

## ハルデン炉での照射試験における温度変更について

過去当社より委託したノルウェーのハルデン炉での照射試験において、IFE（ハルデン炉を所有する機関）から「要領が明確でない温度変更が行われていた」との報告を受けています。

本資料は、現時点での IFE 及び外部調査機関から得られた情報に基づき、過去のハルデン炉での照射試験結果への影響をまとめたものです。

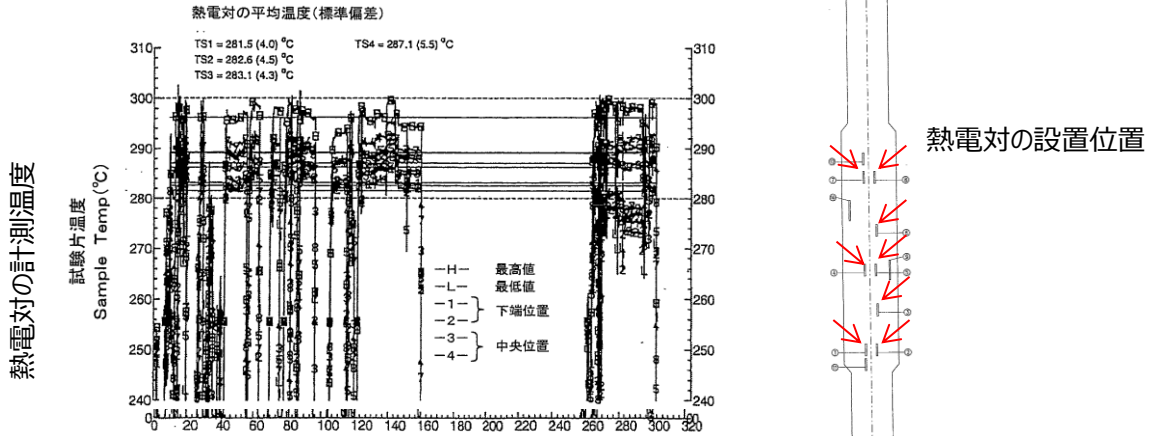
### 1. ハルデン炉に関するプロジェクト

- 当社が IFE に委託したプロジェクトは以下の通りであり、原子炉容器材料の脆化程度を評価するために、原子炉容器と同等の材料（試験片）をハルデン炉で照射している。  
名称：(財)発電技検「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）  
実施内容：原子炉容器の供用期間中の延性破壊防止のため、国内材料に適した照射脆化予測法・破壊靱性予測法を開発し、規格案を作成する（補足1参照）。  
IFE スコープ：試験片照射（加速照射）（\*）照射後の機械試験は別機関で実施。
- 尚、上記プロジェクトで得られたデータは、下記の国内規格・基準へも反映されている。  
JEAC4201「原子炉構造材の監視試験方法」（2004年版以降）  
（上部棚吸収エネルギー減少率の予測式の規定）  
JEAC4206「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」（2004年版以降）  
（上部棚破壊靱性評価式（上部棚吸収エネルギーと破壊靱性の相関式）の規定）

### 2. ハルデン炉での試験概要

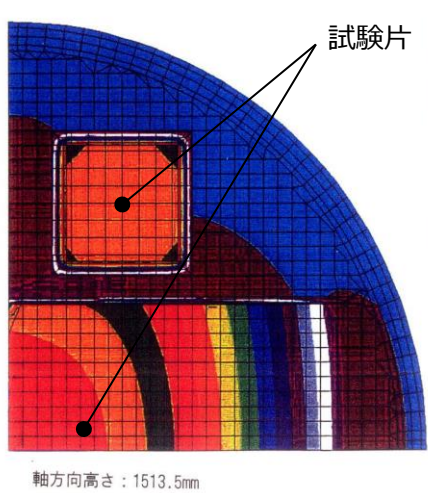
- ハルデンでの照射試験は、機械試験片（以降、試験片）を円筒形の容器（「リグ」と呼ぶ）に配置し、そのリグを炉内に装荷して、リグが予め計画した照射量に達するように照射期間を定めて照射するものである（照射レベル： $3,6,10 \times 10^{19}$  n/cm<sup>2</sup>の3レベル）。
- 照射試験条件として、上記の照射量に加え、照射温度も、国内プラントの原子炉（圧力）容器下部胴の通常運転中温度に設定し、リグ内に温度を計測するための複数個の熱電対を配置し、照射試験中に連続して温度を計測している。
- 照射された試験片は、照射量と試験片温度のパラメータで整理される。試験片温度は、リグ内の温度分布解析（FEM）を実施し、試験片の配置位置での温度として評価される。この温度分布解析の解析条件（ガンマ発熱量）の設定にあたり、リグ内に設置された熱電対により計測された温度が参照されている。（図1、添付1参照）。
- 尚、照射された試験片の機械試験は、IFE ではなく別機関で実施し、IFE のスコープは照射試験のみである。

## 熱電対による温度計測

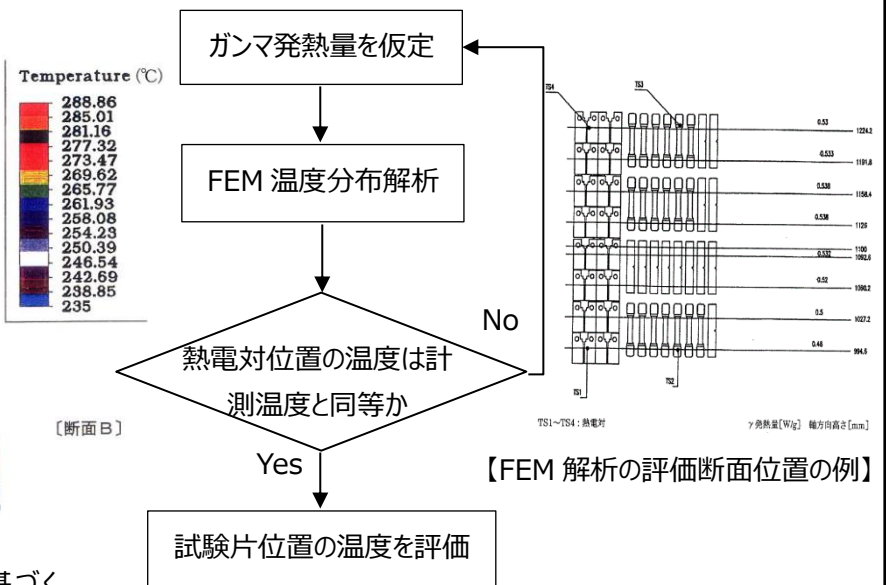


【照射試験中の熱電対の計測温度 (時刻歴) の例】 【照射リグ中の熱電対の設置位置の例】

## FEMによる温度分布解析



【熱電対の計測温度の平均値に基づく FEM 解析による温度コンタ図の例】



【ガンマ発熱量の設定と FEM 解析の流れ】

## 試験片位置での温度評価

FEM 解析により得られた温度分布から、試験片温度として試験片位置での温度を評価。

- 照射リグ内に配置された試験片の照射温度は、リグ内の温度分布解析 (FEM) にて評価される。
- この温度分布解析は、ガンマ発熱量を変化させて繰り返し実施され、解析による熱電対位置の温度が計測温度に極力近くなるようなガンマ発熱量を設定して実施している。

出典: 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) 平成 14 年度原子力プラント機器高度安全化対策技術 (重要機器等脆化評価等) 事業報告書, 平成 15 年 3 月

図 1 ハルデン炉での照射試験における各試験片の照射温度の算出方法

### 3. 温度変更に関する情報

- 外部調査機関による調査の結果、当社が委託したプロジェクトにおいては、以下のとおり熱電対の温度変更が行われていたことが確認されている。
  - ✓ 全リグ（6 体）に対して、各リグ内に配置した 8 個の熱電対のうち特定の熱電対データからの温度換算に、明文化されていない変更アルゴリズムが組み込まれている。
  - ✓ リグ毎の熱電対の時刻歴平均温度は、温度換算の変更前後で、変更前後で差がないものも含め、-9~+8℃となっている（表 1 参照）。

表 1 リグ毎の熱電対の時刻歴平均温度（温度変更前後）

IFA-643.1 (see Figure 4) (リグ No.1)

TS signal	As-measured temperature, °C 計測温度	Amended temperature, °C 変更後温度	$\Delta T$ , °C	Interval over which amended temperature applied
TS1	267	275	8	1999/07/07 – 1999/09/29
TS2	276	279	3	1999/07/07 – 1999/09/29

IFA-644.1 (see Figure 23) (リグ No.2)

TS signal	As-measured temperature, °C	Amended temperature, °C	$\Delta T$ , °C	Interval over which amended temperature applied
TS1	268	275	7	1999/07/01 – 2001/11/24
TS5	306	297	-9	1999/07/01 – 2001/11/24

IFA-645.1 (see Figure 27) (リグ No.3)

TS signal	As-measured temperature, °C	Amended temperature, °C	$\Delta T$ , °C	Interval over which amended temperature applied
TS1	268	273	5	1999/07/17 – 1999/10/09*
TS3	277	281	4	1999/07/17 – 1999/10/09*

\*TS1 and TS3 removed during continued irradiation of IFA-645.1 until 2000/10/26

IFA-646.1 (see Figure 38) (リグ No.4)

TS signal	As-measured temperature, °C	Amended temperature, °C	$\Delta T$ , °C	Interval over which amended temperature applied
TS1	274	278	4	1999/07/01 – 2000/04/29

IFA-647.1 (see Figure 49) (リグ No.5)

TS signal	As-measured temperature, °C	Amended temperature, °C	$\Delta T$ , °C	Interval over which amended temperature applied
TS3	300	300	0	1999/12/20 – 2000/10/06
TS6	299	299	0	1999/12/20 – 2000/10/06
TS7	274	276	2	1999/12/20 – 2000/10/06
TS8	280	283	3	1999/12/20 – 2000/10/06

IFA-654.1 (see Figure 54) (リグ No.6 (照射前期))

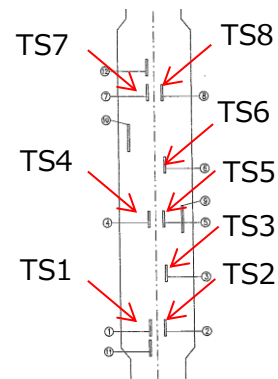
TS signal	As-measured temperature, °C	Amended temperature, °C	$\Delta T$ , °C	Interval over which amended temperature applied
TS4	280	285	5	2000/06/20 – 2000/10/06

【説明】

IFA-\*\*\*,\* : リグ番号 (6 種類)

TS\* : 熱電対番号

$\Delta T$  (°C) : 変更された温度と計測された実際の温度との差



照射リグ内の熱電対の設置位置

#### 4. 温度変更の影響について

今回の事象は、熱電対の計測結果から温度へ換算する際の温度変更であることから、熱電対温度を参照し温度分布解析で評価している試験片の温度への影響を確認し、試験片の有効性を確認する。

##### 4.1 影響評価の考え方

- 照射試験時の試験片における照射温度が企図した温度範囲を外れていた場合は、その試験片は有効ではない。
- 当該プロジェクトにおける破壊靱性の有効範囲は、JEAC4201-2007(2013 年追補版)により、274~310℃である（上部棚吸収エネルギーの減少率の予測式における公称照射温度の適用範囲）。
- 今回の温度変更では、計測温度と変更後の温度では、-9~+8℃の差があることから、これにより、試験片温度が上記の有効範囲内であるかどうかを評価する。

##### 4.2 影響評価の要領と評価結果

熱電対データの温度変更の試験片温度への影響を以下のとおり評価した。

###### a. 評価要領

- 当該プロジェクトにおける当時の評価と同様に、温度分布解析を実施し、リグ内に配置されている各試験片の照射温度を評価する。
- 温度分布解析は、当時の解析モデルが残存しないことから、当時の解析を可能な限り再現して実施し、温度変更される前の熱電対による温度を参照する。
- 温度分布解析は、全リグに対して実施予定であるが、温度変更が最も大きい（-9℃）リグ No.2 に対して先行して実施する（その他リグも解析実施中）。

###### b. 評価結果

- 温度分布解析結果の例を図 2 に、本温度分布解析結果による各試験片の温度変更前の温度範囲を当時評価した温度変更後の温度と比較して図 3 に示す。図 3 より、試験片温度は 275~301℃と評価され、有効な温度範囲内（274~310℃）となっていることが確認された。
- 尚、本評価は、リグ No.2 の結果であるが、その他リグについても、解析が完了次第、評価予定であり、現時点では、その他のリグに対して簡易的に試験片温度を推定しても、有効な温度範囲内（274~310℃）になっていることを確認している（添付 2 参照）。

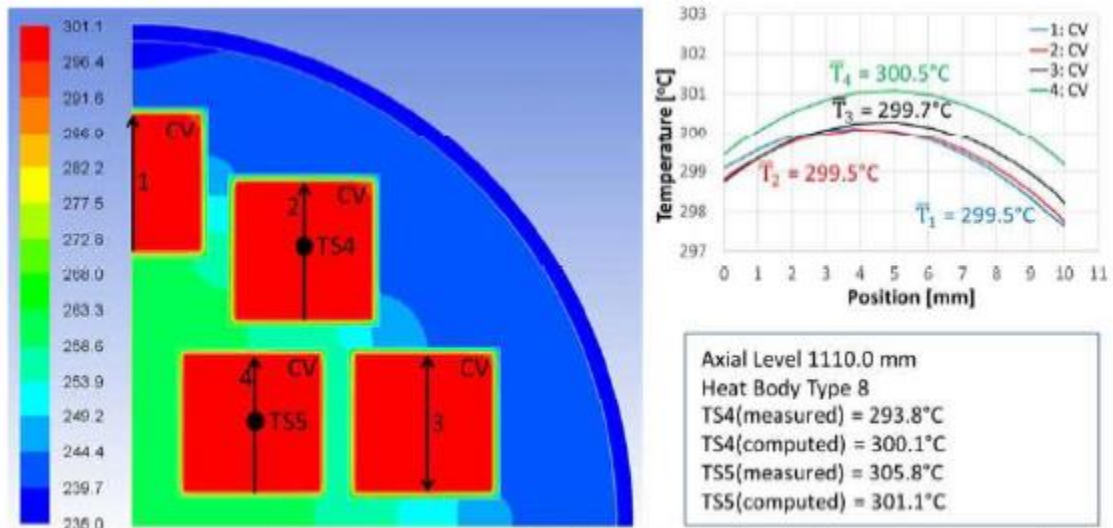


Figure 28. Computed temperatures at axial level 1110.0 mm above the reactor bottom plate.

図2 温度分布解析結果の例

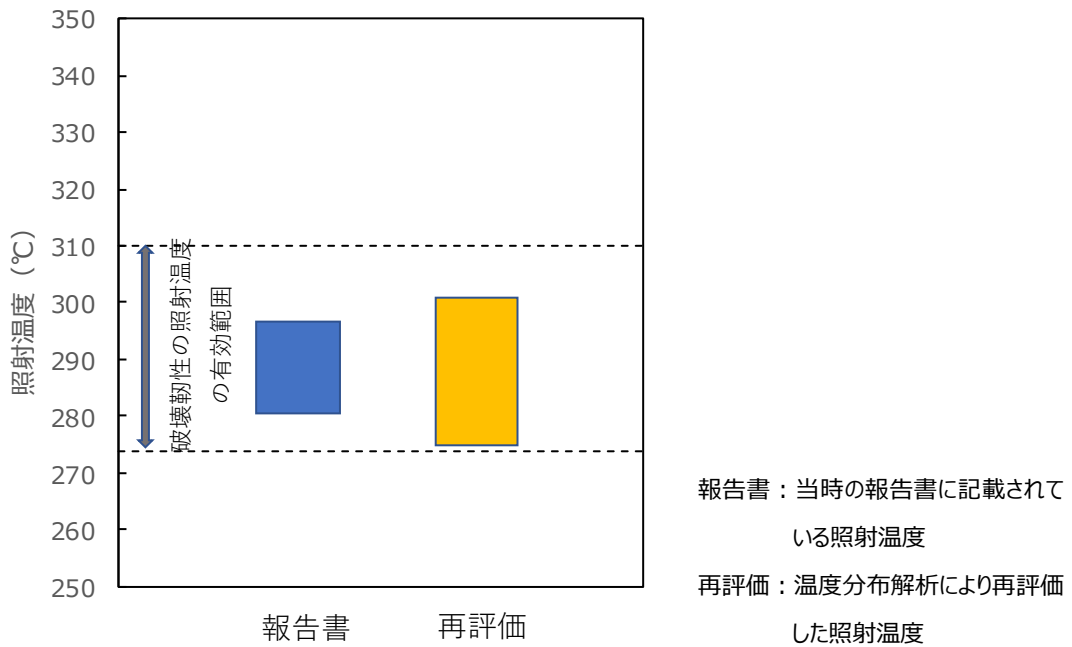


図3 リグ No.2 の試験片の照射温度範囲の比較

## 5. まとめ

ハルデン炉での照射試験における温度変更は、照射試験中の温度に関するものであり、現状確認できている範囲では、試験片の有効性を損なうものではないと評価できる。現時点でも、IFE と調整中であり、IFE から追加情報（No.2 リグ以外の温度分布解析結果）を入手次第、現状評価の妥当性を確認する。

以上

平成13年度

原子力プラント機器高度安全化対策技術

事業報告書

平成14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)

H13.3.87



b. 温度分布解析

各リグの試験片収納部に取り付けられた熱電対の計測データの平均値を基に、各試験片位置における温度分布を FEM 解析により求めた。

解析において、試験片の温度は照射期間の各リグ 8ヶ所に設置した熱電対の時間平均温度を用い、ガス混合比及び試験片とホルダー間のギャップ寸法から熱伝達条件を求め、熱電対位置でのガンマ発熱量を求めた。次に、熱電対位置でのガンマ発熱量軸方向分布から、試験片リグ全長に渡り内挿で求めた。各試験片位置においてこのガンマ発熱量を FEM 解析の入力条件とした。

CT 試験片については試験時き裂の進展するサイドグループ断面の温度を代表とした。全リグの温度評価結果を図 5.2.1.2 - 3 及び図 5.2.1.2 - 4 に示す。リグ No.2 の再照射範囲下端部を除いた全ての試験片は目標値の  $290^{\circ}\text{C} \pm 10^{\circ}\text{C}$  を満足した。

c. 照射量の解析結果

リグ No.2、No.3 のドジメトリワイヤの測定結果を基に、各試験片について以下の照射量等を求めた。

- a. 高速照射量 ( $E > 1\text{MeV}$ 、 $E > 0.1\text{MeV}$ )、熱照射量 ( $E < 0.417\text{eV}$ )
- b. 高速中性子束 ( $E > 1\text{MeV}$ ) の対熱中性子束比
- c. dpa (Fast dpa( $E > 1.23\text{KeV}$ ), Thermal dpa( $E < 1.23\text{KeV}$ )及び Total dpa)

照射量の解析結果を図 5.2.1.2 - 5 及び図 5.2.1.2 - 6 に示す。リグ No.2、3 (高) の目標照射レベルは、 $10 \times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2) \pm 20\%$ ( $E > 1\text{MeV}$ )である。リグ No. 2 の照射量は、 $6.7 \times 10^{19} \sim 13.2 \times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)$  ( $E > 1\text{MeV}$ )、リグ No.3 (高) の照射量は、 $6.1 \times 10^{19} \sim 12.1 \times 10^{19}(\text{n}/\text{cm}^2)$  ( $E > 1\text{MeV}$ )であり、ほぼ目標を達成した。

高速中性子束 ( $E > 1\text{MeV}$ ) の対熱中性子束比は両リグで  $0.11 \sim 0.19$  であり、目標の  $0.2$  を下回った。しかしながら、目標設定のベースとなった実炉の R/V 内表面での高速中性子束 ( $E > 1\text{MeV}$ ) の対熱中性子束比は約  $0.15 \sim 0.22$  であり、試験は実炉に近い値となった。

## 熱電対の温度変更を考慮した試験片温度の簡易的な推定について

熱電対温度の変更による試験片温度への影響は、温度分布解析を実施して確認する必要があるが、ここでは、簡易的な推定方法による影響程度を以下の要領に基づき評価した。

## a. 推定要領

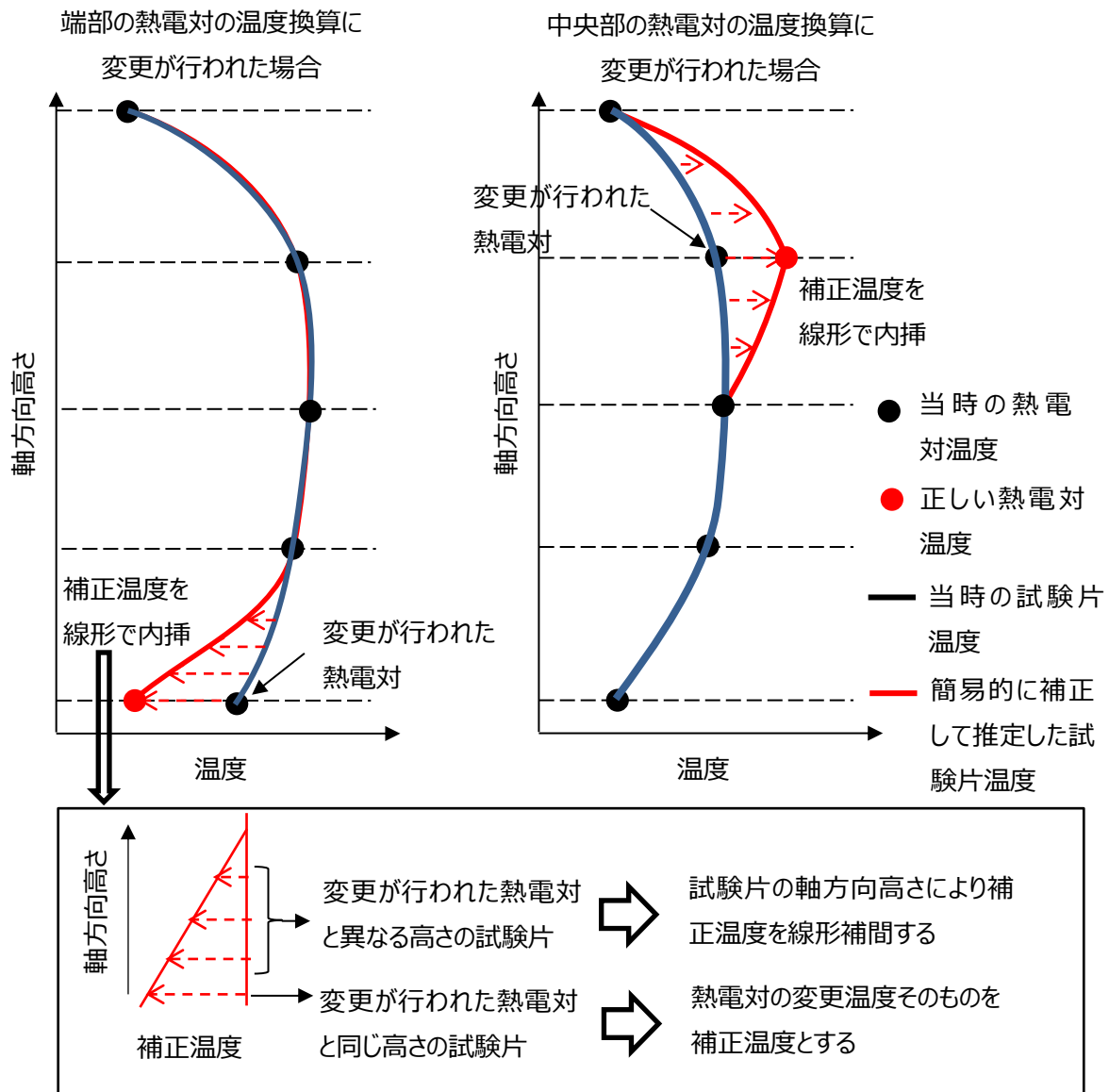
温度変更される前後の熱電対データに基づく温度を基に、以下の要領で簡易的に試験片温度を推定した（図添付 2-1）。

- 各リグ内に 8 個の熱電対が配置され、配置箇所はリグ軸方向に 5 か所に位置することから（同様の軸方向位置に 2 個の熱電対が配置される箇所あり）、リグ軸方向で 4 つの領域を設定する。
- 各リグ内に配置された 8 個の熱電対の内、一部の熱電対に対してのみ温度変更が行われていることから、温度変更が行われていた熱電対を含む軸方向領域にある試験片に対して、温度変更前後の熱電対データに基づき、試験片の温度を推定（補正）する（温度変更が行われてない領域は、その他領域での温度変更の影響は受けないとする）。具体的には以下の通り。
  - ✓ 温度変更された熱電対と同じ軸方向高さにある試験片に対しては、変更温度そのものを補正温度 $\Delta T_m$ とする。
  - ✓ 温度変更された熱電対と同じ軸方向領域にあるが、試験片位置（リグ軸方向高さ）が異なる場合は、試験片位置に応じて温度を補正する（線形補間）。なお、同じ軸方向高さに 2 個の熱電対がある場合には、2 個の熱電対の変更温度の平均値を試験片の補正温度 $\Delta T_m$ とする。

## b. 試験片温度の推定結果

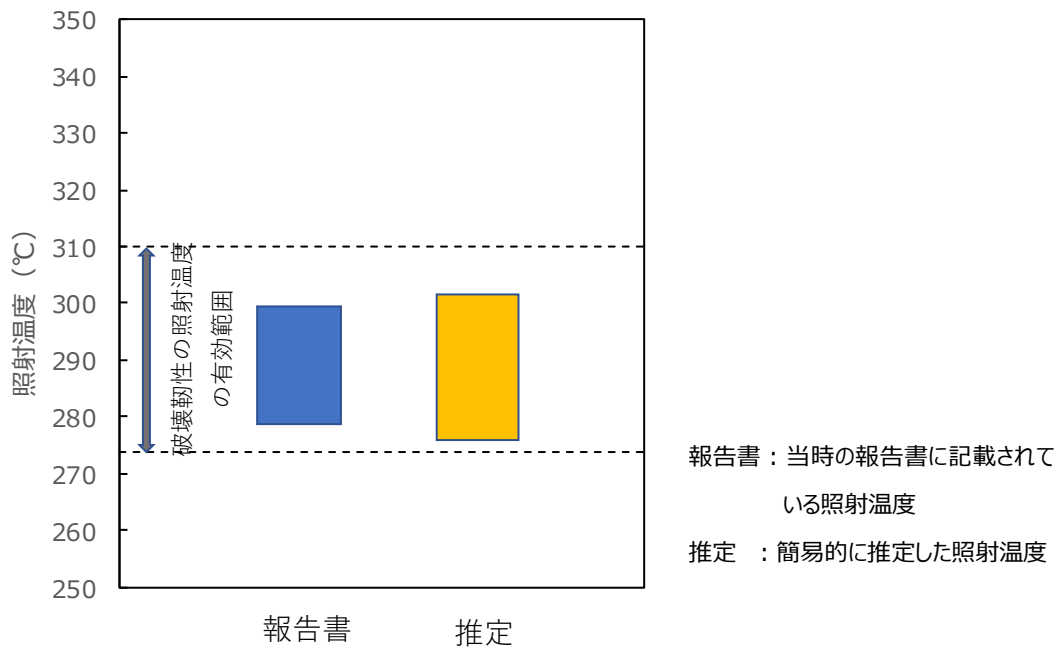
上記の考え方にに基づき推定した温度変更前の試験片温度の範囲を、当時評価した温度変更後の温度と比較して図添付 2-2 に示す。

図添付 2-2 より、温度変更後では 279~300℃であるのに対して、温度変更前では 276~302℃となっていることが確認される。



注) 同じ軸方向高さに二つの熱電対がある場合には、この二つの熱電対の計測温度に合うようにガンマ発熱分布を仮定することになるので、同じ軸方向高さに二つの熱電対がある場合は、その変更温度の平均値の切り上げた値を試験片の補正温度、 $\Delta T_m$ とする。

図添付 2-1 簡易的な試験片温度の補正（推定）方法の概念

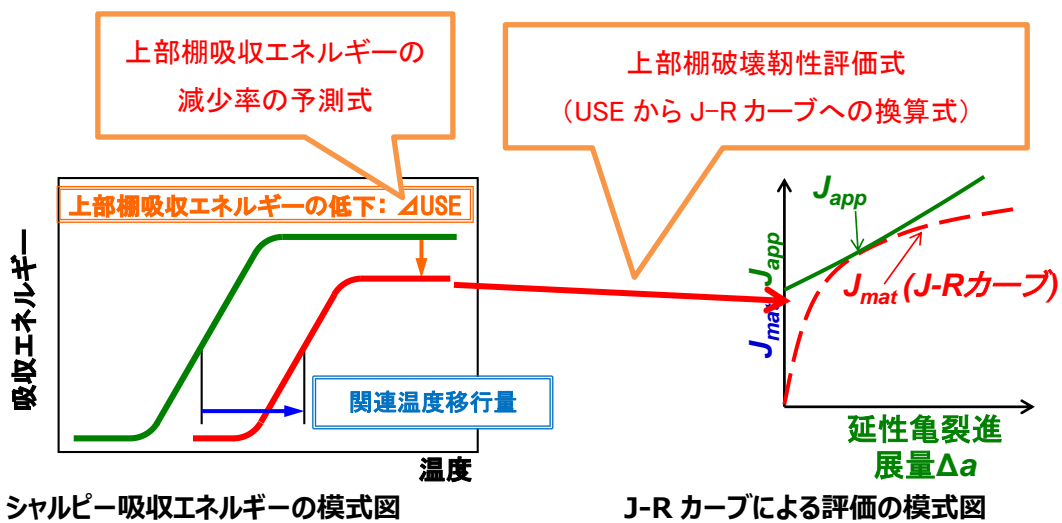


図添付 2-2 全リグの試験片の照射温度範囲の比較

上部棚吸収エネルギーの評価手法

延性破壊が主な破壊形態となるシャルピー遷移曲線における比較的高い温度領域は、上部棚温度領域と呼ばれており、原子炉容器材料の上部棚温度領域におけるシャルピー吸収エネルギー（上部棚吸収エネルギーと呼ぶ）は、中性子照射により減少することが知られている。

本プロジェクトにおいては、中性子照射による上部棚吸収エネルギーの減少率の予測式が開発された。また、延性破壊に対する弾塑性破壊力学評価に使用する破壊靱性としては J-R カーブが使用されることから、上部棚吸収エネルギーから J-R カーブに換算するための換算式が開発された。



- 中性子照射により脆化が進み、シャルピー吸収エネルギー（上部棚吸収エネルギー）が減少する。
- その減少程度を予測するために、データベースの一部として、ハルデンで照射した材料の試験データを活用し、予測式を開発し、規格化されている。

規格：JEAC4201

「原子炉構造材の監視試験方法」

- 照射脆化が進み、その状況下で荷重が作用しても、延性破壊を生じないことを示すために、J-R カーブによる評価を実施している。
- 評価に必要な材料特性（J-R カーブ）をハルデンで照射した試験データで策定している。
- 尚、 $J_{app}$  は、欠陥を想定すれば荷重条件に応じて評価できるものである。

規格：JEAC4206

「原子力発電所用機器に対する破壊靱性の確認試験方法」