

ハルデン炉での照射試験における照射温度変更による電気協会規格への影響について

## 1. はじめに

2021年8月24日の原子力規制庁、日本原子力研究開発機構及び三菱重工業の面談資料「ハルデン炉での照射試験における温度変更について」（三菱重工業（株）及び2021年10月14日の原子力規制委員会の第50回技術情報検討会において、(財)発電設備技術検査協会「原子力プラント機器高度安全化対策技術」の内の「原子炉（圧力）容器の脆化評価技術の開発」（1998年度～2002年度）のプロジェクトで実施されたノルウェーのハルデン炉における照射試験中の熱電対の計測温度の一部が変更（-9℃～+8℃と評価）されていたことが示された。

このハルデン炉の照射試験データは、破壊靱性検討会が所掌する電気協会規格に取り入れられた照射脆化予測法の開発等にも使用されていることから、現時点で入手している情報に基づいて、ハルデン炉の照射試験データの照射温度が変更となった場合の電気協会規格に対する影響を評価した。ただし、今後も本件に関するより詳細な情報を入手し、改めてこれらの規格に対する影響評価を見直す予定である。

## 2. 影響評価

現段階で入手している参考資料(1)の情報に基づいて、ハルデン炉の照射試験データが反映された電気協会規格について、照射温度の変更による影響を評価した。

### 2.1 JEAC4201「原子炉構造材の監視試験方法」

#### (1) 附属書 B-2000：関連温度移行量の予測

実機プラントの監視試験データ（333データ）及び試験炉データ（38データ）に基づいて関連温度移行量( $\Delta RT_{NDT}$ )の予測式が開発され、最新のJEAC4201の2013年追補版に取り入れられている。試験炉データのうち、ハルデン炉の照射試験データとして30データが含まれている。照射温度も予測式の入力条件の一つであり、予測式の係数の最適化にあたっては、ハルデン炉の照射試験データを含む試験炉データは、実際の照射温度ではなく、一律290℃（計画した照射温度範囲である280～300℃の中間温度）として扱われている。

参考資料(1)の別紙1では、熱電対の温度変更の情報に基づいて簡易的に試験片の照射温度を推定した結果、以下のとおりリグ No.2 の高照射量レベルのいくつかのシャルピー試験片が当該プロジェクトで設定された280～300℃の照射温度の仕様範囲を逸脱することが示されている。

表2 照射温度の仕様を逸脱する試験片

材料	中性子照射レベル (n/cm <sup>2</sup> , E>1MeV)	リグ番号	本数
母材 No.1	~10×10 <sup>19</sup>	2	3
母材 No.3	~10×10 <sup>19</sup>	2	3
母材 No.4	~10×10 <sup>19</sup>	2	3
母材 No.5	~10×10 <sup>19</sup>	2	2
溶接熱影響部*	~10×10 <sup>19</sup>	2	2
標準材	~10×10 <sup>19</sup>	2	1

\*: 溶接熱影響部は関連温度移行量予測式の開発に用いられていない。

また、溶接熱影響部を除いて、これらのシャルピー試験片のデータを除外して  $\Delta T_{r30}$  を算出した結果は以下のように示されている。

表3 データ除外前後の  $\Delta T_{r30}$  の変化

	除外前 $\Delta T_{r30}$ (°C)	除外後 $\Delta T_{r30}$ (°C)	除外後 $\Delta T_{r30}$ - 除外前 $\Delta T_{r30}$ (°C)	変化率 (%)
(a) 母材 No.1	165.6	165.7	0.1	0.1
(b) 母材 No.3	151.2	151.4	0.2	0.1
(c) 母材 No.4	159.8	159.7	-0.1	0.1
(d) 母材 No.5	136.3	133.4	-2.9	2.1
(e) 標準材	128.7	128.6	-0.1	0.1

これらの温度変更に関する情報に基づくと、以下の理由から予測式に与える影響は非常に小さいと推定される。

- a) 上記（表 2）にも示されているとおり、当該プロジェクトの照射温度の仕様を逸脱した試験片の内、溶接熱影響部のデータは、関連温度移行量の予測式の開発には用いられていない。
- b) 関連温度移行量の予測式の開発にあたっては、 $\Delta T_{r30}$  は全て整数で扱われていることから、仮に当該プロジェクトの照射温度の仕様を逸脱した試験片を除外したとしても母材 No.1, 3, 4, 標準材については、 $\Delta T_{r30}$  の値は変わらない。
- c) 仮に当該プロジェクトの照射温度の仕様を逸脱した試験片を除外した場合、母材 No.5 については、 $\Delta T_{r30}$  が 3°C 変化することになるが、参考資料(1)にも

記載のとおり、この予測式の策定に用いられたデータセットは 371 あり、その内のわずか 1 個のデータが 3°C 変化するだけである。(この 1 個のデータが 3°C 変化した場合、監視試験データに対する予測値への影響は最大で 0.53°C であり (添付 1 参照)、マージン  $M_R$  の設定における保守的な丸め<sup>注)</sup>に吸収される程度であることから、影響は無い)

注) 監視試験データによる  $M_c$  補正無しの予測の場合、予測誤差 ( $\Delta RT_{NDT}$  計算値 -  $\Delta RT_{NDT}$  実測値) の標準偏差 9.5°C を 10°C に、平均予測誤差 -1.1°C を -2°C に丸めて、 $M_R = 2 \times 10 + 2 = 22^\circ\text{C}$  に設定している。 $M_c$  補正有りの予測の場合、予測誤差の標準偏差 8.2°C を 9°C に丸め、平均予測誤差 1.4°C を保守的に考慮せずに  $M_R = 2 \times 9 = 18^\circ\text{C}$  に設定している。

- d) ハルデン炉の照射試験データを含む試験炉データは、実際の照射温度ではなく、一律 290°C (計画した照射温度範囲である 280~300°C の中間温度) として扱われている。

## (2) 附属書 B-3000 : 上部棚吸収エネルギーの減少率の予測

当該のプロジェクトにおいて、実機プラントの監視試験データ (285 データ) 及びハルデン炉の照射試験データ (34 データ) に基づいて上部棚吸収エネルギーの減少率 ( $\Delta USE$ ) の予測式が開発され、JEAC4201 の 2004 年版以降に取り入れられている。照射温度は予測式の入力条件とはなっておらず、ハルデン炉での照射試験データの実際の照射温度も予測式の設定 (係数の最適化) には使用されていない。

参考資料(1)の別紙 1 によると、当該プロジェクトで設定された照射温度の仕様 (280~300°C) を逸脱したリグ No.2 の高照射レベルのシャルピー試験片には、上部棚温度域で試験されたものも含まれており、上部棚吸収エネルギーの算出にも使用されていると考えられる。参考資料(1)の参考 1 では、温度分布解析に基づくリグ No.2 の照射温度は 275~301°C、簡易的に推定した全リグの照射温度は 276~302°C であることが示されている。

これらの温度変更に関する情報に基づくと、以下の理由から予測式に与える影響は非常に小さいと推定される。

- a) 参考資料(1)にも記載されているように、照射温度は本規定の適用範囲内 (274~310°C, 注: 参考資料(1)本文の 275~310°C は誤り) である。
- b) 上述のとおり、照射温度は予測式の入力条件にもなっておらず、実際の照射温度も予測式の設定に使用されていない。
- c) 参考資料(1)の別紙 1 や添付 2 では、米国の文献に基づいて照射温度の影響は軽微 (0.08%/°C) であり、照射温度の影響は小さいことが示されている。当該プロジェクトで取得された上部棚吸収エネルギーの最も低い値は 51J (母材 No.4 の高照射レベル) であり、仮に上部棚吸収エネルギーの算出に使用

された試験片の照射温度が 5°C（上述の試験片温度の内、最も大きい逸脱温度）変化したとしても 0.4%程度（=0.08×5）の影響であり、1J も変化しないと考えられる。

### (3) 附属書 C：監視試験片再生方法

同じ(財)発電設備技術検査協会（(独)原子力安全基盤機構）「原子力プラント機器高度安全化対策技術」の内の原子炉圧力容器監視試験片の再生に関するプロジェクトでは、ハルデン炉で照射された試験片の残材を用いて、破壊靱性試験後の CT 試験片の一部を溶接接合して試験片を再生することや、再生した試験片の機械的特性が再生前の試験片のものと同等であること等を確認し、試験片再生時における制限条件等が検討された。このプロジェクトの成果に基づく監視試験片の再生方法が、JEAC4201 の 2007 年版以降に取り入れられている。ハルデン炉での照射試験材料については、再生前後の機械的特性の比較のみであり、実際の照射温度の値は使用されていないことから、影響は無いものと考えられる。

## 2.2 JEAC4206 「原子炉圧力容器に対する供用期間中の破壊靱性の確認方法」

(2007 年版までは「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」)

### (1) RF-5211：上部棚破壊靱性（附属書 G-3000（2007 年版），付録 7 の 3（2004 年版）

当該プロジェクトにおいて、ハルデン炉の照射試験で取得したシャルピー試験データに基づく上部棚吸収エネルギーと、破壊靱性試験片による上部棚破壊靱性（J-R カーブ）のデータに基づいて開発された相関式であり、JEAC4206 の 2004 年版以降に取り入れられている。照射温度は相関式の入力条件とはなっておらず、ハルデン炉での照射試験データの実際の照射温度も相関式の設定（係数の最適化）には使用されていない。

2.2(2)に示した通り、当該プロジェクトで取得された上部棚吸収エネルギーに対する照射温度の変更による影響は非常に小さいこと、並びに、あくまで上部棚吸収エネルギーと上部棚破壊靱性との相関式であること、相関式の開発に実際の照射温度が使用されていないことから、本相関式に与える影響は非常に小さいと考えられる。

## 2.3 その他

現在審議中の JEAC4201 の改定案では、1(1)の関連温度移行量の予測を見直しており、その予測法の開発にあたってハルデン炉の照射試験データが使用されている。

(1) 附属書 B-2000 :  $\Delta RT_{NDT}$  の評価 (関連温度移行量評価式)

実機プラントの監視試験データ (359 データ) 及び試験炉データ (65 データ) に基づいて関連温度移行量 ( $\Delta RT_{NDT}$ ) の予測式が開発され, JEAC4201 の改定案に取り入れられている。試験炉データのうち, ハルデン炉の照射試験データとして 34 データが含まれている。照射温度は (係数削減の検討後は) 結果的に予測式の入力条件とはなっておらず, ハルデン炉での照射試験データの実際の照射温度も予測式の設定 (係数の最適化) には使用されていない。

2.1(1)と同様に, 以下の理由から予測式に与える影響は非常に小さいと推定される。

- a) 当該プロジェクトの照射温度の仕様を逸脱した試験片の内, 溶接熱影響部のデータは, 関連温度移行量評価式の開発には用いられていない。
- b) 関連温度移行量の予測式の開発にあたっては,  $\Delta T_{r30}$  は全て整数で扱われていることから, 仮に当該プロジェクトの照射温度の仕様を逸脱した試験片を除外したとしても母材 No.1, 3, 4, 標準材については,  $\Delta T_{r30}$  の値は変わらない。
- c) 仮に当該プロジェクトの照射温度の仕様を逸脱した試験片を除外した場合, 母材 No.5 については,  $\Delta T_{r30}$  が  $3^{\circ}\text{C}$  変化することになるが, この予測式の策定に用いられたデータセットは 424 あり, その内のわずか 1 個のデータが  $3^{\circ}\text{C}$  変化するだけである。
- d) 評価式の開発にあたり, 実際の照射温度は使用されていない。

### 3. まとめ

現段階で入手している情報に基づいて, ハルデン炉の照射試験データが反映された電気協会規格について, 照射温度の変更による影響を評価した結果, 規格への影響は無い, あるいは, 非常に小さいと推定された。したがって, 現段階でこれらの規格の改定や正誤表等の対応は不要と判断される。

ただし, 今後リグ No.2 以外のリグについての温度分布解析も実施される予定であることから, 今後も本件に関するより詳細な情報を入手し, 改めてこれらの規格に対する影響評価を見直す予定である。

また, JEAC4201 の改定案に取り入れられた関連温度移行量評価式にもハルデン炉の照射試験データが使用されているが, 影響が非常に小さいと推定されることから, 現段階で見直しは不要と考えられる。しかしながら, 今後上述の影響評価を見直した結果も踏まえて判断する必要があることから, 電気協会での審議は公衆審査の前に中断することが望ましいと考えられる。

参考資料

- (1) 2021年10月14日 原子力規制委員会 第50回技術情報検討会 資料50-4「ノルウェーエネルギー技術研究所ハルデン炉における問題とその影響（案）」

以上

## ハルデン炉における照射温度変更の JEAC4201-2007 [2013 年追補版] の脆化予測式への影響について

(一財) 電力中央研究所

EX 研究本部 材料科学研究部門

### 1. はじめに

ノルウェーのハルデン炉における照射試験中の熱電対の計測温度の一部が変更されていたことが示され、熱電対の温度変更の情報に基づいて簡易的に試験片の照射温度が推定されている [1]。ハルデン炉における温度変更の試験データへの影響は、現時点において母材 No.5 (高照射) の  $\Delta T_{r30}$  に対する約 3°C の減少とされている。本資料では、この  $\Delta T_{r30}$  の値の変更が JEAC4201-2007 [2013 年追補版] (以下、JEAC4201-2013 とする) で採用されている脆化予測式に与える影響を調べ、修正前後の国内監視試験データに対する  $\Delta RT_{NDT}$  計算値の変化量を調べることで影響の程度を示す。

### 2. データの変更

NRA の技術情報検討会資料 [1] では熱電対の温度変更の情報に基づいて簡易的に試験片の温度を推定した結果が次のように示されている。

表3 データ除外前後の  $\Delta T_{r30}$  の変化

	除外前 $\Delta T_{r30}$ (°C)	除外後 $\Delta T_{r30}$ (°C)	除外後 $\Delta T_{r30}$ - 除外前 $\Delta T_{r30}$ (°C)	変化率 (%)
(a) 母材 No.1	165.6	165.7	0.1	0.1
(b) 母材 No.3	151.2	151.4	0.2	0.1
(c) 母材 No.4	159.8	159.7	-0.1	0.1
(d) 母材 No.5	136.3	133.4	-2.9	2.1
(e) 標準材	128.7	128.6	-0.1	0.1

脆化予測式の開発にあたって、 $\Delta T_{r30}$  は全て整数で扱われていることから、仮に当該プロジェクトの照射温度の仕様を逸脱した試験片を除外したとしても母材 No.1, No.3, No.4 および標準材については  $\Delta T_{r30}$  の値は変わらない。母材 No.5 に対する  $\Delta T_{r30}$  が 3°C 減少することから、母材 No.5 の  $\Delta T_{r30}$  の値 137°C を 134°C に修正し、その変更による影響評価を行うこととした。

### 3. 脆化予測式の再評価

JEAC4201-2013 で採用されている脆化予測式の最適化手法および用いられたデータベースの内容については電力中央研究所報告 Q12007 [2] に記載されており、これと同一条件及び同一データベースを準備して、そのデータベースにおいて母材 No.5 に対する  $\Delta T_{r30}$  を 137°C から 134°C に変化させて予測式の最適化を再実行し、修正後の脆化予測式 (以下、修正予測式という) を得た。

#### 4. 関連温度移行量の計算値 ( $\Delta RT_{NDT}$ 計算値) の変化量の評価

修正予測式と JEAC4201-2013 の予測式より得られる  $\Delta RT_{NDT}$  計算値の比較を行った。

現時点までに取得されている国内の母材及び溶接金属の監視試験 (300 点, 未照射材は除く) の照射条件及び材料の化学組成に対して, 修正予測式を用いて求めた  $\Delta RT_{NDT}$  計算値 (修正) と, JEAC4201-2013 の予測式を用いて求めた  $\Delta RT_{NDT}$  計算値 (2013) の差のヒストグラムを作成し図 1 に示す。  $\Delta RT_{NDT}$  計算値の差の平均値は  $-0.019^{\circ}\text{C}$  であったが, その値は小さく 0 とみなせる。標準偏差は  $0.14^{\circ}\text{C}$  であり, また最大値及び最小値はそれぞれ  $0.53^{\circ}\text{C}$  および  $-0.58^{\circ}\text{C}$  と  $1^{\circ}\text{C}$  未満であった。

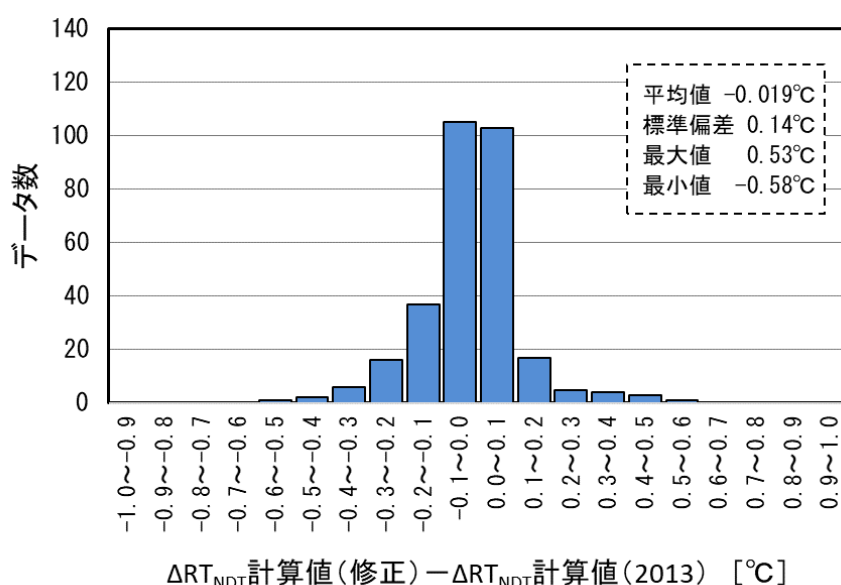


図 1. JEAC4201-2013 と修正係数を用いた  $\Delta RT_{NDT}$  計算値の差のヒストグラム

#### 5. まとめ

現段階で入手できるハルデン炉の温度変更に関する情報に基づいて, 電気協会規格 JEAC4201-2007 [2013 年追補版] に対する影響を評価した結果, 関連温度移行量の計算値 ( $\Delta RT_{NDT}$  計算値) の修正前後での変化量は小さく,  $1^{\circ}\text{C}$  未満であることが分かった。

#### 文献

- [1] NRA 技術情報検討会資料, 資料 50-4 「ノルウェーエネルギー技術研究所ハルデン炉における問題とその影響 (案)」, 令和 3 年 10 月 14 日.
- [2] 曾根田他, 「原子炉圧力容器鋼の照射脆化予測法の改良 —高照射監視試験データの予測の改善—」, 電力中央研究所報告 Q12007, (一財) 電力中央研究所, 平成 25 年 3 月.



平成10年度

実用原子力プラント  
経年変化信頼性等実証試験

事業報告書

平成11年3月

独立行政法人 原子力安全基盤機構  
(財団法人 発電設備技術検査協会)

H10.4.10

## 2) 中性子束

PWR 型原子炉（圧力）容器における高速中性子束（ $E > 1 \text{ MeV}$ ）はサーベイランスカプセル位置では  $10^{11} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  のオーダーであり、原子炉（圧力）容器内表面ではその  $1/3$  程度である。従来までの照射試験の実績（IAEA CRP Phase III での共同研究で実施された照射試験）では、照射試験炉の中性子束は約  $2 \times 10^{12} \sim 10 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  の範囲にある。

一方、米国 California 大学の G.R.Odette らの研究<sup>(1)</sup>によると、照射脆化に対する中性子束の影響が示されているが、評価指標としては硬さに対して調べたものであり、中性子束の上部靱性へ与える影響に対するデータは示されていない。

以上を踏まえ、試験工程等を勘案して高速中性子束は最大  $10 \times 10^{12} \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$  までとする。

## 3) 照射温度

照射温度は、PWR プラントの通常運転時に高速中性子が最も多く照射される部位である原子炉（圧力）容器下部胴の通常運転温度（ $290^\circ\text{C}$ ）に設定する。

昨年度の調査の中で、照射脆化感受性の高い Linde80（フラックス）を用いた溶接金属を  $290 \sim 340^\circ\text{C}$  の照射温度で照射した結果、照射脆化量（ $\Delta \text{USE}$ ）に対する温度の影響は  $0.08\% / ^\circ\text{C}$  程度と見込まれるというデータが得られている（図 2.2.1.1-1）。これを踏まえて、今回の温度域（ $290^\circ\text{C}$ ）で照射温度が  $\pm 10^\circ\text{C}$  変動したとしても、脆化量への影響は約  $2\%$  程度と見込まれる。

また、IAEA 等における過去の試験において、設定温度に対する変動幅は厳しいものでも  $\pm 10^\circ\text{C}$  程度であることも踏まえ、本試験では照射温度を  $290 \pm 10^\circ\text{C}$  とする。

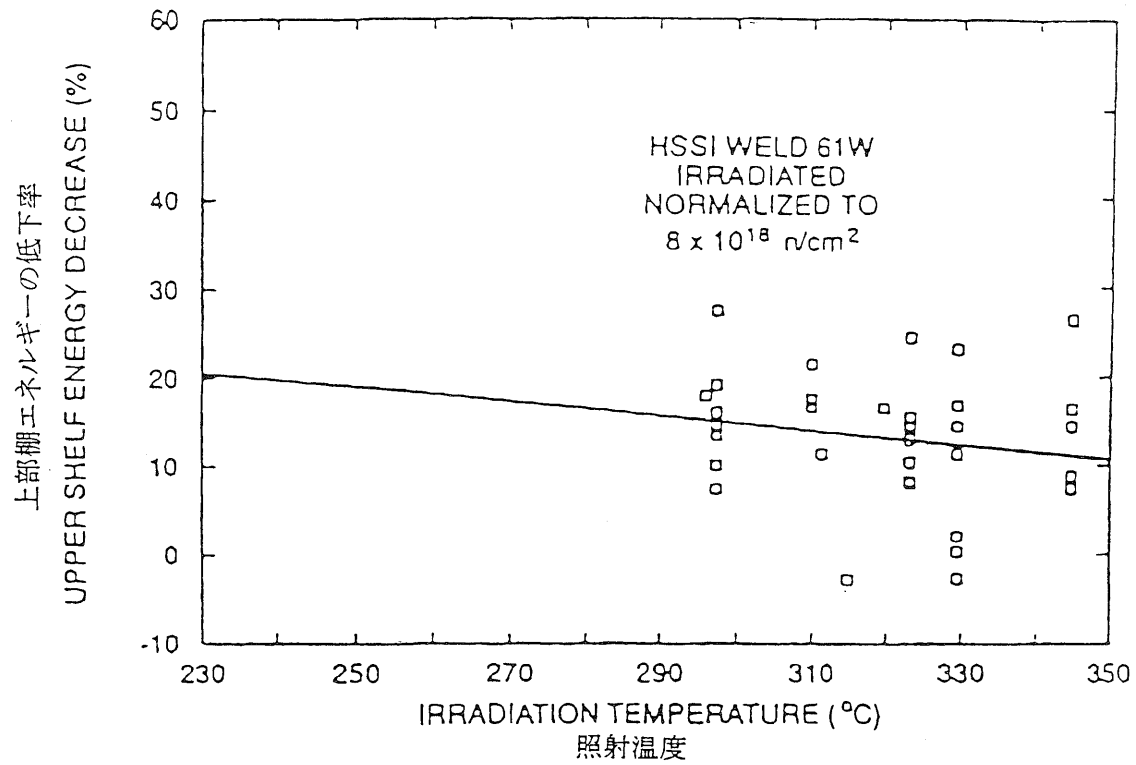


図 2.2.1.1-1 ΔUSE と照射温度の関係[文献 1]