



JEAC4206-2016, JEAC4216-2015における 破壊靱性評価の考え方

令和元年11月22日

(一社)日本電気協会 原子力規格委員会

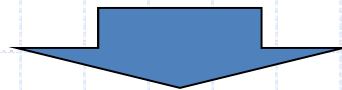


従来の考え方(2007年版)

- 従来(JEAC4206-2007), 原子炉圧力容器鋼の破壊靱性評価には, 様々な温度で試験した破壊靱性実測値の下限を包絡するように評価曲線を定めていた。

(帰納的な推定)

- この考え方は経験則に基づくもので, ばらつきを持つ破壊靱性データの下限で破壊靱性曲線を定めた場合, データの点数に依存することから, 更なる信頼性向上の余地が残っている。

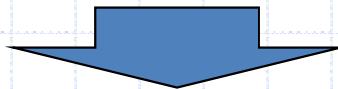


評価の精度, 信頼性向上が継続的な課題



2016年版の考え方

- 研究開発により、破壊靱性が本来有する統計分布特性を考慮して信頼限界を定める「マスターカーブ法」が提唱されている。
- 破壊靱性のばらつきを踏まえた手法としてASTM他で活用が進められつつあり、多くの国内圧力容器鋼に対し適用可能であることが報告される等、知見の拡充がなされている。



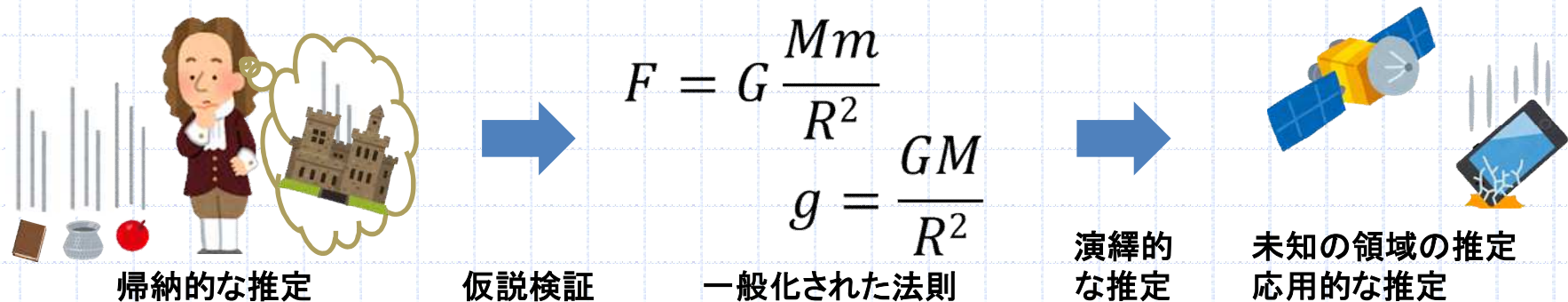
- これらの知見を踏まえ、照射前後の破壊靱性データを取得しているPWRのPTS評価に用いる破壊靱性遷移曲線に対して、破壊靱性のばらつきを踏まえた評価手法を規定する。

(演繹的な推定)



知見の充足・法則の発見に伴う評価手法の変化

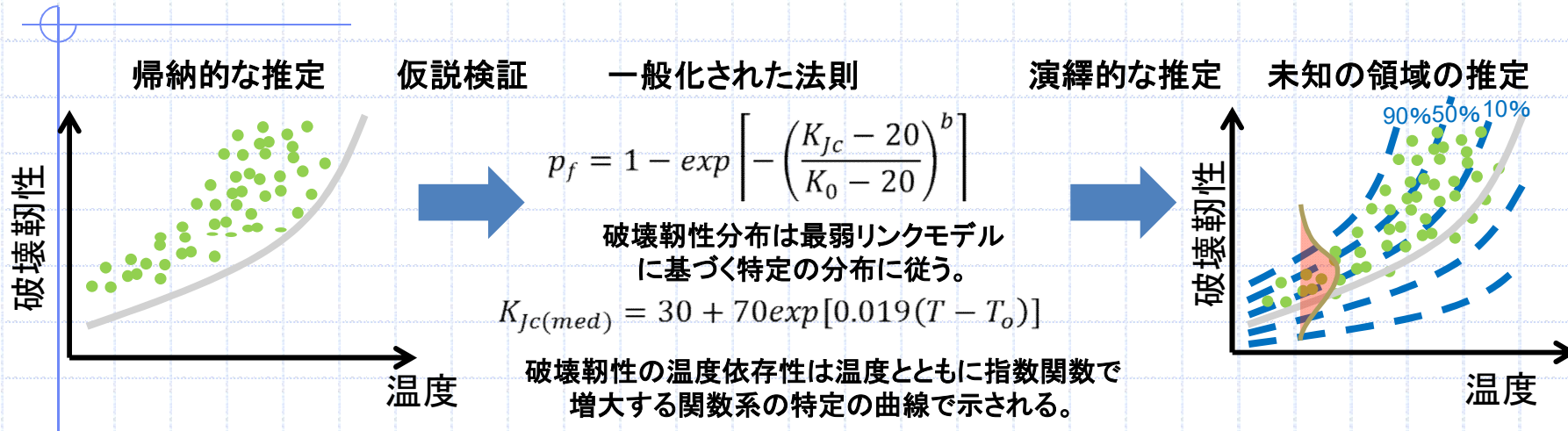
1. 試験や経験に基づくデータ群から目的の値(例:健全性評価のクライテリア)に至るには, データ群の傾向から推定する“帰納的アプローチ”が取られる。
2. その傾向について, 仮説および検証の過程を経て, 一般化された法則が見いだされれば, その後, その法則に従って演繹的に現象を推定できる。
3. 演繹的な手法により, データの無い未知の領域の推定や同じ法則による応用的な事象の推定にも役立てることが出来る。



- ✓ 経験的事実に基づく帰納的な評価:実績に裏打ちされ, 早期の課題解決が可能
- ✓ 信用に足る法則が見いだされれば, 帰納的手法から演繹的手法による評価に移行する。



破壊靱性評価曲線における手法の変化(1)



帰納的な推定 (JEAC4206-2007)	項目	マスターカーブ法による演繹的な推定 (JEAC4206-2016)
経験・実績に基づく下限値 (既存データの有無の境界) クライテリアを下回る領域＝ これまでに破損経験がない領域	クライテリア	統計情報に基づく許容限界 (許容限界に相当する5%信頼限界線) クライテリアを下回る領域＝ 破損する確率が許容限界を下回る領域
<ul style="list-style-type: none"> ✓ 実績に裏付けられた下限値である。 ✓ 破損までの裕度を評価する定量的な指標が無い。 ✓ データ点数に対する依存性が大きい。 	特徴	<ul style="list-style-type: none"> ✓ 破損までの裕度を定量的に評価できる。 ✓ 許容限界の定義が必要 ✓ 新データに対してロバストである。

「従来の経験則に基づき下限値を推定する手法」から、「破壊靱性が本来有する統計分布特性を考慮して信頼限界を定める手法」に変更



破壊靱性評価曲線における手法の変化(2)

- JEAC4206-2016, JEAC4216-2015では, 従来の帰納的な推定ではなく, マスターカーブ法に基づく演繹的な推定(決定論)を採用した。
- これにより, 決定論の評価でありながら**破損への裕度を定量的に評価**でき, また新規のデータ追加に対して**ロバストな手法**となった。
- 将来的には, 米国で導入されている靱性, 亀裂, 照射条件などの因子を確率変数とし, 破損の確率を定量的に評価する評価法の導入を検討していく。

ステップ	内容	対象
1	帰納的な推定 (決定論) ✓ 実機の運転実績に裏付けられた下限値 ✓ 破損までの裕度を評価する定量的な指標はなし	JEAC4206-2007
2	演繹的な推定 (決定論) ✓ 許容限界を下回る領域での破損確率と, 保守性の定量的な評価結果を比較し, 破損への裕度を定量的に評価できる。	JEAC4206-2016
3	確率論による 評価体系 ✓ 靱性, 亀裂, 照射条件などの支配因子を確率変数とし, 破損の確立を定量的に評価する評価法(確率論的破壊力学評価; JEAG4640-2018等)を導入する。	JEAG4640-2018

JEAC4206-2016の改定内容

JEAC4206-2007

- クラス1機器
 - 建設時の要求
 - 原子炉圧力容器の
供用期間中の要求
- クラスMC容器
- クラス2機器
- クラス3容器・配管
- 支持構造物
- 炉心支持構造物

前版(JEAC4206-2007)
「原子力発電所用機器に対する
破壊靱性の確認試験方法」

JEAC4206-2016

原子炉圧力容器の供用期間中の要求
【非延性破壊防止】

圧力・温度要求

マスターカーブ(RT_{T_0})の取り込み
(解説-RF-2100-2)

PTS評価

最新知見反映

【延性破壊防止】

上部棚評価

編集上の修正(従来規定を流用)

原子炉圧力容器の供用期間中の要求
以外は、JSME設計・建設規格と重複
するため、JEAC4206から削除

現行版(JEAC4206-2016)
「原子炉圧力容器の供用期間中の
破壊靱性の確認方法」



マスターカーブ法の成り立ち

破壊靱性のばらつきと寸法依存性

- 最弱リンクモデル

- 様々な強度のリンクが繋がった鎖のうち、最も弱いものが全体の強度を支配する。
- 鎖によって強度が異なる→ばらつき
- 長い鎖のほうが弱いリンクが入る可能性が高い→寸法依存性

- ワイブル分布に従う

$$F(x) = 1 - \exp\left[-\left(\frac{1-B}{A}\right)^C\right]$$

A: スケールパラメータ: ばらつきの大きさ

B: 位置パラメータ: 分布の位置 (破壊靱性の高さ)

C: 形状パラメータ: 分布の形状





マスターカーブ法の特徴

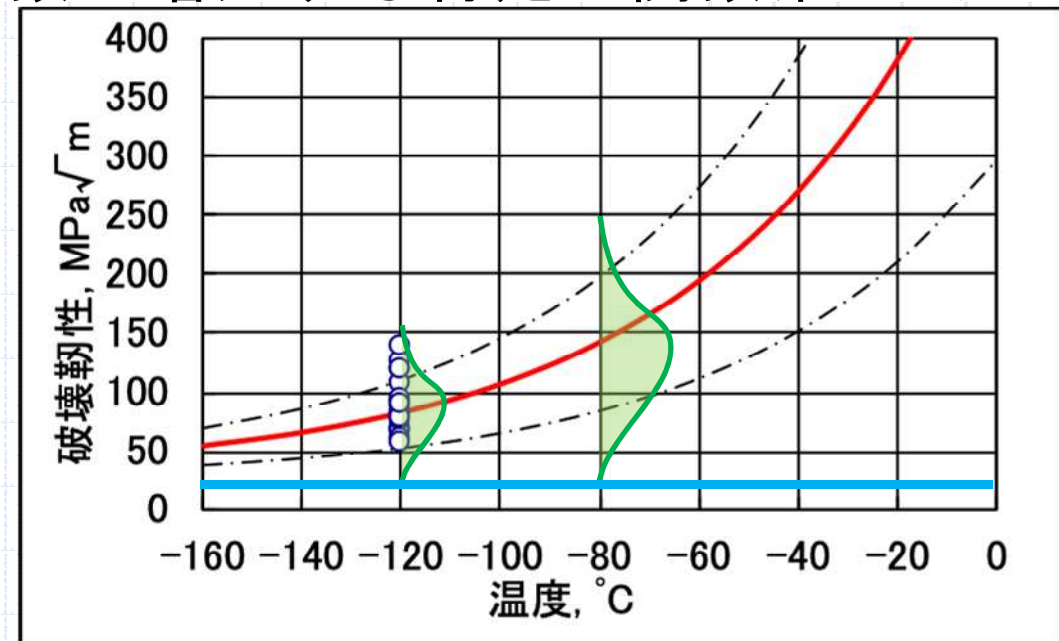
- 圧力容器鋼などのフェライト鋼のへき開破壊靱性値の分布は3パラメータのうち**形状パラメータ**と**位置パラメータ**の2つを固定した特定のワイブル分布で記述できる。
- 破壊靱性の**寸法依存性を補正**できる。
- 破壊靱性の**温度依存性**が、熱活性化過程に影響され、温度とともに指数関数で増大する特定の関数系の式で表される。

$$F(x) = 1 - \exp \left[- \left(\frac{1 - \textcircled{B}}{\textcircled{A}} \right)^{\textcircled{C}} \right]$$

温度の関数

固定 固定

次の3スライドで各項目を説明



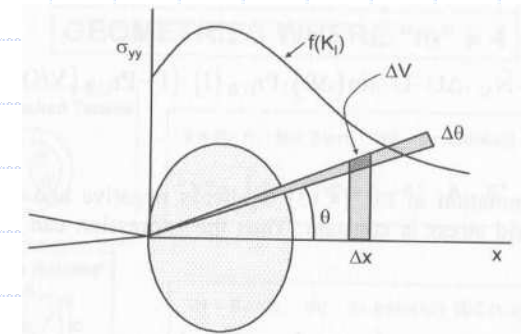
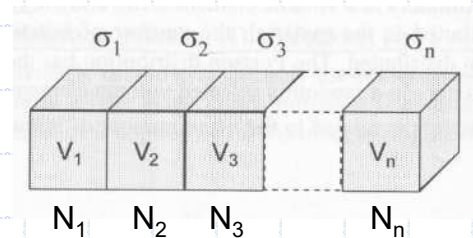
形状パラメータ(固定)の根拠

最弱リンクモデルによる微小体積Vあたりの破損確率

$$P_f = 1 - \left[1 - \Pr \{ I/O \} \right]^N$$

$\Pr\{I/O\}$: 条件付きへき開破壊発生確率
 N : 微小体積Vあたりの破壊起点数

- ✓ 全数の微小体積で破壊起点の分布は一様
- ✓ 亀裂前縁から前方への応力はHRR特異場, 板厚方向へは一様として, 式を展開



亀裂前縁およびその前方の領域における破損確率

$$P_f = 1 - \exp \left\{ - \frac{B}{B_0} \left(\frac{K_I}{K_{0i}} \right)^4 \right\}$$

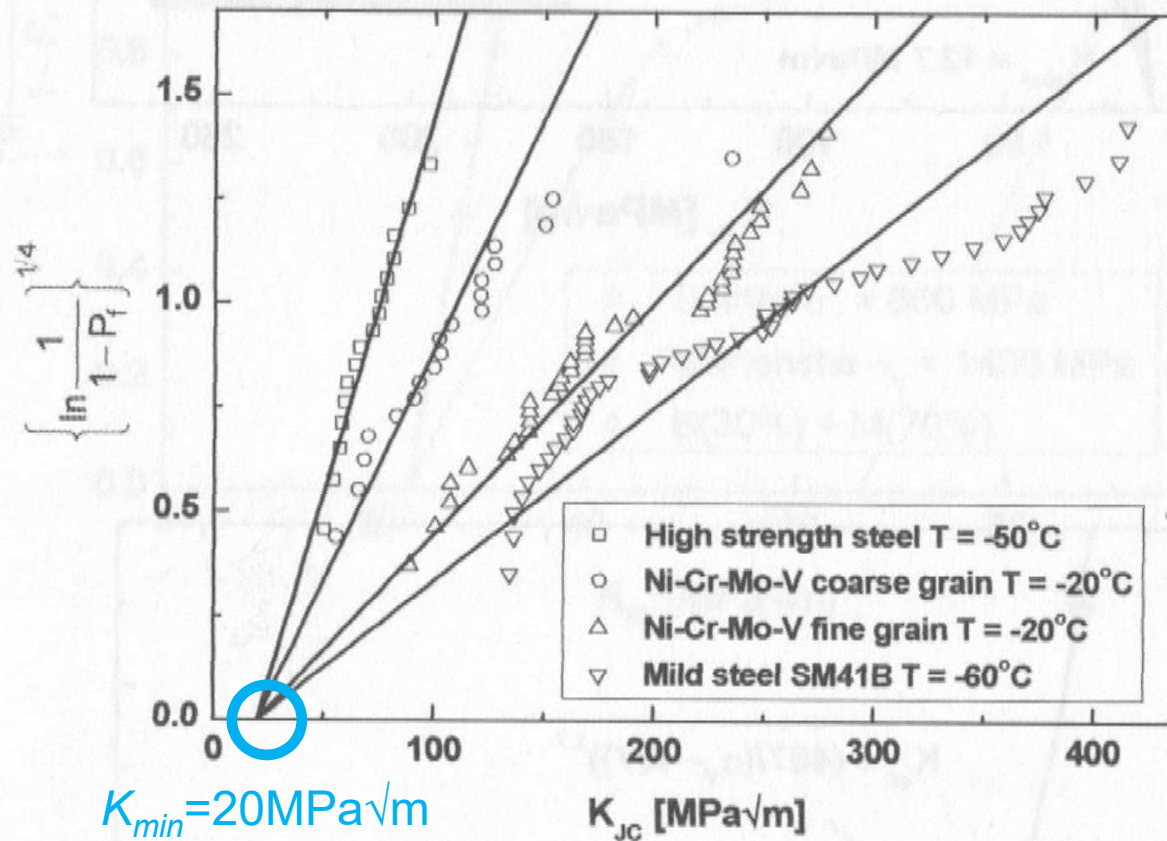
固定の形状パラメータ (ワイブル指数)

B : 板厚
 B_0 : 正規化に用いる板厚 (通常1インチ)
 K_{0i} : 板厚 B_0 の試験片で破損確率63.2%に相当する時の破壊靱性

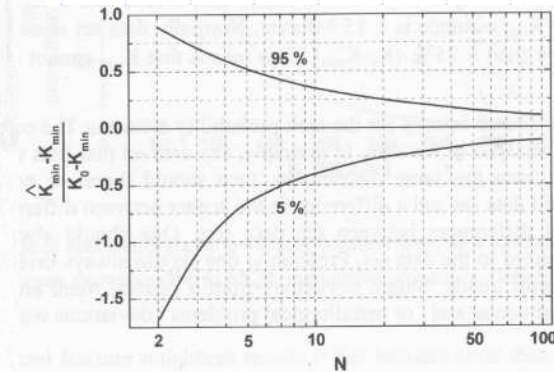
破壊靱性の寸法依存性が補正可能

◆ 最弱リンクモデルとHRR特異場の理論により理論的に決定

位置パラメータ(固定:最小破壊靱性)の根拠



$K_{min} = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$
(位置パラメータに関連)



注: 不確定性が大きく, 個々の実験データから $K_{min} = 20 \text{ MPa}\sqrt{\text{m}}$ を求めるには多くの試験片が必要, とされている。

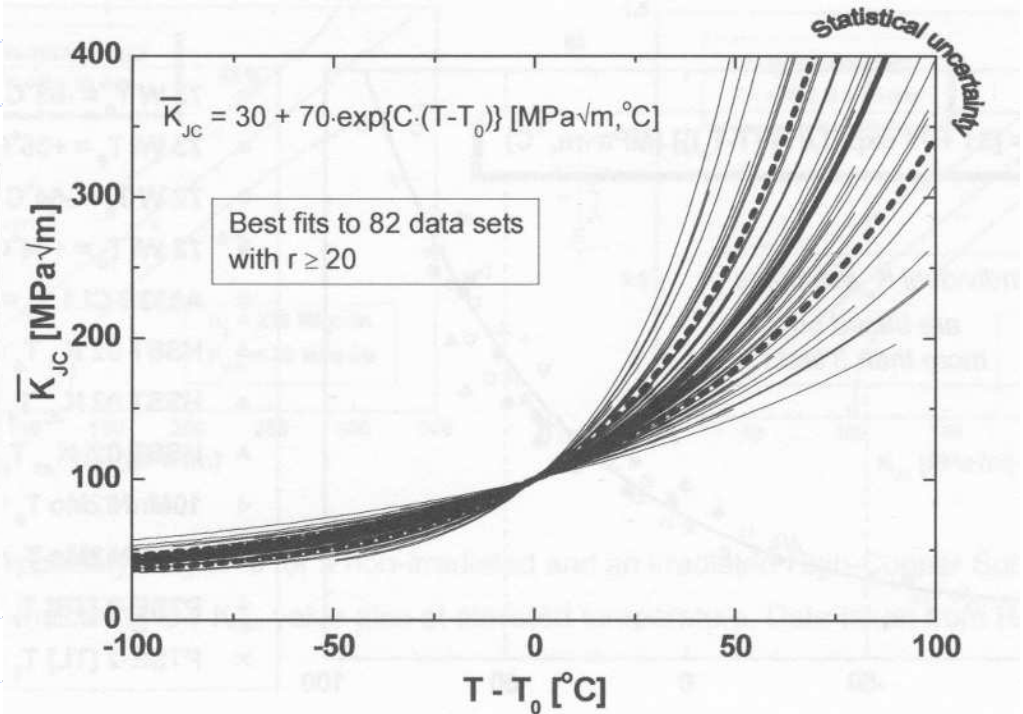
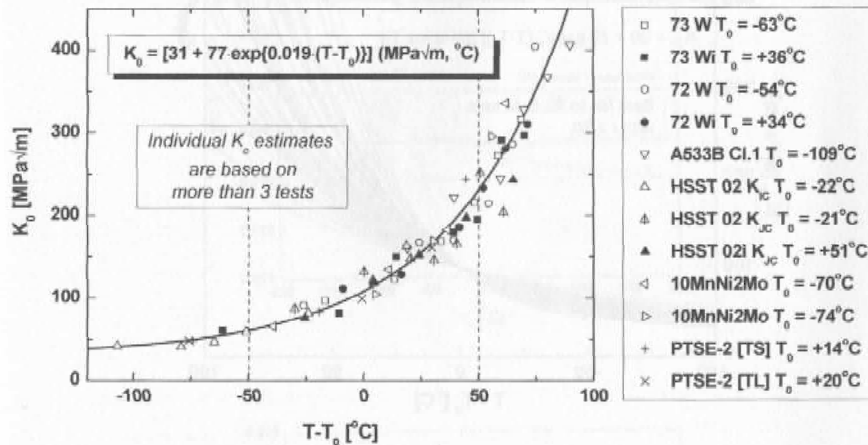
◆ 実験事実の積み上げに基づき決定

Miyata, T. and Togawa, T, Material Research, Vol. 5, pp.85-93, (2002)

Wallin, K., "Fracture Toughness of Engineering Materials," EMAS Publishing, (2011)



スケールパラメータ(温度の関数)の根拠



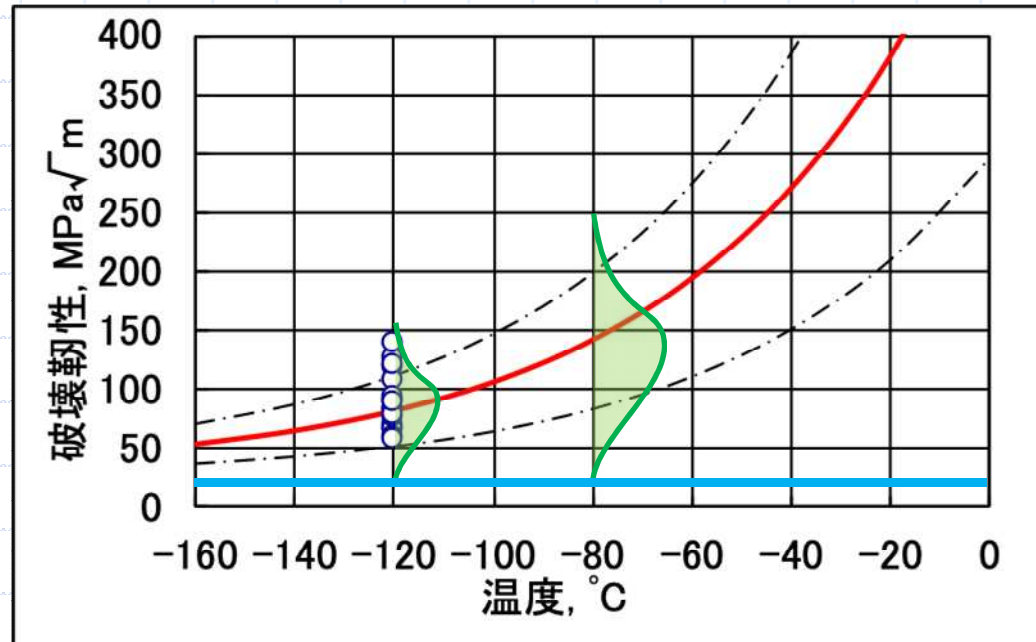
スケールパラメータ: 温度の関数

$$K_{Jc(\text{med})} = 30 + 70 \exp[0.019(T - T_0)], \text{MPa}\sqrt{\text{m}}$$

- ◆ 温度依存性(破壊靱性の大きさ)は温度とともに指数関数で増大する関数系のプロットで表される。
- ◆ 米国HSSTプロジェクトなどで T_0 の異なる様々な材料について実験事実を積み上げて定式化



まとめ：マスターカーブ法の成り立ち



- ◆ 基本の理論：最弱リンクモデル，熱活性化過程
- ◆ 3つのワイブルパラメータの決め方
 - 形状パラメータ：理論
 - 位置パラメータ：実験事実
 - スケールパラメータ：理論(熱活性化過程)および実験事実
- ◆ 破壊靱性の試験片寸法補正：理論



PTS評価の変更内容について



PTS評価の変更(1)

- JEAC4206-2016ではPTS評価における破壊靱性遷移曲線について、以下の観点から見直しを実施した。
 - ①マスターカーブ法の信頼下限を採用
 - ②シャルピー遷移温度を指標とした破壊靱性遷移曲線((8)式)を開発
 - ③マスターカーブ法の参照温度がある場合には、マスターカーブ法による破壊靱性遷移曲線((10)式)も使用可能



PTS評価の変更(2)

- PTS評価における破壊靱性遷移曲線の変更点について、以下に整理した。

項目	2007年版	2016年版	理由・根拠
破壊靱性遷移曲線のデータベース	個々のプラント固有の監視試験破壊靱性データ	国内PWR監視試験破壊靱性データ	対象材料だけだとデータ点数が少ない場合が考えられるため、鋼種毎に全体の傾向を把握する。
	照射による温度移行後の破壊靱性データの温度が0°C以上のデータを対象	下部棚($T_o-50^\circ\text{C}$)以下の温度の試験データを除外	一律0°C以下のデータを除外した場合、遷移温度域の破壊靱性の傾向を反映できない可能性があることから、より正確に下部棚の破壊靱性データを除外した。
	拘束の観点でのスクリーニングは無い	拘束の弱い $K_{Jc(\text{limit})}$ を超える破壊靱性データを除外	マスターカーブ法では、 $K_{Jc(\text{limit})}$ を超えるデータは $K_{Jc(\text{limit})}$ に置き換えるが、2016年版では保守的に除外した。
	照射前後の破壊靱性データを使用	高照射領域($5 \times 10^{19}\text{n/cm}^2$ 以上)のデータに限定	破壊靱性に対する照射量の依存性や60年運転時点の原子炉容器の照射量を踏まえて保守的に限定した。

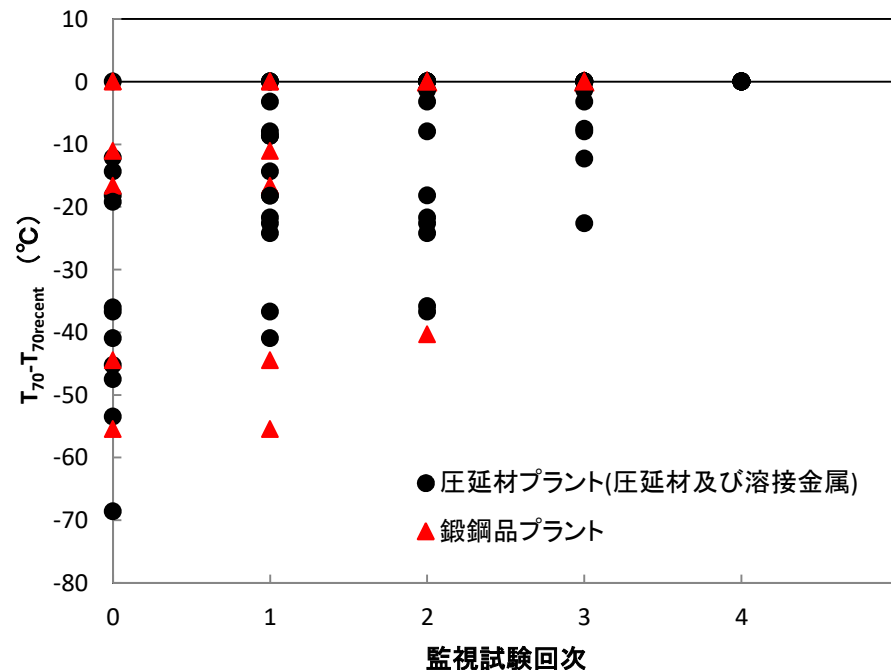


PTS評価の変更(3)

項目	2007年版	2016年版	理由・根拠
破壊靱性遷移曲線の設定方法	破壊靱性データの下限包絡	5%信頼下限	<ul style="list-style-type: none"> ・下限包絡の信頼性はデータ数に依存する(ロバストで無い)ため、マスターカーブ法を参考にワイブル分布を適用し定量的に信頼度を評価する。 ・ASME K_{Ic}カーブとの比較や海外での適用状況を踏まえて5%信頼下限に設定した。
		シャルピー遷移温度(T_{r30})に対して係数 ΔT_t で補正	<ul style="list-style-type: none"> ・破壊靱性データのデータ点数が少ない場合が考えられ、破壊靱性との相関が比較的良く、予測法とも整合するT_{r30}を指標とした。
	破壊靱性に対する亀裂長さの考慮(板厚補正)無し	1インチの亀裂長さ(板厚)に換算	<ul style="list-style-type: none"> ・破壊靱性に対する亀裂長さの影響(最弱リンク)があることが知られており、想定する半楕円亀裂のK値分布から1インチの亀裂長さの破壊靱性に換算した。
脆化予測に対するマージン	予測誤差の標準偏差の2倍	予測誤差と破壊靱性のばらつきを考慮して設定	誤差伝播法則から設定したマージンをモンテカルロ法、破損確率により妥当性を確認して設定した。
破壊靱性の温度依存性	国プロPTSプロジェクトの破壊靱性データベースで設定	マスターカーブ法の温度依存性を適用	<ul style="list-style-type: none"> ・国プロデータベースで設定したものとマスターカーブ法の温度依存性を比較したところ、ほぼ同等であった。

PTS評価の変更(4)

- 2007年版の破壊靱性遷移曲線は，監視試験時までには得られた破壊靱性データの下限包絡としていていることから，新たな監視試験に伴い破壊靱性データが増えるたびに破壊靱性遷移曲線(T_{70})が変化しやすい傾向がある。
⇒ロバストで無い。



2007年版の破壊靱性遷移曲線の監視試験に伴う T_{70} の変化
(至近の監視試験時の T_{70} との温度差($T_{70} - T_{70\text{recent}}$))



PTS評価の変更(5)

- JEAC4206-2016のPTS評価用の破壊靱性遷移曲線は、破壊靱性に関する最新の知見を取り込んで見直したものであり、下限包絡とした2007年版より**予測精度・信頼性の高い評価**が行える。
- 2007年版の破壊靱性遷移曲線は、**本質的に破壊靱性データが下回る可能性**を有しており、また、ロバストで無いことから、対象材料のデータ点数に依存せず、**一定の保守性を持たせたロバストな評価**に変えるべきと判断した。
- 2007年版と比べて**全体的に保守的な傾向**があり、非保守的となる5プラントについても、2007年版に従う評価時期の破壊靱性データを概ねカバーする(大きく外れていない)。
- これは、破壊靱性以外に亀裂や過渡等にも一定の保守性を有しており、これらの保守性を組み合わせた決定論的評価を行う上では、**PTS評価全体として十分な保守性**を有していると判断したものである。
- ただし、今後も**監視試験等で得られる破壊靱性データ等最新知見を分析**し、引き続き精度向上を図る予定

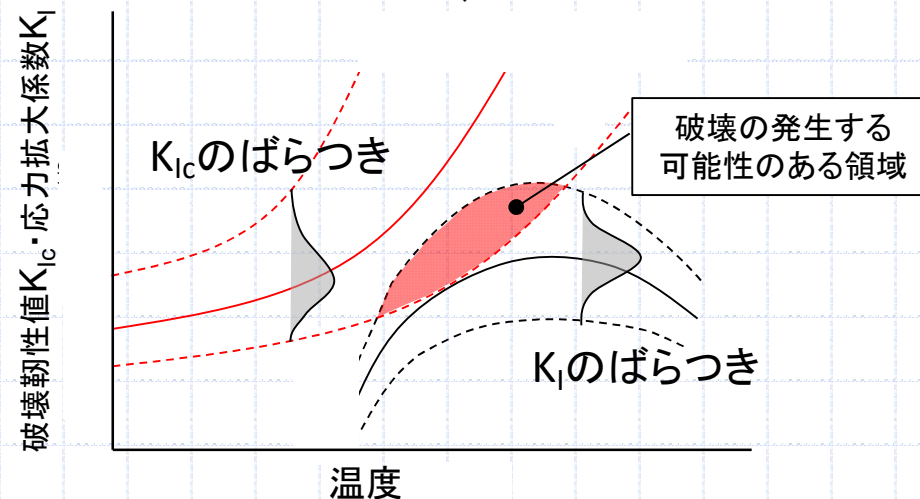


2016年版のベンチマーク評価

2016年版の評価手法のベンチマーク評価(1)

- 2016年版の決定論的評価に対して，米国では確率論的破壊力学評価(PFM評価)に基づく規制が取り入れられている。

(PFM: Probabilistic Fracture Mechanics)



確率論的破壊力学評価によるPTS時の破損頻度評価のイメージ

- 決定論に基づく2007年版及び2016年版の評価手法のベンチマーク評価のために，代表国内PWRプラントに対して許容基準に相当する破損頻度を試算した。



2016年版の評価手法のベンチマーク評価(2)

国内PWR代表プラントの条件を用いて、米国の評価手法に従う確率論的破壊力学(PFM)評価を用い、JEAC4206の許容基準に相当する亀裂貫通頻度を算出し、米国の基準と比較した*。

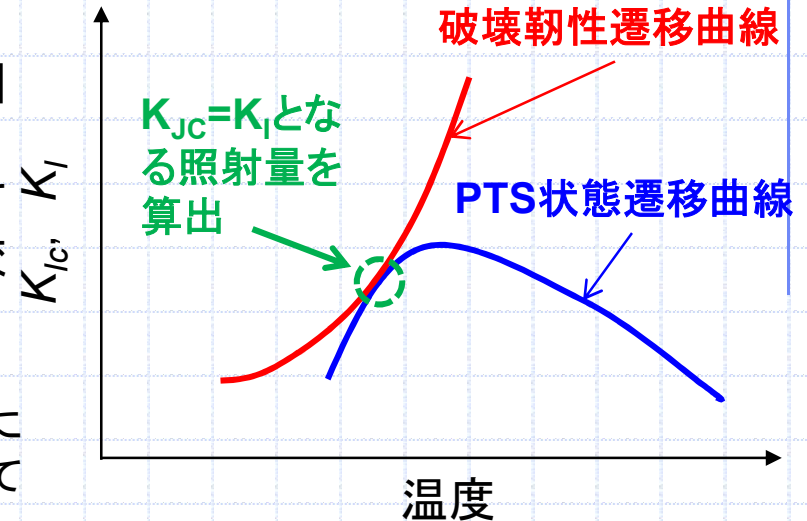
【評価の流れ】

- ① 国内PWR代表プラントを対象に、JEAC4206に基づきPTS評価を行い、以下のケースに対して許容基準に相当する照射量を算出

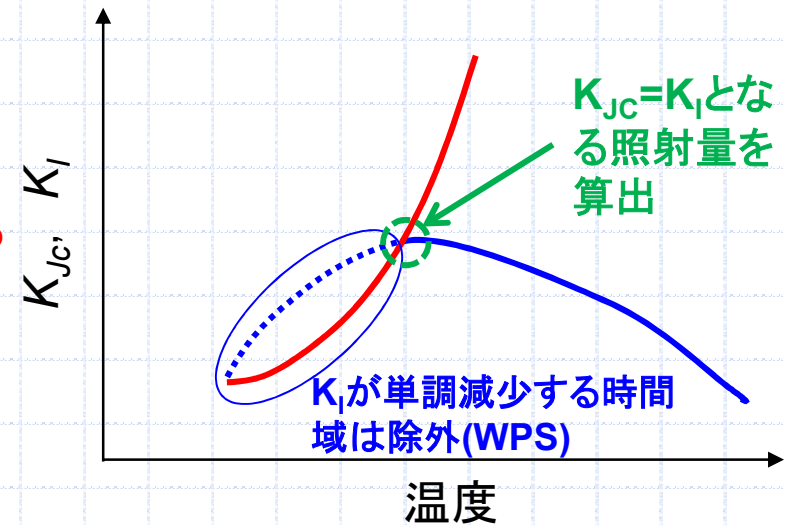
- JEAC4206-2007
- JEAC4206-2016(一般評価及び詳細評価)

- ② 国内PWR代表プラントのパラメータ及び①項の照射量を用いて、米国のPFM評価コードであるFAVOR16.1を用いてPFM評価を実施

- ③ PFM評価により算出された亀裂貫通頻度(TWCF)が米国のスクリーニング基準である $TWCF < 1 \times 10^{-6} [/\text{炉} \cdot \text{年}]$ と比較



【JEAC4206-2007, 2016の一般評価】



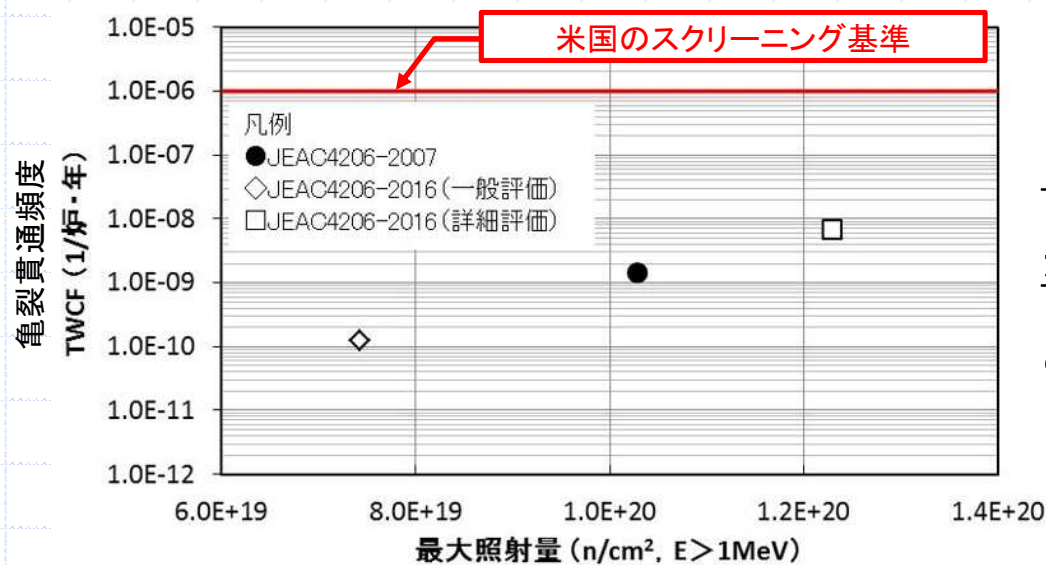
【JEAC4206-2016の詳細評価】

* 村上ら、「国内原子炉圧力容器の加圧熱衝撃事象に対する健全性評価手法における許容基準に相当する破損リスクの評価」、日本原子力学会2018年春の年会, 3K05.



2016年版の評価手法のベンチマーク評価(3)

- PFM評価の結果,
 - ✓ いずれの試算でも米国のスクリーニング基準の根拠としている亀裂貫通頻度(TWCF) $< 1 \times 10^{-6}$ [/炉・年]に対して裕度を有している。
 - ✓ 2016年版の許容基準に相当するTWCFを2007年版と比較すると、一般評価では2007年版よりも小さくなるが、詳細評価では若干大きくなる。



「JEAC4206の許容基準は、
米国よりも保守的に設定されている」
ことが確認できている。

国内PWR代表プラントの亀裂貫通頻度評価結果



まとめ

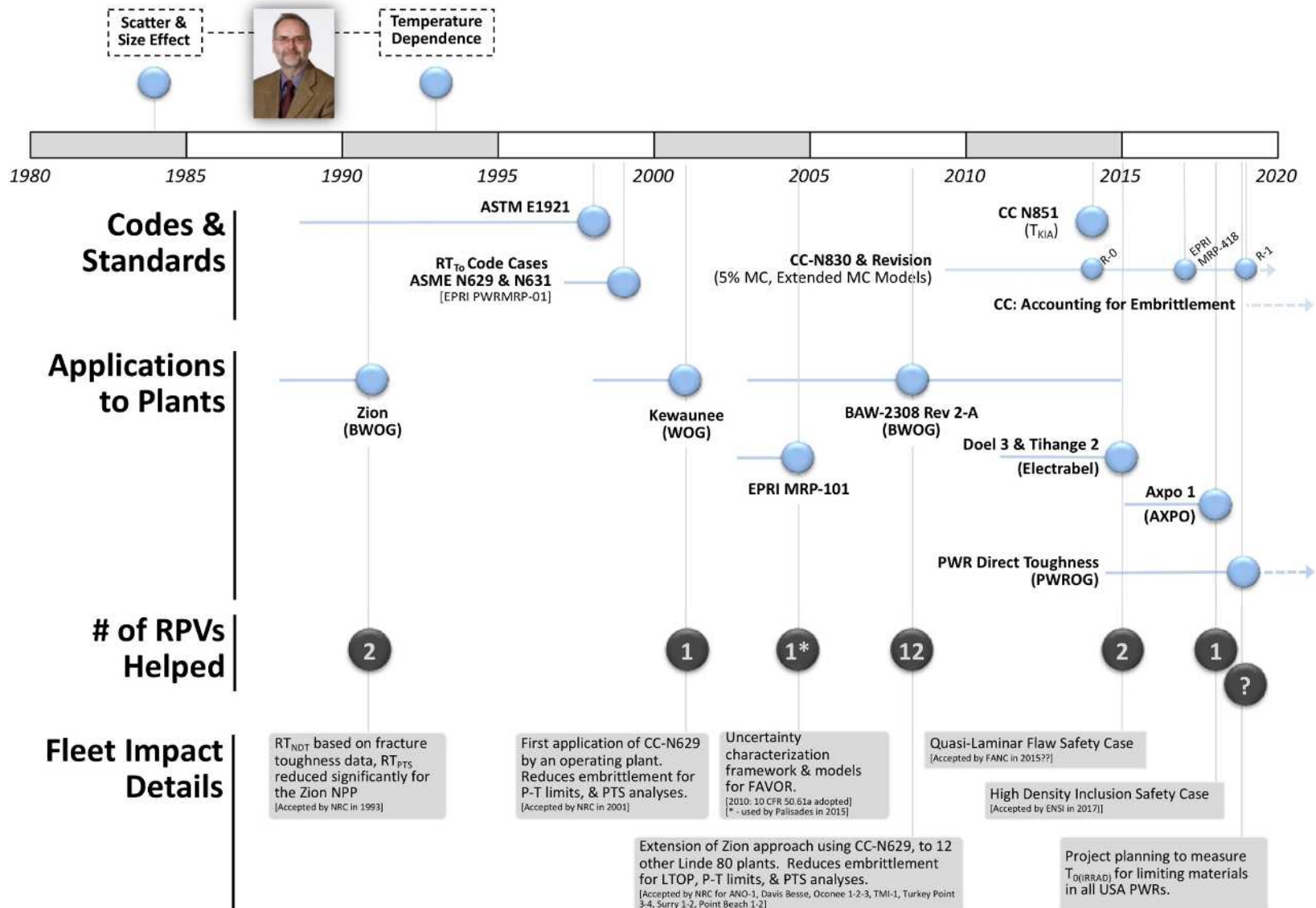
- マスターカーブ法については、30余年に渡る知見の拡充がなされてきており、十分な信頼性を有するとともに、評価精度の向上に資すると判断し、規定を整備した（JEAC4216-2011）。
- 評価精度の向上を目的として、PTS評価に対して破壊靱性のばらつきを踏まえた評価手法（マスターカーブ法他）を開発し、導入した（JEAC4206-2016）。
- マスターカーブ法による破壊靱性評価が多くの機器で活用され、更なる信頼性向上を図ることを目的として、破断済みシャルピー試験片などを有効活用してデータを採取可能となるように超小型試験片を新たに採用した（JEAC4216-2015）。



マスターカーブ法の実績(参考)



欧米におけるマスターカーブ法活用の歴史





マスターカーブ法の活用に関する国外の動向

	名称	内容
規格・ 基準等	ASTM E1921	試験法 (JEAC4216に相当)
	ASME Code Case N-629/631	RT_{70} を介した破壊靱性曲線の設定法 (JEAC4206-2016のRF-2100に相当)
	ASME Code Case N-830	マスターカーブ直接使用による破壊靱性曲線の設定法 (JEAC4206-2016のRF-4222に相当)
	IAEA Guideline (Technical Report Series No.429)	圧力容器健全性評価
産業界	米国PWROG	監視試験材料を対象としたマスターカーブ法による破壊靱性評価研究



日本におけるマスターカーブ法の活用の方向性

- 圧力容器の破壊靱性値の実力値を評価できる。
 - シャルピー衝撃試験による破壊靱性のシフト量の間接評価から、照射後の材料の破壊靱性の直接評価へ
- ◆ Mini-C(T)試験片を活用することで、監視試験の際より多くの試験データを採取できる。
 - シャルピー衝撃試験の破断材から試験片の加工が可能



終わりに

- マスターカーブ法は，破壊靱性のばらつきを定量評価できる方法として活用が始まっている。JEAC4216-2015は，マスターカーブを決定するための試験及び評価方法を示した規程として整備されている。
- 2011年版から2015年版への改定ではMini-C(T)試験片が使用可能となり，シャルピー試験片の試験後の破断材から追加の試験片を作成して破壊靱性データを取得する道筋が確保された。
- 破壊靱性評価の信頼性向上や，原子炉圧力容器の監視試験への活用が期待される。