

九州大学 応用力学研究所

# 炉内構造物の経年変化に関する研究集会

平成24年7月24日(火)-25日(水)

## 照射脆化予測の電中研モデル と誤りの指摘

小岩 昌宏

初めに電中研モデルの概要を述べる。次に、この扱いはおかしい点を指摘する。

## 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。

# 第1ステップ $C_{SC}$ , $C_{MD}$ を計算

$$C_{SC} \quad \frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} + \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$= \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD}$$

$$+ \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot \left( 1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0 \right) \right)^2$$

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

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

マトリックスに固溶した銅の濃度

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

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

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

拡散係数

中性子束依存性

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

## 第2ステップ 遷移温度上昇を計算

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

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

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

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

$$D_{SC} \approx D_{Cu}$$

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

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

前の2枚のスライドに示したように

組織変化に関する式，シャルピー温度上昇量に関する式には 17個 + 2個 + 2個の未定係数が含まれている。

その値を“国内監視試験データを再現するように定める”

$\xi_1 \sim \xi_8$

4個の値は手動最適化により決定

$$\varepsilon_1 = 0.02, \quad \varepsilon_2 = 0.0001$$

$\varepsilon_1, \varepsilon_2$

$\omega, \eta$

$$D_{CH} = D_{CH}^{thermal} + D_{CH}^{irrad} = D_{CH}^{thermal} + \omega \cdot \phi^\eta$$

$$D_{CH} = 0.75 + 7.0 \times 10^{-6} \cdot \phi^{0.52}$$

$\xi_9 \sim \xi_{17}$

公称照射温度 283°C

17個の値はメトロポリス法による自動最適化

# JEAC4201-2007

左の表の値を用いて、様々な条件下での遷移温度上昇量の値が計算されたが - -

変数	値
$\xi_1$	7.8389E-06
$\xi_2$	2.6450E-04
$\xi_3$	3.4068E-01
$\xi_4$	7.1620E-01
$\xi_5$	7.6028E+00
$\xi_6$	7.6159E-01
$\xi_7$	3.3033E+00
$\xi_8$	2.7840E+02
$\xi_9$	2.9500E-25
$\xi_{10}$	2.4093E-02
$\xi_{11}$	6.6826E-01
$\xi_{12}$	6.0732E-05
$\xi_{13}$	7.3670E-01
$\xi_{14}$	2.4264E+00
$\xi_{15}$	7.3319E-01
$\xi_{16}$	2.3457E+02
$\xi_{17}$	1.7241E+00

$$\varepsilon_1 = 0.02, \quad \varepsilon_2 = 0.0001$$

$$D_{Cu} = 0.75 + 7.0 \times 10^{-6} \cdot \phi^{0.52}$$

附属書表 B-2100-1 (1/22) PWR 原子炉圧力容器に対する  $\Delta R T_{cor}$  計算値

[注] 相対温度が 303°C、中性子束が  $1.0 \times 10^{16}$  n/cm<sup>2</sup>s に対する  $\Delta R T_{cor}$  計算値 (°C)

組別	層別	位置																
		000	000	000	001	001	001	010	010	010	011	011	011	020	020	020	021	021
B1	1	8.3	8.4	8.5	8.6	8.7	8.8	8.9	9.0	9.1	9.2	9.3	9.4	9.5	9.6	9.7	9.8	9.9
	17	1.7	1.8	1.9	2.0	2.1	2.2	2.3	2.4	2.5	2.6	2.7	2.8	2.9	3.0	3.1	3.2	3.3

$10^2$   
 $10^{-25}$

(注1) Cu の含有量 (mass%)、W の含有量 (mass%)  
(注2) 本表は、公称相対温度が 303°C 以上に対して適用できる。

## $C_{SC}$ の式 (2.1) の誤り

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

Therefore, it is described as the square of the product of the concentration of copper atoms in supersaturation and the diffusivity.

(Journal of ASTM International 1513 presented at a symposium in Denver, CO from June 24–26, 2008 Sonoda et al.)

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。

電力中研報告 Q06019 平成19年

和文，英文のいずれの論文においても，著者はいささかのためらいもなく，“拡散係数の二乗として記述される”と述べている。しかし，“拡散係数の一乗”とするべきである。

## $C_{SC}$ の式 (2.1) にあらわれる2項の次元

$$\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0) \right)^2$$

主要な量のみ残して簡略化すると、以下のようになる。

$$\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat}) \cdot D_{Cu} \right) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \right)^2$$

拡散係数 x (濃度)<sup>2</sup>

(拡散係数)<sup>2</sup> x (濃度)<sup>2</sup>

次元の異なる量を加えるとは！！ 奇妙な式だ。

第1項 マトリックス損傷 を目指してCu 原子が拡散する。  
だから、このような形になることは理解できる。

第2項 動き回る2個のCu 原子が出会うと、核が形成される。  
このとき、拡散係数は2乗となるのか？ **No.**



## $C_{SC}$ の式の修正

$$\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0) \right)^2$$



$$\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD} + \xi_8 \cdot (C_{Cu}^{avail})^2 \cdot D_{Cu} \cdot (1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0)$$

拡散係数の次元が間違っているにもかかわらず、「未定係数  $\xi_8$  を最適化するとき、自動的に正しい値に調整される」という人がいる。しかし、拡散係数は、中性子照射率  $\Phi$  を含んでいるので、そういう都合のいい話にはならない。

なお、拡散係数  $D$  よりもジャンプ頻度  $\nu$  を用いる方が適切である。

$D = \alpha \nu a^2$   $\alpha$  数因子  $\nu$  ジャンプ頻度  $a$  ジャンプ距離

2個の粒子の会合によって、新たな欠陥が生まれる過程は、格子欠陥論の分野でよく取り扱われた問題である。“急冷した金属中の凍結（単一）空孔(single vacancy)が2個集まって複空孔(divacancy)を形成する過程” に関する記述を紹介する。

空孔が次の格子位置に移る速さ(単位時間のジャンプ数)は、空孔のまわりの格子の振動数を $\nu$  とすると

$$j_1 = \nu \exp(-E_m^1/kT)$$

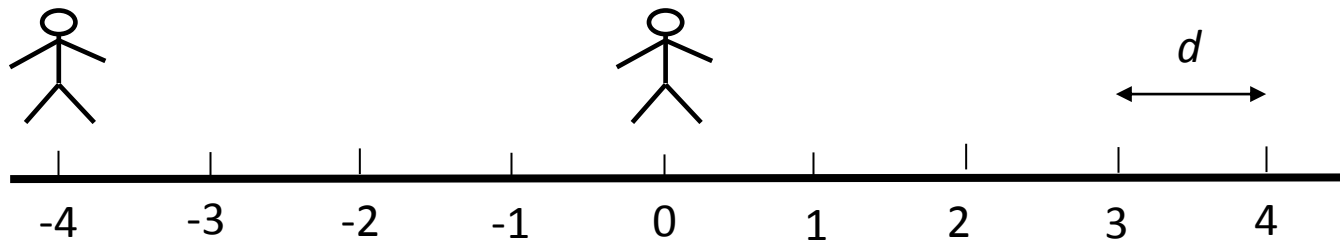
である。1個の単空孔のまわりには12個の最近接位置があり、そのそれぞれの位置に7方向から他の空孔が入る可能性があるため、濃度 $c_1$ の単空孔がお互いに接して複空孔を作る速さは、

となる。

$$\left(\frac{dc_2}{dt}\right)_+ = 84c_1^2\nu \exp\left(-\frac{E_m^{(1)}}{kT}\right) \quad (2.28)$$

$$\left(\frac{dc_2}{dt}\right)_+ = 84c_1^2 \nu \exp\left(-\frac{E_m^{(1)}}{kT}\right)$$

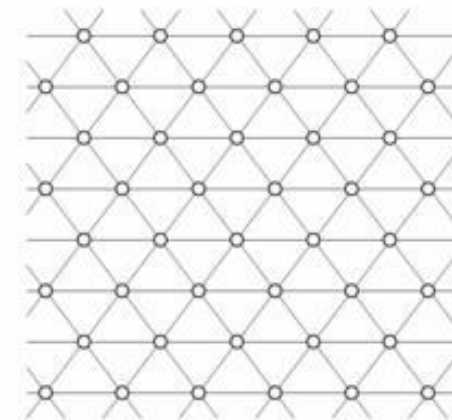
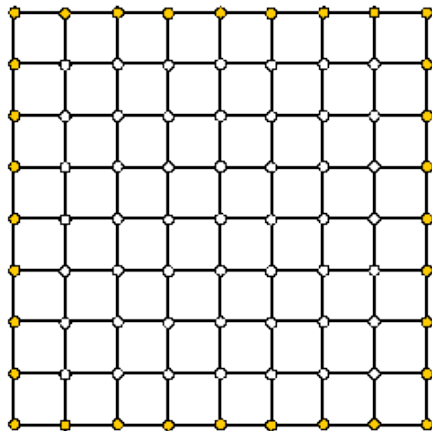
2個の空孔はどちらも動く．だからといって，ジャンプ  
頻度  $\nu$  は2乗ではなく，1乗であることに注意．



## 格子上のランダム・ウォーク

2個の粒子（ウォーカー）が出会う頻度（確率）は、一方が動かないでいても同じ。

**教訓** 待ち合わせのときは、動き回らず、1か所にとどまっていた方がよい（動いても早く会えるとは限らない）



電力中研報告 Q06019 平成19年

照射促進クラスター形成は、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。

第14回議事録より 曾根田委員

脆化予測モデルは、いきなりこのモデルがぽんとアプリアリに出てきて、それでデータベースにフィッティングしてつくったと、そういうものではありません——照射促進項を記述するにはどういうモデルが、どういう関数系が最適であろうかと。モデル、この場合、イコール関数系ですけども——が最適であるかということを考えながらつくってきたものでありますので、これは正しいとか間違っているとかいうものではなくて、こういうモデルを用いることが監視試験データの値を適切に予測できるという形で取り入れているというものであります。

曾根田委員の弁明は、論文の断定的記述と対比して納得しがたい。“いろいろな関数系”を調べたのであれば、当然 拡散係数の1次 の場合も調べたはずだ。 それを示せ。

# 疑問の数々

電中研報告および英文論文 (J. ASTM. Intl., Vol.7, No.3, p.64) における説明は不十分である。基本となる13の式がどのような考え方で導かれたかを丁寧に説明する必要がある。

溶質クラスターの寸法の時間変化を表わす式が必要ではないか？

反応速度式 に関する情報が不足しているとき、多くの係数(未知数)を入れておいて、実測のデータと合うようにそれを決めるという方式は、合理的か？

ある項が間違っているにもかかわらず正しい結果は得られるのか？

「メトロポリス法を採用する」とのことだが、未知数の数をできる限り減らしておくべきではないか？ (別スライド1)

マトリックスに固溶しているCu濃度に関する第3式の説明。(1)式との整合性。(別スライド2)

$\Delta T_{SC}$  の式 なぜ複雑な手順が必要か？ (別スライド3)  $\Delta T_{SC} = \xi_{16} \cdot \sqrt{C_{SC}}$

# 第1ステップ $C_{SC}$ , $C_{MD}$ を計算

別スライド1

$$C_{SC} \quad \frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} + \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \quad (2-1)$$

$$= \xi_3 \cdot \left( (C_{Cu}^{mat} + \varepsilon_1) \cdot D_{Cu} + \varepsilon_2 \right) \cdot C_{MD}$$

$$+ \xi_8 \cdot \left( C_{Cu}^{avail} \cdot D_{Cu} \cdot \left( 1 + \xi_7 \cdot C_{Ni}^0 \right) \right)^2$$

銅の時効析出はニッケルによって促進されることが分かっているため

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

転位ループの数がニッケル含有量とともに増大する

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

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

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

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

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

これらの量は、既存のデータから定めておけばよいのではないか？

# マトリックス中固溶 Cu の濃度の式

## 別スライド 2

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

不要ではないか？  
次元は？

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

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

$v'_{SC}$  どう書いたらいいだろうか？

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

$v_{SC} = 1$  ではないか？



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

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

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


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

$$D_{SC} \approx D_{Cu}$$

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

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

(2-8) ~ (2-11) 式  
をこの式ひとつに  
したらどうなる？



$$\Delta T_{SC} = \xi_{16} \cdot \sqrt{C_{SC}}$$

$$\Delta T_{MD} = \xi_{17} \cdot \sqrt{C_{MD}}$$

“最適化が適正に行われているかどうかをたしかめたいので、「最適化に用いた生データをエクセルファイルで」お送りいただきたい。”（第9回資料1-3）と申し入れたが、電事連の回答は以下のように冷淡なものであった。（井野）

係数の最適化については、マイクロソフト・エクセルのソルバー機能を利用して係数を変化させながら目的関数の最小化を行っており、適切に行なわれていると考えています。なお、今回の予備検討結果は、予測精度向上に向けて、現状知見に基づき高照射領域データに重みを付ける等の技術的・工学的な判断を行い、現状の予測式の係数を最適化するための方法を提示し、事前検討した結果をご紹介しているものです。従って、本意見聴取会では、今回の予備検討での考え方などを技術的・工学的な観点から議論していただくものと考えております。

（第10回聴取会 資料8 原子炉压力容器の中性子照射脆化に係る委員コメントに対する回答（電事連））

# 高経年化技術評価に関する意見聴取会

第1回 平成23年11月29日～ 第17回 平成24年6月20日

保安院のホームページに 議事録, 資料がある.

[http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/800/30/800\\_30\\_index.html](http://www.nisa.meti.go.jp/shingikai/800/30/800_30_index.html)

Ustreamの動画 で委員会の質疑の様子を克明に知ることが可能.  
(現在, アーカイブとして保存されているものもある.)

<http://www.ustream.tv/recorded/23436007>

# 高経年化技術評価に関する意見聴取会 名簿

○阿部 弘亨 国立大学法人東北大学金属材料研究所 教授

○井野 博満 国立大学法人東京大学 名誉教授

大木 義路 学校法人早稲田大学理工学術院 教授

橋高 義典 公立大学法人首都大学東京都市環境学部 教授

○庄子 哲雄 国立大学法人東北大学大学院工学研究科 教授

○関村 直人 国立大学法人東京大学大学院工学系研究科 副研究科長 教授

○曾根田直樹 財団法人電力中央研究所 材料科学研究所 副所長

更田 豊志 独立行政法人日本原子力研究開発機構 安全研究センター  
副センター長

箕島 弘二 国立大学法人大阪大学大学院工学研究科機械工学専攻 教授

○飯井 俊行 国立大学法人福井大学大学院工学研究科 教授

山口 篤憲 財団法人発電設備技術検査協会 参与

○渡邊 英雄 国立大学法人九州大学応用力学研究所 准教授

○ は照射脆化に関する意見を聴取する専門家

専門家による詳細な議論が行われることを期待したが、  
“学術的な議論は 学協会では”  
と井野委員の問題提起は封じ込められてしまった感がある。

脆化予測に関する 規格JEAC4201 - 2007の改訂には，下記の3氏が幹事，委員として関与している．

原子力規格委員会	幹事	関村	直人
構造分科会	委員	庄子	哲雄
破壊靱性検討会	委員	曾根田	直樹

本聴取会においても，この3人の委員が主に発言している．

## 庄子委員長（第15回）

これまでの議論を整理すると、井野委員は（脆化予測モデルは）間違っているという。曾根田委員より前回、資料を出して説明していただいた。それによると、もともとの考えかたが違う。井野委員は線形物理モデルで考えている、曾根田委員はそうではなく、実際のデータは線形物理モデルでは合わない。だから二乗にした。また、阿部委員から、拡散係数の二乗に比例するような現象もあるとの発言もあった。（だから、井野委員の意見は多数の意見ではない。）

「線形物理モデルであるか否か」という表現はあたらない。ある微分方程式において、ある項の係数として、拡散係数の1乗が適切であるか否かの問題である。また、井野は特定のモデルを考えているのではない。曾根田委員の論文（電力中研報告）の記述にしたがって、すなわち曾根田モデルに立脚して、表式のあるべき形を述べているに過ぎない。

庄子委員長は 議論の内容を全く理解しないで、司会を務めているようだ。

## 関村委員 (2-1) 式 第2項 の拡散係数について

一乗であろうと二乗であろうと、実はグザイ 8 の中に含まれてしまうんですね。グザイ 8 のほうに外に出してやれば、グザイ 8 というパラメーターがどういう数になるのか、どういう定数になり得るのかというところのこのフィッティングのところの話として考えるべきであって――井野先生の御指摘が、ある意味では正しいものになっている部分があるというふうに認めざるを得ないところがあると思いますが、――、どのようにこのような式にして評価していくのか、電気協会等々の議論の場でも進めなくちゃいけない（第14回議事録より）

拡散定数の中に照射速度  $\phi$  が入っているから、グザイ 8 を照射速度  $\phi$  が変わるごとに変えないとつじつまが合わなくなる。フィッティングを始めるとき、拡散係数  $D$  が 1 乗か 2 乗かはなおざりにできない重要な点である。

阿部委員（第14回）脆化予測に関する(2-1)式に関して

「 - - - またあるサイズでクラスターとして認知されるという閾条件を課すと、下に凸の関数になりまして、ある程度のところまでは二次関数で包絡されるような、そういう挙動をとります。 - - - 上に凸の形は持続できなくて、やがて寝てきて、その段階にいてると、二次関数で近似できるような、そういう関数で表現をされていて妥当な範囲なのではないかなと。 - - - 結論から申し上げますと、ここでクラスターの濃度をとっていますので、二次関数での近似は、妥当な範囲であると思います。井野先生がおっしゃっているように、サイズ、あるいは原子の数の時間移動に関しては一次をとらざるを得ないだろうなというのが私の印象です。」

「すみません。ちょっと言い間違えていました。拡散係数の二乗です。」と訂正。



井野質問状 各委員に文書による 説明回答を求めたが - -

阿部委員 (第15回)

[非常に複雑な式を多数積み上げると - - - 最終的に下に凸の関数になり - - - ] と発言.

口頭の発言では意味を正確に理解することは困難である. 「二次関数で近似」「下に凸の関数」などは, (2-1) 式とどう関連しているのでしょうか.

如何に複雑な過程であっても, それらを近似して表現した場合, (2-1) のような反応速度式において拡散係数の2乗が現れることはあり得ない. 多数個の拡散係数が含まれる表式が現れる場合にも, 何らかの平均になっているはずで, 次元としては1個の拡散係数と同じ形になるべきである. したがって, 阿部委員がどのようなケースを想定しておられるのかわからない.

発言の内容を文書で詳しく説明し, 関連文献を教えてください.

## 阿部委員（第17回）

○井野名誉教授 阿部さんが、私の言ったことがひとり歩きしては困るんだというふうにおっしゃっているんですが、私は、全く阿部さんのおっしゃっていることが理解できなかつたんですよ。それで、庄子さんとか曾根田さんは阿部さんの発言に対して、すぐ私も同感ですと、同じ考えですというのをおっしゃってすぐ御理解されたようなんですが、私には理解できなかつた

○庄子教授 阿部委員、よろしいですか。私はあまり必要ないと思えますけれども、もしよろしければ。

○阿部教授 私も必要ないと思えます。阿部です。基本的なkineticsの概念については、議事録の中に申し上げておりますし、記録も残っているので、その形に基づいてkineticsを構築していけば、そういうようになると。下に凸の二次関数になるという言い方を私はしたのではなくて、積み上げていくことによって、そういう関数で包絡できるのではないかということをお願いしたわけで、そのことについては、二次になると言った覚えは一言もない。

あともう一つは、私の議論というのは、たまたまの全く別の系でということも既に申し上げているので、そのことについて細かい議論をここでしても仕方なくて、肝心なことは、脆化予測式の中で二次にフィッティングさせたほうがいいのか、一次にフィッティングさせたほうがよいのかという点について問題点が出てきたということ、そういう意見をこの場に出てきたということをもって、これが学協会のほうに反映されて検討されていくべきであると。そこで意見聴取会としてはおしまいではないかなと思います。 以上です。

口頭の発言は，自分では明快に話しているつもりでも，相手には伝わりにくいものである． 委員会における質問・回答はできる限り文書にしておくべきである．

阿部委員は，主観的には首尾一貫した発言をされているのであろうが，議事録を読み返しても理解できない．

横軸は拡散係数？ 温度？ 現在の問題とどう関連するのか？

その発言は 曾根田モデルを支持する 役割を果たしている．

これ以上の学術的な議論は学協会で - - - という大合唱である．  
その学協会 というのは 日本電気協会 原子力規格委員会 を意味するらしい．

庄子，関村，曾根田 の諸氏がそのメンバーであった． 誤りを認めたくない人々で構成される委員会で，どんな検討がなされるのであろうか？

## 井野委員の指摘に対するコメント

電力中央研究所 曾根田 直樹

電力中央研究所が電気事業者の協力を得て、進めてきた中性子照射脆化に関する研究成果に基づいた脆化予測法は、日本電気協会における JEAC4201 の改訂においても、その成果が取り込まれてきた。以下に、本脆化予測法の構築に関する基本的な考え方を説明する。

本脆化予測法は、中性子照射された監視試験片からの実機鋼材に対する機械特性試験結果、ミクロ組織観察結果に加えて、分子動力学法並びにモンテカルロ法等を活用した計算機シミュレーション結果に、学会等の場で議論され蓄積されてきた照射脆化機構の基本的理解の進展に基づき、脆化の主要因と考えられる溶質原子クラスターとマトリックス損傷の変化を照射促進項と照射誘起項に大きく区別し、相互の関係性を含めて反応速度論式に類似した連立微分方程式によって記述し、ミクロな機構を鋼材のマクロな機械特性挙動に相関づけるモデルに基づいたものである。方程式に現れる個々の係数項について、明確にメカニズムの観点から定式化できるものについては詳細に記述し、そうでないものについては、最後に監視試験データベースへのフィッティングを行うことで係数を最適化し、全体として照射脆化を適切に予測できるように開発されたものである。

JEAC4201-2007 で採用された脆化予測モデルはこのような複雑な物理現象の基礎過程を記述するものではない。脆化予測モデル中の照射促進項は、上記に示したような基礎過程の理解を踏まえ、複雑なプロセス(脆化に効くクラスターが形成されるまでの核形成、成長、安定化)を、簡単な項により近似するために考えられたものである。照射促進項は、井野委員が主張される拡散する2つの粒子(銅)が出会うことを記述する項ではない。

なお、本脆化予測モデルの基盤となる機構、ミクロ・マクロ相関、係数のフィッティングに利用すべきデータベースについては、これまでに多くの専門家の方々にご意見をいただき議論され、学術的にも受け入れられてきている。脆化予測モデルの開発には、照射損傷の基礎理論および圧力容器照射脆化に関する国内外の第一人者である東京大学名誉教授の石野栞教授にもご参加いただいている。石野教授も、照射促進項は諸々の複雑性を単純な項でうまく記述するためのモデルであるとお立場である。また、予測法開発段階では、照射脆化のメカニズムおよび監視試験データに精通した国内外の6名の専門家からなる集中的なレビュー検討会を平成16年に開催し、予測法について詳細な分析とこれに基づいた改善への推奨方策を議論いただいている。さらに、電力中央研究所の報告書に取りまとめを行った後、平成19年12月4日には国内の専門家の方々にお集まりいただき、脆化予測法の詳細についてご説明し、ご意見をいただいている。

電力中央研究所の報告書に加えて本脆化予測モデルについて述べた論文は、照射脆化に関する主な専門家が集まる米国 ASTM の会議で口頭発表ののち、論文投稿し受理されている。なお、その時の査読者からは、「頑健性のあるサイエンティフィックな手法が圧力容器鋼の照射脆化予測法を開発するためにエンジニアリングのデータベースに解析に適用され成功したという点で極めて重要な論文である(原文は英文)」とのコメントがあった。

本脆化予測モデルについては、これらの経緯を経て国内外で広く認知され、その結果として、欧州の照射脆化専門家会議、米国NRCの照射脆化に関する専門家会議、NATO主催サマースクール、IAEA 主催スクール、その他の国際会議、国外大学での講義等、国際的な場で合計 11 件の基調講演・招待講演・講義(他に国内で 3 件の基調講演・招待講演)を依頼されるなど、国際的にも成果は広く受け入れられている。

なお、照射促進項に対する井野委員の指摘とは別に、井野委員の主張に対していくつかの点を指摘しておきたい。