

オンライン学習会「原子炉はなぜもろくなる？
予測は可能？ 規制委審査は大丈夫？」

規制委審査は大丈夫？

井野博満

(2022年12月19日)

規制の枠組み

- 日本電気協会制定の民間規格
- 「原子炉構造材の監視試験方法」
JEAC4201-2007
- 「原子力発電所用機器における破壊靱性の確認試験方法」
JEAC4206-2007
- 日本電気協会（JEA）作成のコード（C）の意。制定年を付ける
- これらの民間規格を、規制当局が承認（エンドース）して国の規程として使っている
- 日本電気協会は、事業者中心の協会
日本電気協会 > 原子力規格委員会 > 構造分科会 > 破壊靱性検討会

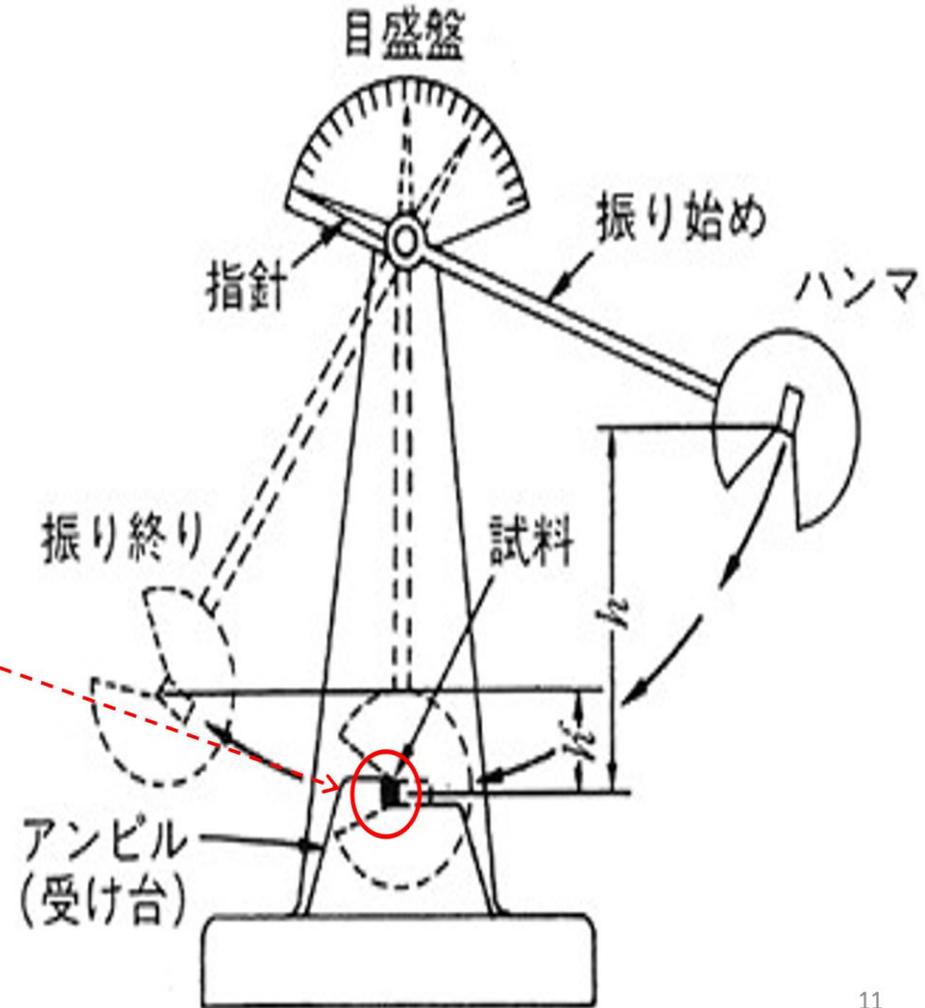
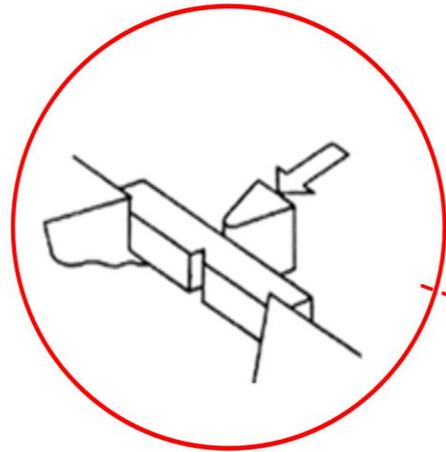
I 「原子炉構造材の監視試験方法」
(JEAC4201-2007)

「原子炉構造材の監視試験方法」 (JEAC4201-2007) の内容

- 炉内に入れた監視試験片のシャルピー試験の結果
- 照射脆化予測式（計算式）に、圧力容器鋼材中の銅とニッケルの含有量、中性子照射量、照射速度を入れて計算
- この両者から圧力容器の脆性遷移温度曲線を求める

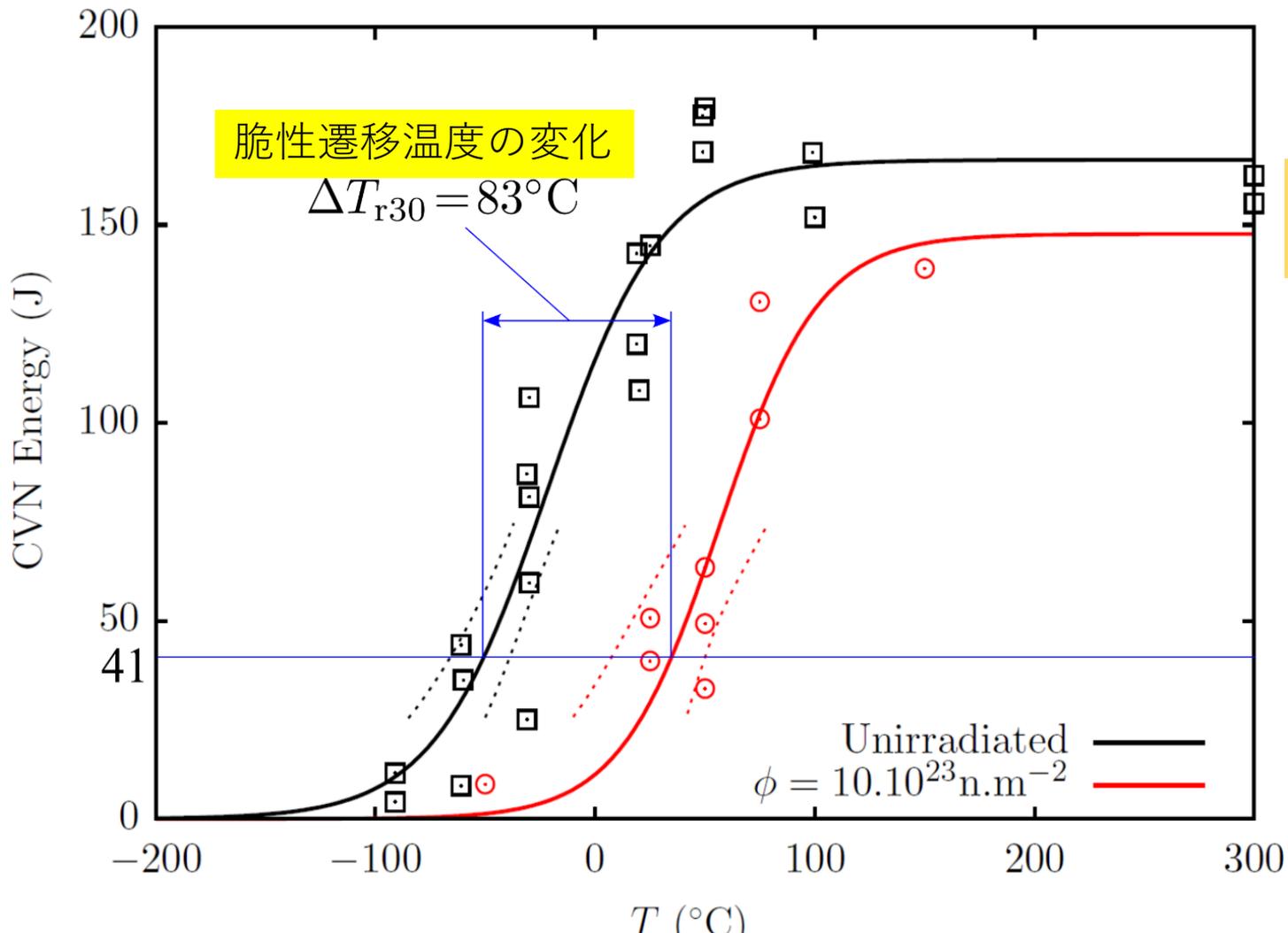
シャルピー衝撃試験

試料寸法
10mm角 55mm長



シャルピー試験による脆性遷移温度の測定例

靱性



材料試験炉で加速照射
PWR60年運転に相当

Hure et al. (2015)

脆性

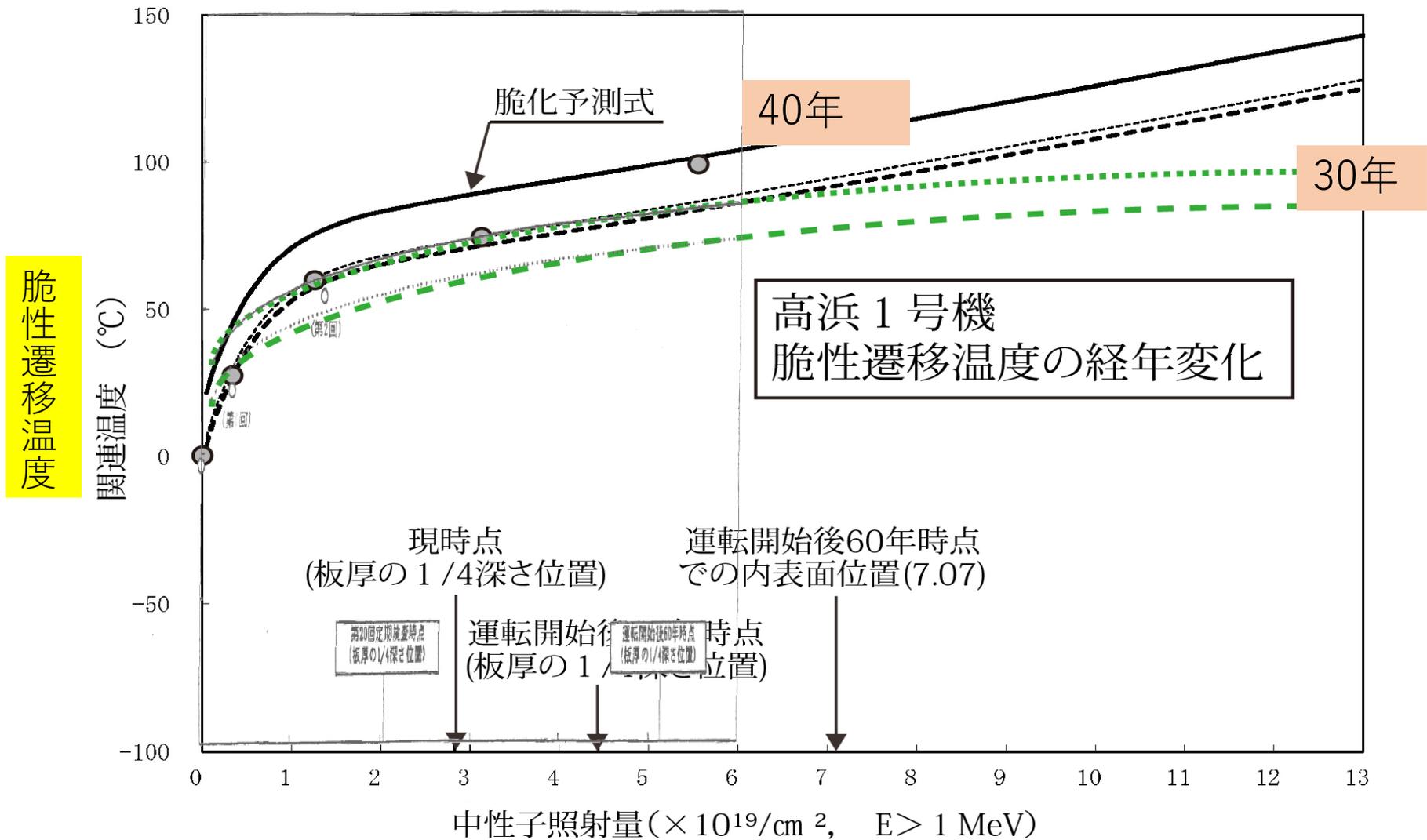


図1 高浜原発1号炉監視試験により測定された脆性遷移温度(●印)とJEAC4201-2007[2013追補版]にもとづく脆化予測曲線(文献2)。なお、60年位置が以前の報告書より内側に修正されている

JEAC4201-2007 の問題点、その後の経緯

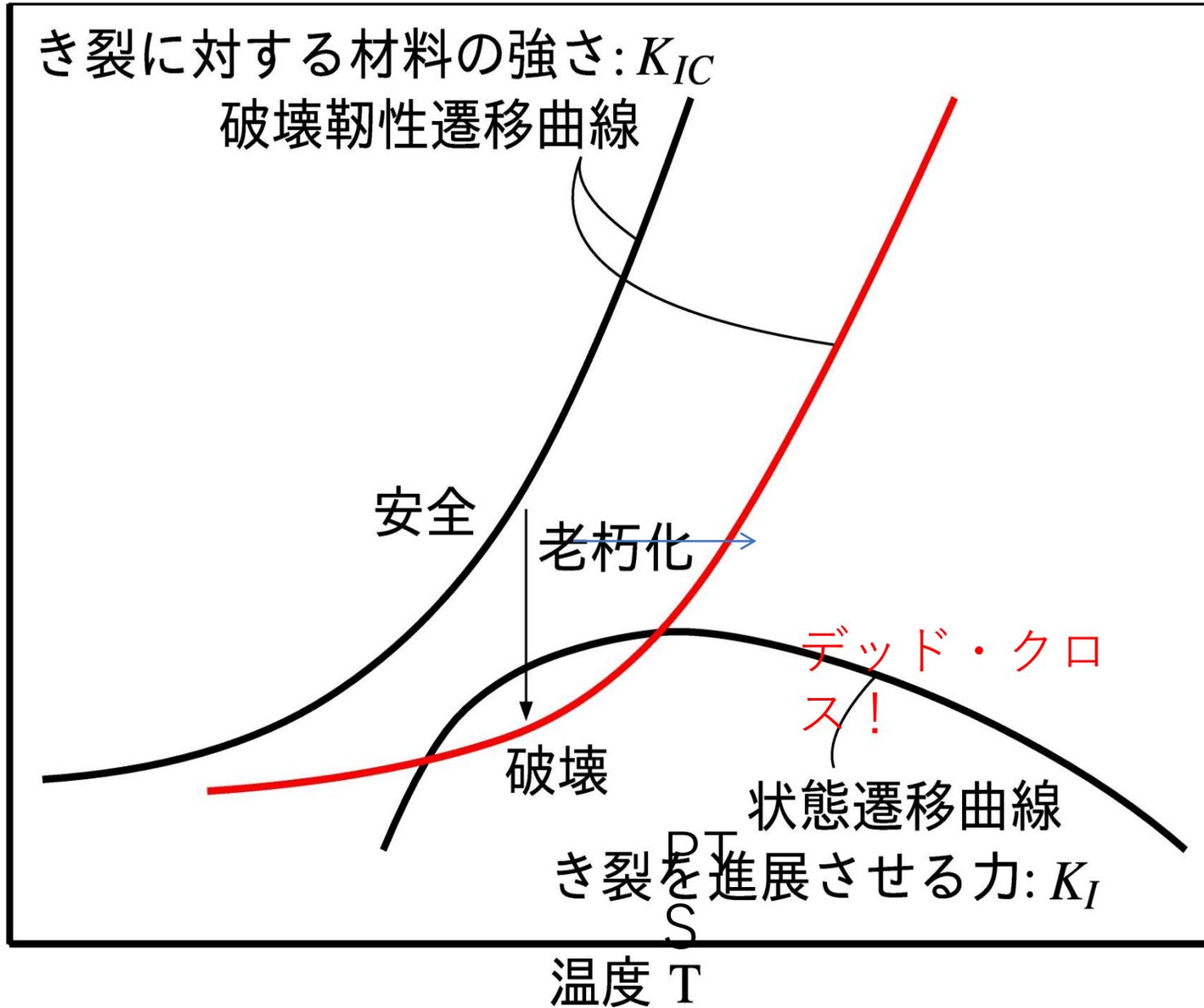
- 脆化予測式のもとになる反応速度式（照射による欠陥の生成や原子の動きを表す式）に初歩的な誤りがあった
- 原子力安全・保安院の高経年化意見聴取会（2011-12年）で井野が指摘
- この予測式を作った電力中央研究所（電中研）や日本電気協会は誤りを認めず
- 保安院は結論を先送り（規制上は問題なし、学術の場で再検討）
- 原子力規制委員会が日本電気協会に抜本的改訂をもとめる「特定指導文書」を発出
- 日本電気協会は、まだ改訂版（JEAC4201-202X）を審議中
- 規制委員会は、間違っただまのJEAC4201-2007で審査をおこなっている

II 「原子力発電所用機器における破壊靱性の確認試験方法」 JEAC4206-2007

「原子力発電所用機器における破壊靱性の確認試験方法」 JEAC4206-2007の内容

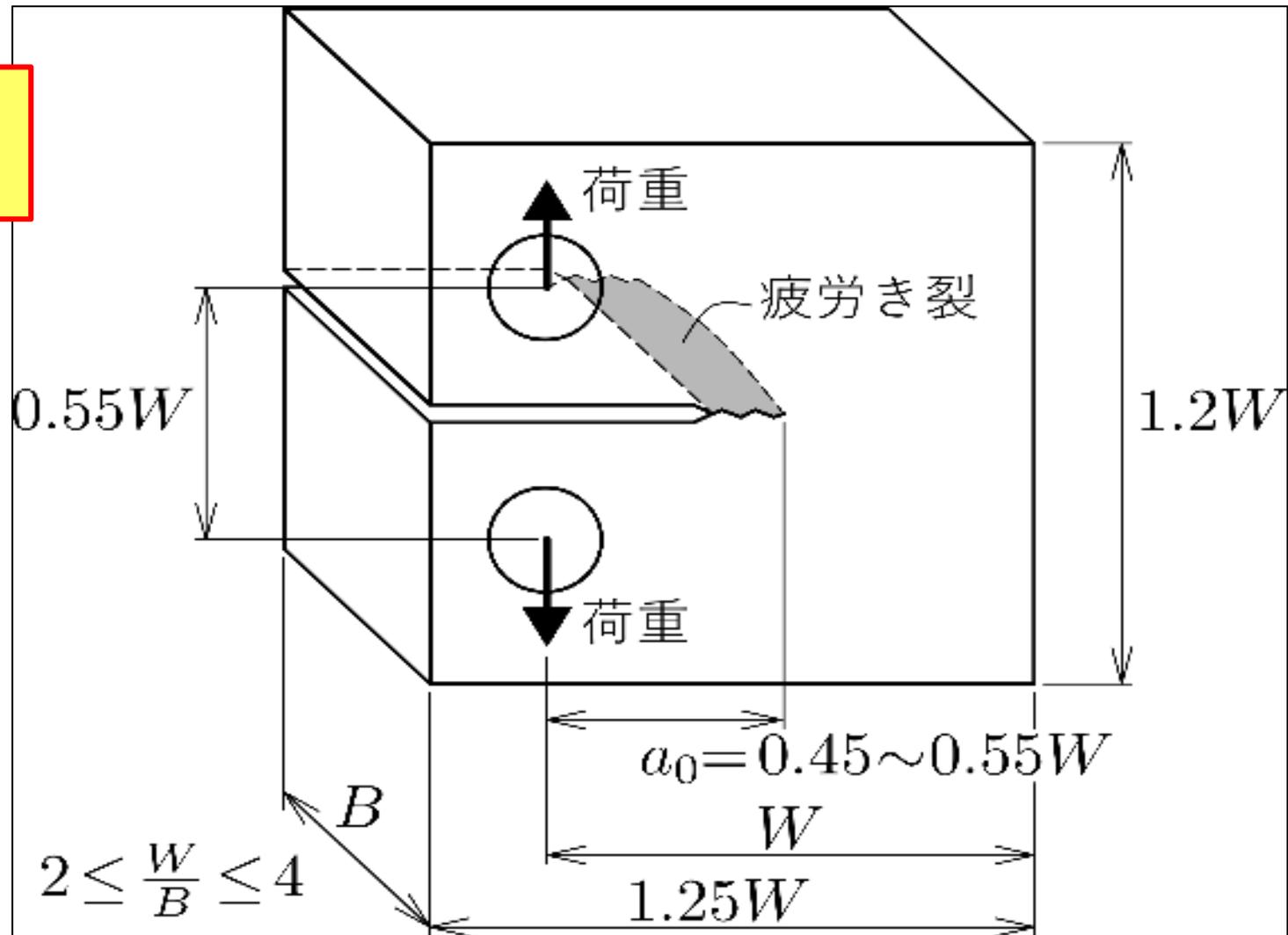
- 圧力容器内面に想定した深さ10mmのき裂にかかる力の大きさ
(Stress Intensity Factor、応力拡大係数) K_I
- 圧力容器鋼材が耐えられる力の大きさ (破壊靱性値) K_{Ic}
- この二つを温度に対する曲線で示し、すべての温度で
 K_{Ic} 曲線 $>$ K_I 曲線 (クロスしないこと)
を確認する

応力拡大係数 K_I
破壊靱性値 K_{IC}



破壊靱性測定法（CT試験片）

き裂が進展する荷重を
破壊靱性値とする



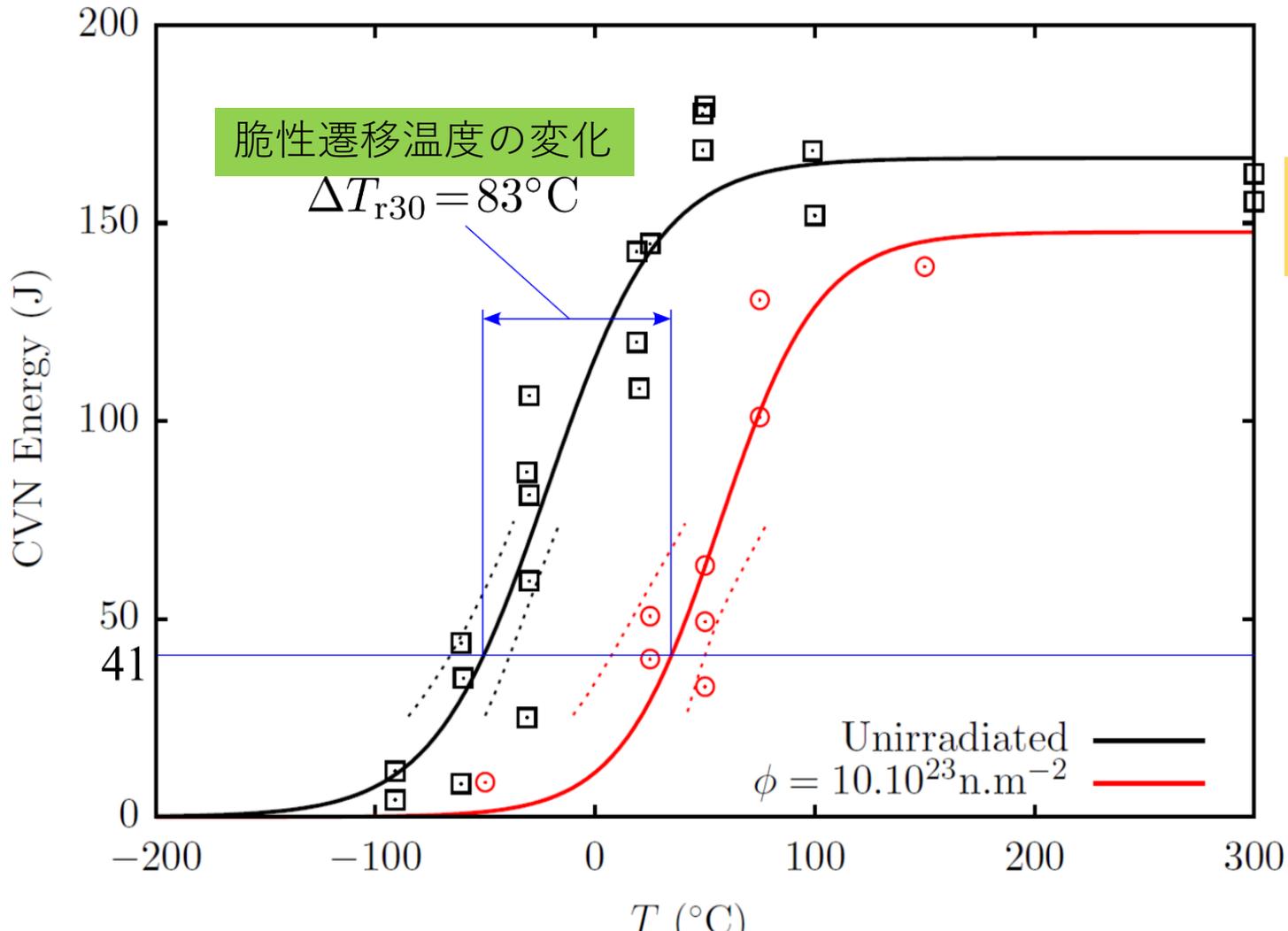
破壊靱性曲線導出の問題点

破壊靱性試験の数が少ない。照射量の違う条件のデータを温度シフトして使う「裏技」を使っている。

- 裏技とは・・・シャルピー試験で求まる脆性遷移温度のシフト量が、破壊靱性試験でも同じだろうとして温度シフトする方法
- 「裏技」が間違いであることが分かってきた。シフト量は等しくない
 - Hure et al. の2015年の論文
 - 廣田らの論文(2021): 日本の原発のデータベースを解析
温度補正が必要なことを示した

照射による脆性遷移温度の変化 (再)

靱性

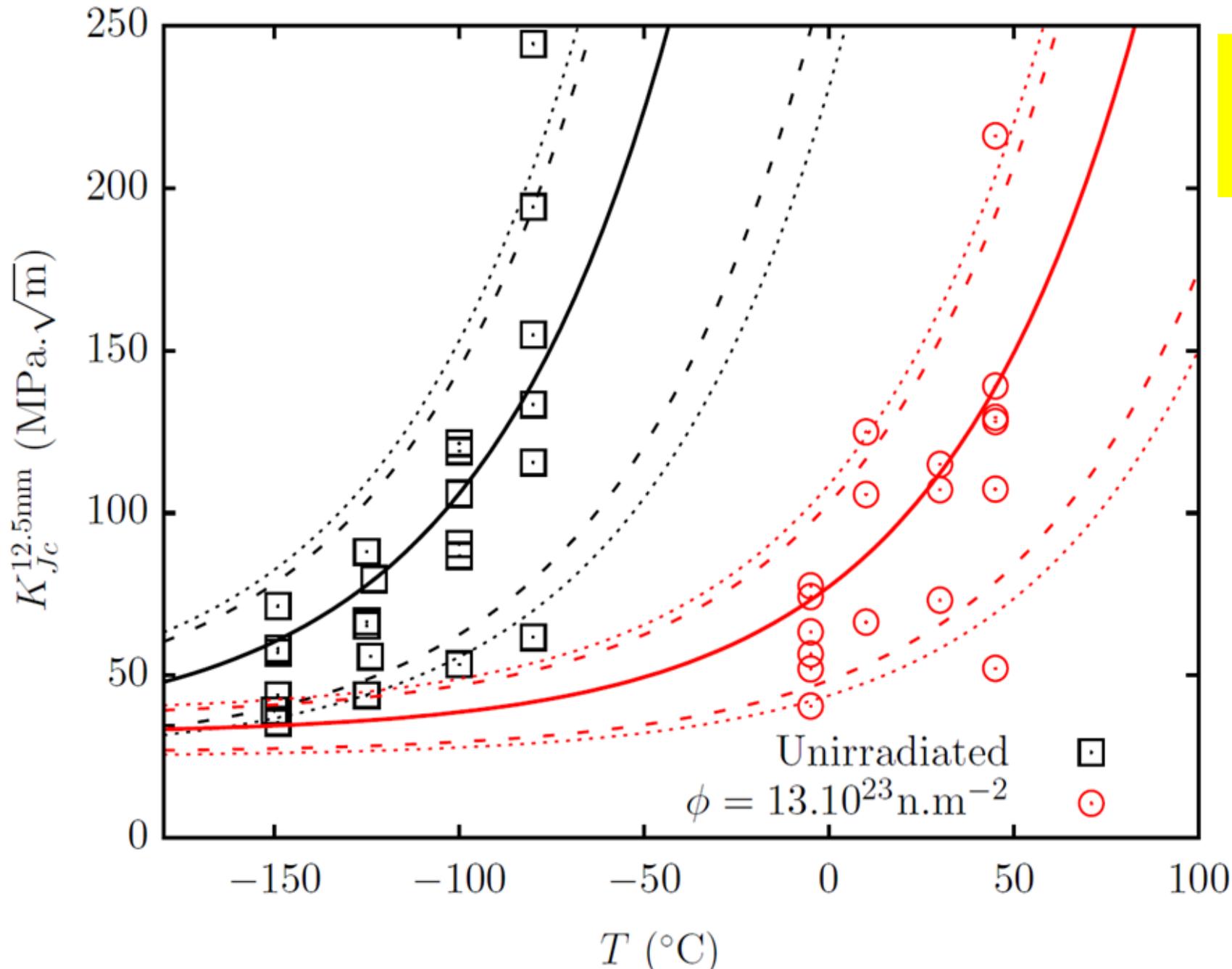


材料試験炉で加速照射
PWR60年運転に相当

Hure et al. (2015)

脆性

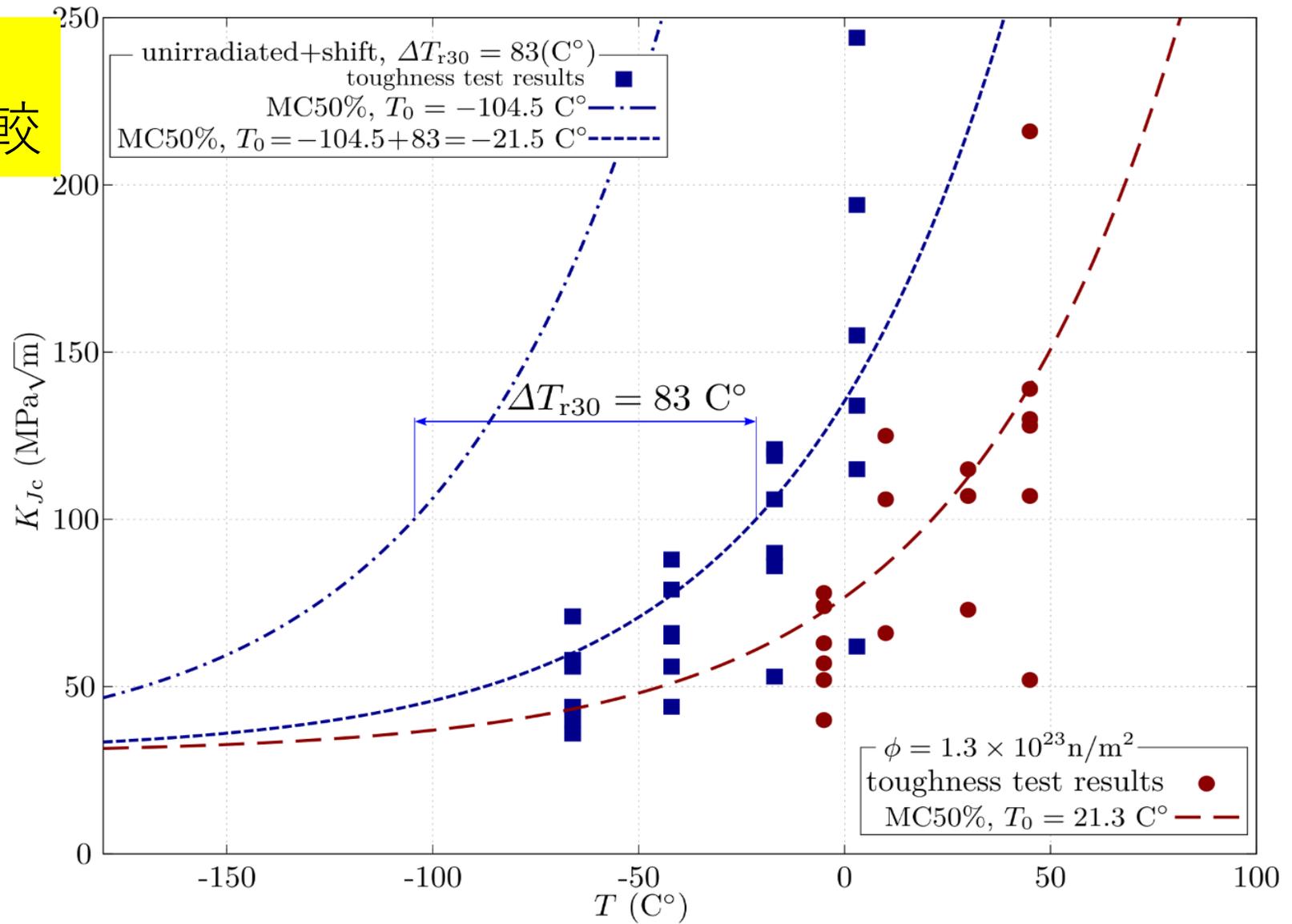
照射による破壊靱性値の変化



材料試験炉で加速照射
PWR60年運転に相当

Hure et al. (2015)

二つの曲線の
シフト量の比較



JEAC4206-2007の改訂版は採用されず

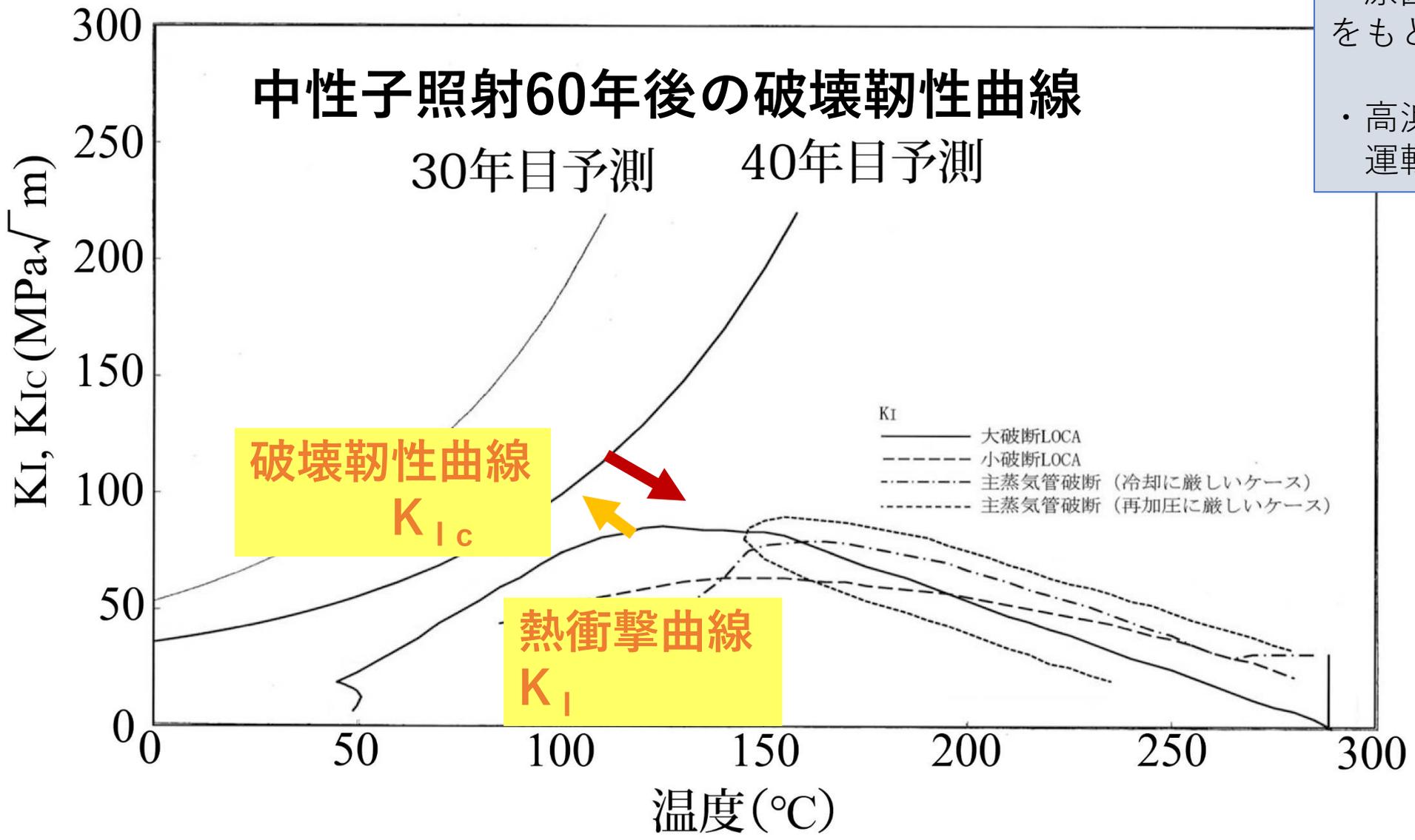
- 2011-12年の意見聴取会での議論で安全余裕が足りないなどの指摘を受け、日本電気協会が改訂に着手
- 2016年に「JEAC4206-2016」を制定
- 欧米で主流となっているマスターカーブ法を採用、下限包絡曲線に替えてマスターカーブの95%信頼曲線を破壊靱性曲線とした
- **しかし、照射材への適用の妥当性が検証できないことを主な理由として、原子力規制委員会は、この規程の採用を却下した(2020年9月)**
- 現在使われている規程は、改訂を求められていたJEAC4206-2007のまま

III 高浜1号炉の破壊靱性評価

高浜1号炉の破壊靱性評価

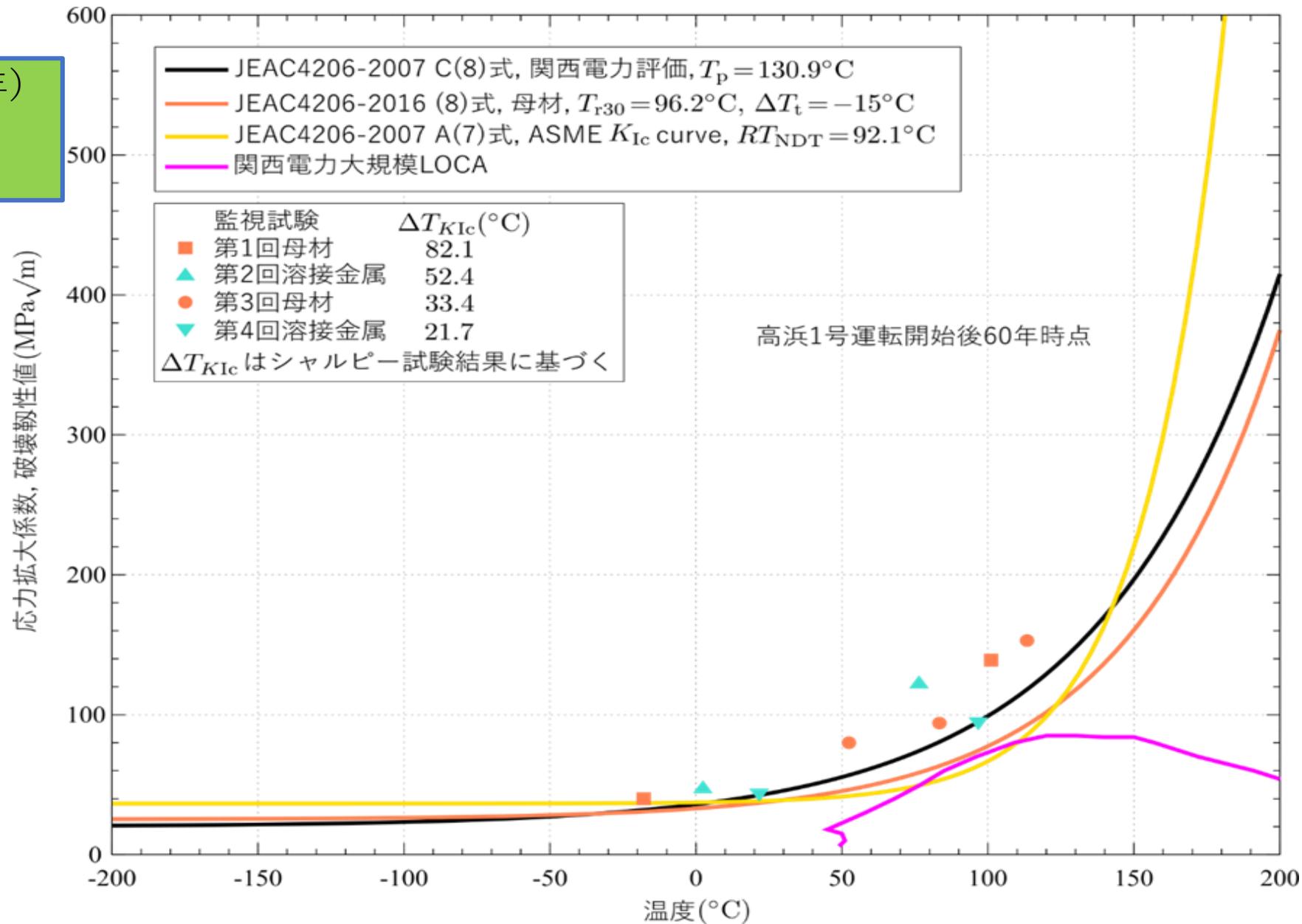
【注記】
・原図（関西電力作成）
をもとに、編集、追記

・高浜1号炉（PWR）：
運転開始 1974年



高浜1号炉（運転開始60年）
の破壊靱性遷移曲線予測
異なる解析法の比較

現行規格（黒線）は
非安全側の評価だ



異なる3つの方法で作成された高浜1号炉母材の破壊靱性曲線の比較

- 黒実線はJEAC4206-2007(現行規程)の下限包絡曲線
- ピンク色の曲線はJEAC4206-2016(未採用)におけるマスターカーブ法による評価
- 黄色の曲線はASME K_{Ic} 曲線にもとづく評価
- 評価はさまざま
- 現行の破壊靱性曲線がもっとも非安全側の評価を与えている
-

高浜1号炉・2号炉、美浜3号炉での破壊靱性観測データの問題点(まとめ)

- (1) 少数の破壊靱性測定値をもとにその下限包絡線として破壊靱性曲線を求めている
- (2) 脆性遷移温度の変化量を破壊靱性値の温度シフト量に用いている
- (3) 母材と溶接金属双方のデータ点を、母材の破壊靱性曲線を描くのに使っている。

同じように照射されているが、両者は別物。

シャルピー試験結果は別々に評価されているのに！

- (4) 4回の監視試験の際、破壊靱性値は母材か溶接金属のどちらかしか測定していなかった。この事実は、40年廃炉訴訟で判明！

IV 監視試験片の不足問題

運転延長の際の監視試験片の不足をどうするのか

- もともと40年までの運転を想定していたため、監視試験片が不足する。
再生試験片でカバーするとしている(山中委員長の記者会見での回答)

監視試験用カプセルには、シャルピー試験用と破壊靱性試験用の2種類の監視試験片が装着されている

- **再生試験片の問題点**

- (1) シャルピー試験: **熱影響部は狭すぎて再生試験片を作れない**
⇒母材で代表できるとしている(そうでないとする研究結果がある)
- (2) 破壊靱性試験(CT試験): **ミニCT試験片でおこなうとしているが、遷移領域での試験が困難(表面から塑性変形を起こしてしまう)で、信頼性が低い**

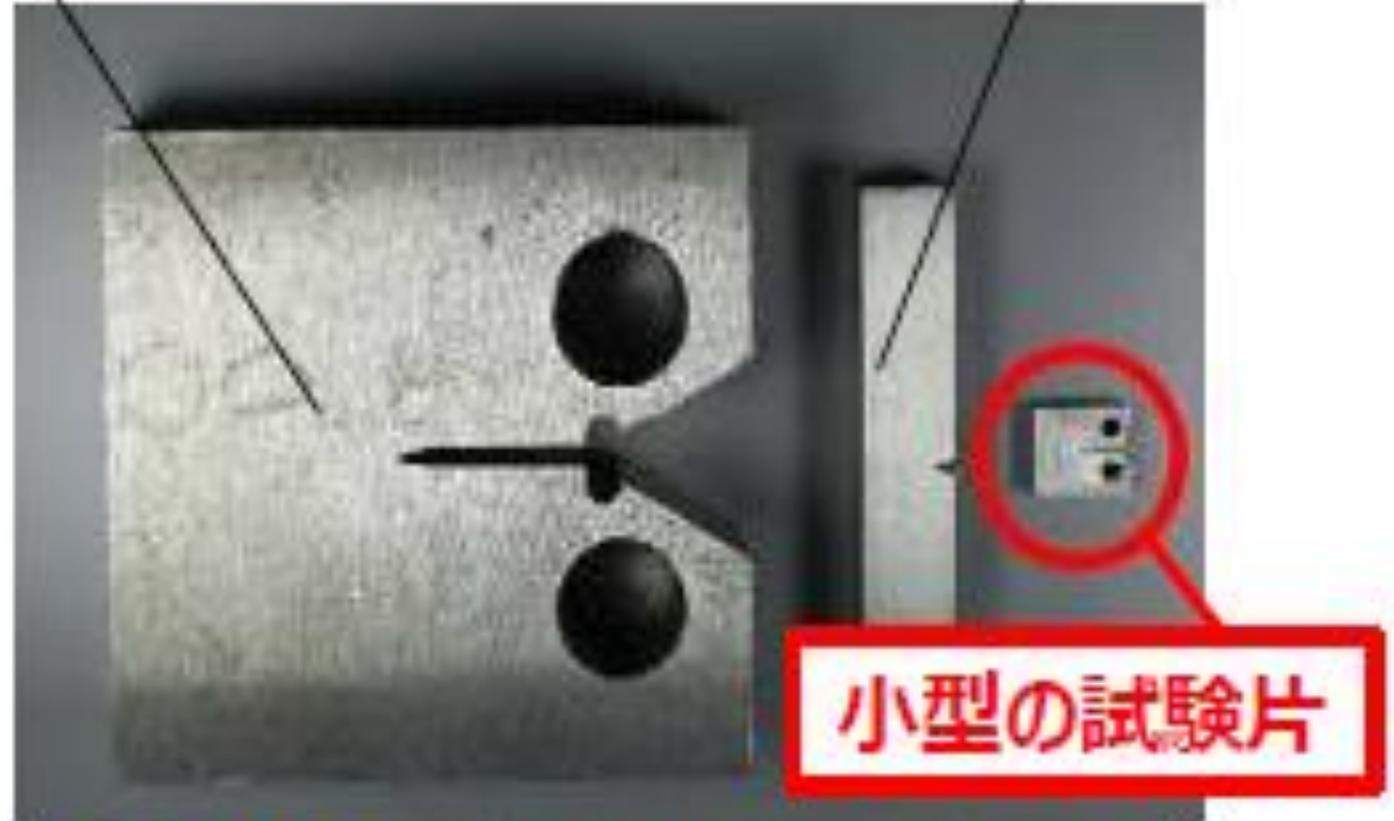
試験片
(破壊靱性試験片)

試験片
(シャルピー衝撃試験片)

シャルピー試験片：
10mm角棒×長さ55mm

破壊靱性（CT）試験片：
板厚25mm×60mm×62.5mm

ミニCT試験片：
板厚4mm×10mm×9.6mm
板厚が薄いので塑性変形
を起こしやすい



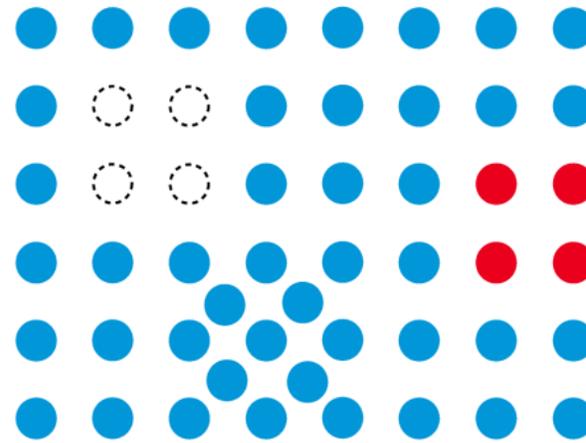
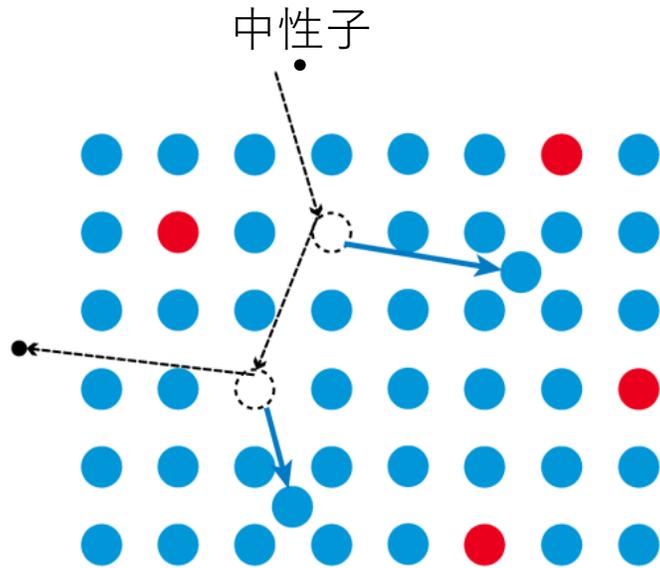
試験片を加工し、複数の小型の試験片を製作

V 結論

中性子照射により金属が脆化するメカニズム

中性子照射による原子のはじき出し

空孔・格子間原子の拡散（移動）



空孔
クラスター } の形成
格子間原子
クラスター

銅クラスターの形成
(不純物原子)

材料の硬化
(照射脆化)

- 鉄原子
- 空孔
- 銅原子(不純物原子)

このメカニズムは確立されたものではない！

中性子照射脆化の特徴

- (1) 銅クラスター(不純物クラスター)の形成が一段落した後も、
格子欠陥クラスター(空孔クラスターや格子間原子クラスター)の形成は限りなく続く
- (2) 材料試験炉での加速照射では、実機の照射脆化を予測できないことが分かってきた(脆化するメカニズムが照射速度によって違ってくる)

⇒ 運転延長で未知の領域に入る

規制委審査は大丈夫？ ⇒ ではない

- 破壊靱性曲線、熱衝撃曲線ともに、**不確かさ**がある。
- このことを厳正に**考慮した審査がされていない**。
(高浜1・2号・美浜3号の運転延長認可審査)
- 審査基準である日本電気協会の規程には初歩的間違いや正しくない前提が使われている
- 監視試験片が不足する。熱影響部の再生試験片は作れない。
ミニCT試験片では十分なデータが取れない
- 実機での監視試験片は、**照射年数が40年以下**
(最長で高浜1号機の37年)。
40年超への運転延長は、取得データがない未知の領域に入る。