
中性子照射脆化評価について

原子力エネルギー協議会
(ATENA)

2022年 11月 30日

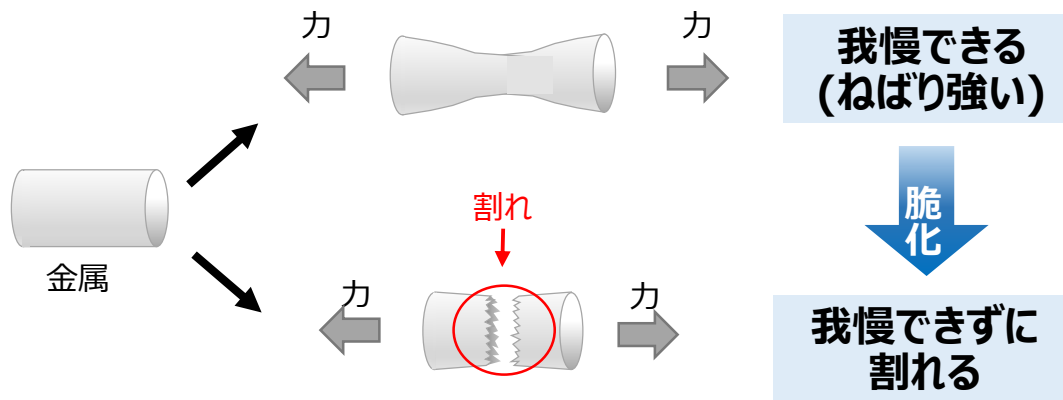
中性子照射脆化評価について ～脆化について

<金属の性質>

- ねばり強さを持っている金属は、大きな力を加えても、伸びたり曲がったりすることにより、簡単には割れません。
- 高温の状態では、ねばりが強いですが、温度が低くなると、ねばり強さが低下する性質があります。

<脆化について>

- ねばり強さを持っている金属ですが、外部からの様々な影響を受けると、初めに持っていたねばり強さが少しずつ低下していき、次第に伸び方が小さくなります。この現象を「脆化」といいます。

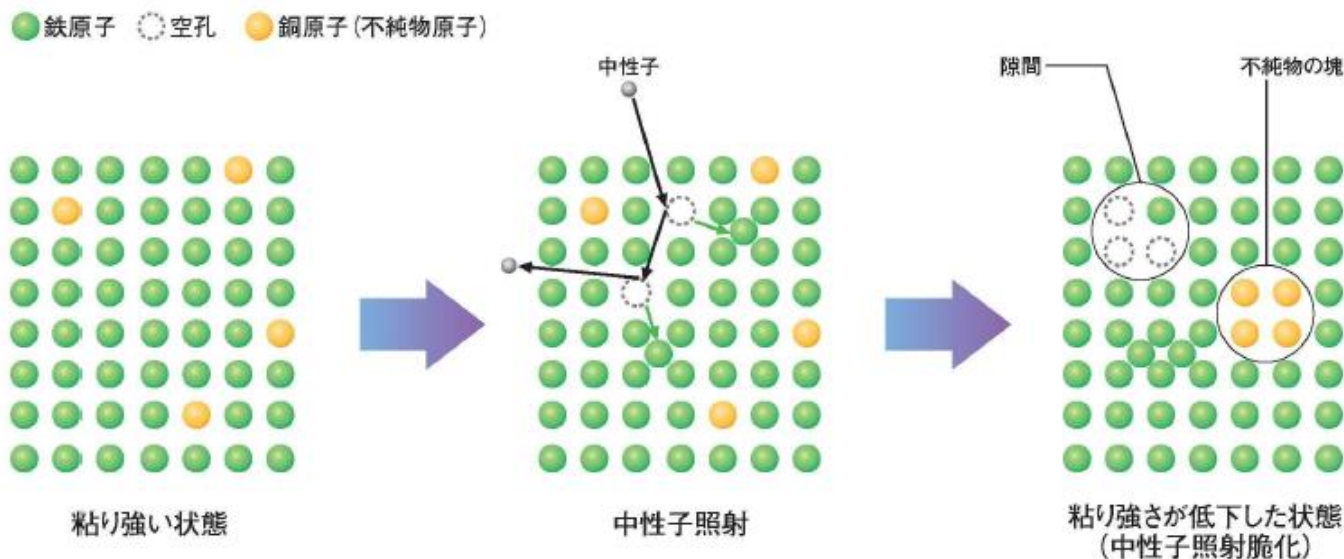


金属のねばり強さのイメージ

中性子照射脆化評価について ～中性子照射脆化について

<中性子照射脆化について>

- 鉄などの金属は、中性子を受けると脆化することがわかっています。
- これは、鉄を原子レベルで見ると、鉄原子はねばり強い状態では規則正しく並んでいますが、中性子を受けると、鉄原子がはじき出されて隙間が出来たり、不純物の塊ができていたりすることにより、規則正しさが乱れるためです。
- これを「中性子照射脆化」といいます。

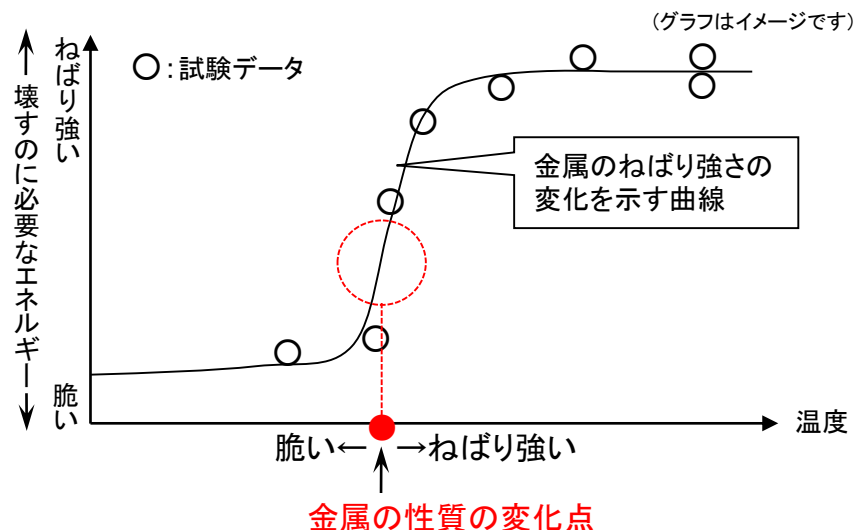


中性子照射に伴う原子構造の変化 (イメージ)

中性子照射脆化評価について ～延性脆性遷移温度と監視試験片（1/2）

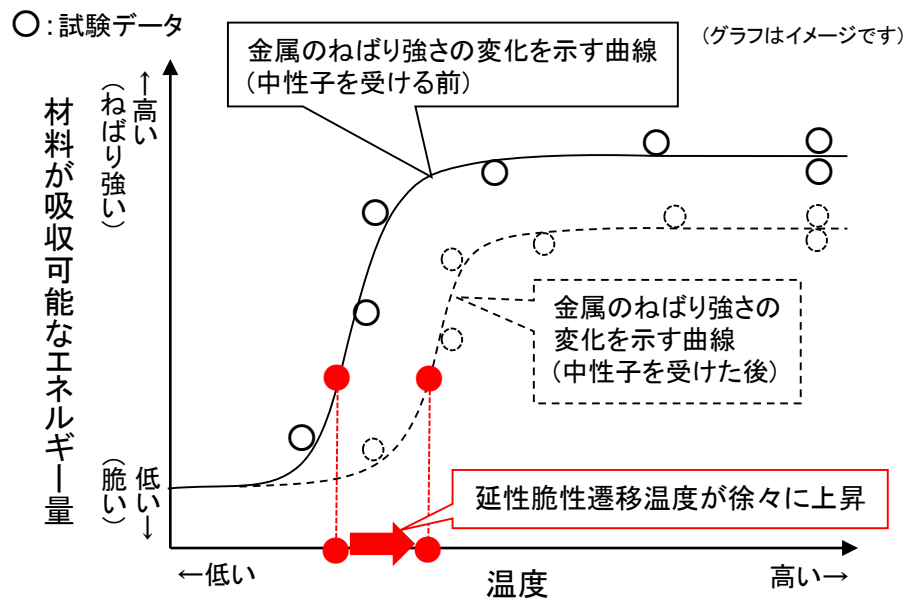
<延性脆性遷移温度について>

- 金属は、ある温度以下になるとねばり強さが低くなる性質があり、この性質が変わる温度を「延性脆性遷移温度」といいます。
- この延性脆性遷移温度は、金属の試験片の温度を様々に変え、衝撃を加えて壊す試験を行い、試験片を壊すのに必要なエネルギーの量を測定することで確認出来ます。



<中性子照射に伴う延性脆性遷移温度の変化>

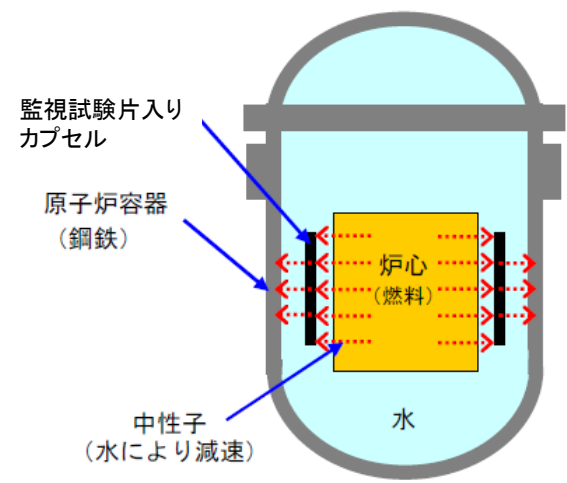
- 延性脆性遷移温度は、中性子を多く受けるほど高くなる性質があります。このため、原子力発電所を長く運転するほど、原子炉容器が受ける中性子の量が増え、延性脆性遷移温度が徐々に上昇します。



中性子照射脆化評価について ～延性脆性遷移温度と監視試験片（2/2）

<原子炉容器の監視試験片>

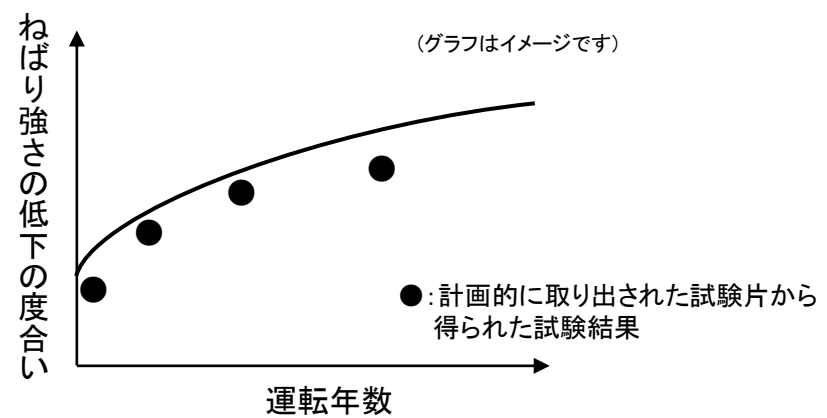
- 原子炉容器が受ける中性子の影響を監視するために、原子炉容器と同じ材料でできた「監視試験片」が原子炉容器内にあらかじめ設置されています。
- 監視試験片を取り出して様々な試験をする事により、延性脆性遷移温度（原子炉容器のねばり強さ）等が判ります。



(PWR原子炉容器のイメージ)

<原子炉容器の照射脆化の評価>

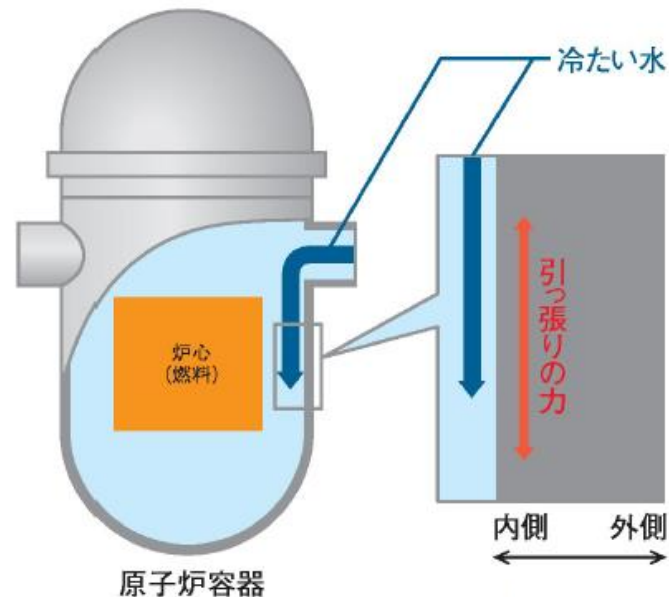
- 原子炉容器に入っている試験片を計画的に取り出して試験を行い、延性脆性遷移温度の変化を調べる事等により、原子炉容器のねばり強さの変化（脆化）を評価することができます。



中性子照射脆化評価について ～加圧熱衝撃評価について（1/2）

<加圧熱衝撃評価とは>

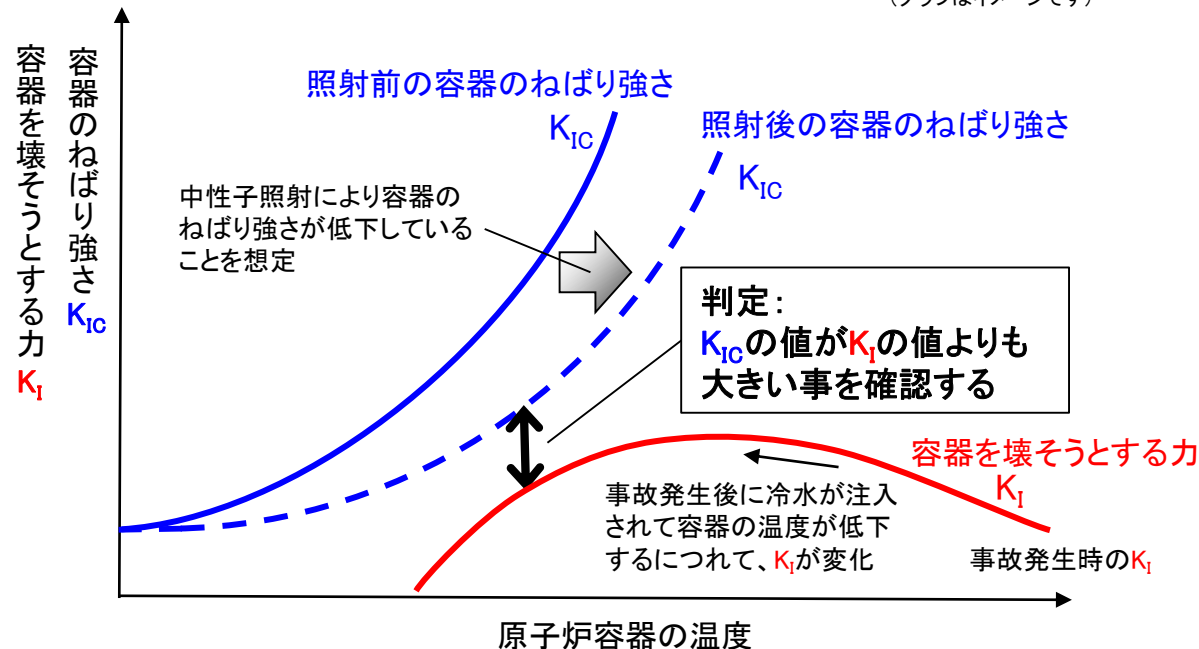
- ここからは、中性子照射脆化に対する代表的な評価の一例として、加圧水型軽水炉（PWR）における、加圧熱衝撃評価について説明します。
- PWRでは、万が一、事故が起こった場合には、燃料を冷やすために非常用炉心冷却系統の冷たい水が高温・高圧の原子炉容器に注入されます。すると、高温である原子炉容器外側と、水と接する内側の温度差により、原子炉容器内面に引っ張りの力（壊そうとする力）が働きます。
- このようなことが万が一起きて、仮に内面に亀裂があったとしても、原子炉容器が壊れないことを評価しており、これを加圧熱衝撃評価といいます。



＜加圧熱衝撃評価の内容＞

- 加圧熱衝撃評価では、監視試験片を使った試験結果などから、原子炉容器がどの程度脆化しているかを評価した上で、「容器のねばり強さ」が、「容器を壊そうとする力」よりも大きい事を確認します。
- この「容器のねばり強さ」を K_{IC} 、「容器を壊そうとする力」を K_I と呼びます。脆化進行後の K_{IC} は試験結果等を基に、容器のねばり強さが低下していることを想定し、 K_I は事故時を想定したコンピュータによる解析で算出されています。

(グラフはイメージです)



- なお、評価では以下の例のような保守的な仮定を置いており、仮に評価の結果、 K_{IC} 曲線と K_I 曲線が接したとしても、実物の原子炉容器が直ちに壊れる訳ではありません。

＜ K_I 曲線の仮定＞

- 点検で傷がないことを確認しているが、大きな亀裂があると仮定
- 高温・高圧の原子炉容器に冷たい水が注入される厳しい環境を仮定

＜ K_{IC} 曲線の仮定＞

- 脆化進行後の K_{IC} は、ねばり強さの低下量を評価した結果に余裕を加味し、ねばり強さを、より小さく仮定

中性子照射脆化評価について ～まとめ

- 今回は中性子照射脆化に関する一部の評価を御紹介しましたが、その他にも、脆化した原子炉容器が高温域でどのくらいのねばり強さを持っているかの評価（上部棚吸収エネルギー評価）等も実施しており、また、各評価には、適切な保守性が見込まれています。
- また評価だけでなく、実物の原子炉容器でそもそも破壊の起点となるきずが無い事を確認するため、超音波による検査を実施しています。また、プラントの起動・停止時などにおいて原子炉容器の温度・圧力が変化する時でも、温度と圧力を制限する領域を設定して、原子炉容器の健全性が損なわれないようにする等、保全や運用の面からも、中性子照射脆化に対応しています。
- 更に、照射脆化を含めた経年劣化に関する知見は常に更新していくべきとの認識のもと、プラントの安全性の維持・向上に資するべく、日々知見拡充の取組みが行われています。

中性子照射脆化評価について ～参考とした資料

- 原子炉構造材の監視試験方法（JEAC4201-2007[2013年追補版]） （一社）日本電気協会
<https://nusc.jp/jeac/4201/jeac4201-2013add.html>
- 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） （一社）日本電気協会
<https://nusc.jp/jeac/4206/jeac4206.html>
- 原子炉容器の照射脆化に対する健全性について 九州電力(株)
https://www.kyuden.co.jp/nuclear_irradiation_index.html
- 高浜1,2号機の安全対策について（高浜発電所1・2号機に係る住民説明会資料） 関西電力(株)
<https://www.city.maizuru.kyoto.jp/kurashi/0000007362.html>
- 原子炉圧力容器鋼の中性子照射脆化と健全性評価 （一財）電力中央研究所
<https://criepi.denken.or.jp/koho/journal/eneco/2012/eneco.pdf>
- PWR型原子炉容器の安全性について （財）原子力発電技術機構 安全情報研究センター
（平成5年9月 一般向冊子）