原発の老朽化を考える

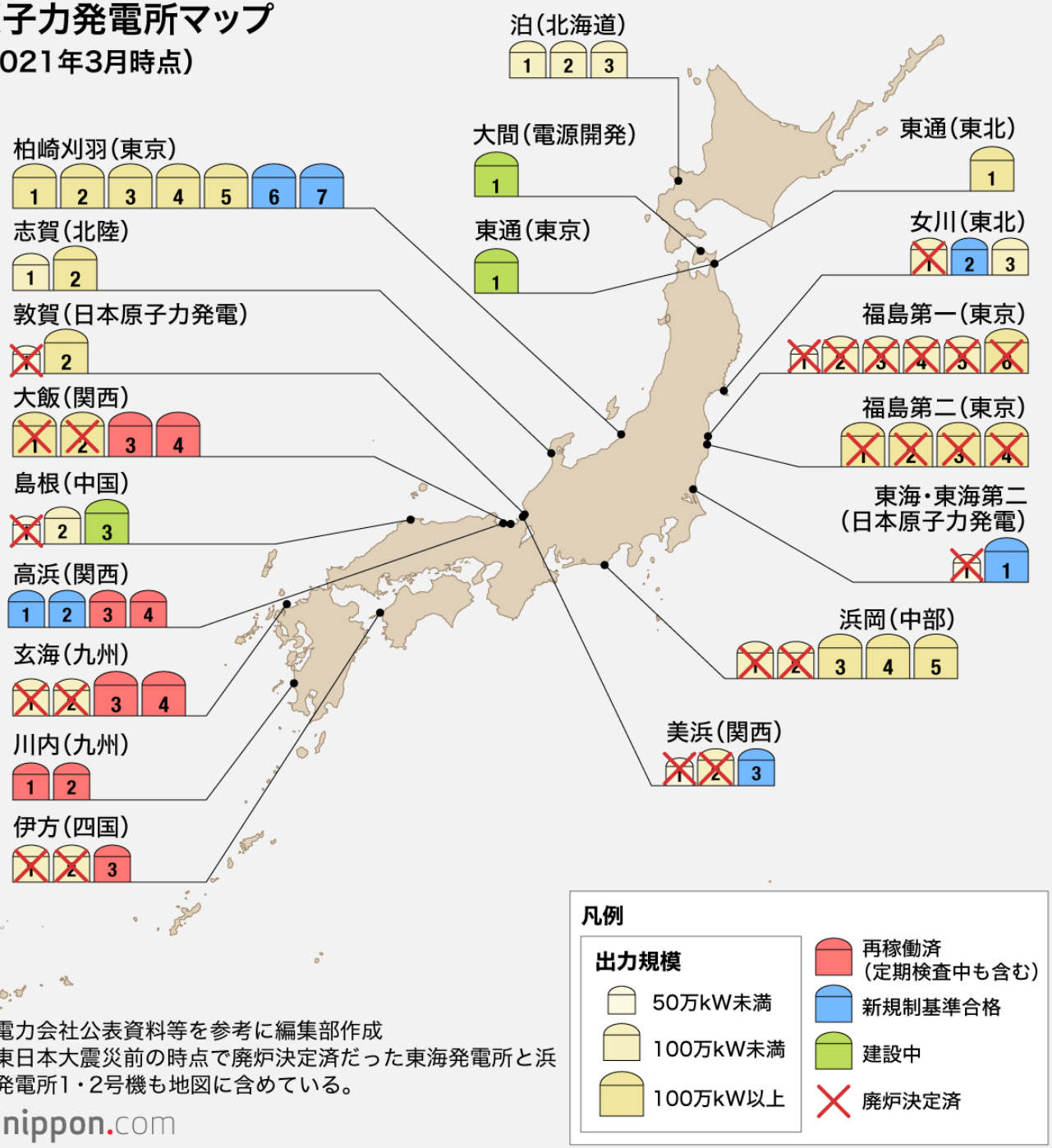
井野博満

2021.08.10、CNICオンライン学習会

日本の原発の運転開始時期

1966年　　：　１基（東海）
1970年-1979年：２０基（敦賀１、美浜１、…）
1980年-1989年：１６基
1990年-1999年：１５基
2000年以降　　：　５基
合計５７基
建設中：３基（大間、島根３、東電東通１）
2030年時点で運転開始40年未満なのは、
　1990年以降運転開始の２０基のみ

原子力発電所マップ
(2021年3月時点)



各電力会社公表資料等を参考に編集部作成
※東日本大震災前の時点で廃炉決定済だった東海発電所と浜岡発電所1・2号機も地図に含めている。

nippon.com

老朽化原発は廃炉に向かうか？

- すでに廃炉が決まった原発（計24基）

東海、浜岡1・2、福島第一1・2・3・4・5・6、敦賀1、美浜1・2、島根1、玄海1・2、伊方1・2、大飯1・2、女川1、福島第二1・2・3・4　　⇒　残り33基

- 再稼働した原発（10基）

川内1・2、伊方3、高浜3・4、玄海3・4、大飯3・4、美浜3

- 新規制基準適合審査合格し再稼働待ちの原発（6基）

柏崎刈羽6・7、高浜1・2、東海第二、女川2

- 蛍光マークは40年を超える運転延長認可の原発（4基）

原発の経年劣化

金属材料の経年劣化

①腐食・・・水や大気中で酸化し、錆やひび割れが生じる現象、応力腐食割れ（SCC）など

②金属疲労・・・繰り返しの力を受けて破損する

③放射線による損傷・・・圧力容器鋼材の中性子照射脆化

複合要因（③+①）・・・ステンレス鋼の照射誘起応力腐食割れ（IASCC）

ほかにも電気配線やコンクリートの経年劣化

鉄は低温で脆くなる

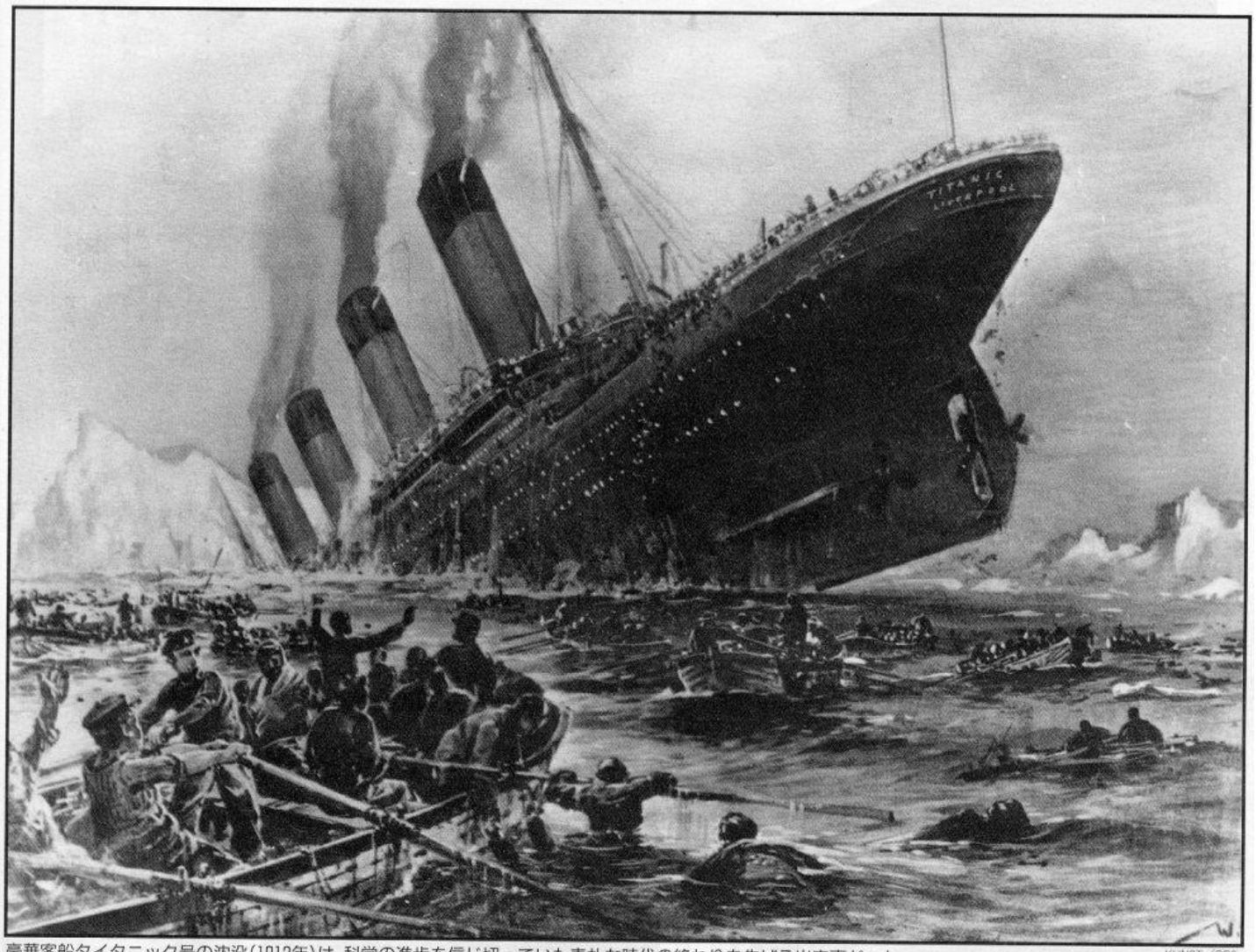
脆化＝脆くなる、割れやすくなる

鉄は強い力で引っ張ると延びて塑性変形するが、低温では延びずに割れる。その境となる目安の温度を脆性遷移温度（あるいは延性脆性遷移温度、DBTT）、無延性温度（NDT）などと呼ぶ

鉄鋼の脆性破壊

- 船舶ではもっとも恐れられている事故原因
- 1912年　タイタニック号の沈没　外板の鋼の材質が悪く、脆性遷移温度27℃前後。船が真っ二つに破断
- 第二次大戦中、米国輸送船（リバティー船）が２５００隻が損傷。スケネクタディー号は静かな海上で大破
- 戦後の日本でも、ぼりばあ丸やカルフォルニア丸が海難事故

タイタニック号沈没（1912年）



豪華客船タイタニック号の沈没（1912年）は、科学の進歩を信じ切っていた素朴な時代の終わりを告げる出来事だった

KUNST／PPS

タイタニック号

1912年太西洋で氷山と衝突。

当時世界最大の豪華客船

◆リベット継ぎ手だが、リベットが脆性破壊したとの説がある。

◆横隔壁（ﾊﾞﾙｸﾍｯﾄﾞ）の上部にすきまがあり、水密隔壁ではなかった。

◆救命ボートや救命胴衣の不備、救助要請の遅れ等で**死者1513名**。

Earl R. Parker, John Wiley & Sons, 1957

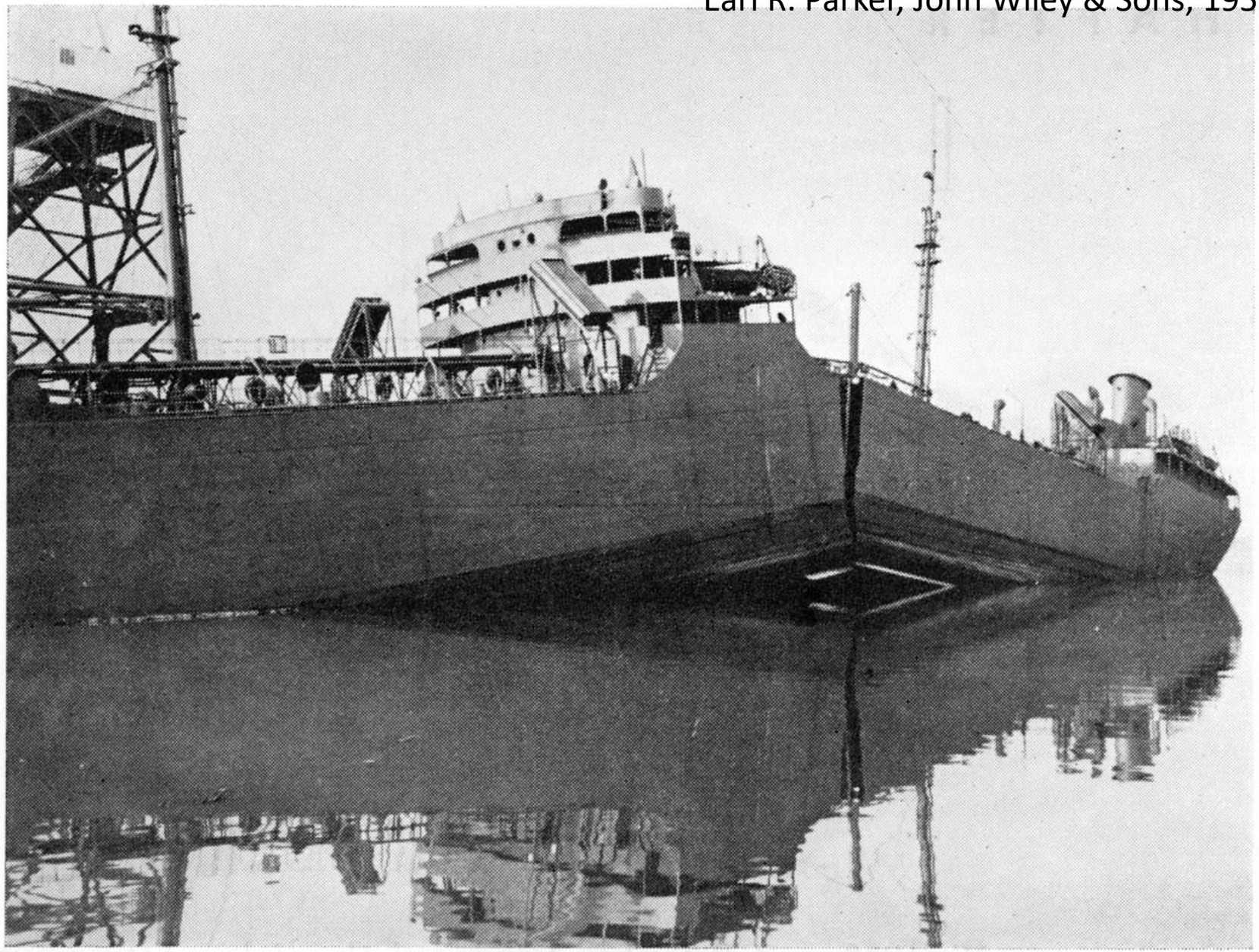


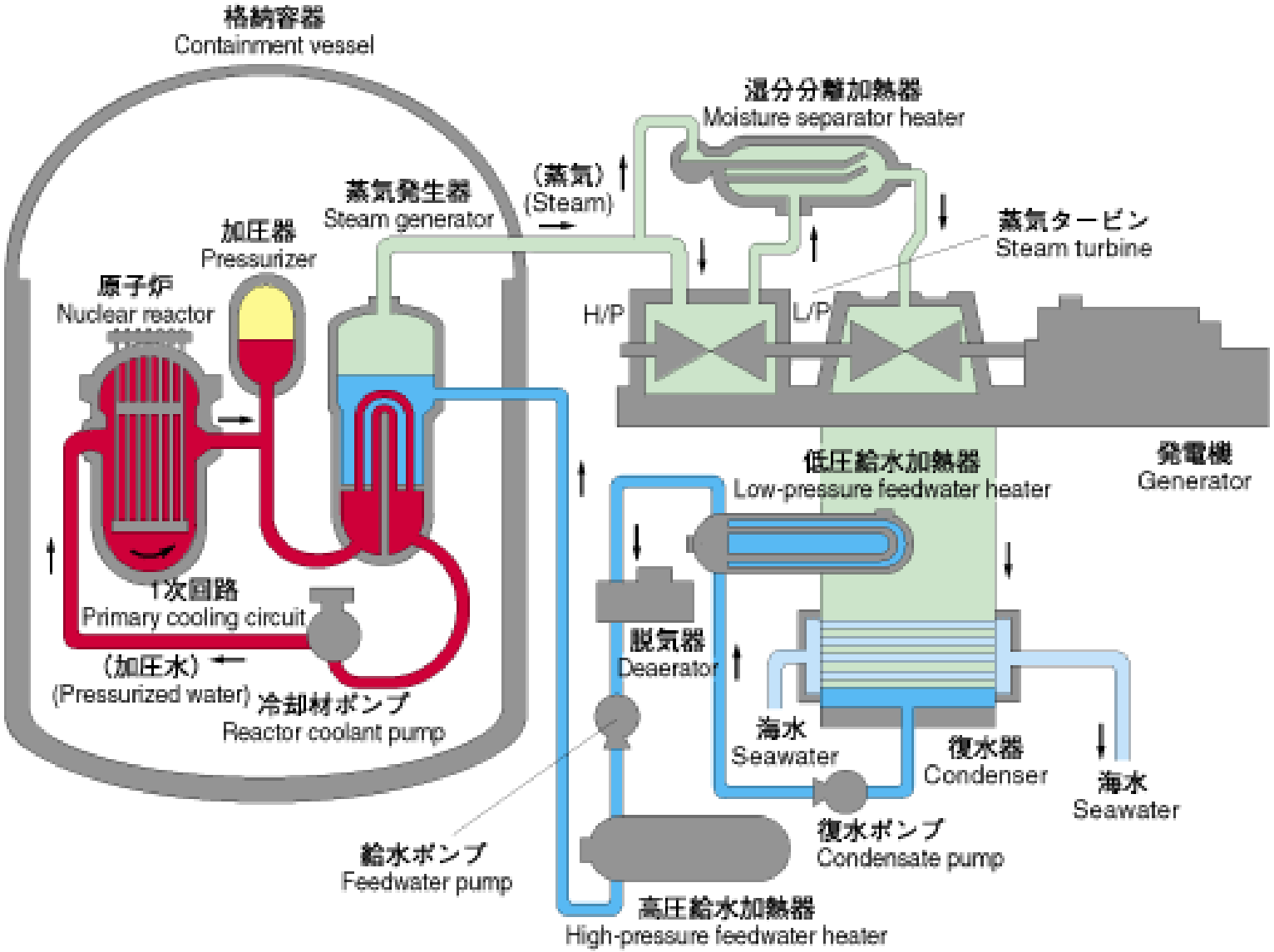
Fig. 1.1 Photograph of a T-2 tanker that failed at pier.

中性子照射脆化とは？

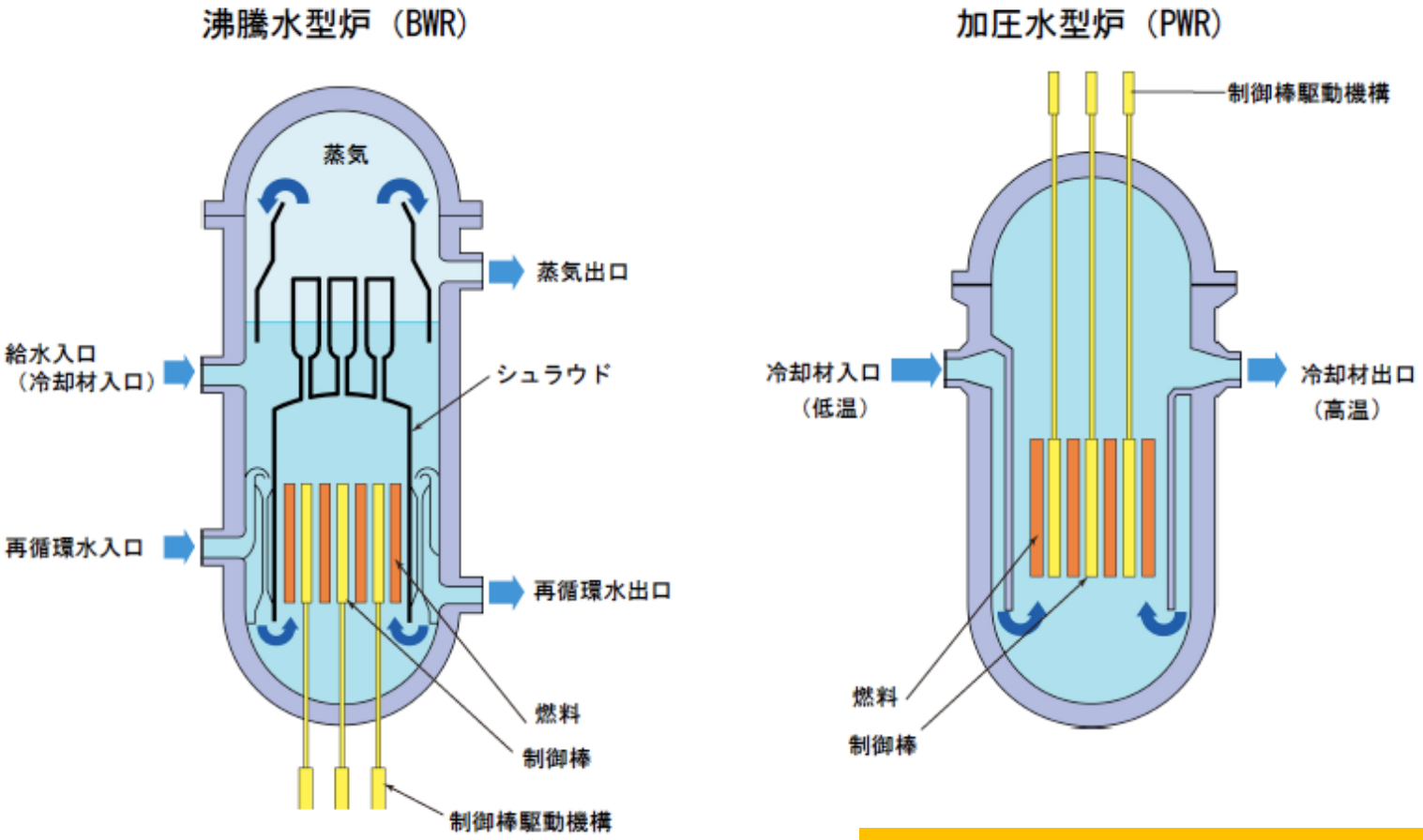
炉心からの中性子が圧力容器鋼材を照射すると原子配列に欠陥が生じ、脆化を引き起こす現象

結晶中に欠陥クラスターができる。これが金属特有の粘り強さ（靭性）を妨げる

三菱ＰＷＲ形原子力発電プラント系統図
Mitsubishi PWR Nuclear Power Plant Flow Diagram



原子炉圧力容器断面図



PWR事業者は原子炉容器と呼ぶ

出典：資源エネルギー庁「原子力2010」

圧力容器の破壊はどういうときに起こるか

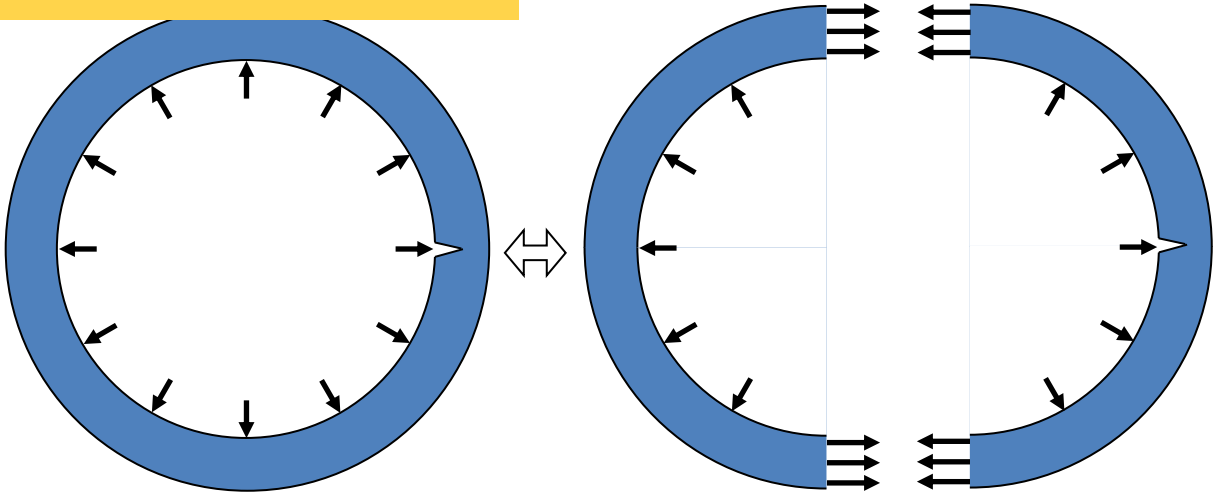
① 圧力容器鋼材が劣化して脆くなっている

② 緊急炉心冷却装置（ECCS）が働いて圧力容器が急冷され、容器内面に加圧熱衝撃（PTS）が生じる

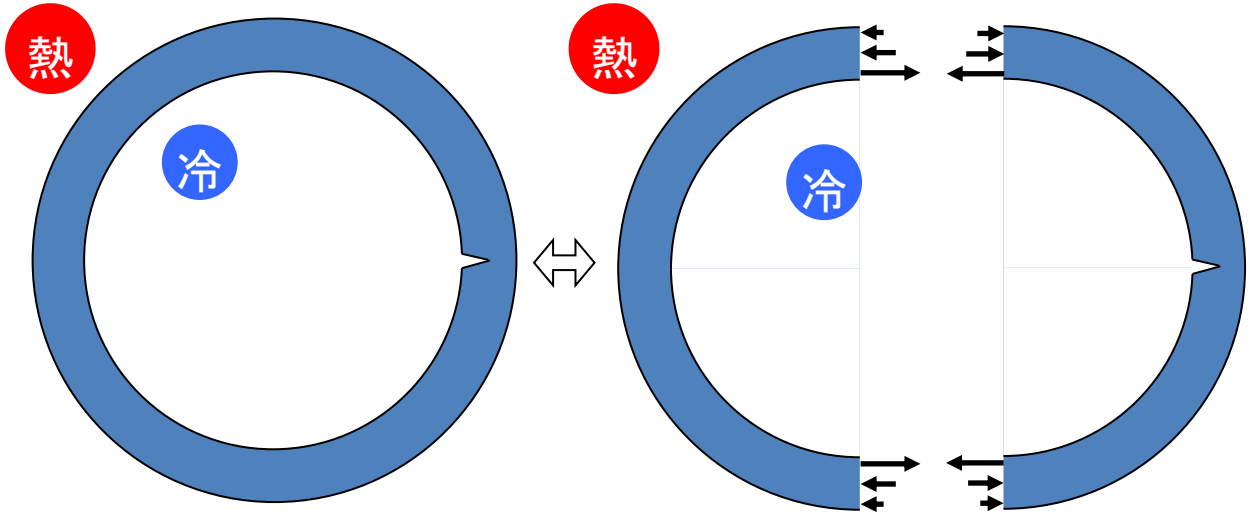
③ 容器内面にき裂（ひび割れ）があると、そこから割れが進行し、大事故となる

圧力容器内面に作用する力

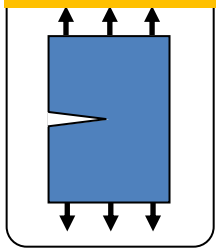
内圧：断面に引張応力



温度差：内側が冷えると断面内壁近くで引張応力



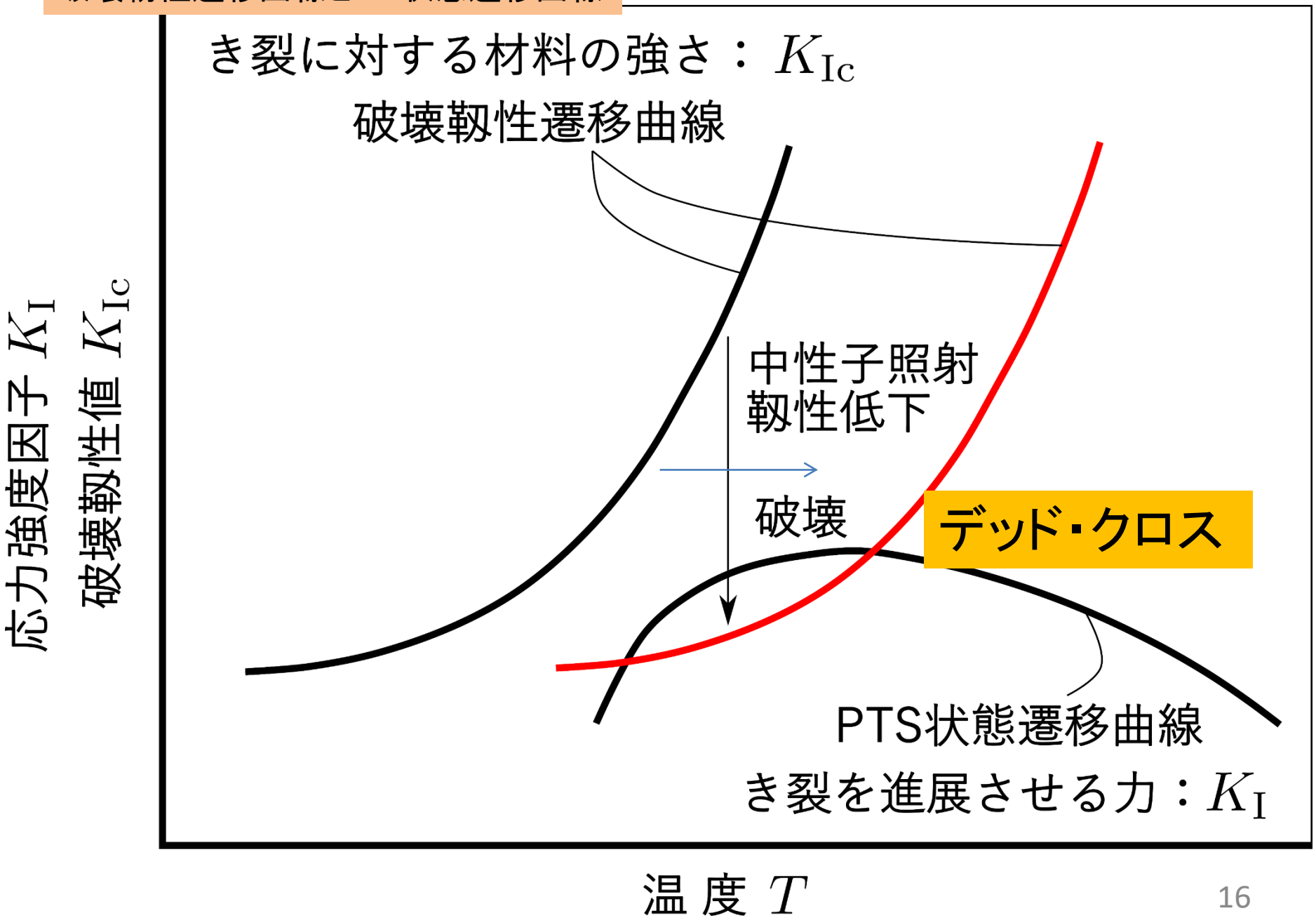
き裂付近



破壊靭性評価

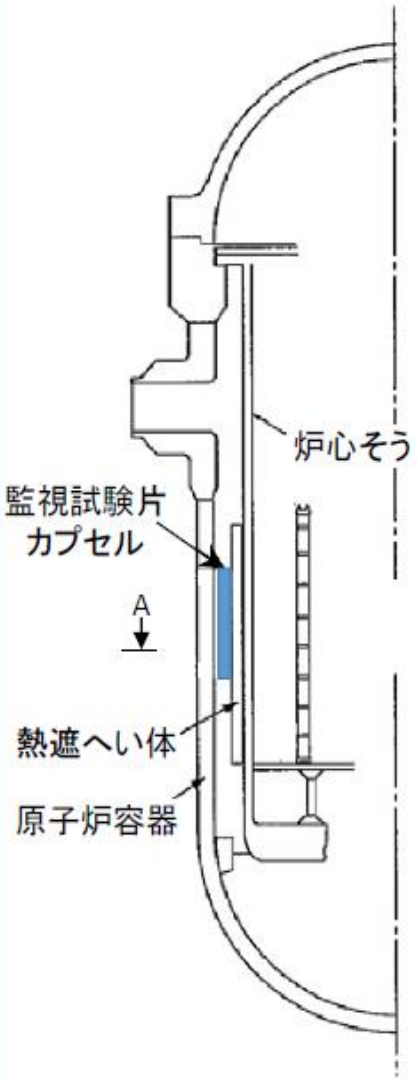
- 圧力容器鋼の強さを示す破壊靭性曲線（K_{Ic}曲線）（脆化の度合いを示す）
- 容器のき裂にかかる力を示すPTS状態遷移曲線（K_I曲線）
- 両曲線が交差しなければ安全と判定する

破壊靭性遷移曲線とPTS状態遷移曲線

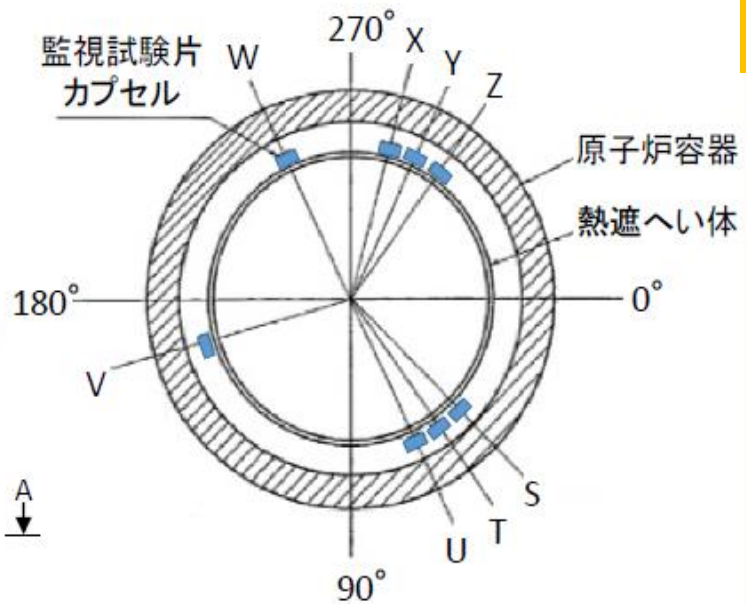


監視試験カプセルと炉内配置図

監視試験片カプセルの装荷図

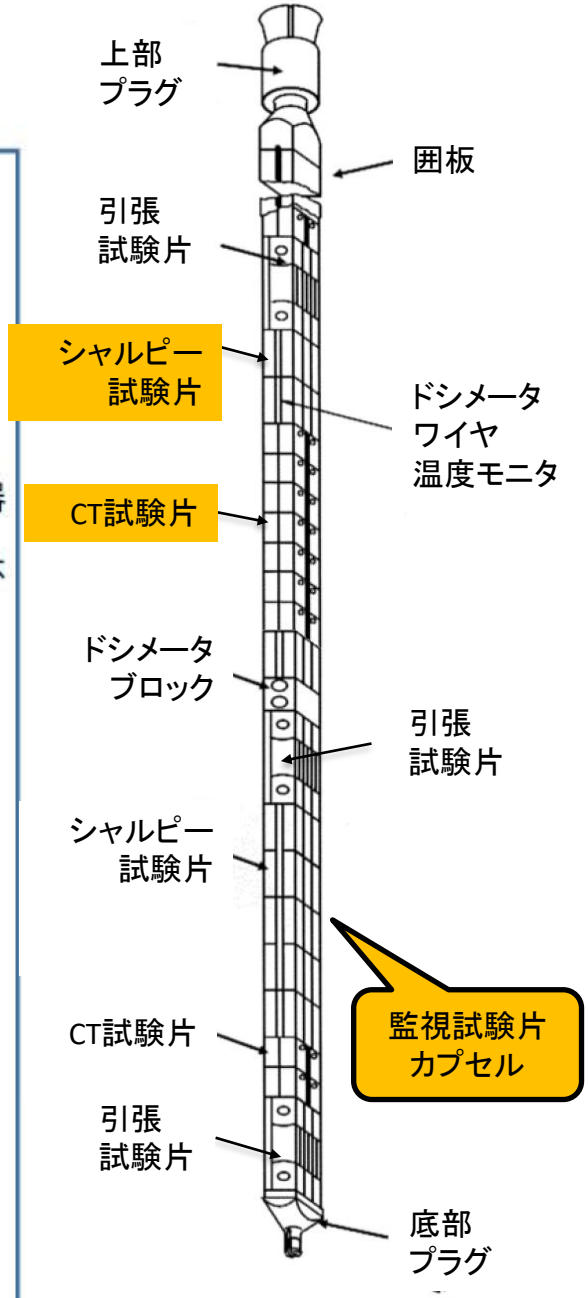


（原子炉容器を側面から見た図）



断面A-A

（原子炉容器を上部から見た図）



原子炉内に設置されている監視試験片の種類

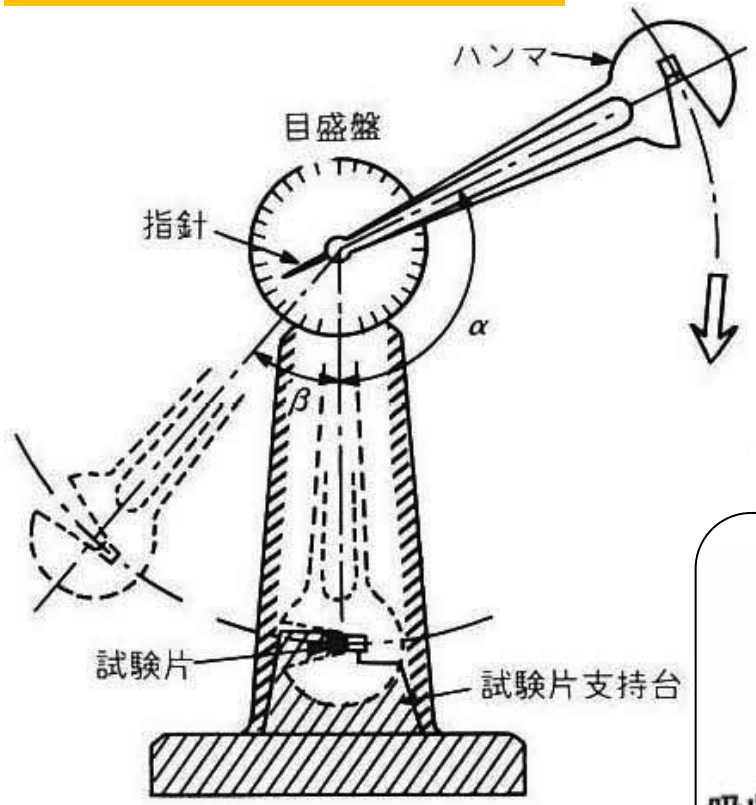
- シャルピー衝撃試験片・・・脆性遷移温度を求める
- CT試験片・・・破壊靭性値を求める

  ただし、BWRには挿入されていない
- 引張試験片・・・引張強さを求める
- ドシメータ・・・中性子照射量を求める

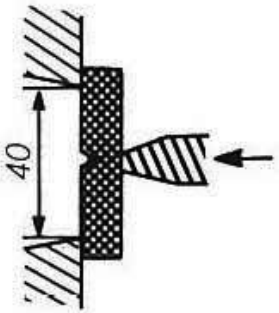
- これらをセットした監視試験カプセルが数組挿入されている

シャルピー試験

エネルギー衝撃に対しどのほど強度を持つのか評価



(a)シャルピ衝撃試験機



(b)シャルピ試験

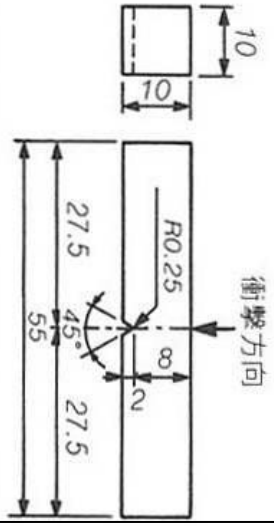
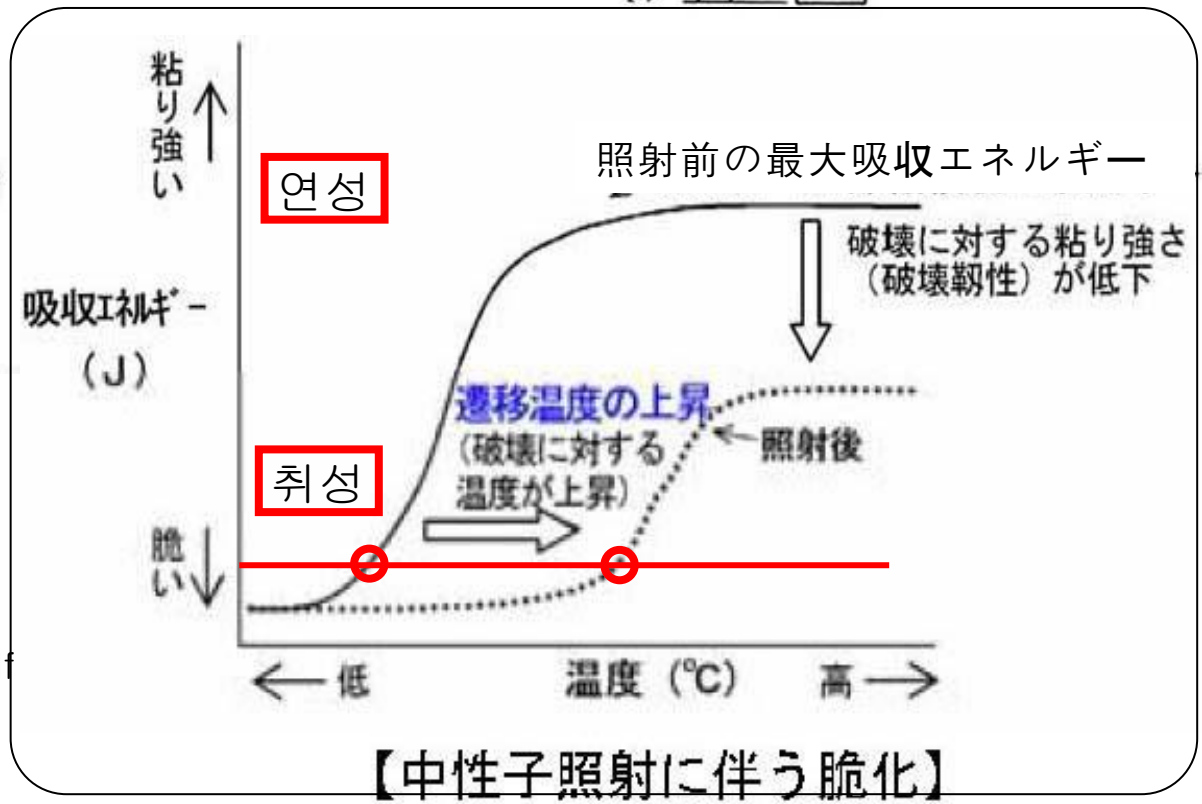


図3・2 シャルピ試験片（4号試験片）

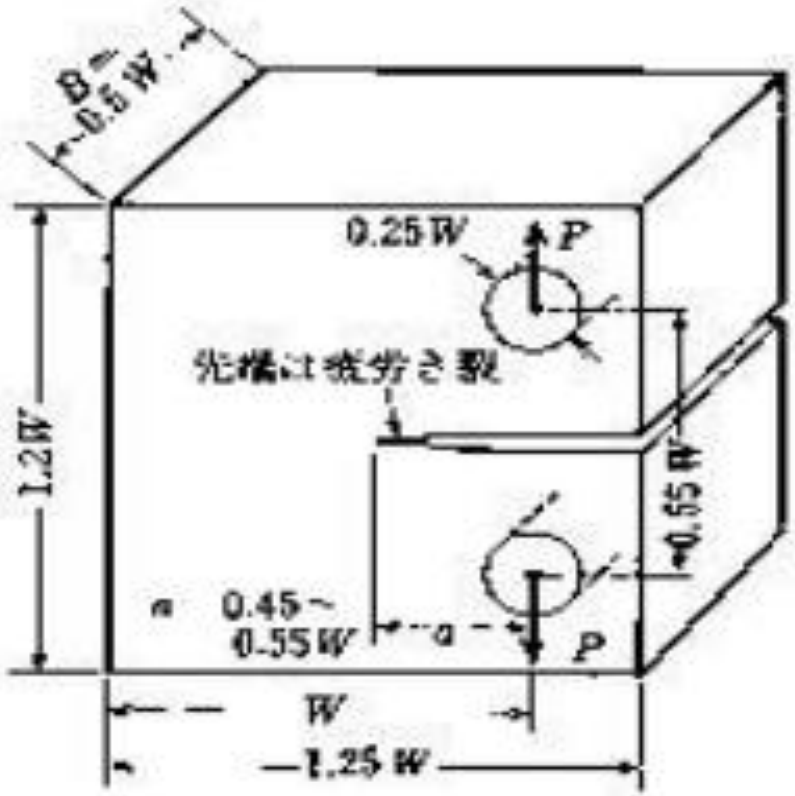
『機械材料学』，日本材料学会,1991



【中性子照射に伴う脆化】

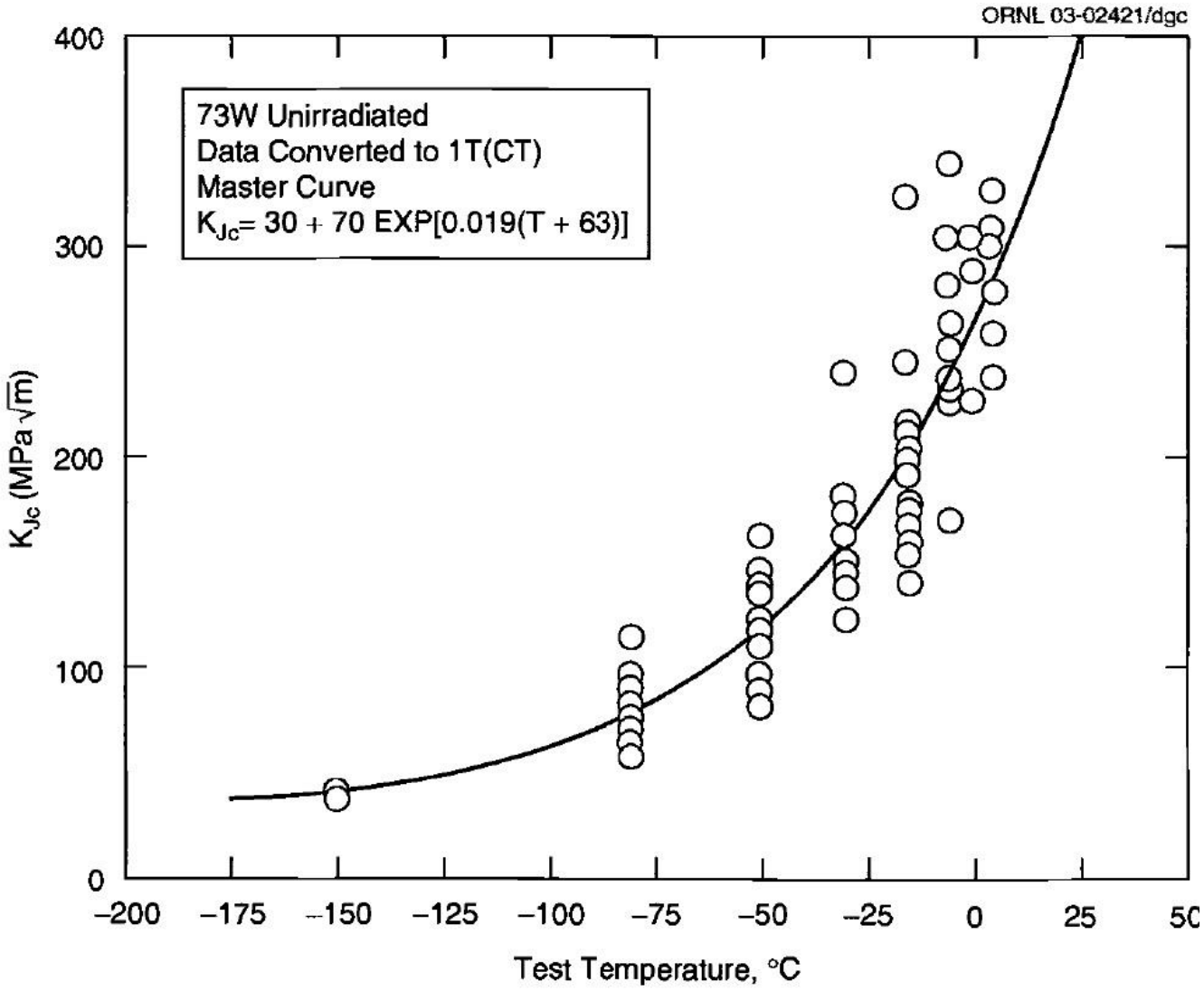
http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/nuclear/nuclear_irradiation110708.pdf

CT（Compact Tension）試験片



き裂にかかる力を増やし、どこまで耐えられるかを調べる。き裂が進展するときの値が破壊靭性値 K_{Ic}

CT試験によって得られるマスターカーブの例



高浜1号圧力容器で何が起っているか

- １９７４年１１月運転開始
- ２００３年　高経年化技術評価書（３０年目）
- ２０１３年１１月　高経年化技術評価書（４０年目）
- ２０１６年４月　６０年までの運転延長を認可しないことを求める行政訴訟（名古屋地裁）

高浜1号炉の脆性遷移温度と予測曲線

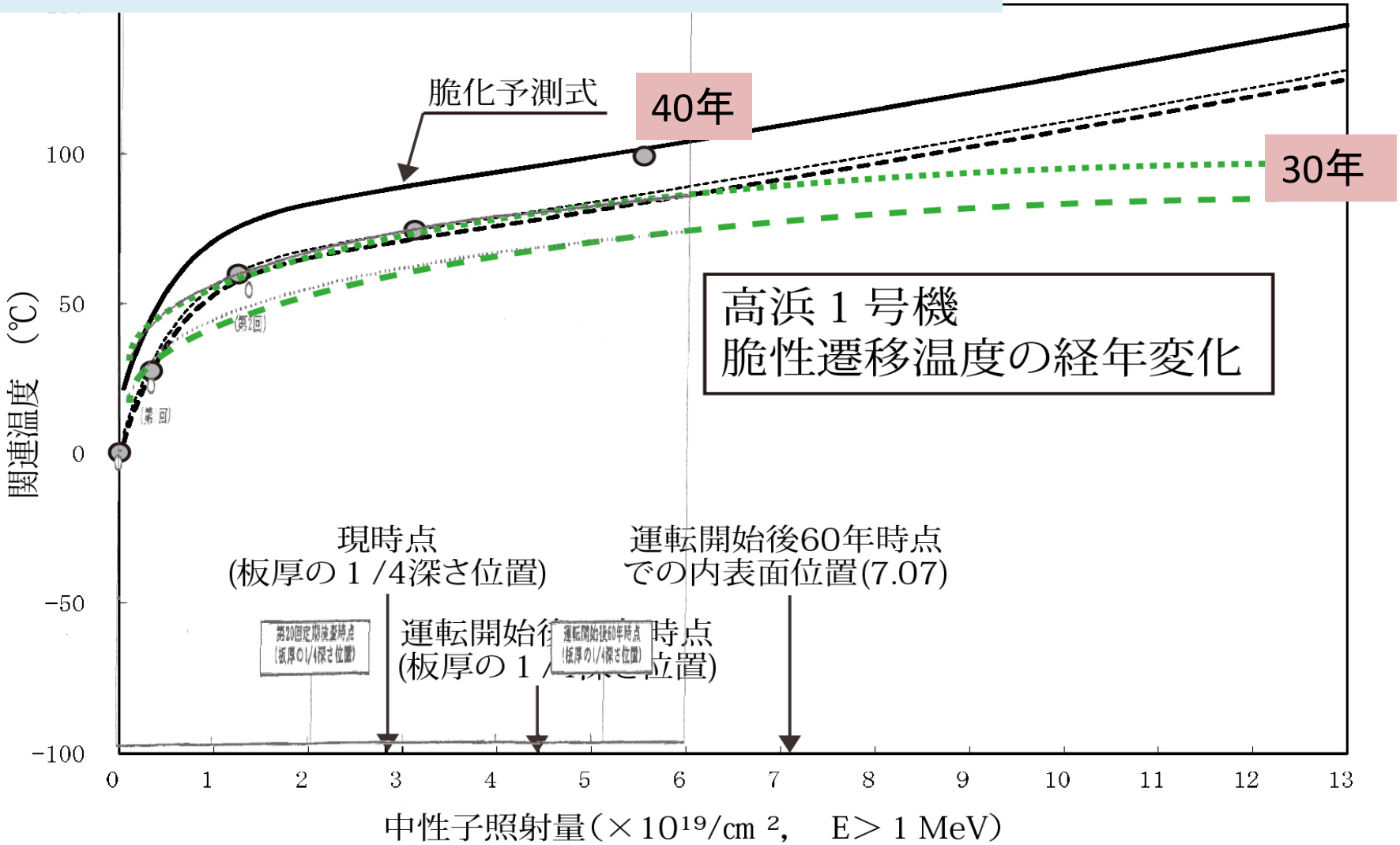
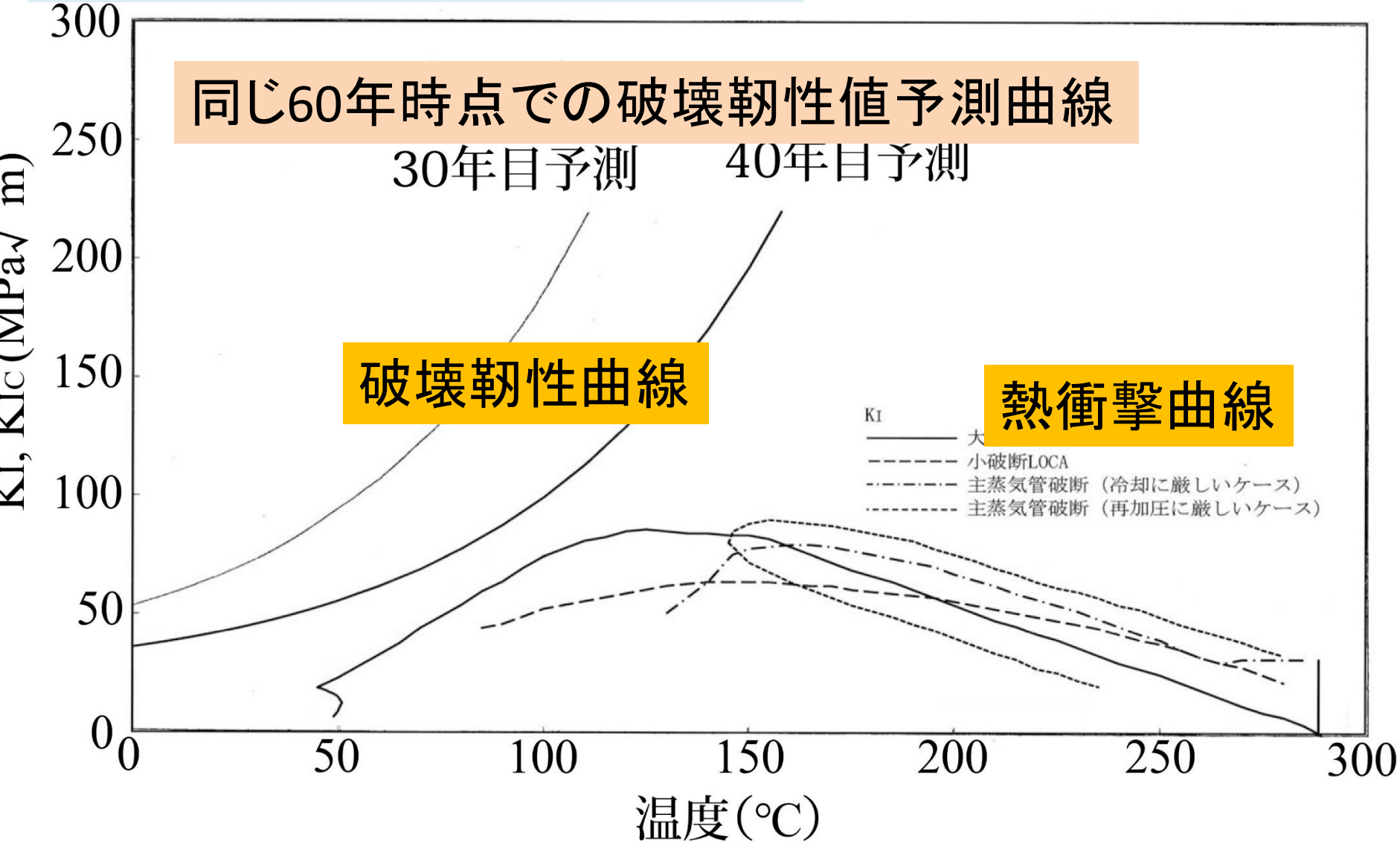


図１　高浜原発１号炉監視試験により測定された脆性遷移温度（●印）と JEAC4201−2007［2013追補版］にもとづく脆化予測曲線（文献２）。なお、60年位置が以前の報告書より内側に修正されている

高浜1号炉のPTS評価



予測が大幅に狂った理由

- 30年目予測：第3回監視試験データまでで予測
- 40年目予測：第4回監視試験データが追加された
- 第4回監視試験結果（2009年）

①破壊靭性試験で予想以上の低い（悪い）値

②シャルピー試験で予想以上の高い（悪い）値

⇒予測式が正しくない（危険側の予測をする）

技術規程改訂の動き

- 日本電気協会（JEA）電気技術規程
- 「原子炉構造材の監視試験方法」JEAC4201
- 「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靭性の確認方法」JEAC4206
- 改定の動機・出発点は、保安院・高経年化意見聴取会（2011-2012）での議論・批判

JEAC4201
原子炉構造材の監視試験方法

JEAC4201-2007

脆化予測式の元になる反応式が間違っている（老朽化研で小岩昌宏が見つける）

高経年化意見聴取会で議論。保安院は、この規程で現状は十分安全とする一方、日本電気協会に信頼性の高い改訂案の作成を求めた（2012年）

日本電気協会はおざなりな【２０１３追補版】を作成

現在、日本電気協会は新規程を作成中だが、誤りを認めないまま、問題点をスルーした案を検討中

JEAC4206
原子炉圧力容器の破壊靭性の確認方法

- JEAC4206-2007
- 破壊靭性遷移曲線の求め方が安全側になっていない。典型例が高浜1号炉の破壊靭性評価
- JEAC4206-2016
- 原子力規制委員会の検討チームで審査（2019-2020）。採用を却下。実に異例なこと！

採用却下の理由

- 新しく採用されたによる確率論的破壊靭性評価（マスターカーブ法）が、照射材に適用できるかどうか十分な根拠が示されていない
- 「技術評価書」の結論①「5%信頼下限を用いて T_0 式及び T_{r30} 式を設定したことは、それらの式を下回るデータが5%あることを前提としており、その妥当性については、規格策定者による論理的な説明が必要である。」
- ②～⑤、省略

- くわしくは、筆者らの論考をご覧ください
- 井野博満・青野雄太 「原子炉圧力容器の破壊靭性評価はいまどうなっているか―原子力規制委員会が採用を却下した日本電気協会の新規格JEAC４２０６－２０１６」、『科学』 ２０２１年９月号

JEAC4206-2016の本質的欠陥

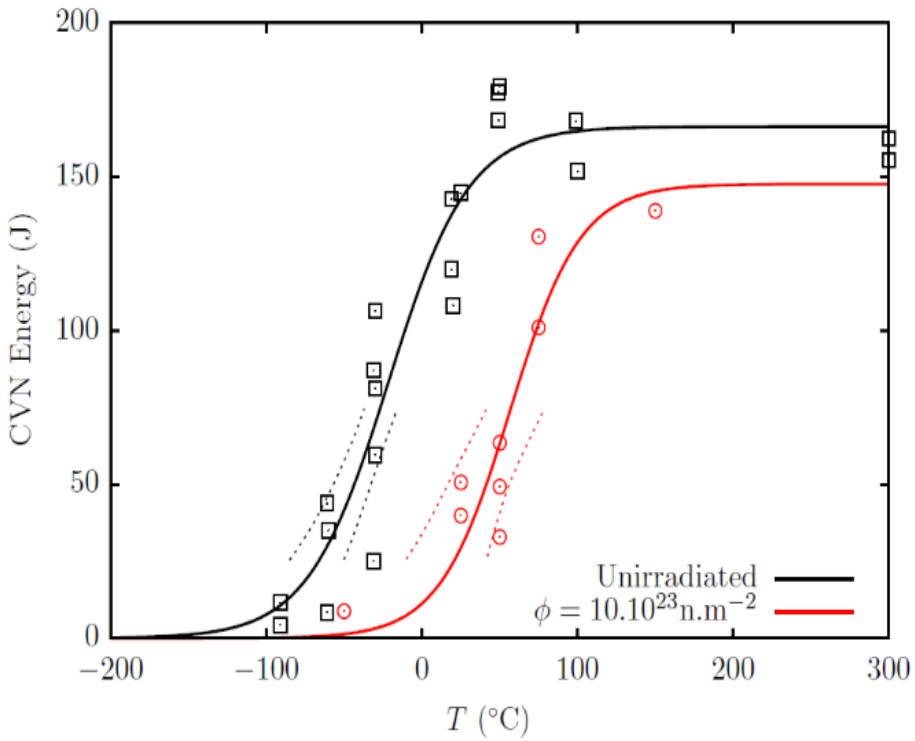
- 日本で運転されている原発の圧力容器の破壊靭性値の監視データは毎回4点しかない
- それを補うため、照射による破壊靭性値の移行量ΔT_Oの代りに、脆性遷移温度の移行量ΔT_{NDT}を評価に使っている。$\Delta T_O = \Delta T_{NDT}$と仮定
- JEAC4206-2007でも2016でも同じ。それが正しくない。$\Delta T_O > \Delta T_{NDT}$なのではないのか

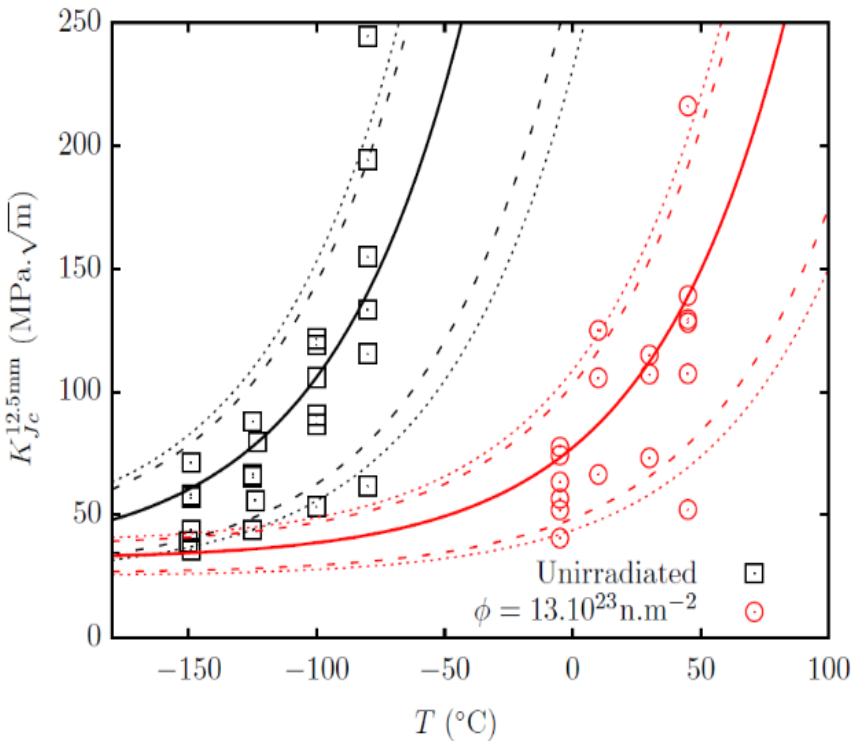
裏付ける新しいデータ
J. Hure et al. , J. Nuc. Mater. (2015)

- この論文での実験結果は、高照射領域（仏のPWRで60年運転に相当する照射量）において、筆者らの主張を明確に裏付けている
- ΔT_0＝126℃、ΔT_{NDT}＝98℃と求められている

- **供試材データ**:仏規格16MND5（ASME A508 C13)鋼（鍛鋼品）、照射温度288°C、fluence（照射量）**10～13×10^{23}n/m^2（仏のPWRで60年運転相当）**、flux（照射速度）4.77×10^{16}n/m^{2}s（材料試験炉JMTRと同レベルの加速照射）

照射による脆性遷移温度の移行量ΔT_{NDT}（左図）と破壊靭性値の移行量ΔT_0（右図）の比較





圧力容器の脆性破壊評価法は根本から間違っている

- JEAC4206が採用してきた方法は、その前提となる仮定が成り立たない。現行規程も改訂された2016年版もダメ

40年を超える原発は
ただちに廃炉にすべきである

- JEAC4206という誤った規程で審査すべきでない

- 破壊靭性評価はPWRでしかおこなわれていない。
- BWRでもおこなうべきである。敦賀1号炉での脆性遷移温度は51℃に達していた。東海第二も奇妙なデータが得られている
- 配管の劣化、電気配線の劣化、コンクリートの劣化など危険がいっぱい
- 40年を超える老朽化原発は事故を起こす危険性が高い。ただちに廃炉にすべきである

ご清聴ありがとうございました