

# 玄海原発1号炉压力容器の照射脆化 および現行予測式についての考察

井野博満、小岩昌宏  
九大応力研研究集会  
2012. 7. 24

# 話の順序

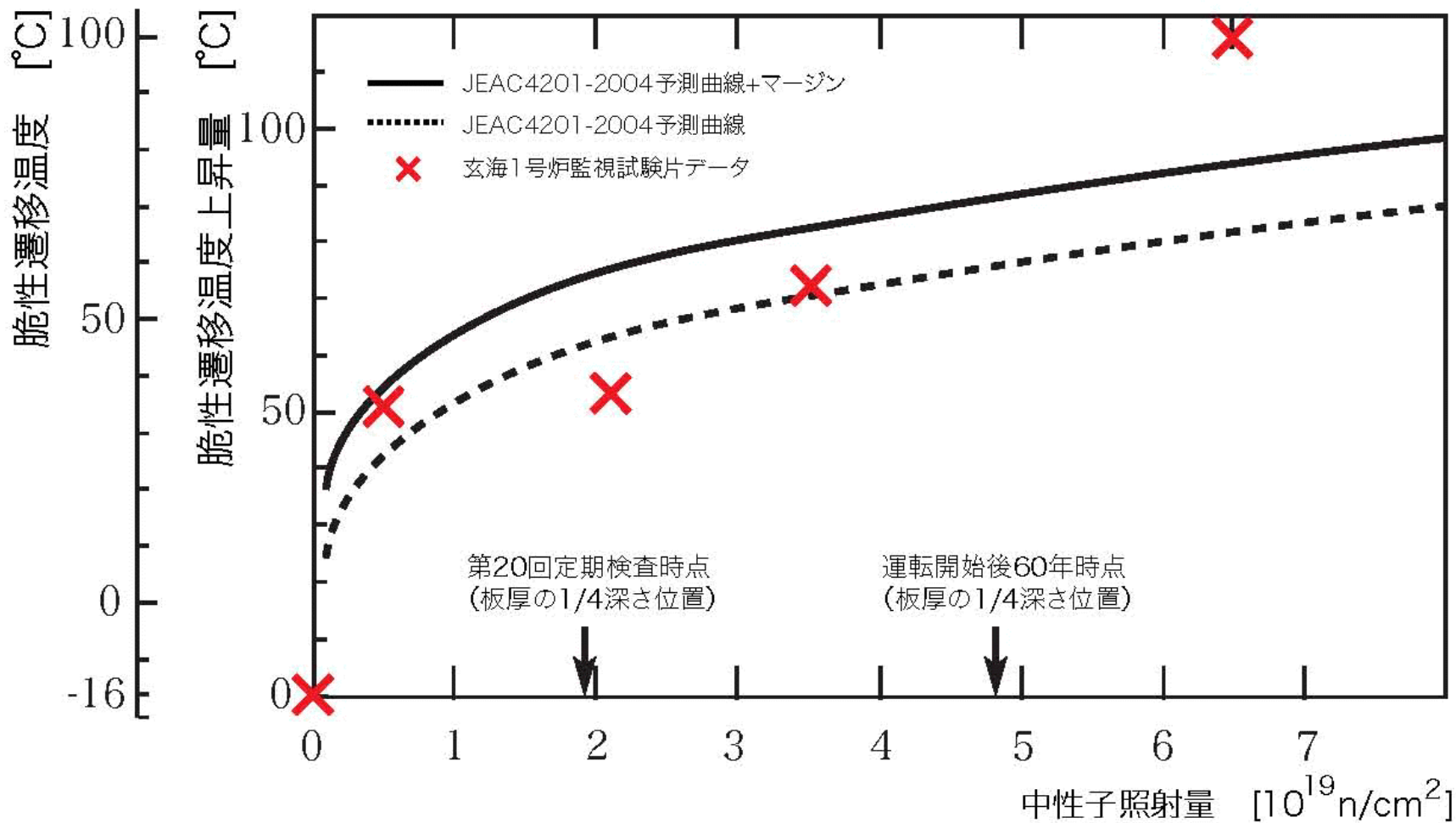
## Part I : 井野レポート

1. 玄海1号炉照射脆化の現状と問題点
2. 高経年化意見聴取会での議論の経過
3. 現行予測式の問題点(主として小岩が報告)
4. PTS評価の問題点

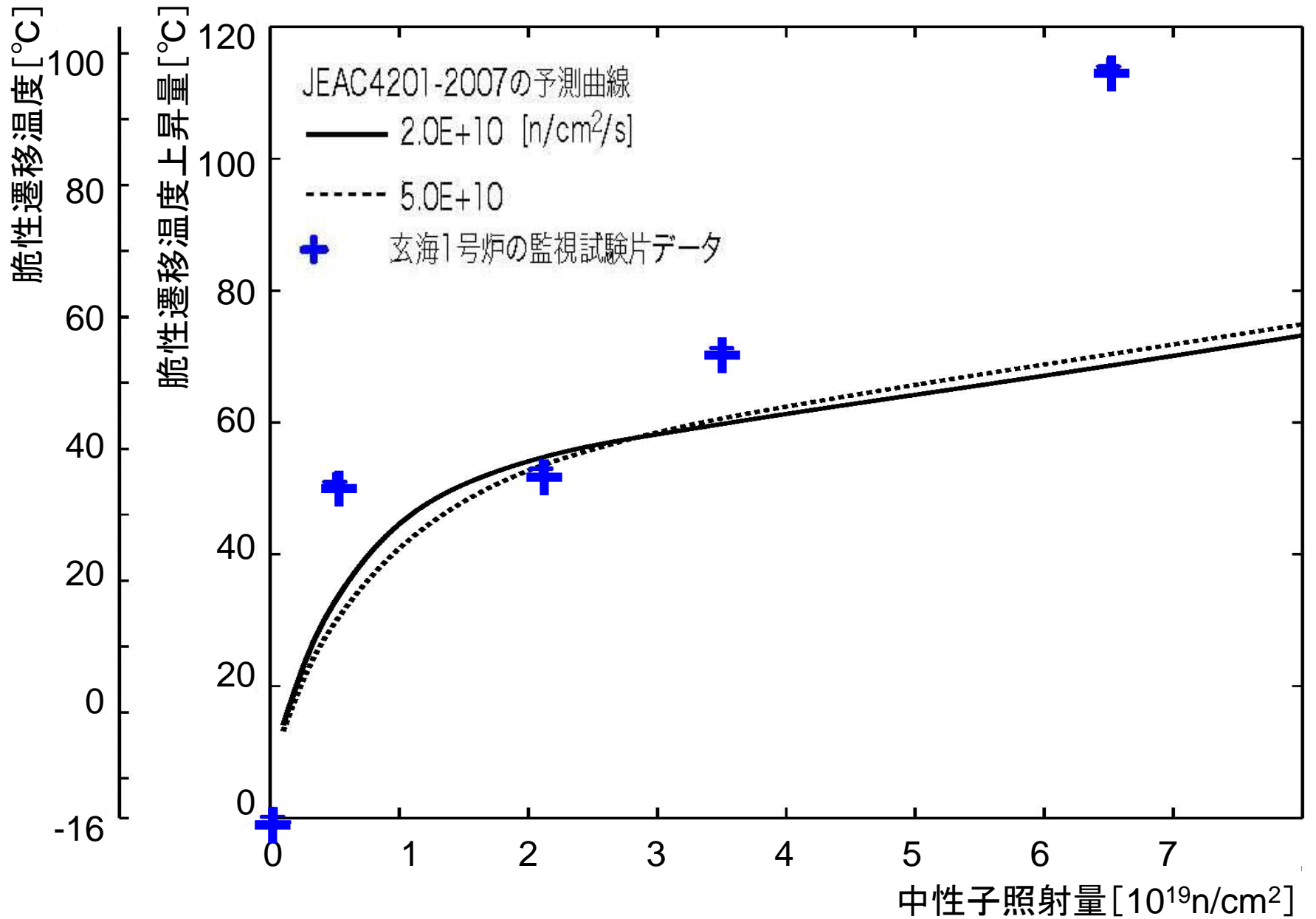
## Part II : 小岩レポート

# 1. 玄海1号炉照射脆化の現状 と問題点

# 玄海1号炉監視試験片データとJEAC4201-2004年版予測曲線



玄海1号炉監視試験片データとJEAC4201-2007年版予測曲線



# 結果をどう解釈するか？

- 56°Cと98°Cを結び、物理的に意味のある脆化予測曲線は考えにくい
- このふたつの監視試験片の材質（不純物含有量やミクロ組織）が同一かという疑問
- そうすると、圧力容器自体に材質のばらつきがある可能性を否定できない→欠陥圧力容器ではないのか？

## 2. 高経年化意見聴取会での 議論の経過

# 九州電力の説明

(第5回高経年化意見聴取会(2012年1月23日)資料3)

- 原子炉容器(母材)の化学成分のバラつきによる影響は小さいと考えられる。
- アトムプローブ測定法で測定した結果、溶質原子クラスター体積率は一定の増加傾向を示しているものの特異な増加は認められなかった
- 透過型電子顕微鏡で測定した結果、転位ループ数密度は一定の増加傾向を示しているものの、特異な増加は認められなかった。

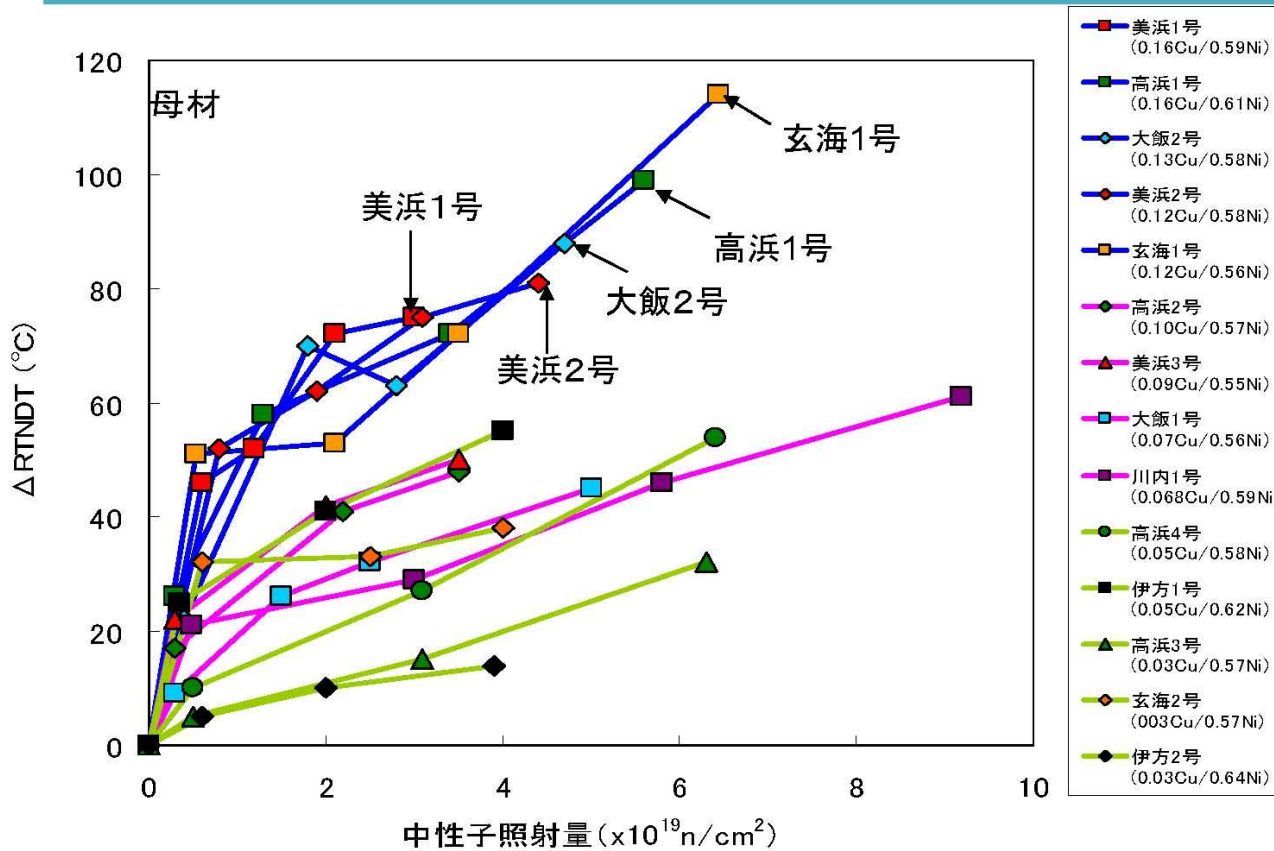


# 原子力安全・保安院の論点整理

(第5回高経年化意見聴取会(2012年1月23日)資料2)

- 予測値を超える上昇が生じた要因
  - ・材料の異常劣化か。予測式の問題か。その他。
- 玄海1号機の原子炉圧力容器の健全性
  - ・玄海1号機の原子炉圧力容器の健全性が確保されているか。
- 規制の見直しの必要性の有無について
  - ・直ちに現行規制の見直しが必要か。

# 4. 照射脆化に係る他プラントとの比較(1)

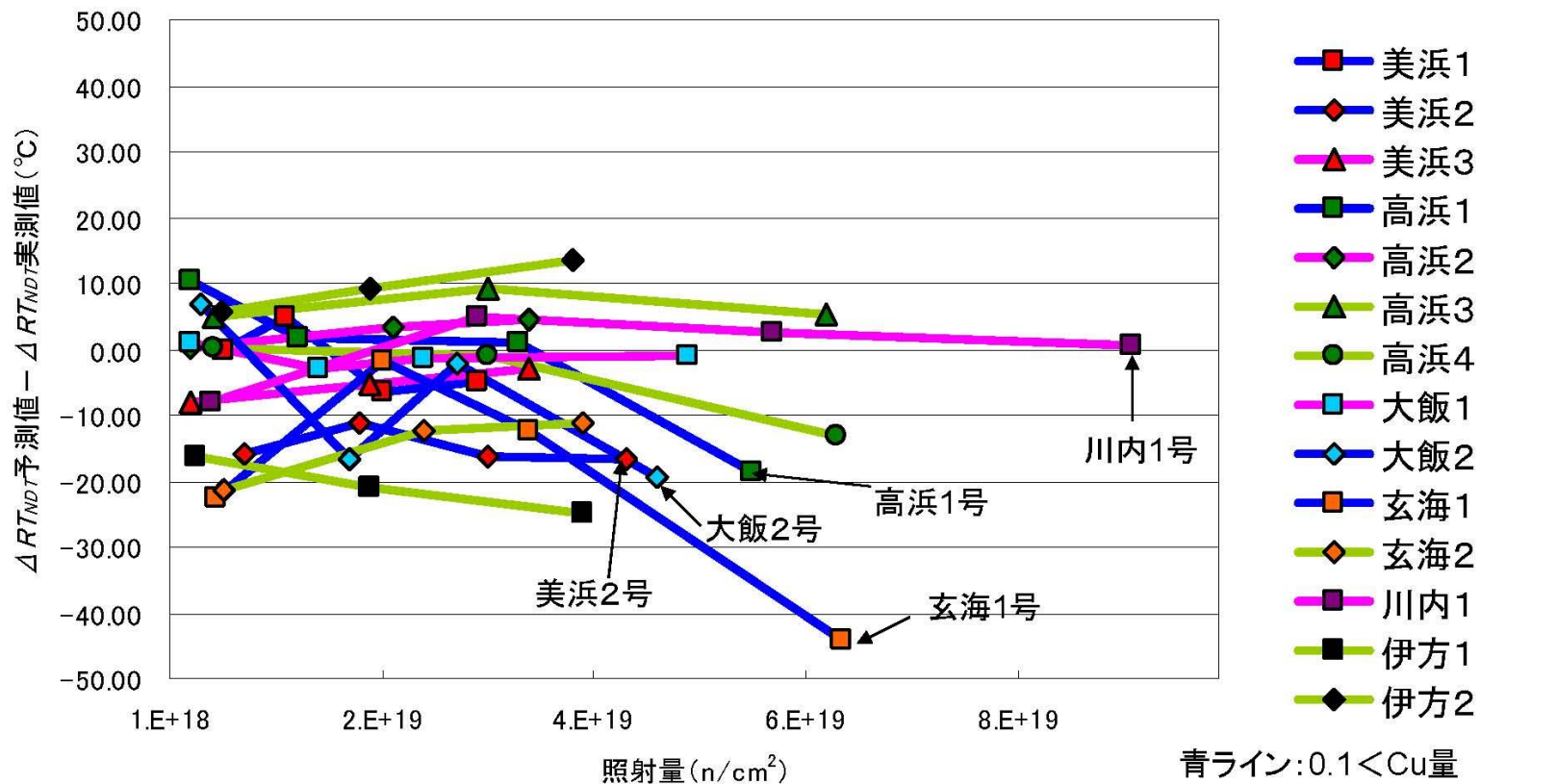


| 母材 |      | Cu    | Ni   |
|----|------|-------|------|
| 1  | 美浜1号 | 0.16  | 0.59 |
|    | 高浜1号 | 0.16  | 0.61 |
|    | 大飯2号 | 0.13  | 0.58 |
|    | 美浜2号 | 0.12  | 0.58 |
|    | 玄海1号 | 0.12  | 0.56 |
| 2  | 高浜2号 | 0.1   | 0.57 |
|    | 美浜3号 | 0.09  | 0.55 |
|    | 大飯1号 | 0.07  | 0.56 |
|    | 川内1号 | 0.068 | 0.59 |
| 3  | 高浜4号 | 0.05  | 0.58 |
|    | 伊方1号 | 0.05  | 0.62 |
|    | 高浜3号 | 0.03  | 0.57 |
|    | 玄海2号 | 0.03  | 0.57 |
|    | 伊方2号 | 0.03  | 0.64 |

青ライン: 0.1 < Cu量  
 桃ライン: 0.05 < Cu量 ≤ 0.1  
 緑ライン: Cu量 ≤ 0.05

✓ 玄海1号と同程度のCu量を持つ他プラントの脆性遷移温度の上昇(上グラフの青線)と比較しても、同程度の脆化進展傾向を示しているのではないかと。

## 4. 照射脆化に係る他プラントとの比較(2)



✓予測値と試験結果の差(下グラフ)に着目すると、右肩下がり(照射量が増えるにつれて、予測値よりも実測値が高くなる)の傾向が見受けられるのではないかと。

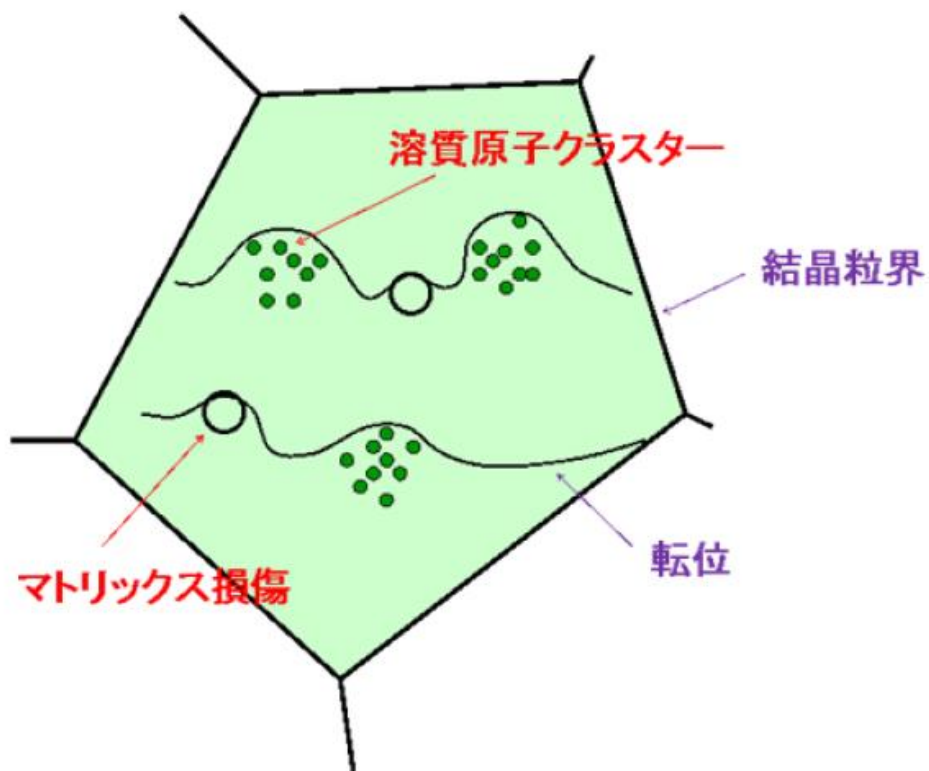
### 3. 現行予測式の問題点

JEAC4201-2007 では、以下に紹介する電力中央研究所の脆化予測式をそのまま取り入れている

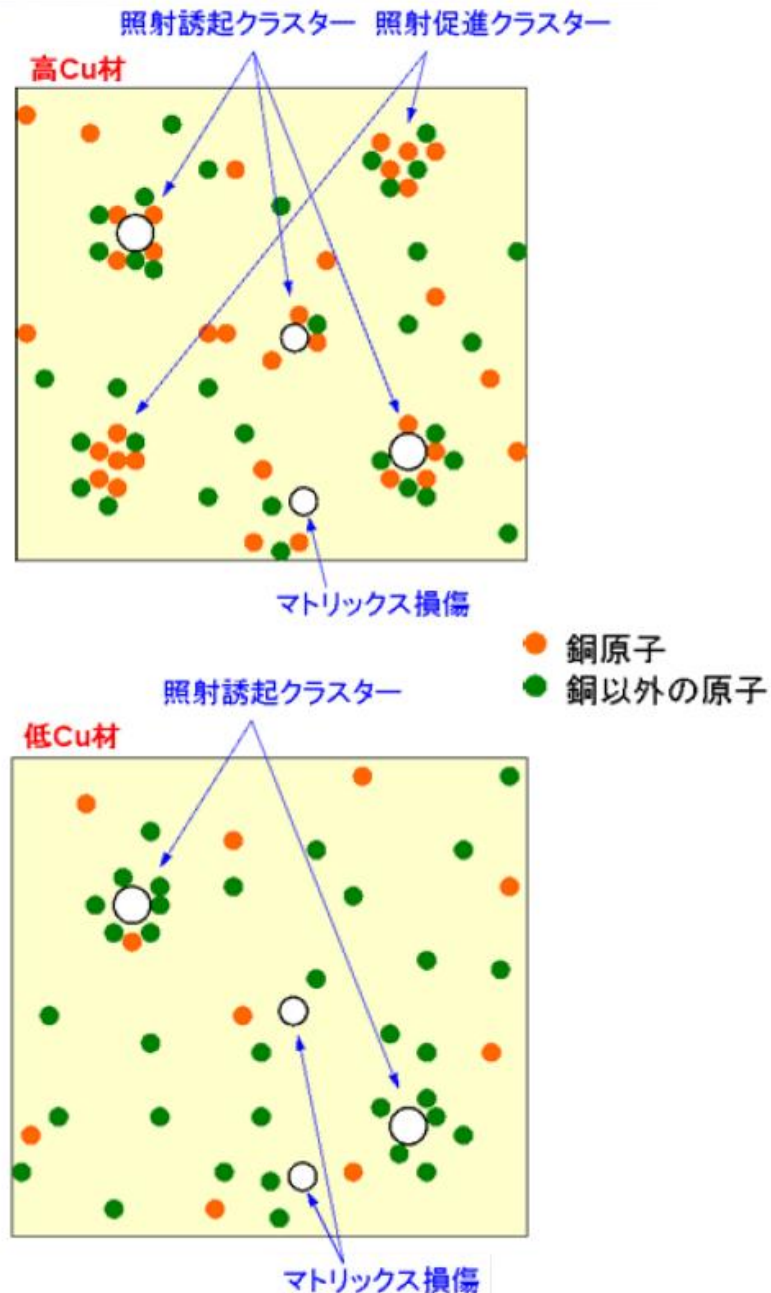
## 2.1.1 ミクロ組織変化の反応速度式

電中研脆化予測法では、反応速度式を用いて照射により生じる鋼材のミクロ組織変化を計算したのち、そのミクロ組織に応じた遷移温度上昇量を計算する、という2ステップのモデリングを採用している。ミクロ組織変化を記述する式を以下に示す。

# 照射脆化のメカニズムとマイクロ組織変化について



- マトリックス損傷の形成(転位ループ)
- 溶質原子クラスターの形成



モデル  $C_{SC}$  と  $C_{MD}$  を計算する.

$$\begin{aligned} \frac{\partial C_{SC}}{\partial t} &= \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} + \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \\ &= \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD} \\ &\quad + \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot \left( 1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0 \right) \right)^2 \end{aligned} \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \xi_4 \cdot F_i^2 \cdot \left( \xi_5 + \xi_6 \cdot C_{Ni}^0 \right)^2 \cdot \phi - \frac{\partial C_{SC}}{\partial t} \quad (2-2)$$

$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = -v_{SC} \cdot \frac{\partial C_{SC}}{\partial t} - v'_{SC} \cdot C_{SC} \quad (2-3)$$

$$v_{SC} = \xi_2 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \right)^2 \cdot t_r \quad (2-4)$$

$$v'_{SC} = \xi_1 \cdot C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \quad (2-5)$$

$$C_{Cu}^{avail} = \begin{cases} 0 & C_{Cu}^{mat} \leq C_{Cu}^{sol} \\ C_{Cu}^{mat} - C_{Cu}^{sol} & C_{Cu}^{mat} > C_{Cu}^{sol} \end{cases} \quad (2-6)$$

$$D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + D_{Cu}^{irrad} = D_{Cu}^{thermal} + \omega \cdot \phi^\eta \quad (2-7)$$

## 2.2 ミクロ組織と機械特性の相関の定式化

### 2.2.1 遷移温度上昇の計算式

ミクロ組織とシャルピー遷移温度上昇量の相関を以下の式で記述する。

$$\begin{aligned}\Delta T_{SC} &= \xi_{16} \cdot \sqrt{V_f} \\ &= \xi_{16} \cdot \sqrt{\xi_{15} \cdot f(C_{Cr}^{mat}, C_{SC}) \cdot g(C_{Ni}^0) + h(\phi t)} \cdot \sqrt{C_{SC}}\end{aligned}\quad (2-8)$$

$$f(C_{Cr}^{mat}, C_{SC}) = \xi_{11} \cdot \frac{C_{Cr}^0 - C_{Cr}^{mat}}{C_{SC}} + \xi_{12} \quad (2-9)$$

$$g(C_{Ni}^0) = \left(1 + \xi_{13} \cdot (C_{Ni}^0)^{\xi_{14}}\right)^2 \quad (2-10)$$

$$h(\phi t) = \xi_9 \cdot (1 + \xi_{10} \cdot D_{SC}) \cdot \phi t \quad (2-11)$$

$$D_{SC} \approx D_{Cr}$$

$$\Delta T_{MD} = \xi_{17} \cdot \sqrt{C_{MD}} \quad (2-12)$$

$$\Delta T = \sqrt{(\Delta T_{SC})^2 + (\Delta T_{MD})^2} \quad (2-13)$$



前の2枚のスライドに示したように

組織変化に関する7個の式,

ミクロ組織とシャルピー温度上昇量の相関に関する6個の式  
には17個 +2個 +2個の未定係数が含まれている.

$$\varepsilon_1 \quad \varepsilon_2 \quad \xi_1 \sim \xi_{17} \quad \omega, \eta$$

(これらは) 係数で、監視試験データに基づいて決定する (電中研  
報告書、p2) .

# 電気事業連合会・電力中央研究所による再検討

(第8回意見聴取会2012年2月22日)

## 最適化後の係数の値

| 変数         | JEAC4201-2007 | Case III   |
|------------|---------------|------------|
| $\xi_1$    | 7.8389E-06    | 9.7208E-06 |
| $\xi_2$    | 2.6450E-04    | 3.7232E-04 |
| $\xi_3$    | 3.4068E-01    | 1.4231E+00 |
| $\xi_4$    | 7.1620E-01    | 7.1620E-01 |
| $\xi_5$    | 7.6028E+00    | 2.1943E+00 |
| $\xi_6$    | 7.6159E-01    | 1.1885E+00 |
| $\xi_7$    | 3.3033E+00    | 5.6817E+00 |
| $\xi_8$    | 2.7840E+02    | 7.1272E+02 |
| $\xi_9$    | 2.9500E-25    | 3.9940E-25 |
| $\xi_{10}$ | 2.4093E-02    | 0.0000E+00 |
| $\xi_{11}$ | 6.6826E-01    | 6.6826E-01 |
| $\xi_{12}$ | 6.0732E-05    | 2.0039E-05 |
| $\xi_{13}$ | 7.3670E-01    | 1.4434E-01 |
| $\xi_{14}$ | 2.4264E+00    | 4.7000E+00 |
| $\xi_{15}$ | 7.3319E-01    | 7.3319E-01 |
| $\xi_{16}$ | 2.3457E+02    | 3.0277E+02 |
| $\xi_{17}$ | 1.7241E+00    | 2.2404E+00 |
| $\eta_1$   | 7.0000E-06    | 1.8709E-07 |
| $\eta_2$   | 5.2000E-01    | 6.3156E-01 |

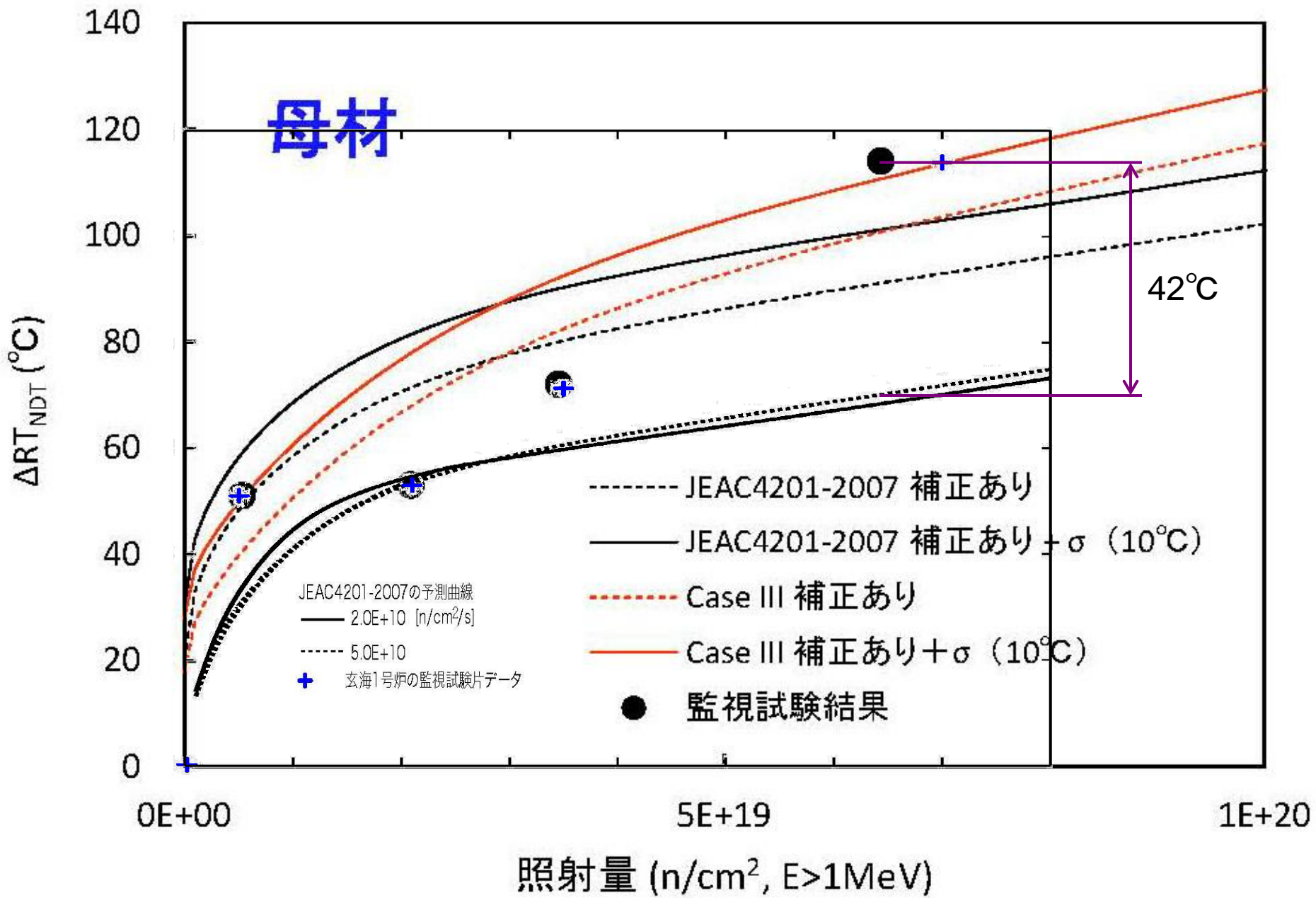
高照射領域で実測値との乖離が大きい

そこで、高照射領域の最新データに重みづけをして最適化をおこなった。改善されたというが、特に玄海1号については、実測値との一致はよくない。

溶質原子クラスターの形成速度を示す係数 $\xi_3$ や $\xi_8$ が3-4倍変化  
⇒モデルの脆弱性を示すと思われる

どこに問題があるか

1. 予測式に間違いがある
2. フィティングに無理があるのか？
3. 脆化メカニズムが正しく反映されていない。高照射領域で未知要因はないのか？



## $C_{SC}$ の式 (2.1) の誤り

$$\begin{aligned}\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} &= \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} \text{ (照射誘起クラスター形成)} + \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \text{ (照射促進クラスター形成)} \\ &= \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0) \right)^2\end{aligned}$$

固溶限を超える銅原子が核を形成するプロセスであるため固溶限を超えるCuの量，その拡散係数の二乗として記述される．（電中研報告Q06019、2007年）

“拡散係数の二乗として記述される”としているが、正しくは“拡散係数の一乗”とすべきである。

「拡散定数の一乗か二乗か」について、曾根田氏は、実験データなどをいろいろ検討して選んだという趣旨の発言を意見聴取会でおこなったが、この報告書を見る限り、式自体はア priori に与えられている

# 反応速度式の誤りが及ぼす影響

- JEAC4201-2007 では、これらの反応速度式をもとに、データに合うように係数を決め、脆性遷移温度上昇量の一覧表が、Cu量、Ni量、照射量、照射速度をパラメータとして計算されている
- 照射促進クラスター形成項の拡散係数が誤って二乗で入ると、照射速度依存性が変化するのので、この一覧表は無意味になる
- JEAC4201-2007の見直しが不可避

## 4. PTS評価の問題点

玄海1号炉圧力容器の健全性評価  
は大丈夫か？

# :破壊靱性遷移曲線 ( $K_{1c}$ 曲線) と PTS遷移曲線 ( $K_1$ 曲線)

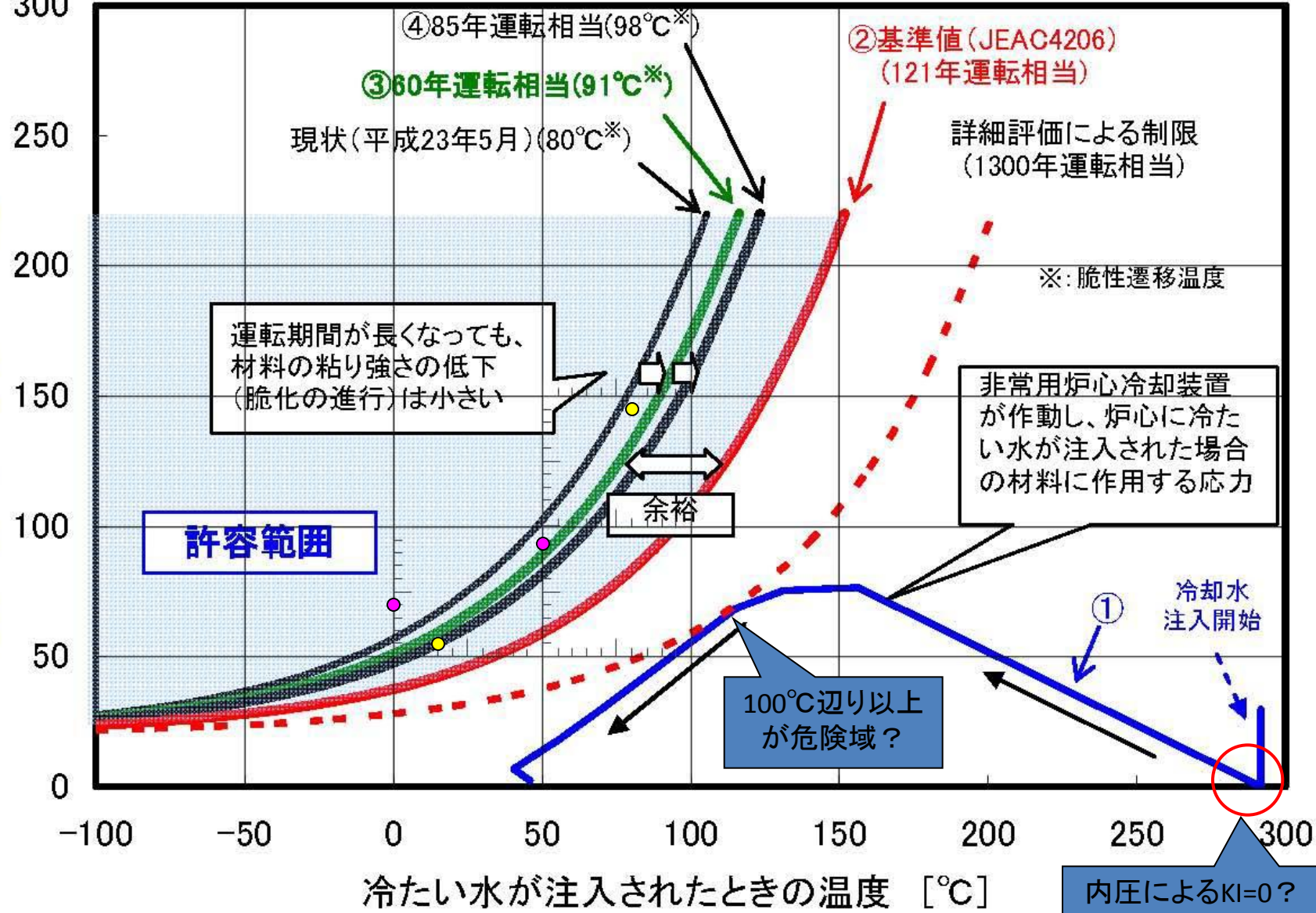
- LOCA時などにおける加圧熱衝撃 (Pressurized Thermal Shock、PTS) の際、圧力容器内表面のき裂先端に応力拡大係数  $K_1$  が材料の破壊靱性値  $K_{1c}$  を超えないことが条件
- PTS状態遷移曲線 ( $K_1$  の時間変化を温度軸上に表した曲線) を計算する
- 破壊靱性測定値や脆性遷移温度測定値から破壊靱性遷移曲線 ( $K_{1c}$  の温度依存曲線) を想定する
- PTS状態遷移曲線が破壊靱性遷移曲線にデッドクロスしないこと ( $K_1 \ll K_{1c}$ ) を確認する

- 母材(第4回静的破壊靱性試験結果, 九電公表資料より)
- 溶接金属(第4回静的破壊靱性試験結果, 九電公表資料より)

[MPa√m]  
300

粘り強さ [②、③、④、現状]

材料に作用する引張応力 [①]

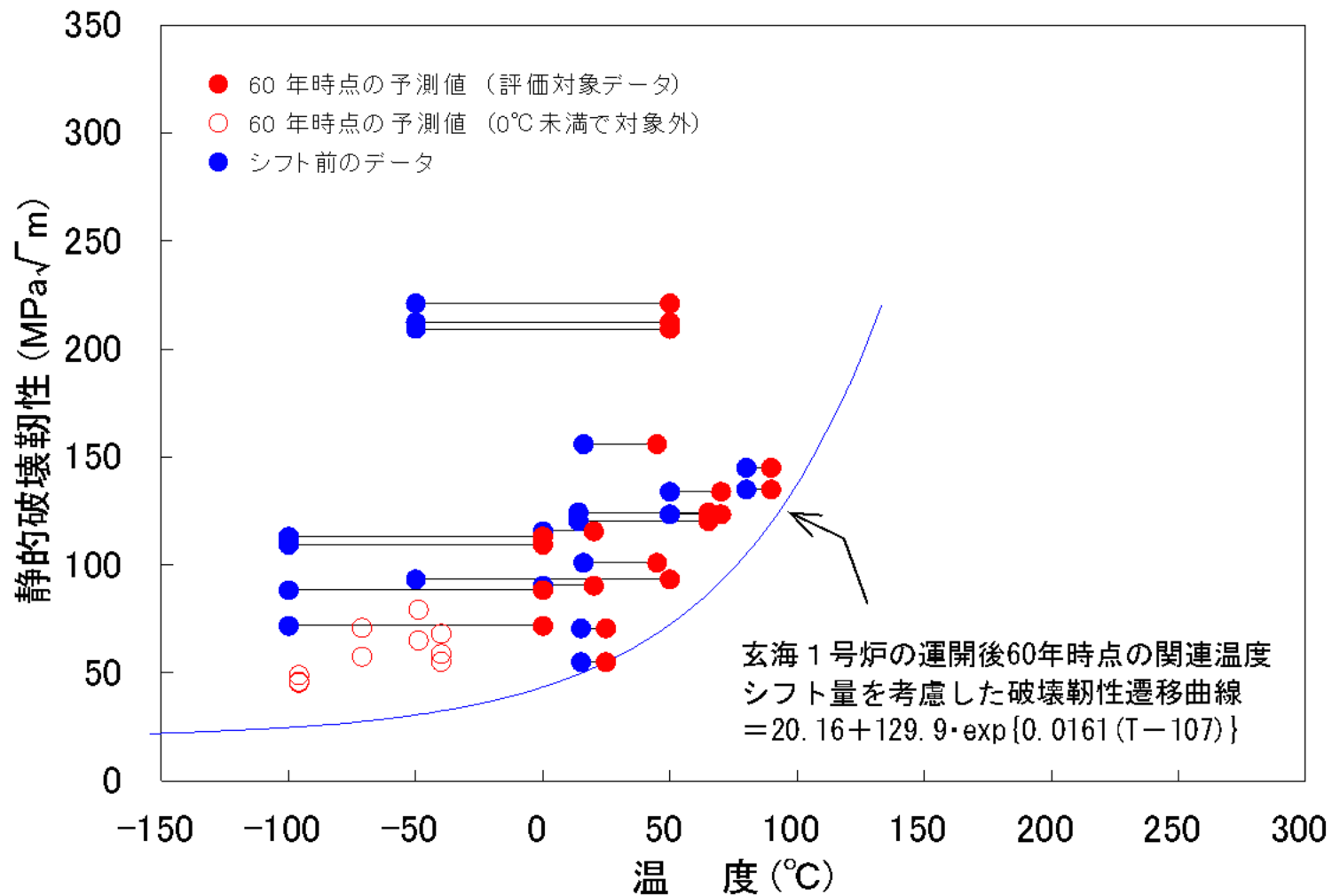


PTS評価(九電「玄海原子力発電所1号機原子炉容器の照射脆化に対する健全性について」  
[http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/nuclear/nuclear\\_irradiation110708.pdf](http://www.kyuden.co.jp/library/pdf/nuclear/nuclear_irradiation110708.pdf)より)



# JEAC4206-2007での破壊靱性評価法

- 破壊靱性の測定値がある場合
- 附属書Cによる
- $K_{1c} = 20.16 + 129.9 \exp[0.0161(T - T_p)]$  (C8)式
  
- 破壊靱性の測定値がない場合
- 附属書Aによる
- **ASME  $K_{1c}$  Curve**
- $K_{1c} = 36.48 + 22.78 \exp[0.036(T - RT_{NDT})]$  (A7)式



60年時点の想定：46EFPY

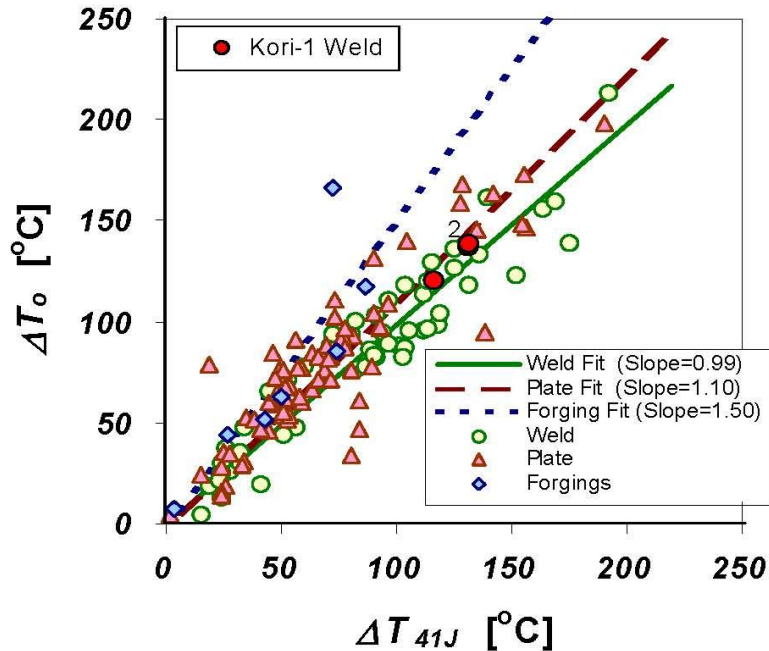
## (C8) 式の $T_p$ の決め方

- 照射前およびすべての回の監視試験における破壊靱性値を、温度軸に沿って  $\Delta RT_{NDT}$  だけシフトさせる
- このことは、 $\Delta T_{K1c} = \Delta RT_{NDT}$  という仮定に基づいている。
- その上で、それらのすべてのデータ点を下限包絡するように、(C8) 式の  $T_p$  を決める

# 중성자 조사에 의한 $T_0$ 의 변화 (Charpy와 비교)

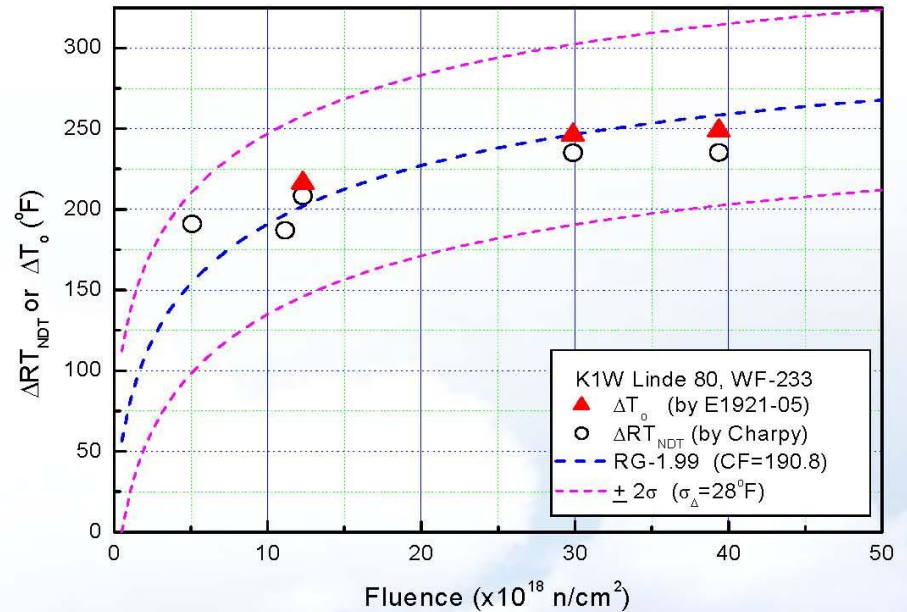


(NUREG-1807 database)



<RPV steels & welds>

(USNRC RG-1.99, Rev.2)



CF = 190.8°F (from Charpy,  $\Delta T_{30ft-lb}$ )

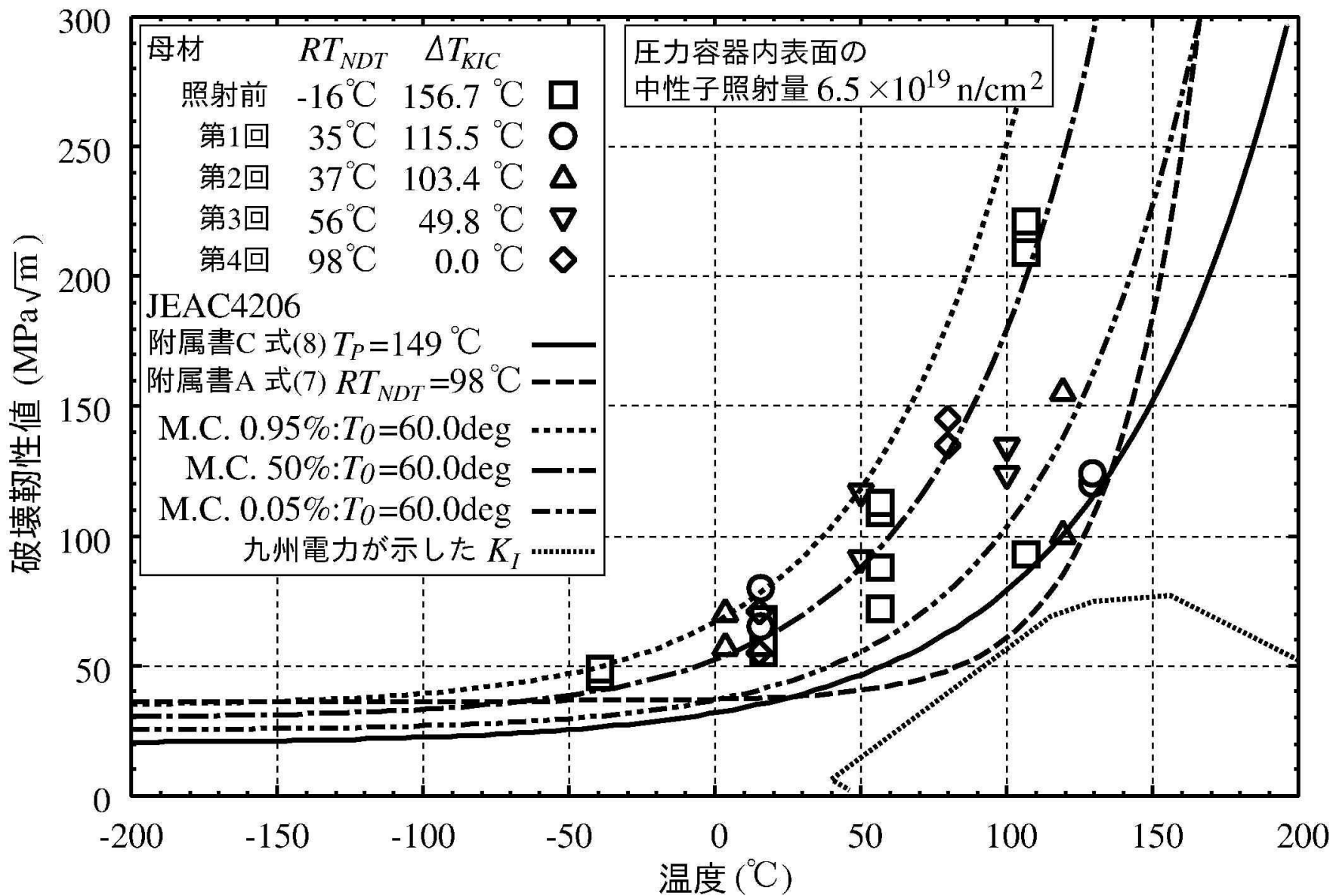
CF = 191.6°F (Master Curve,  $\Delta T_0$ )



表1 脆性遷移温度  $T_{NDT}$  のシフト量と参照温度  $T_0$  のシフト量との比較

|                                    | 照射前   | 第1回   | 第2回   | 第3回  | 第4回  |
|------------------------------------|-------|-------|-------|------|------|
| $T_{NDT}(^{\circ}\text{C})$        | -16   | 35    | 37    | 56   | 98   |
| $\Delta T_{NDT}(^{\circ}\text{C})$ | 114   | 63    | 61    | 42   | 0    |
| $T_0(^{\circ}\text{C})$            | -96.7 | -55.5 | -43.4 | 11.2 | 60.0 |
| $\Delta T_0(^{\circ}\text{C})$     | 156.7 | 115.5 | 103.4 | 49.8 | 0    |

# $T_0$ に従って温度シフト



# まとめ

1. 玄海1号炉压力容器の脆性遷移温度の急上昇の**原因は未だ明確でない**。容器鋼材の問題と脆化予測式の不備の両方が重なったのではないか
2. 大学などの**中立的な研究機関に監視試験片を提供**する必要がある
3. **脆化予測式**に関しては、JEAC4201-2007を廃し、適切な管理法を提示する必要がある
4. **玄海1号機**压力容器は、 $K_{1c}$ ,  $K_1$ ともに評価に問題があり、十分に健全だとは言いきれない