

【院内集会】

圧力容器の老朽化を問う【高浜1・2号機稼働延長問題】

問われる研究者の倫理

原子炉圧力容器の脆化予測

JEAC4201－2007をめぐって

小岩 昌宏

2015年4月9日(木)14時30分～17時

衆院第一議員会館 第四会議室

小岩 昌宏 略歴

1964 ~ 1985 東北大学 金属材料研究所 原子炉材料金相学部門
1985 ~ 2000 京都大学 工学部
2000 定年 京都大学 名誉教授

滋賀県 琵琶湖の西岸 大津市在住 原発ゼロをめざす湖西ネット

2008年3月 新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会
設備健全性、耐震安全性に関する小委員会 (51回 2011年3月8日) 委員

文献

- (1) 原子炉圧力容器の照射脆化 脆化予測法JEAC 4201-2007は誤っている
金属(アグネ技術センター) **85(2015)87.**
- (2) 続 原子炉圧力容器の脆化予測は破綻している
- 日本電気協会, 電力中央研究所と学者・研究者の姿勢を問う
科学(岩波書店) **84(2014) 152.**
- (3) 原子炉圧力容器の脆化予測は破綻している
- でたらめな予測式をごまかす意見聴取会
科学(岩波書店) **82(2012) 1150.**

巨大地震を経験した原発は健全か？

—新潟県設備健全性、耐震安全性に関する小委員会の議論を振り返る
科学(岩波書店) **82(2012)1023.**

加圧水型原子炉 PWR

格納容器

原子炉压力容器

315°C 150気圧

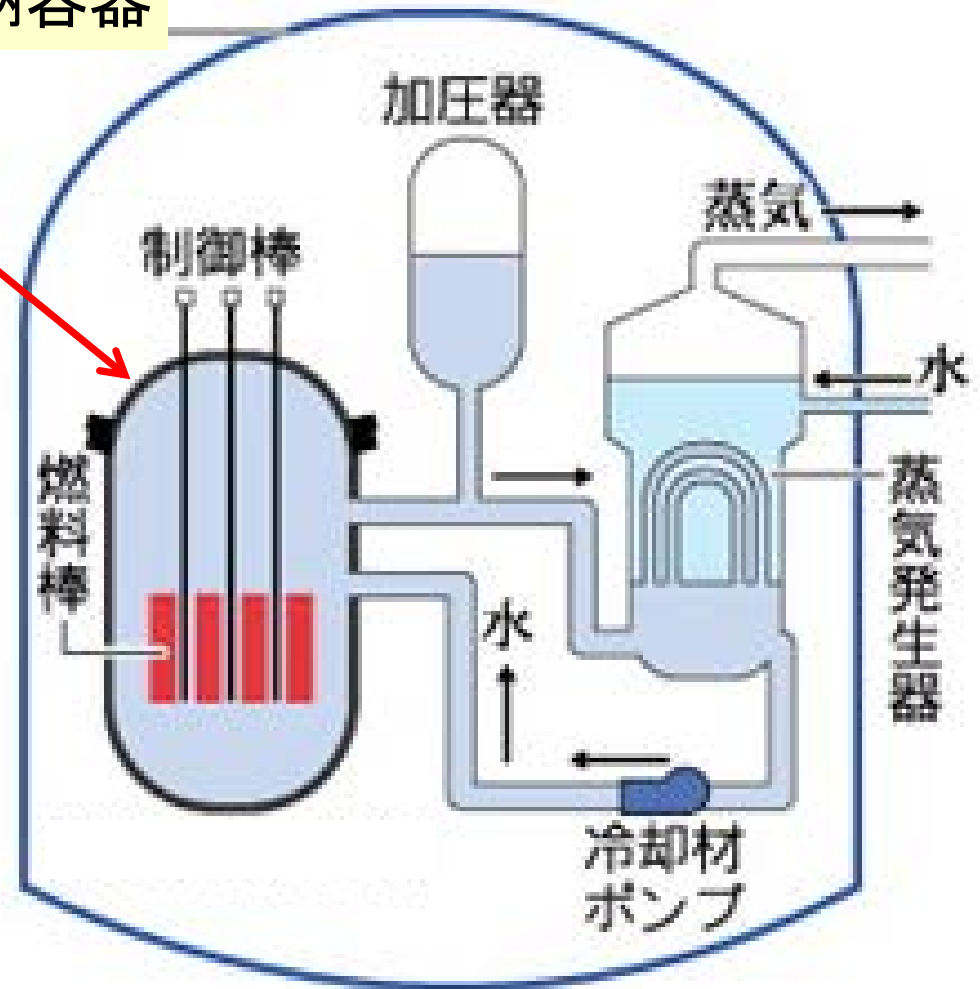
内径6m, 板厚180mm

高さ22m

総重量 910トン

低合金鋼

(Mn, Ni, Mo, 1%前後)



原子炉圧力容器 は巨大な鉄鋼構造物であり、
鉄鋼材料の宿命ともいふべき低温脆性を示す。

延性－脆性遷移 温度 (Ductile-Brittle Transition Temperature)
建設当初は -20°C 程度であるが

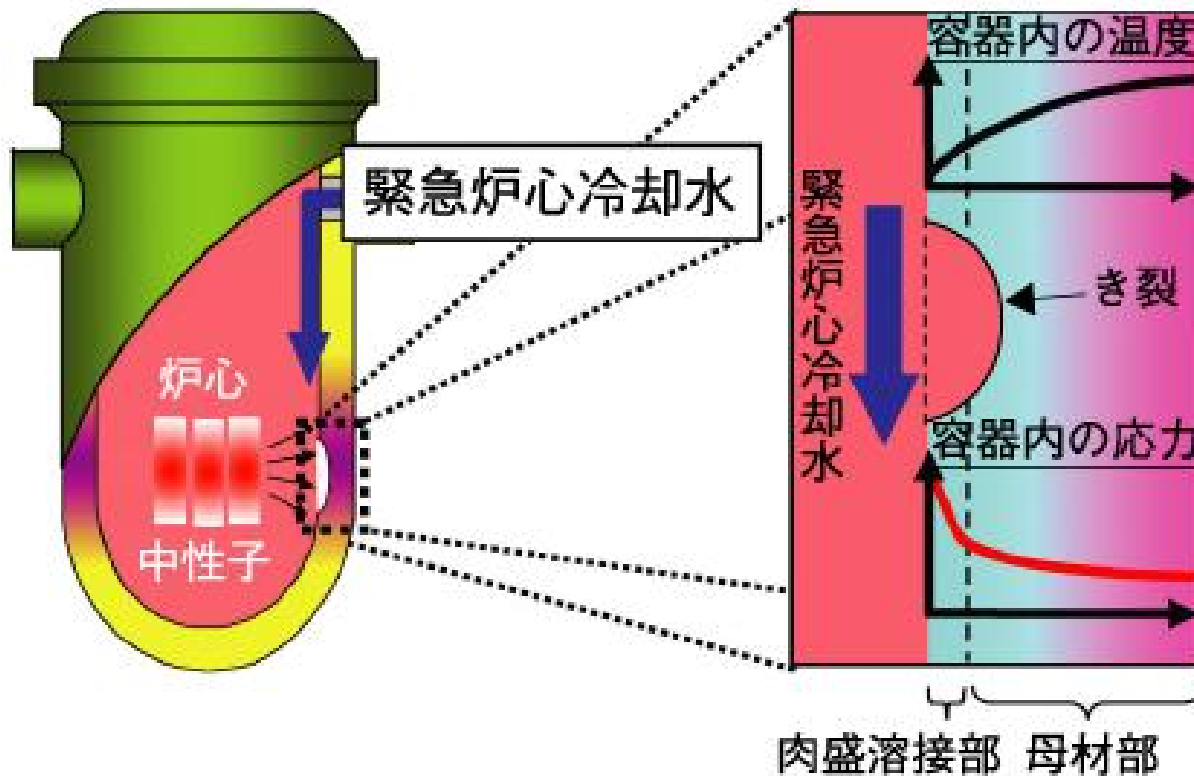
中性子照射によりDBTTが上昇 $\sim ?^{\circ}\text{C}$ になると危ない

ECCS(強制冷却水注入装置) 300°C 付近 \rightarrow 100°C 付近
熱応力で破損し放射性物質が外に漏れる危険性がある

監視試験片を圧力容器内に置き、一定の期間ごとにとりだして試験
炉心に近い場所に置かれるから、圧力容器そのものより多量の中性子照射
を受けている。このことを考慮して、データ解析、解釈を行う



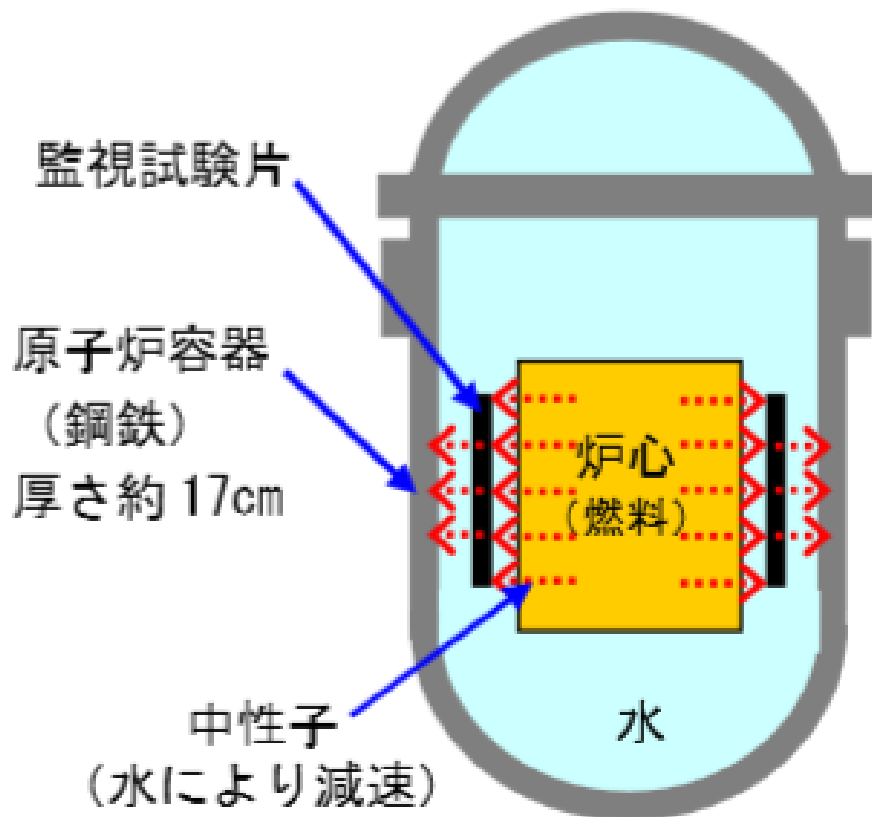
原子炉压力容器



加圧熱衝撃とは、万が一、原子炉冷却材圧力バウンダリに何らかの冷却材の喪失が起きた場合に、原子炉压力容器内部に緊急炉心冷却水が注入され、圧力がかかった状態のまま容器内部が冷却されることを指します。この結果、炉心付近の内表面では大きな応力が発生するので、その状態でも容器が健全であることを確かめるため、この付近にき裂が存在すると仮定した解析を行います。

監視試験片は、原子炉圧力容器より 燃料に近い場所にあるので、多くの中性子を浴びている(加速照射).

定期検査の際に取り出して試験を行い、そのデータをもとに 将来の状態を予測する.



何年かのちの圧力容器の状態を示している.

【玄海1号機の監視試験片を収納した容器の数】

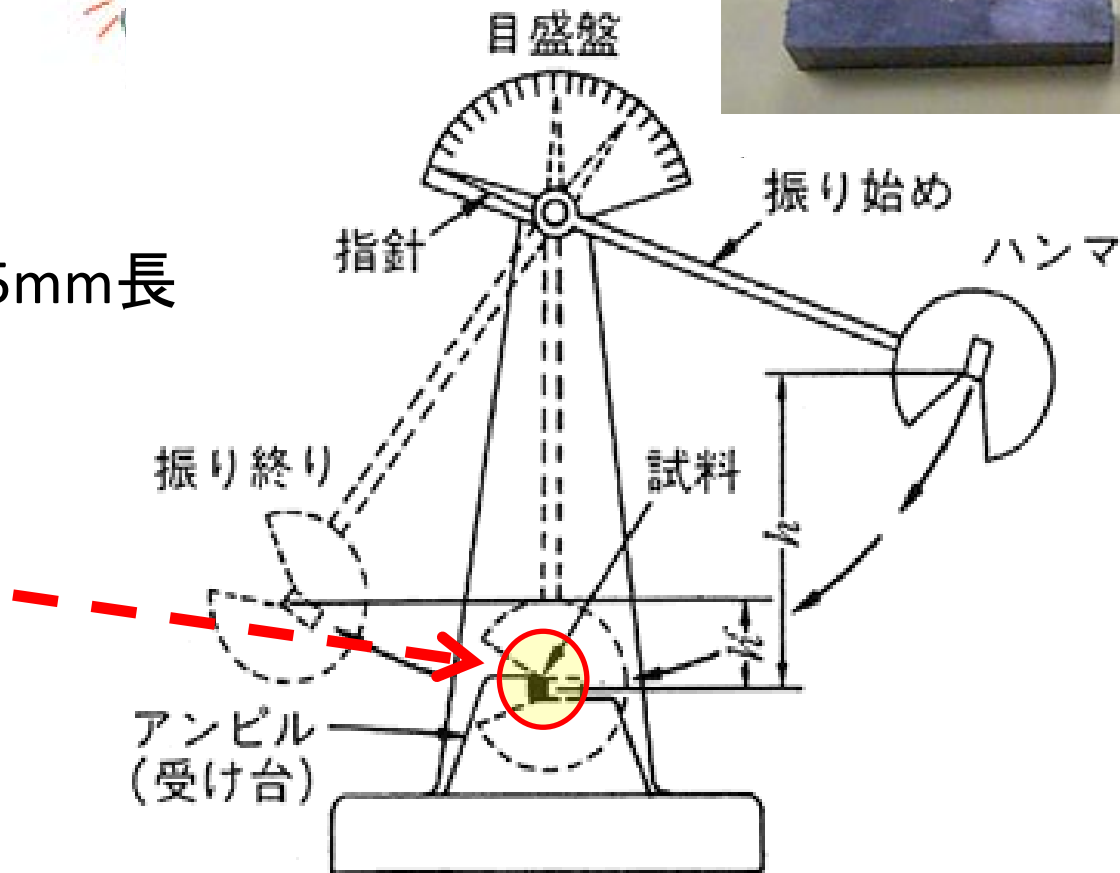
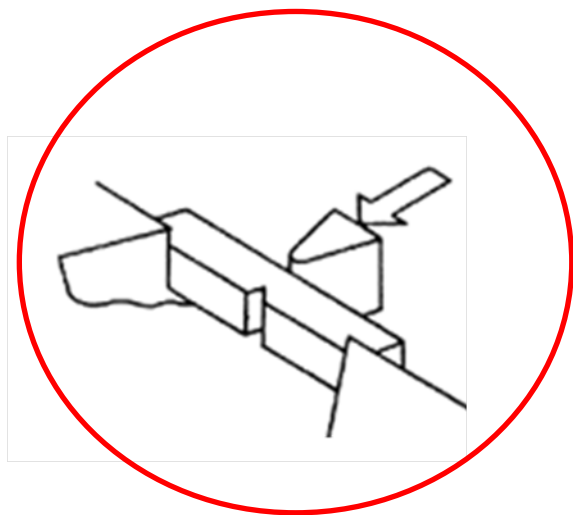
法令要求数	4個
初期装着数	6個

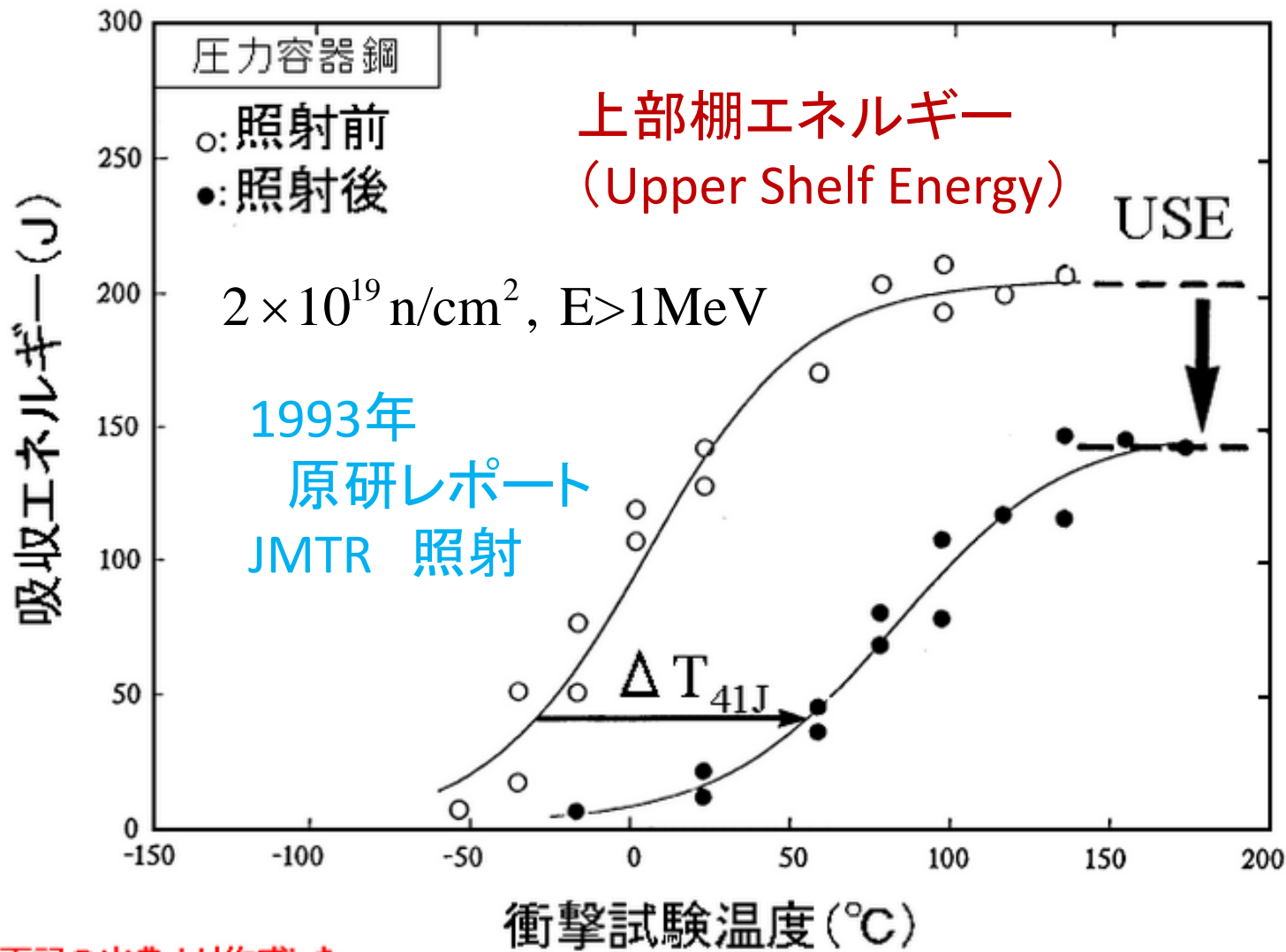
シャルピー衝撃試験 (Charpy impact test)

切り欠きのはいった角柱状の試験片に高速で衝撃を与え、破壊するのに要するエネルギーの大きさを評価するフランスの技術者ジョルジュ・シャルピーが考案した



試料寸法 10mm角 55mm長





延性 (粘い)



脆性 (脆い)

下記の出典より作成した。

図 2 シャルピー吸収エネルギー遷移曲線の中性子照射による変化

JMTR

Japan Materials Testing Reactor

材料試験炉 大洗

照射による脆性遷移温度の上昇 ΔRT_{NDT} 脆化予測式

以前の予測式 JEAC 4201-1991

化学成分 (Cu, Ni, P), 中性子照射量 f
関数形を仮定し, 蓄積されたデータに合うように係数の値を決定

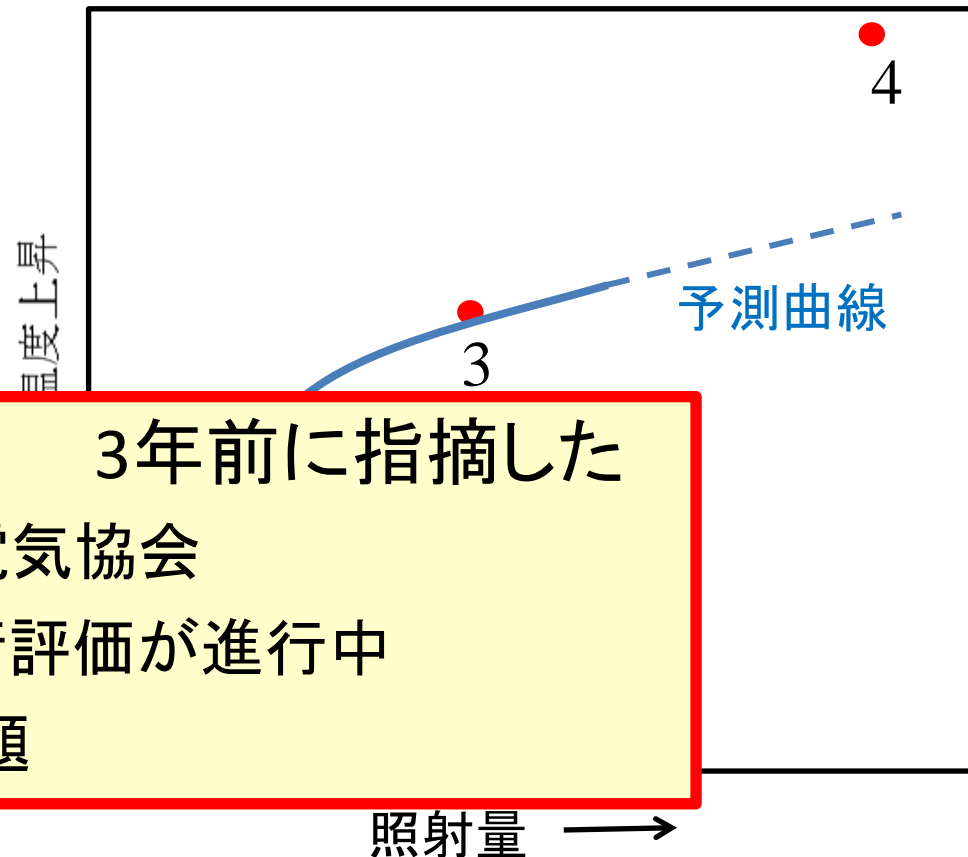
$$\Delta RT_{NDT} = (-16 + 1210 \cdot P + 215 \cdot Cu + 77\sqrt{Cu \cdot Ni}) \cdot f^{0.29 - 0.041 \log f}$$

現行の予測式

JEAC4201-2007

電力中央研究所が開発

機構論に先導された予測手法



この予測法に誤りがある 3年前に指摘した

- それを認めようとするしない日本電気協会
- 原子力規制委員会による技術評価が進行中
- 高浜1, 2号機の運転延長問題

JEAC 4201 「原子炉構造材の監視試験方法」

Japan Electric Association Code

日本 電気 協会 原子力規格委員会

圧力容器用鋼材の照射による変化を調査し，評価するための監視試験方法について規定1970年に制定．数年ごとに改訂

JEAC 4201-2007

JEAC：電気技術規程

JEAG：電気技術指針

JEAC 4201-2007 [2010 年追補版]

JEAC 4201-2007 [2013 年追補版]

← 現在の検討対象

JIS (日本工業規格) 工業標準化法に基づく国家規格

民間規格 または 学協会規格

民間が自主的に制定した規格を，規制当局が技術評価し是認(エンドース)したもの．国家規格に準ずる

原子力発電施設の技術基準*

以下の3学協会が制定したものが用いられている。

日本機械学会(発電用設備規格委員会)

JSME (The **J**apan **S**ociety of **M**echanical **E**ngineers)

日本原子力学会(標準委員会)

AESJ (**A**tomic **E**nergy **S**ociety of **J**apan)

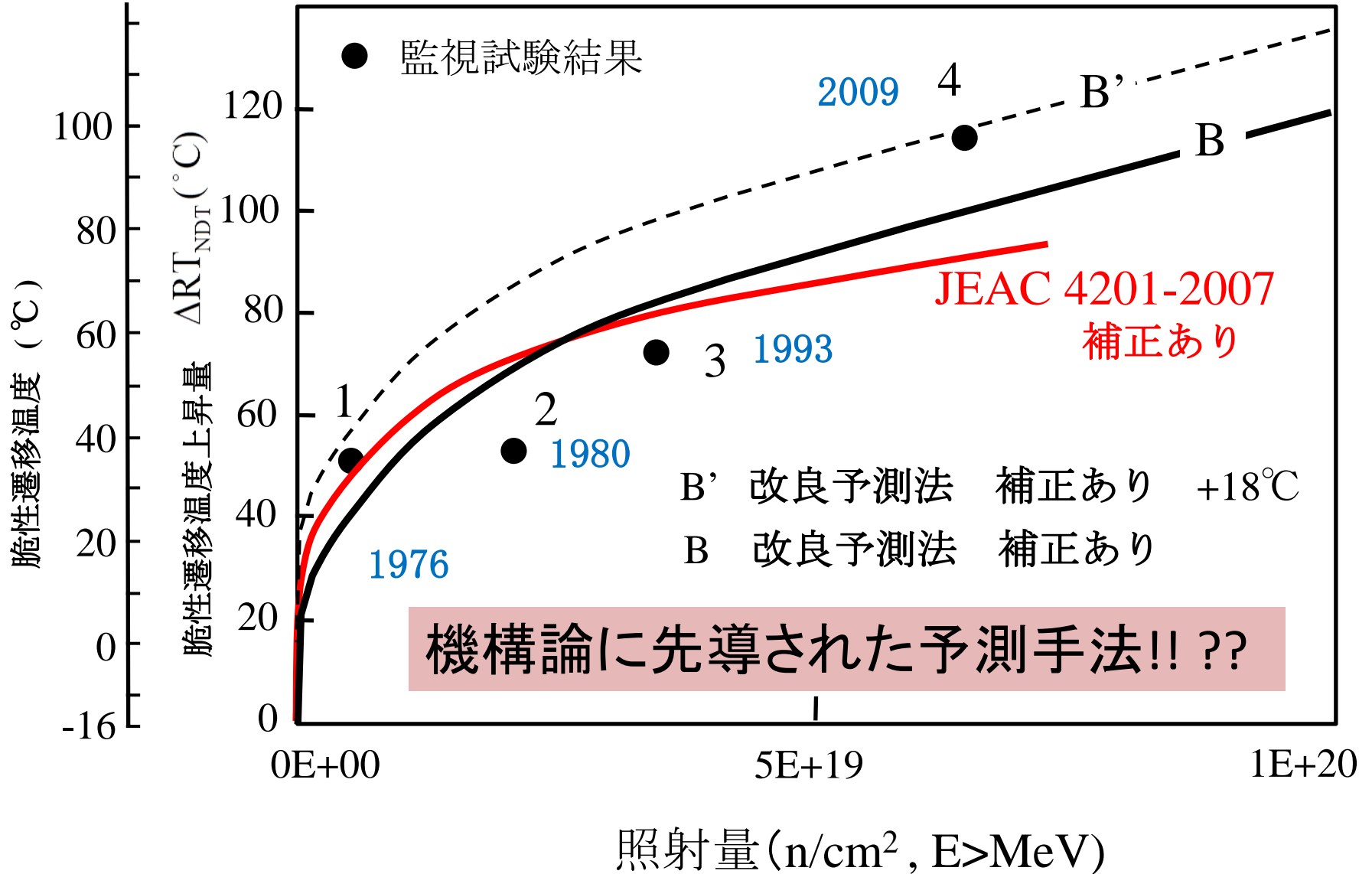
日本電気協会(原子力規格委員会)

JEAC (**J**apan **E**lectric **A**ssociation)

*技術者がものを設計する際に留意すべき事項(規格, 指針)

玄海1号炉監視試験片データと予測曲線

1975年 運転開始



JEAC 4201改訂に関する経緯

2007年 JEAC 4201-2007制定（電力中央研究所報告 Q06019）

2009年 玄海1号炉 監視試験片 異常

2012年3月 原子力安全保安院 高経年化技術の評価に関する意見聴取会
電中研 JEAC 4201-2007改定案提示

井野博満 委員 電中研モデルの誤りを指摘

2012年10月～2013年8月 日本電気協会へ意見提出（小岩，井野）

2013年6月21日 日本電気協会原子力規格委員会

JEAC 4201-2007 [2013年追補版] 制定案 公衆審査

2013年8月15日 小岩 井野 意見提出

2013年10月3日 日本電気協会原子力規格委員会
変更する必要はないものと判断しました。

2015年1月 原子力規制委員会 技術評価作業

原子炉構造材の監視試験方法の技術評価に関する検討チーム

第1回 1月26日，第2回 2月24日，第3回 3月16日，第4回

曾根田直樹, 土肥謙次, 野本明義, 西田憲二, 石野栞
軽水炉圧力容器鋼材の照射脆化予測法
の式化に関する研究 一照射脆化予測法の開発一

Q06019, 平成19年4月 2007

改訂版

曾根田直樹 中島健一 西田憲二 土肥謙次
原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の改良
一高照射監視試験データの予測の改善一
Q12007, 平成25年3月 2013

英文 報告

N. Soneda, et al :

“Embrittlement Correlation Method for the Japanese Reactor
Pressure Vessel Materials”,

Journal of ASTM International, 7, Issue 3(2010)



On line Journal

主な原発の原子炉压力容器の銅の割合

電力会社 原発名称 運転開始年 銅の割合 (%)

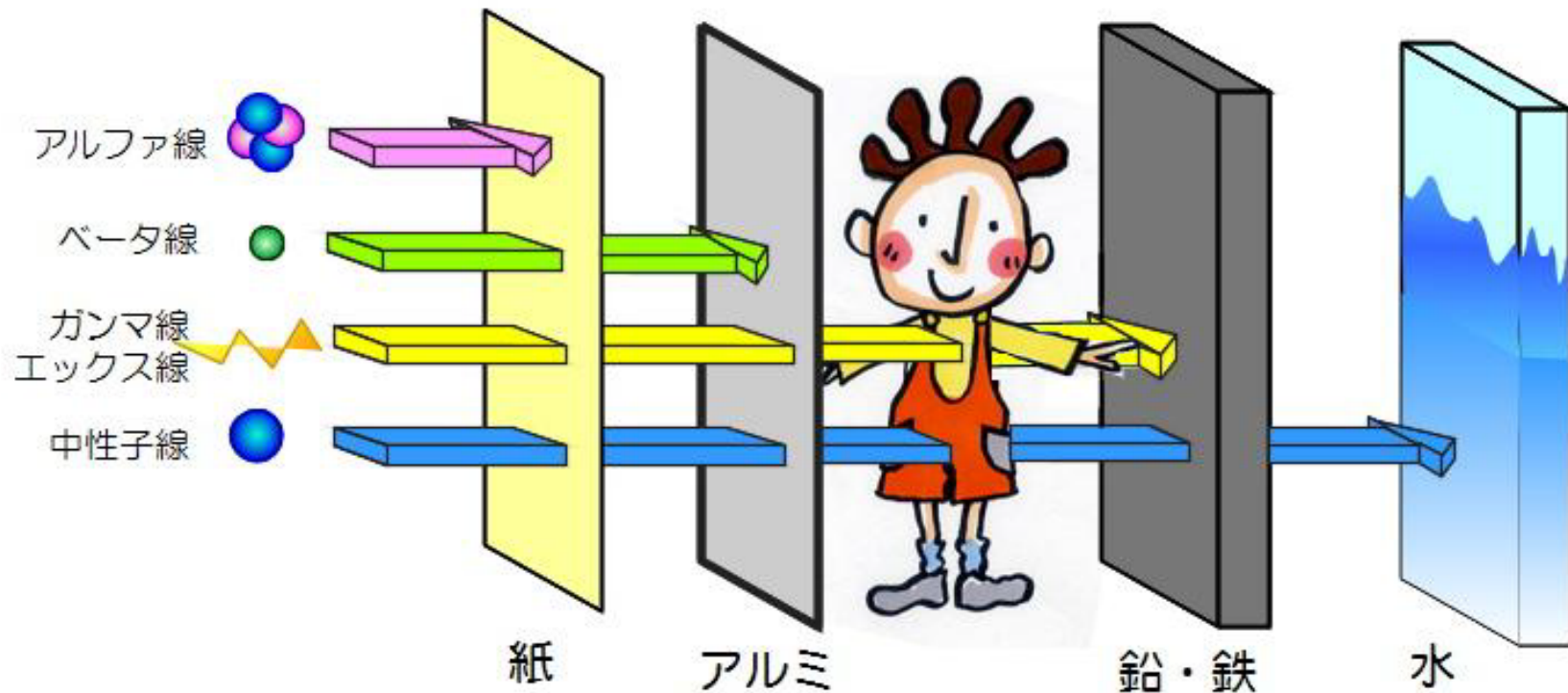
電力会社	原発名称	運転開始年	銅の割合 (%)
古い原発	日本原子力発電 敦賀1号	1970	0.24
	東京電力 福島第1原発1号	1971	0.23
	関西電力 美浜1号	1970	0.16
	// 高浜1号	1974	0.16
	中国電力 島根1号	1974	0.16
	九州電力 玄海1号	1975	0.12
新しい原発	北海道電力 泊3号	2009	0.04
	九州電力 玄海3号	1994	0.018
	東京電力 柏崎刈羽2号	1990	0.01
	// 柏崎刈羽5号	1990	0.01

廃炉決定

高浜2号
1975 0.1

※経済産業省原子力安全・保安院と電力各社への取材を基に作成

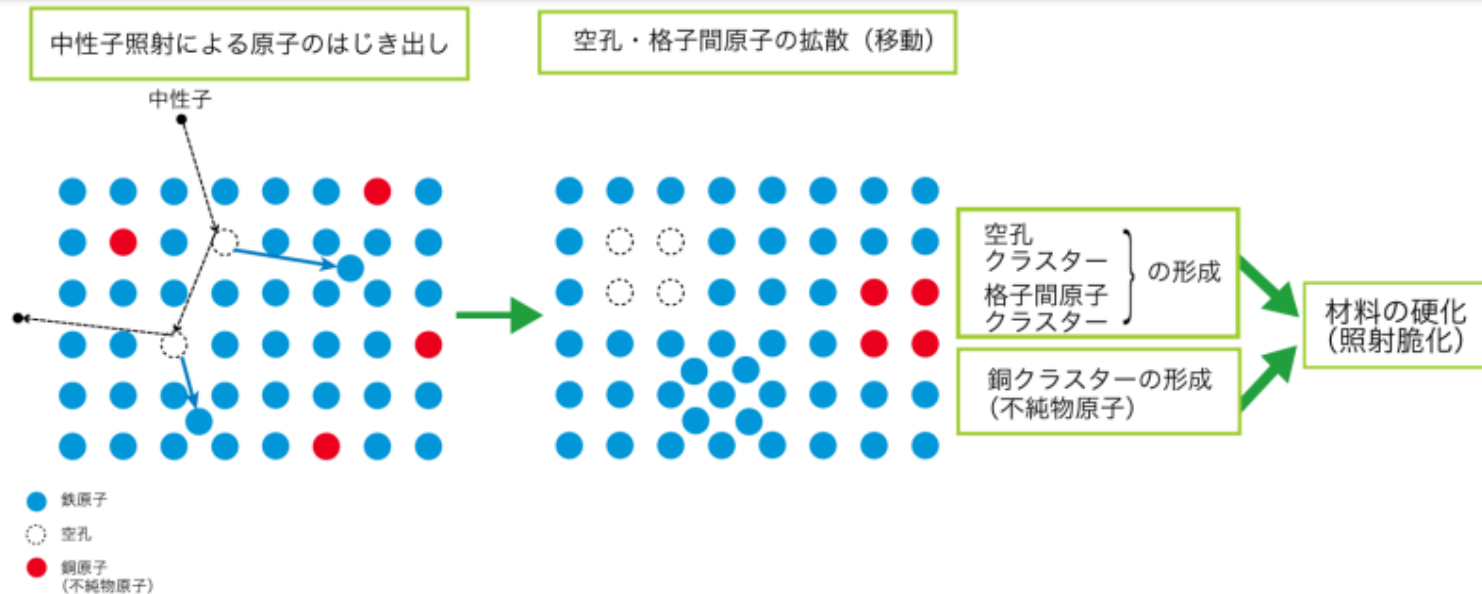
放射線の種類とつきぬける力（透過能力）



原子炉で用いる金属は中性子照射により，性質が変化する。

金属中の原子に中性子が当たると
何が起こるのか？

中性子照射脆化メカニズム



原子炉圧力容器(原子炉容器)では

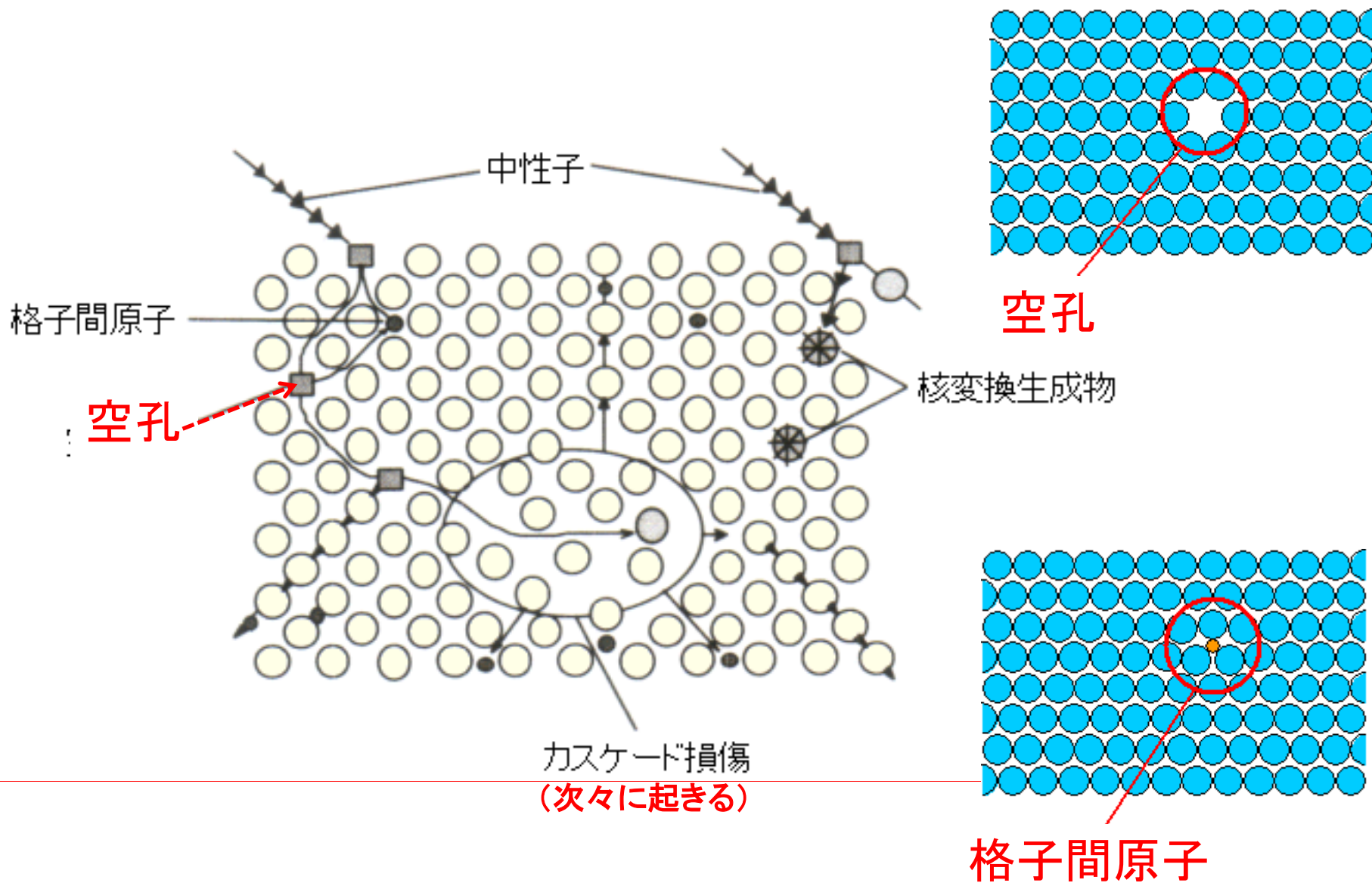
1. より高い温度で脆性破壊を引き起こす。

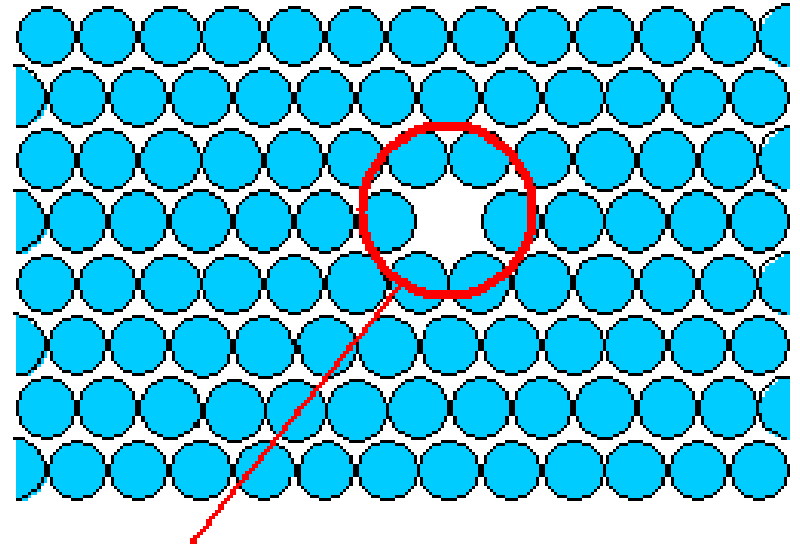
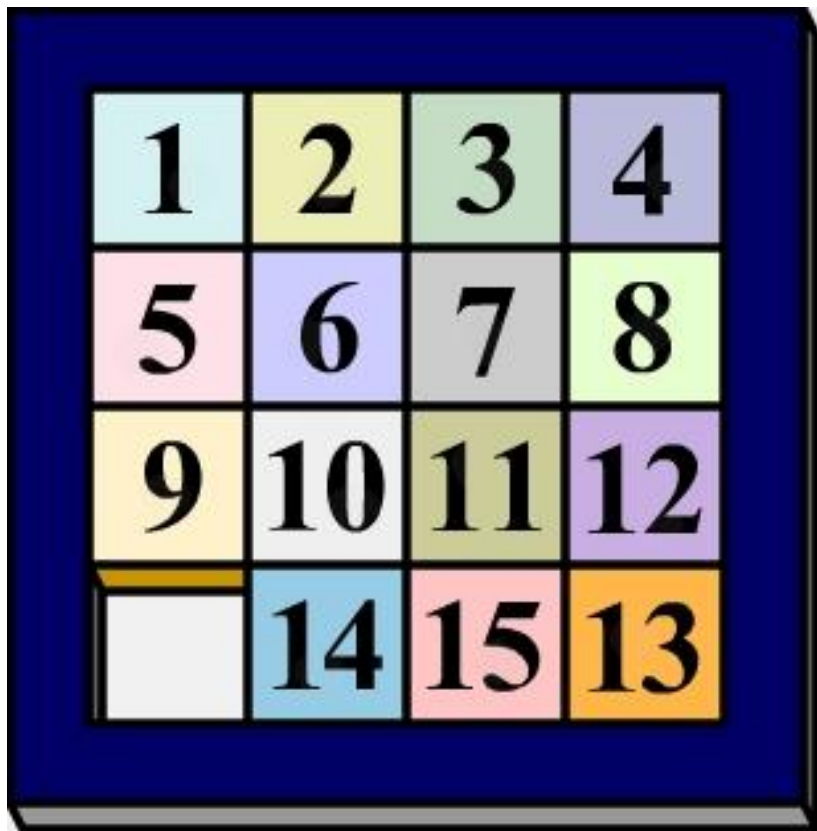
脆性遷移温度の上昇

2. より小さなエネルギーで破壊する。

上部棚エネルギーの低下

中性子は原子を弾き飛ばし、**空孔** と **格子間原子** を作りだす。





空孔

固体中の原子の移動は
空孔の移動によって起こる

中性子照射によって空孔が多数形成され、原子の再配列が起こる。銅(Cu)原子が寄り集まってクラスターを作る。

空孔・格子間原子がそれぞれ集まって、集合体を作る。⇒ 材料の性質が変わる。

電中研の脆化予測法 の考え方

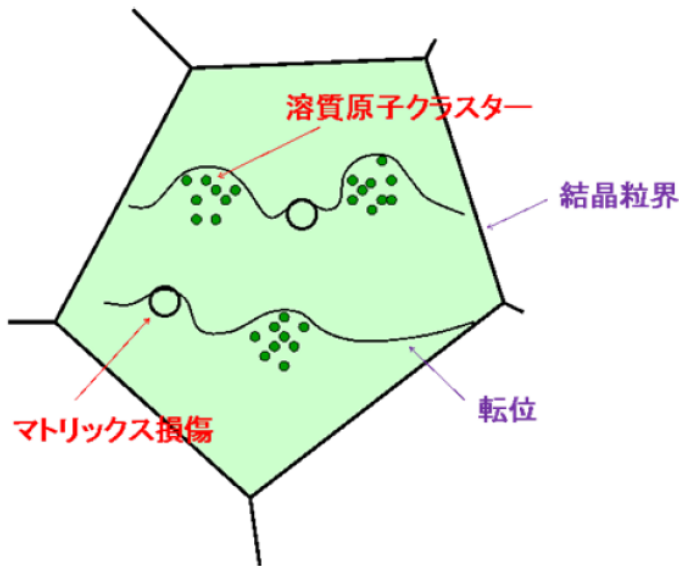
2種類の欠陥の濃度により延性-脆性遷移温度が計算できる。

溶質原子クラスター

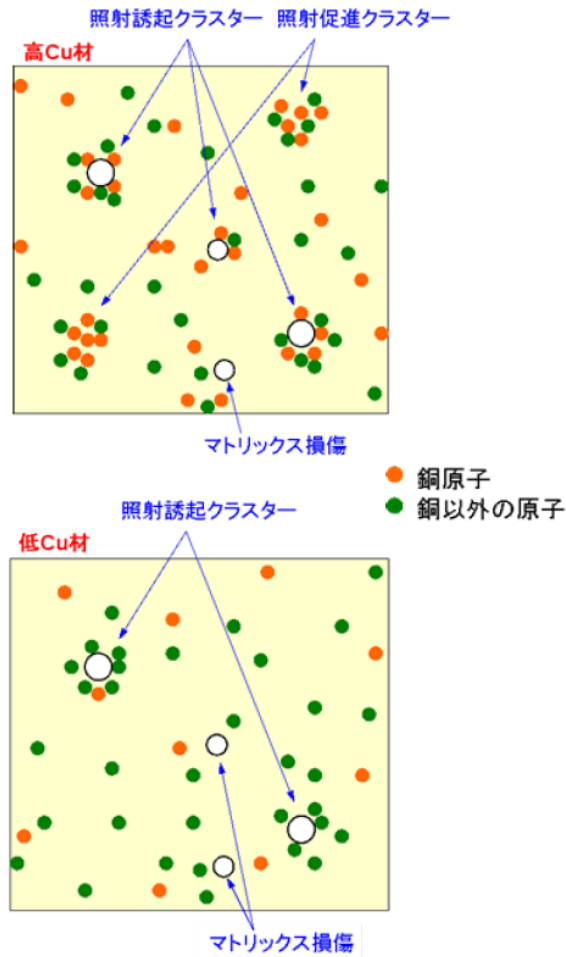
C_{SC} 銅などの溶質原子を含む

マトリックス損傷

C_{MD} 転位ループ



- 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



(SC : Solute Cluster)

(MD: Matrix Damage)

C_{SC} C_{MD}

溶質原子クラスター，マトリックス損傷，マトリックス中の Cu

$$C_{SC}$$

$$C_{MD}$$

$$C_{Cu}^{mat}$$

3つの量についての反応速度式を書く。(21個の未定係数)
これらの式を数値積分して，欠陥濃度を求める。
実験データに合うように未定係数の値を決める。

$$\frac{\partial C_{SC}}{\partial t} = \frac{\partial C_{SC}^{ind}}{\partial t} \text{ (照射誘起クラスター形成)} + \frac{\partial C_{SC}^{enh}}{\partial t} \text{ (照射促進クラスター形成)} = -$$

$$\frac{\partial C_{MD}}{\partial t} = \text{-----}$$

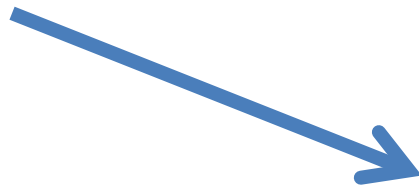
$$\frac{\partial C_{Cu}^{mat}}{\partial t} = \text{-----}$$

Cu の 拡散係数 (中性子束 ϕ に依存)

$$D_{Cu} = D_{Cu}^{thermal} + \eta_1 \cdot \phi^{\eta_2}$$

21個の未定係数 ξ_i を含むこれらの式を数値積分して、 C_{SC} C_{MD} を求める。

実験データに合うように ξ_i の値を決める。



実際には、21個の未定係数 ξ_i をある値に決めて、これらの式を数値積分して、 C_{SC} C_{MD} を求める。

その C_{SC} C_{MD} から ΔT (遷移温度上昇)を計算し、実験データに合う ξ_i の組をさがす。

表 7 改良予測法 (Case $\gamma 5$) の係数

係数	JEAC4201-2007	改良予測法
ξ_1	7.8389E-06	1.6983018E-05
ξ_2	2.6450E-04	3.5228183E-04
ξ_3	3.4068E-01	8.3530827E-01
ξ_4	7.1620E-01	7.1620000E-01
ξ_5	7.6028E+00	1.1937318E+01
ξ_6	7.6159E-01	4.9388038E-01
ξ_7	3.3033E+00	1.7879868E+01
ξ_8	2.7840E+02	5.7851852E+02
ξ_9	2.9500E-25	6.0761276E-25
ξ_{10}	2.4093E-02	0.0000000E+00
ξ_{11}	6.6826E-01	6.6826000E-01

物理現象を支配する方程式の各項は次元的に健全でなければならない。

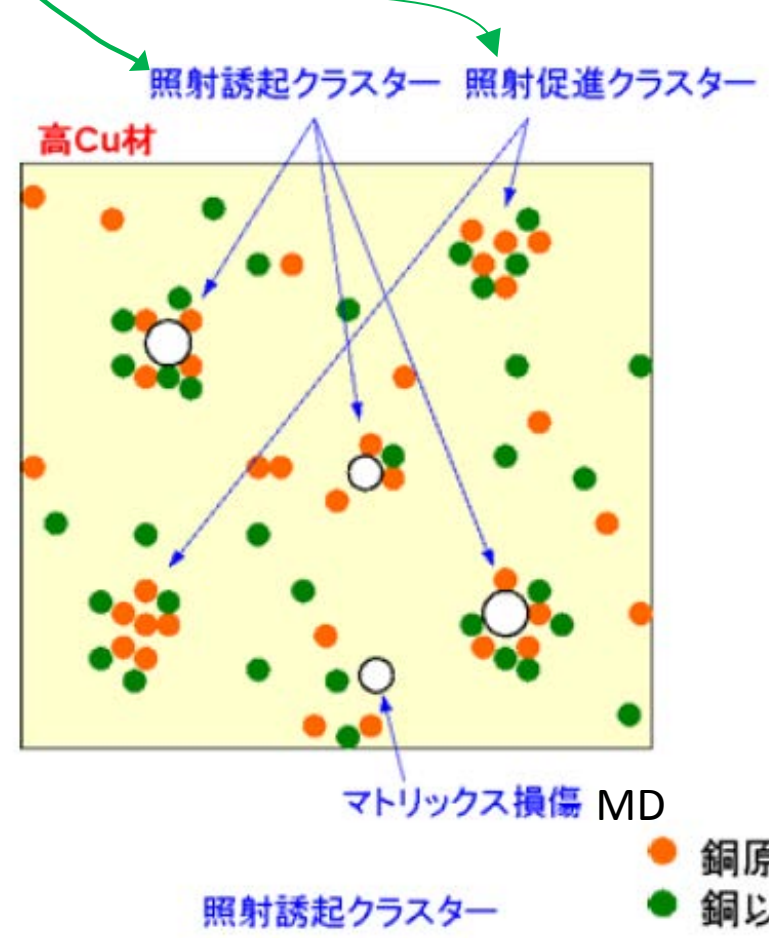
パラメータ ξ は無次元でなく、次元を持たさなければならない。!

溶質原子クラスター C_{SC}

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

第1項 マトリックス損傷 を目指してCu 原子が拡散する.

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.



拡散係数の次数

第1項 D_{Cu}

第2項 D_{Cu}^2

2項の次元が違う！！

次元一致の原理

物理現象を支配する方程式の各項は同じでなければならない。

長さ+面積??

電中研の脆化予測法の問題点

(1) 溶質原子クラスター濃度 C_{SC} の時間変化を表わす式に誤りがある。(拡散係数の2乗)

(2) マトリックス中の Cu 濃度 C_{Cu}^{mat} の時間変化を表わす式にも誤りがある。

(3) 21個のパラメーター ε_1 ε_2 $\xi_1 \sim \xi_{17}$ η_1, η_2 のうち、次の9個は不要である。

$$\xi_2, \xi_4, \xi_9, \xi_{10}, \xi_{11}, \xi_{12}, \xi_{13}, \xi_{14}, \xi_{15}$$

疑問 こうした問題点を修正したとして、この方法は正しい結果を与えることができるだろうか？
重要な量（クラスターサイズなど）を与える式が含まれていない。

C_{SC} の式

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

原著論文

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

電中研, 原子力規格委員会

--(D^2 とした)照射促進項は、クラスター形成の複雑なプロセスを簡単な「単一項」により近似することを目的に設定されたものである。

<批判>

なぜ D^2 にすると複雑なプロセスを近似できるのか? **無回答**

「1次と2次の場合を比較して、2次の方がよく合う」というのであれば、そのデータを示せ という問いかけには **無回答**.

日本電気協会 原子力規格委員会 の対応

意見聴取会において「学術的な問題であるので、学協会において検討するべき」として議論が打ち切られた。このとき、委員の一人である関村直人氏は以下の趣旨の発言をした。

「（拡散係数が1乗であるべきとの）井野委員の指摘は正しいと認めざるを得ないところがある。どのように評価していくのか（日本）電気協会の場でも議論しなければならない。」

JEAC 4201-2007 の制定，改訂の責を担う日本電気協会 原子力規格委員会（委員長 関村 直人氏）に対して意見聴取会における議論の要点を伝え，再三にわたり学術的検討を要請した。

しかし，JEAC 4201-2007 の基本反応式に誤りがあるとの指摘は無視され，**フィッティングパラメーターのみ調節し直した結果が** 電中研報告 改訂案として公表され，公衆審査が行われた。意見提出（平成25年8月15日）

日本電気協会原子力規格委員会 委員長 関村 直人

結論としましては、制定案を公衆審査版から変更する必要はないものと判断致しました。 平成25年10月3日

日本電気協会 原子力規格委員会

委員会は、**公平性**、**公正性**、**公開性**を原則に審議を実施。

【公平性】 委員の選出

◆特定の個人・企業・業界の利益に偏らないように、――

【公正性】

- ◆規格は、分科会審議、、委員会審議、公衆審査という慎重なプロセスを経て制定
- ◆ 議論と採択のプロセスが分かるような議事録を作成し公開。
- ◆ 意見があった場合は、委員会で審議し、必要に応じて規格案を修正。
ご意見に対する結果をホームページに掲載します。

【公開性】

- ◆委員会の開催は1か月以上前に、開催日時、会場、議題を公開
- ◆議論と採択のプロセスが分かるような議事録を作成し公開。
- ◆規格原案に対して、2ヶ月間の公衆審査を実施。
- ◆日本電気協会ホームページでの公告及び電気新聞等で公告。
- ◆規格案の閲覧希望がある場合は、日本電気協会での開示又は規格案を郵送。

原子力発電関係の規格を制定する3学協会 の会員構成

日本機械学会	正員	30888名	特別員	711社
日本原子力学会	正会員	6884名	賛助会員	229社
日本電気協会	個人会員	1700名	法人会員	2200社

日本電気協会は、電気事業関連の事業者団体を主たる会員とする協会である。他の2学会とは性格を異にする。

日本電気協会

本会の会員は、電気事業、電気機械器具・材料の製造および販売業、電気工事業、電気鉄道事業、ならびに電気を使用する事業を営む会社など、電気に関連する事業全般にわたる事業者やその事業に従事される方、さらには学識経験者など幅広い分野にわたり、現在約4,000名の個人、法人または団体が会員となっています。

委員会は 公平性、公正性、公開性 を原則に審議を実施
しているか？

	スライド 使用	委員会資料 公開	議事録 公開時期
設備健全性 小委員会	○	Web PDF	委員の確認後すぐに公表
高経年化 意見聴取会	×	Web PDF	委員の確認後すぐに公表
原子力 規格委員会	×	郵送 有料	次期会合で確認後

新潟県原子力発電所の安全管理に関する技術委員会
設備健全性、耐震安全性に関する小委員会

原子力安全・保安院 高経年化技術評価に関する意見聴取会

日本電気協会 原子力規格委員会

原子力発電施設の技術基準を制定する 学協会の公衆審査方式

	公衆審査	資料公開
日本電気協会 原子力規格委員会	郵送	有料
日本機械学会 発電用設備規格委員会	Web	PDF
日本原子力学会 標準委員会	Web	PDF

日本電気協会 原子力規格委員会 の対応

議事録の早期公開(1年近くも閲覧できないケースがある)

会議後どの程度の期間を経て公開するか|こつについては明確に定めていなかったため、**前回お伝えしましたとおり**、会議後の議事録公開時期の目安を定めることとしたいと考えております。 **(この1年近くに3回要請したが、回答は同じ)**

委員会における **配布資料のネット上公開 要求に対して**

公平性、公正性、公開性を確保できるよう議事録を作成し公表していること、請求に応じて資料を郵送していること、また、委員会への傍聴参加を認めていることから、配布資料のネット上での公開については、従来通りといたします。

(非論理的回答！！)

公衆審査 「ご意見があった場合は、委員会で審議し、必要に応じて規格案を修正します。ご意見に対する結果をホームページに掲載します。」

提出した意見は“抜粋”のみ掲載、答えたくない点については無視

委員会の決定内容に異議申し立ての権利がある(運営規約細則)

「頂きました異議申し立てにつきましては、個人および組織を誹謗すると思われる記述が含まれております。原子力規格委員会としましては、以降の意見に対して回答しかねる場合がありますことを、あらかじめご承知おきください。」

日本電気協会について

原発関連の技術規程（学協会規格）を制定する3学協会：

日本機械学会，日本原子力学会，日本電気協会

日本電気協会は業界団体で，他の2学会とは性格が異なる。

日本電気協会 原子力規格委員会

「委員会は、公平性、公正性、公開性

を原則に審議を実施」

と標榜するが，空文句に過ぎない。

この組織に学協会規格を制定する
資格はない。

原子力規制委員会

JEAC4201-2007（2013年追補版）の技術評価作業開始

原子炉構造材の監視試験方法

の技術評価に関する検討チーム 田中 知 委員（座長）

第1回 1月26日，第2回 2月24日，第3回 3月16日，第4回

問題点 1月7日開催の原子力規制委員会

当該技術評価の実施に際して、「監視試験方法については、既に技術評価されている2007年版/2010年追補版と2013年追補版との相違点について技術的妥当性を評価する」との方針。

しかし，JEAC4201-2007が採用している脆化予測の基礎となっている反応速度式には，根本的な誤りがあることが指摘されている。そのことを配慮して，技術的妥当性を評価するべきである。

原子炉構造材の監視試験方法の技術評価 に関する検討チーム 発足

第1回 1月26日, 第2回 2月24日, 第3回 3月16日, 第4回

原子力規制委員会

田中 知 原子力規制委員会委員

原子力規制庁

平野 雅司 技術総括審議官

竹内 大二 原子力安全技術総括官

青木 昌浩 技術基盤課長

増原 康博 技術基盤課企画官

林田 均 技術基盤課原子力規制専門職 外部専門家

北條 智博 安全技術管理官 (システム安全)

藤澤 博美 技術参与

船田 立夫 技術参与

独立行政法人日本原子力研究開発機構 安全研究・防災支援部
安全研究センター

西山 裕孝 材料・構造安全研究ユニット 材料・水化
リーダー

笠田 竜太 京都大学エネルギー理工学研究所准教授

関東 康祐 茨城大学工学部機械工学科教授

森下 和功 京都大学エネルギー理工学研究所准教授

座長である田中委員へメールを送り、注意を喚起している。

「我が国の原子力規制組織に対する国内外の信頼回復を図り、国民の安全を最優先に、原子力の安全管理を立て直し、真の安全文化を確立すべく、設置された。」ものと伺っております。新たな体制における学協会規格活用が、どのような審議を経て行われるのか、旧原子力安全・保安院の対応とどのように異なるのか、関係者は重大な関心を持って注視しております。真摯かつ誠実な対応を期待しております。

**(1) 学協会規格を制定する機関としての日本電気協会の適性
各種委員の構成・選出。**

原子力産業に利害関係をもたない有識者を委員に
論文内容を的確に理解できる専門家を委員に

(2) 原子力規制委員会は日本電気協会 の回答を受け入れるのか？

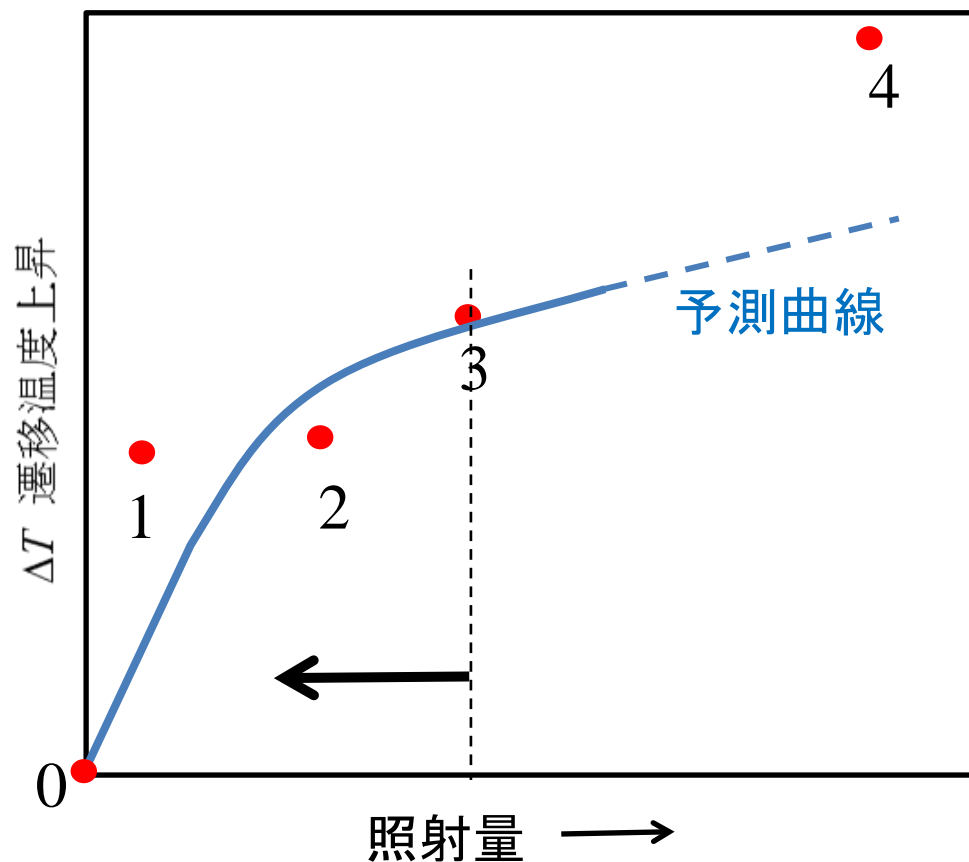
「・・・添付資料1の通りであり、反応速度式に誤りがあるとは考えていません。」(p.26)としている。反応速度式が“次元的に健全でない”と指摘されているのに、“誤りがあるとは考えていません”という主観的な返答では、『回答』になってない。

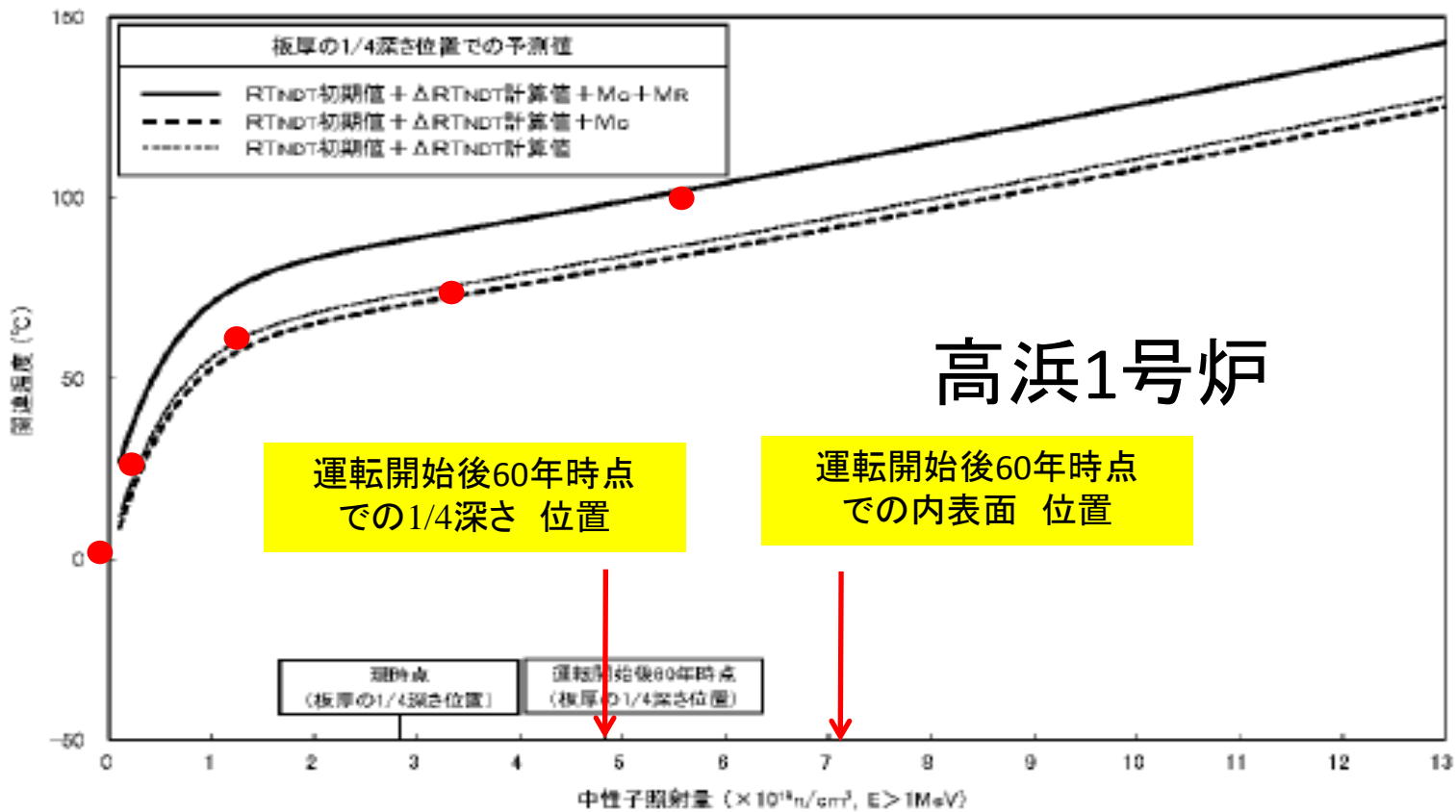
「指摘事項である照射促進項は、クラスター形成の複雑なプロセスを簡単な「単一項」により近似することを目的に設定されたものである。」というが、何故『次元的に間違った式を用いると複雑なプロセスを近似できるのか』を説明していない。「グレイボックスモデル」においても、次元的に誤った式が許されるはずがない。どのように複雑なプロセスを想定しても拡散定数 D の2乗を含む項は出現するはずがない。このような科学的に不合理な“説明ないしは弁解”を原子力規制委員会は受け入れるのか？ 見解を問う。

(3) 電中研予測式は外挿に用いるべきではない。

“玄海1号の第4回監視試験片など高照射量のデータが従来のJEAC4201-2007による予測から大きく外れたため、パラメータフィッティングをやり直して今回のJEAC4201-2007(2013追補版)を出さざるを得なくなった”という事態そのものが、外挿が不可であることを雄弁に物語っている。

データ点 1, 2, 3
を元に導いた予測
曲線は, 3以下の
照射量の範囲で
用いるべきだ。





現在得られている監視試験片の中性子照射量は、運転開始60年時点で压力容器表面が受けると予想されるの照射量に満たない。原子力規制委員会は、20年運転延長を認めてはならない。

江田五月活動日誌 2月24日(火) 規制庁---

今日は、篠原孝さんの呼びかけで、10時から原子力規制庁担当者と原発の安全性評価に関する問題提起をしている学者の皆さんとの会合が開かれ、私もちょっと遅れて10時半から1時間ほど、同席しました。 <中略>

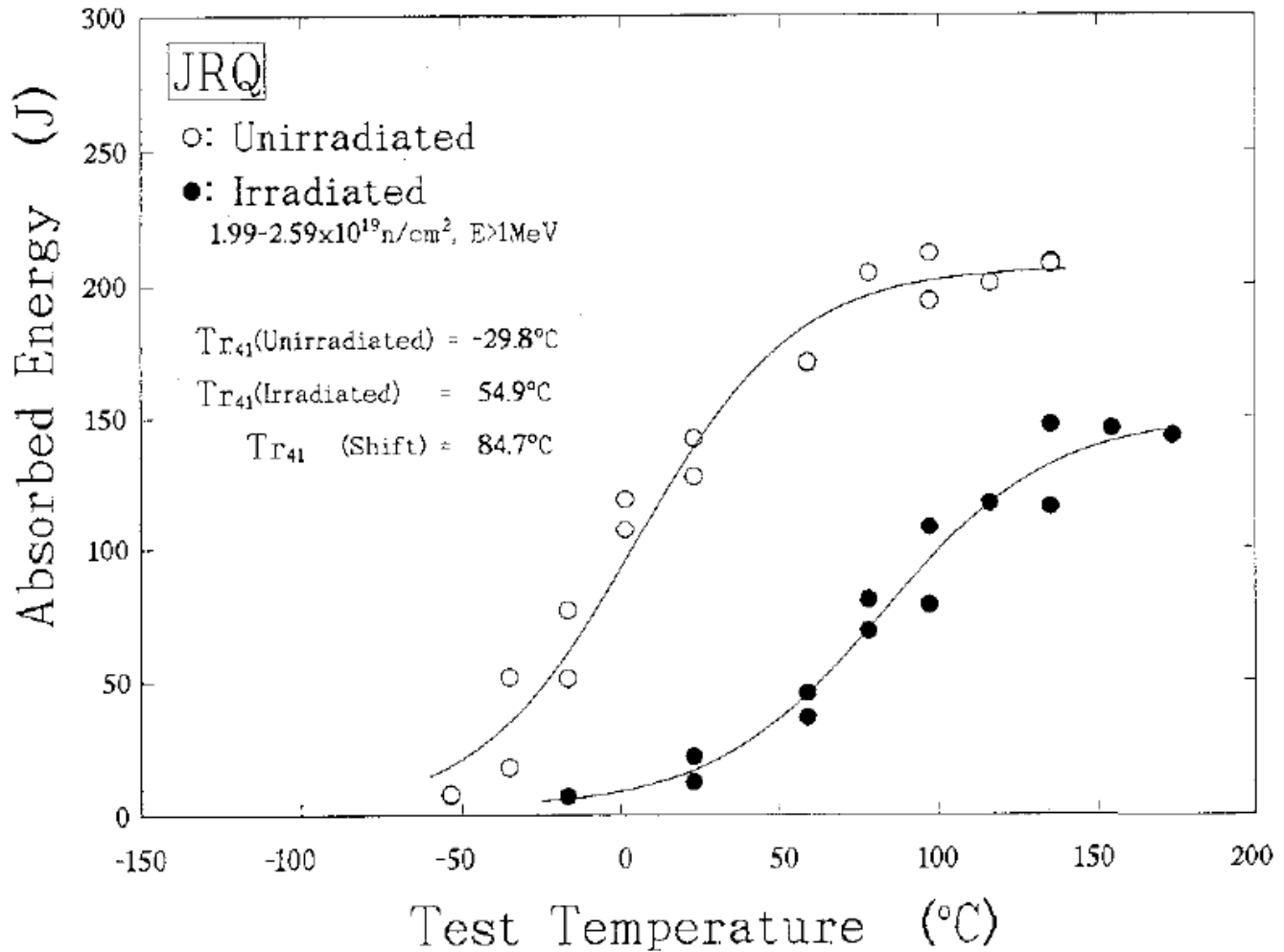
原子炉構造材の監視試験方法の技術評価に関する検討チームの作業につき、私のオックスフォード留学以来の友人で京都大学名誉教授の小岩昌宏さんらが疑問を出しています。



日本電気協会の原子炉圧力容器の脆化予測は破綻しているという主張に対し、規制庁側の説明は、素人の私にも説得力が十分でないように思います。

ご清聴ありがとうございました.

JMTR



a) Absorbed energy

Figure D-7 Charpy transition curves of JRQ.