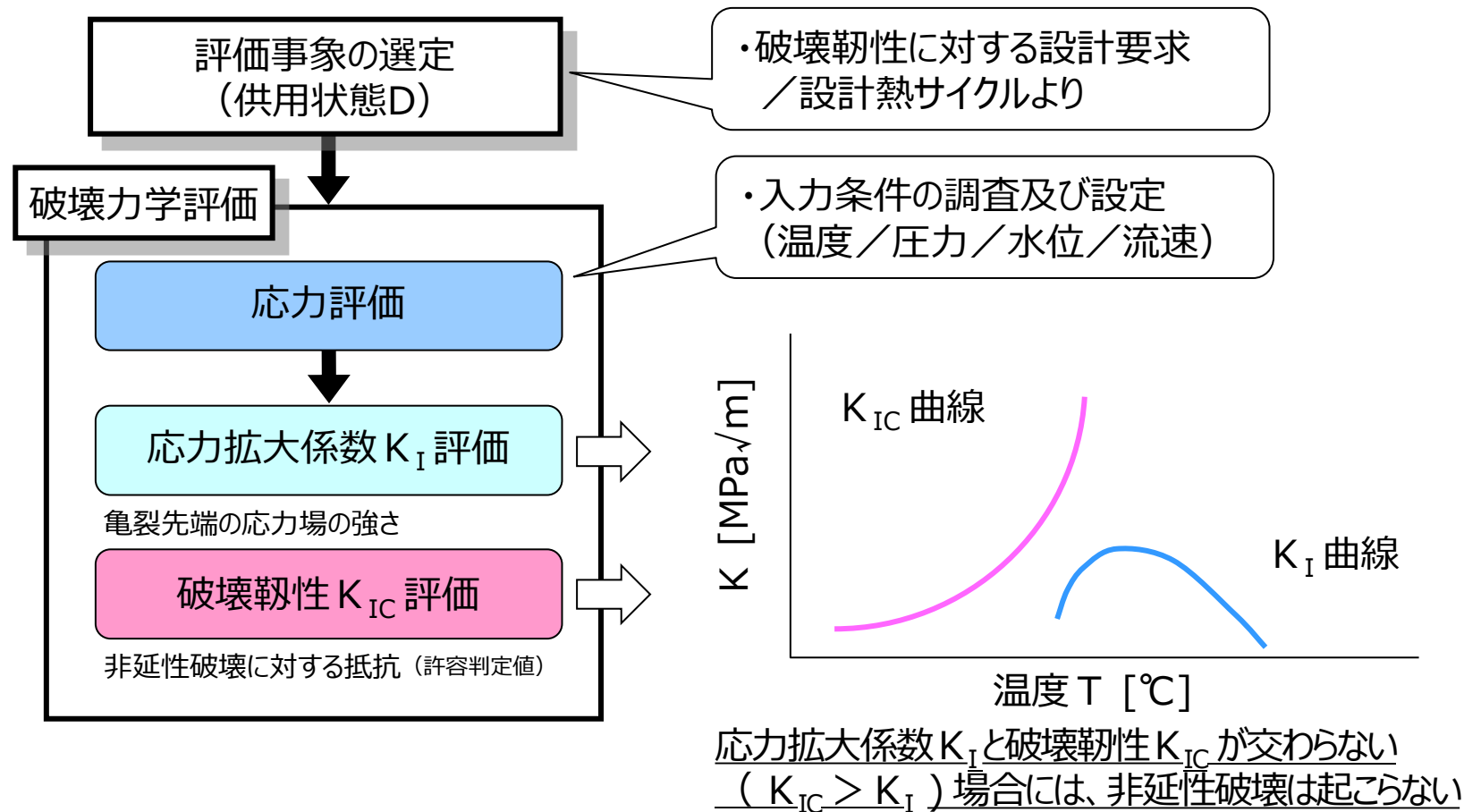


図 国内BWRプラントにおける非延性破壊に対する評価フロー

BWRプラントにおける非延性破壊に対する検討（3 / 5）

- BWR・ABWRプラントでは、標準設計が導入されているプラントがあることを踏まえ、構造（内径、板厚、クラッド厚さ他）や、設計熱サイクル（供用状態A及びB、供用状態C、D）を考慮してプラントのグルーピング化を行って評価を実施する。

✓ プラント構造・熱サイクルを考慮し、15グループへ分類して評価を実施する。

- 供用状態D（冷却材喪失事象）として想定される設計熱サイクルの条件を以下に示す。

表 供用状態D（冷却材喪失事象）におけるRPVの水位及び炉心領域の胴板部分の圧力・温度の設定

		BWR 2/3/4/5	ABWR
想定事象		再循環系配管の完全破断	格納容器内主蒸気配管の完全破断
概要		RPVの再循環出口ノズルから冷却材が流出し、ECCSが作動	RPVの主蒸気出口ノズルから蒸気が流出し、ECCSが作動
ECCS 作動後	水位	再循環出口ノズル	主蒸気出口ノズル
	圧力	格納容器内圧力まで低下	
	温度	飽和蒸気温度	常温（ECCS注入水温度）※

※ ABWRではECCS作動後にRPVの水位が主蒸気ノズルまで上昇し、圧力は格納容器圧力まで徐々に低下、RPV炉心領域の胴板部分の冷却材温度はECCS注入水の温度まで低下すると想定している。

BWRプラントにおける非延性破壊に対する検討（4 / 5）

- 炉心領域中央に深さが板厚の1/4、長さが板厚の1.5倍の仮想欠陥に対する K_I と中性子照射脆化を考慮した K_{IC} の比較を行い、BWR2/3/4/5プラントにおいて、応力拡大係数 K_I と破壊靱性 K_{IC} が交わらないこと、また、応力拡大係数 K_I に対し破壊靱性 K_{IC} は十分な裕度を有することを確認した。

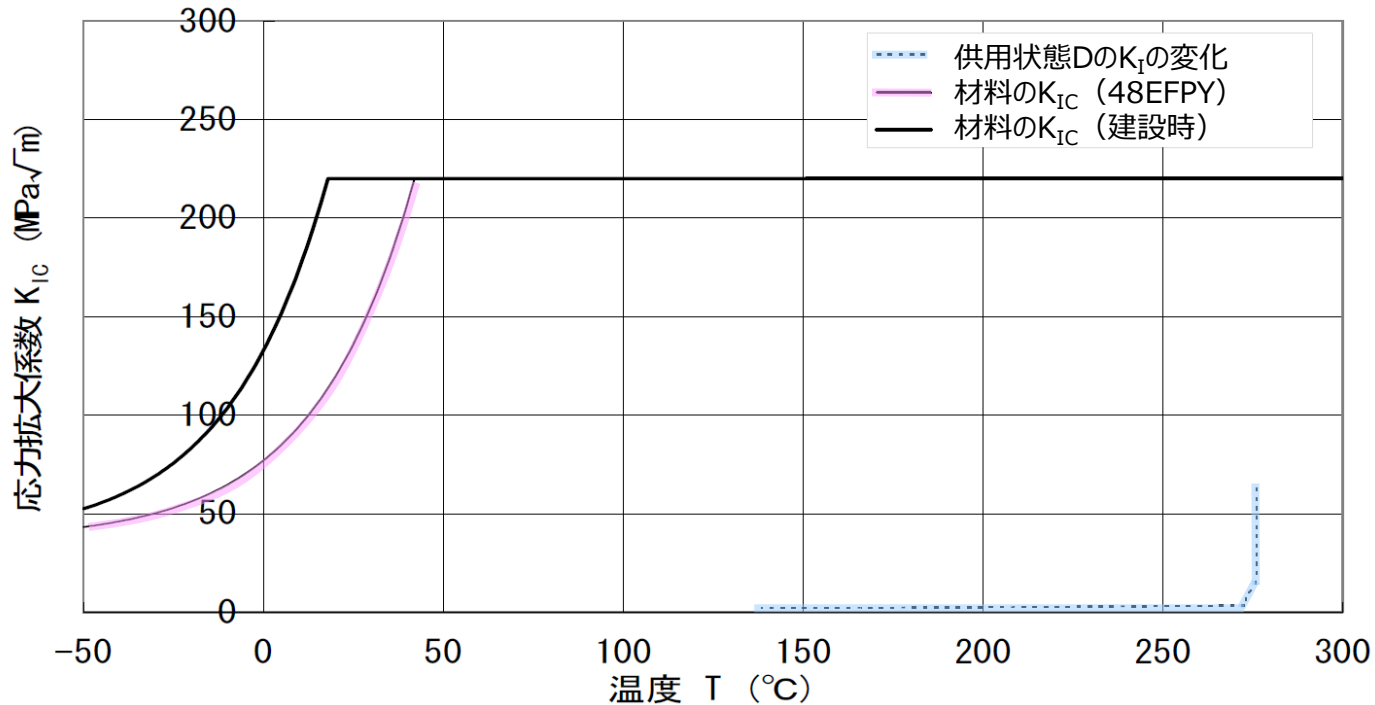


図 BWR2/3/4/5における供用状態D（冷却材喪失事象）に対する評価結果※

BWRプラントにおける非延性破壊に対する検討（5 / 5）

- 炉心領域中央に深さが板厚の1/4、長さが板厚の1.5倍の仮想欠陥に対する K_I と中性子照射脆化を考慮した K_{IC} の比較を行い、ABWRプラントにおいて、供用状態Dとして「炉心領域の胴板が直接冷水に曝される想定※」をした場合でも、応力拡大係数 K_I と破壊靱性 K_{IC} が交わらないこと、また、応力拡大係数 K_I に対し破壊靱性 K_{IC} は十分な裕度を有することを確認した。

※ 常温の水がRPVの内部に注入された場合でも、胴板表面における冷却材の温度が直ちに常温まで低下することは考えられないが、保守的な評価になるように想定している。

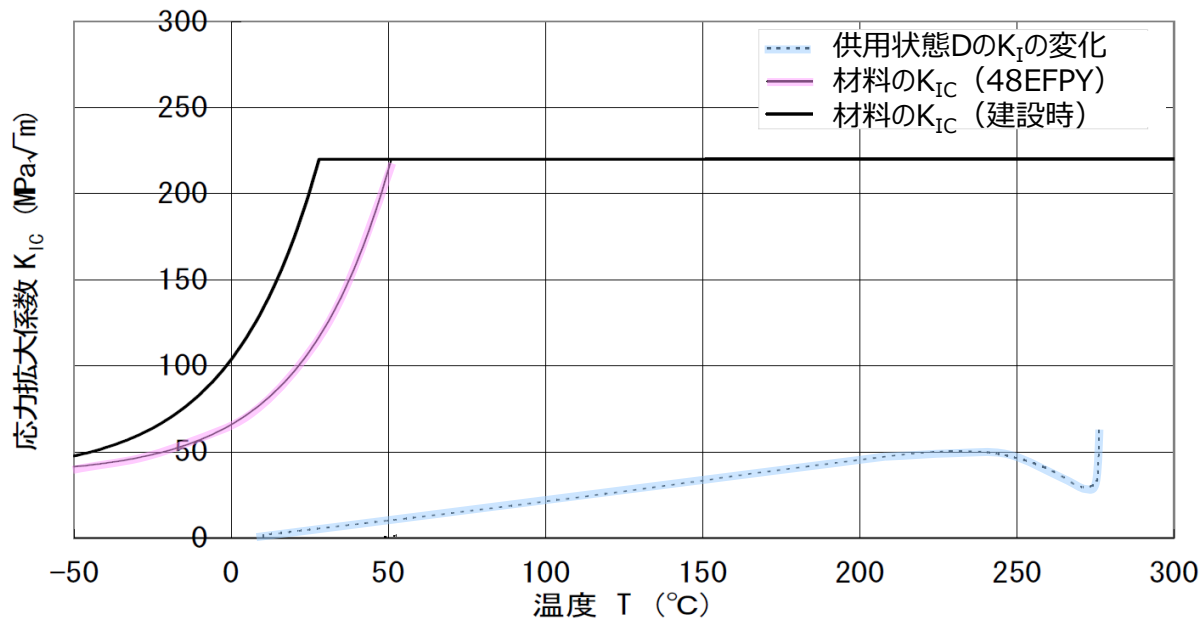


図 ABWRにおける供用状態D（冷却材喪失事象）に対する評価結果※

まとめ

- RPVは、運転に伴い中性子の照射を受けて徐々に材料の靱性（粘り強さ）が低下するため、経年変化の進行程度を把握して、計画的に健全性を確認することにより管理していくことが重要である。
- JEAC4206-2007附属書Cに規定されたPTS評価手法等の規格／基準を参考に、国内BWR（ABWR含む）の非延性破壊に対する評価手法を構築し、評価を実施している。
 - ✓ 供用状態Cにおいては、供用状態Bと水位および温度の変化が同等であることから、供用状態A及びBに対する温度圧力制限曲線の評価によって代表可能である。
 - ✓ 国内BWR・ABWRプラントを対象に、構造および設計熱サイクルが同等である15のグループに分類し、供用状態Dに対する検討を行った結果、60年（48EFPY）時点でも十分な破壊靱性の裕度を有することを確認した。
- BWR・ABWRプラントでは、RPV等の構造・システム構成から供用状態C、Dにおいて、PTS事象のような非延性破壊に対して厳しい事象は存在しないこと、非延性破壊に対する評価の結果、応力拡大係数に対し破壊靱性は十分な裕度を有することを確認している。