

(頂いたご意見)

科学(岩波書店)10月号掲載の拙文「原子炉压力容器の脆化予測は破綻している」を添付資料で送るのでご覧いただきたい。

原子力安全・保安院の「高経年化技術評価に関する意見聴取会」における議論を注目してきており、脆化予測式に関しては、保安院は“学術的内容であるから学協会(日本電気協会)で検討していただく”という態度であったため、日本電気協会(貴構造分科会)でどのような検討が行われているかを注目している。

これまでの議事録(第45回まで)を見る限り、“学術的な検討”を行ったようには思われない。

9月11日に第46回検討会が開かれた由ですが、まだ議事録が掲載されていない。日本電気協会が適正な検討を行われることを願っています。

【回答】

科学(岩波書店)10月号掲載「原子炉压力容器の脆化予測は破綻している」は、JEAC4201-2007に記載されている脆化予測法が採用している数式モデルの一部に誤りがあると指摘していますが、指摘を踏まえ JEAC4201-2007における数式モデルの考え方について検討した結果、日本電気協会としての見解は添付資料1の通りです。

JEAC4201の脆化予測法については、これまで、その時々国内外の研究成果や動向を踏まえ、添付資料2のとおり順次改定を行ってきています。各国の脆化予測法の変遷を図1に示します。1990年前後に、米・仏において、規制当局が中心となって「現象論的脆化予測法」が相次いで開発され、規格化されています。これら予測法では化学成分項と照射量項の積の形で脆化量を予測しています。一方、これら現象論的脆化予測法と平行して、照射脆化機構に関しては世界の専門家のコミュニティー(たとえば IGRDM(International Group on Radiation Damage Mechanism in Pressure Vessel Steels)など)の中で議論が続けられ、機構に関する最新知見に基づく「機構論的予測法」の研究が進められてきました。また、この間、マイクロ組織観察技術や計算機シミュレーション技術が飛躍的に向上し、照射脆化メカニズムに関する理解が大きく向上しました。

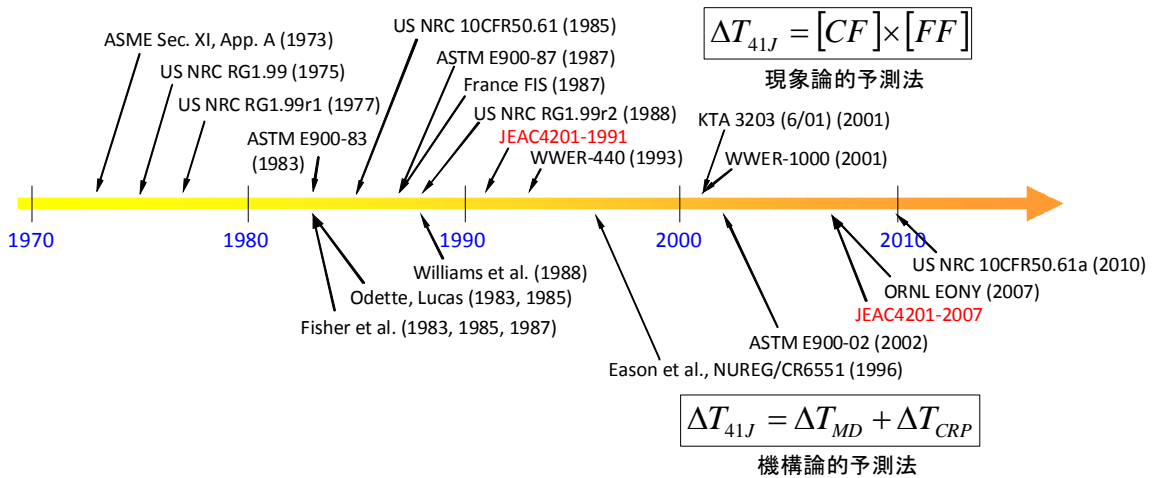


図1 各国脆化予測法の変遷

国内においても国内専門家が IGRDM 等を中心に積極的に研究に参画するとともに、日本原子力学会の「原子炉压力容器の照射脆化メカニズム究明の調査」(石野主査、関村幹事、平成5~8年)をはじめとして学会レベルの知見の共有化が図られてきました。平行して PTSプロジェクト(昭和58年度~平成3年度)、PLIMプロジェクト(平成8年度~平成17年度)、PREプロジェクト(平成17年度~平成22年度)などの国家プロジェクトが行われるとともに、商用炉原子炉压力容器においては監視試験データの蓄積が進められました。

このような流れを受けて 1990 年後半から機構論的予測法の開発が各国で進められ、

2007年までに日本、米国で新たな脆化予測法の規格化が行われています。JEAC4201-2007が採用した脆化予測法[Rev.1]もこれら「機構論的予測法」の一つですが、照射脆化機構に関して米国等で行われている手法からより踏み込んだモデル化が行われています。また、この脆化予測法[Rev.1]は国内外の専門家の詳細なレビューを受け、当時の最新データに基づき開発されたもので、国内外での学会発表等を通じて、米仏規制当局を含め、広く認識されています。さらに、脆化予測法[Rev.1]は、それまで用いられてきた手法に比べて飛躍的に予測性が向上しており、国の技術評価では、2010年に発行したJEAC4201-2007[2010年追補版]の内容も踏まえ技術的に妥当と判断されています。

脆化予測法は、順次取得される監視試験データや上述のような国際的な専門家との議論、最新の技術的知見を収集・分析し継続的に見直していくことが重要です。また、ご存知のとおり、2012年8月に発行された高経年化技術評価に関する意見聴取会の取りまとめ報告書では「関連温度の予測法に関しては、現行規格(JEAC4201)の制定時以降の実機データの蓄積、最新技術による脆化メカニズムの研究の進展があることから、国は、学協会に対して、最新知見に基づき現行脆化予測法の信頼性改善の検討や予測法の見直し等の継続的取り組みを求めることとする。」とされており、脆化予測法の改善活動の推進は規制当局からも求められているところです。したがって、現在、日本電気協会では、順次取得されている監視試験データやマイクロ組織観察などの最新知見を踏まえ、脆化予測法の精度向上を図るための改定検討を継続的に進めています。

以上

JEAC4201-2007 における脆化予測モデルの考え方について

原子炉圧力容器鋼の照射脆化に限らず、実機鋼材の機械特性挙動等のモデル化においては、いくつもの係数を含む複雑な数式モデルが用いられることが多い。数式モデルは、力学的、物理的な洞察のもとにいろいろな形が策定され得るが、理論の積み上げだけで現実の材料挙動を定量的に表現することは難しい。そこで、実際の材料挙動予測では、数式モデルの係数を実測値と合うようにフィッティングする作業、いわゆるパラメータフィッティングが行われる。また、このアプローチに際しては、数式モデルを精緻化することでパラメータフィッティングを容易にする方法と、簡便な数式モデルを用いてパラメータフィッティングを精緻に行う方法があり、両者の組み合わせにはある程度の自由度がある。したがって、材料挙動の定量的な予測法においては、数式モデルの1部分だけに着目して理論的に正確かという観点で議論するよりも、数式モデルと係数のパラメータフィッティングをセットで考え、目的とする巨視的材料挙動をうまく表現できているか、多数のデータ点に対してベストフィットカーブを適切に設定できるか、という観点で議論すべきである。

JEAC4201-2007 の脆化予測法は、

- 1) 溶質原子クラスターとマトリックス損傷が照射脆化に寄与すること
- 2) 溶質原子クラスターには銅を必ず含むものと(照射促進項)、必ずしも含まなくても良いもの(照射誘起項)の2種類があること
- 3) 溶質原子クラスター形成には照射速度が影響すること

など、照射脆化の機構に係る近年の知見を反映して策定されたものである。ここで用いられている数式モデルは、実用性も含めた工学的な観点から監視試験結果を適切に予測することを目的として作成されたものであり、照射脆化機構の厳密な理論モデルを記述するものではない。また、この数式モデルに対するパラメータフィッティングの結果導出された JEAC4201-2007 脆化予測法は、多数の実機監視試験データや材料試験炉データの関連温度移行量やマイクロ組織の変化に対して一定の予測精度が確保されている。

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(照射脆化に寄与する溶質原子クラスターが形成されるまでの核形成、成長、分解、安定化などのプロセス)を簡単な「単一项」により近似することを目的に設定されたものである。当然のことながら、上述の複雑なプロセスを単一项で厳密に記述することは不可能であり、先に述べたような数式モデルとパラメータフィッティングの組合せによりクラスター形成の複雑なプロセスがモデル化されているものと理解している。したがって、素過程の議論に基づき照射促進項において拡散係数の1乗であるべきとの指摘は、JEAC4201-2007 脆化予測法で採用されているモデル化の方針とは基本的に異なる。

JEAC4201 脆化予測法の変遷

JEAC 4201	脆化予測法	備考
1970	規定なし	
1980	NRC R.G 1.99 Rev.1 を解説に記載	
1986	Guthrie PTS 式を解説に記載	
1991	国内脆化予測法 Rev.0 ¹⁾ を解説に追記	国家プロジェクトの PTS 委員会 (三島委員長)で開発された PWR 压力容器鋼を対象とした予測式をベースに BWR 監視試験データを加えて策定した式。
2000	国内脆化予測法 Rev.0 を付録に記載	内容は変更なし
2004	同上	2000 年版から変更なし
2007	国内脆化予測法 Rev.1 に改訂	電力中央研究所が開発した機構論予測式を採用 (技術評価でエンドースされず ²⁾)
2010 追補	2007 年版に対する技術評価のコメントへの対応として、解説に予測法の汎用性/保守性の評価を追加 (脆化予測式は変更なし)	技術評価で国内脆化予測法 Rev.1 が妥当と判断された (Cu:0.16%を超える場合は要件が付いた ³⁾)
201X	国内脆化予測法 Rev.2 を提案中	近年の監視試験結果をベースに係数の見直しを実施

(注記)

1)開発時点における実機監視試験データと、それを補う材料試験炉データをベースに、統計的手法で設定されている。

式の形態(脆化量=[材料成分項]×[照射量項])や Cu、Ni、Si、P を入力値として選定する等、当時の研究成果を反映。(脆化予測式は下式参照)

$$\text{母材: } \Delta RT_{NDT} = (-16 + 1210 \cdot P + 215 \cdot Cu + 77\sqrt{Cu \cdot Ni}) \times f^{0.29-0.04 \log f}$$

$$\text{溶接金属: } \Delta RT_{NDT} = (26 - 240 \cdot Si - 61 \cdot Ni + 301\sqrt{Cu \cdot Ni}) \times f^{0.25-0.1 \log f}$$

ここで、Cu、Ni、Si、P: 鋼材の化学成分(mass.%)、f: 中性子照射量 (X10¹⁹n/cm², E>1MeV)

2) 2007 年版の国内脆化予測法 Rev.1 について、技術評価で米国データの予測性が 2004 年版よりも悪くなっていること(汎用性)や、脆化傾向が飽和する傾向が 2004 年版よりも大きいこと(保守性)についてコメントが付き、2009 年の技術評価では国内脆化予測法 Rev.1 はエンドースされなかった。

3) Cu が 0.16%を超える場合は、国内脆化予測法 Rev.0 (2004 年版)の予測を下回らないことを確認する。