

平成24年（行ウ）第15号 東海第二原子力発電所運転差止等請求事件

原告 大石 光伸 外265名

被告 国 外1名

### 準備書面（45）

原発の老朽化～原子炉圧力容器が脆性破壊される可能性について

2017（平成29）年4月27日

水戸地方裁判所民事第2部 御中

原告ら訴訟代理人弁護士 河合 弘 之  
外

#### 1. 脆性破壊とは

金属は、一般的な性質として、延性を有している。

原告らの準備書面（42）の22頁で述べたとおり、金属に力を加えた場合、ある一定の力までは弾性的に変形する。しかし、弾性限界を超える力を加えると、金属は塑性変形を起こし、やがて破壊に至る。引張り等の応力を加えた際に変形する金属の能力を延性といい、塑性変形を伴って発生する破壊現象を延性破壊という。

ところが、この延性破壊とは別の現象として脆性破壊というものがある。脆性破壊とは、延性が低下して硬く脆くなった金属、すなわち脆化した金属に力を加えた場合に、塑性変形をほとんど起こすことなく、突然に破壊に至ることをいう。

原告らは、本準備書面において、東海第二原発のように長期間稼働した古い原発で脆性破壊が発生する可能性のあることを主張するもので

ある。

## 2. 圧力容器鋼材の中性子照射脆化について

原子力発電は、原子炉圧力容器（以下「圧力容器」という）の内部で、燃料であるウラン<sup>235</sup>の核分裂反応によって発生する熱を蒸気に換え、その蒸気でタービンを回して発電する仕組みである。

圧力容器の金属材料である鋼材は、前記の核分裂反応が継続する間、強力な中性子の照射を受け続ける。金属に中性子が照射されると、格子状に配列した金属の原子が配列の外にはじき出される。はじき出された原子は格子の空間部分へと移動し（格子間原子）、それまで原子が存在していた格子点は欠陥点となる（空格子点）。これら格子間原子や空格子点は、さらに移動や合体、時として消滅を繰り返し、欠陥集合体を形成する。欠陥集合体は、金属に応力が作用した場合、摩擦を与えたり固着を発生させたりして金属の変形を阻害する。また、鋼材に含まれる銅などの不純物原子も空格子点を介して移動し、集合体（銅クラスター）を形成する。以上の結果、金属の延性が低下し、脆性破壊を発生させる素地が形成されるのである。この現象を中性子照射脆化（以下「照射脆化」という）といい、原発の場合、圧力容器の照射脆化は、発電システム上、避けて通ることのできない問題である。

## 3. 照射脆化した圧力容器が脆性破壊を引き起こすまでの経過

照射脆化した金属材料は、当該金属材料内に存在しうるクラックや異物の混入等の欠陥に応力が作用し、かつ、後述する脆性遷移温度よりも当該金属の温度が下がった場合に脆性破壊することがある、といわれている。

そもそも原発は、圧力容器の内圧に加えて、自重や鋼材溶接時の残留

応力など、応力の作用が不可避なプラントである。また、鋼材を製造する際にクラック等の欠陥を完全に排除することも不可能である。

脆性遷移温度について説明すると、金属材料は、温度の低下に伴って延性が減少していく性質を有している。延性を喪失して脆性破壊を起こすおそれのある温度を脆性遷移温度という。問題は、金属材料が中性子照射を受ければ受けるほど、脆性遷移温度が高温側に移行していくことである。このため、運転年数を重ねた原発では、当然に脆性遷移温度も上昇している。

稼働中の圧力容器は非常に高温であるが、定期点検等で運転を停止したり、原子炉がスクラムして非常用炉心冷却装置（ECCS）が作動して炉心に冷水が注入された場合には、圧力容器が低温下の環境に晒されることになる。このときに、圧力容器内面にクラックなどの欠陥が存在し、中性子照射によって上昇した脆性遷移温度以下に圧力容器が冷やされ、クラックなどの欠陥の先端に生じる引張応力の大きさが鋼材の破壊強度を超える事態が重なってしまうと、圧力容器が脆性破壊に至ることが想定される。

以上の問題とは別に、鋼材の性質は、含まれる炭素や様々な元素の存在によって大きく変化する。例えば、炭素が増えると硬くなり、引っ張り強さが増える反面、粘り強さ（靱性）を失う。リンや硫黄などの不純物元素も靱性を低下させる。靱性の喪失ないし低下は、脆性破壊に対する抵抗力が弱い状態にあることを意味する。2項で述べたとおり、鋼材に銅が多く含まれていると、銅クラスターの形成によって照射脆化がさらに促進されることも判明している。

このように、長期間稼働した原発では、脆性破壊は極めて深刻な懸念材料であって、これも原発の老朽化をめぐる重要な争点のひとつである。

#### 4. 照射脆化進行の監視方法、特に監視試験片について

圧力容器は、他の機器や配管と異なり、原発の心臓部であって、その機能と構造が巨大であることや、放射化して強い放射能を有していることなどの理由によって、新品に取り換えることができない。そこで、照射脆化の進行が圧力容器の破壊につながらないように、照射脆化の状況を定期的に監視し、その進行を予測する対策がとられている。この場合、監視と予測に失敗すれば、圧力容器の破壊によって冷却材が喪失し、炉心の損傷、さらには格納容器の破壊を引き起こし、大量の放射能放出という重大な事故に発展する可能性を否定することができない。それでは、現在行われている監視と予測は、はたして圧力容器の照射脆化状況を正確にとらえているのであろうか。

照射脆化進行の定期的監視は、圧力容器内に設置した監視試験片を取り出し、試験結果を評価することにより行われている。また、脆化進行の予測は、従前、材料試験炉という施設で短期間に集中して圧力容器鋼材と同じ鋼材に中性子照射を行ない、得られたデータを基に考案された脆化予測式によって行われていたが、近年は実機のデータも一部採用したうえでの予測式が用いられている。

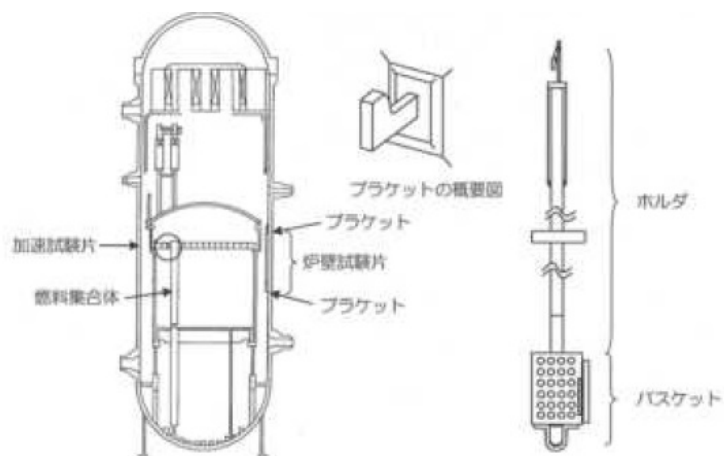
さて、監視試験片は、当該原発の圧力容器と同じ製造履歴を持つ鋼材から切り出したものである。圧力容器は何枚かの鋼板を溶接で接合させて製造されるが、その鋼板の一部から監視試験片が作られている。切り出される監視試験片は母材、溶接金属、熱影響部の3部分にわたる。

監視試験片はカプセルに詰め、たうえで圧力容器内に装荷される。一定期間の供用による中性子照射後に取り出して行われる試験には、引張り試験・シャルピー衝撃試験の二種類があり、そのために装荷されるカプセルにはそれぞれの用途のために複数の監視試験片が詰められている。監視試験片の個数については、引張り試験用として、母材3個以上、溶

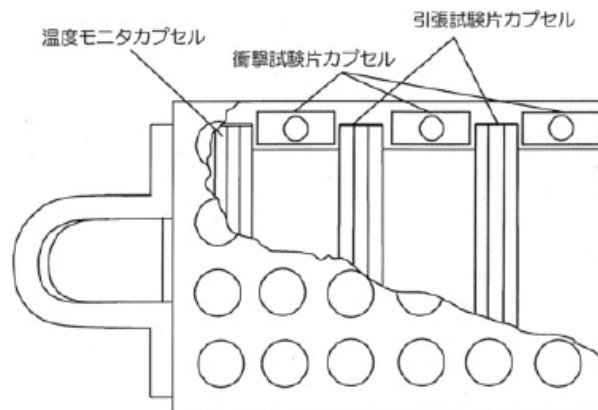
接金属 3 個以上、また、シャルピー衝撃試験用として、母材 1 2 個以上、溶接金属 1 2 個以上、熱影響部 1 2 個以上、と定められている（日本電気協会『原子炉構造材の監視試験方法〈J E A C 4201-2007 2013 年追補版〉』より）。

東海第二原発に関しては、監視試験片を詰めたカプセルの構造、及び、圧力容器内におけるカプセルの取付位置が公表されていない。もっとも、原子力規制委員会のウェブサイトには、国内プラント（BWR）における試験カプセルの設置状況を図示した資料が掲載されており

[（http://www.nsr.go.jp/data/000144706.pdf）](http://www.nsr.go.jp/data/000144706.pdf)、参考のためにその一部を抜粋して以下のとおり図示する（東海第二原発においても、おそらくこれに近い状況にあると推測される）。6 項で述べるとおり、監視試験片の採取方法は、監視試験の結果を左右しかねない重要事項であって、その前提問題として、監視試験片の取付状況についても正確に知っておく必要がある。



(a) 試験カプセルの取付位置



(b) 試験カプセルの構造例

なお、脆性遷移温度との関係では、シャルピー衝撃試験がとりわけ重要である。

シャルピー衝撃試験とは、振り子型のハンマーで監視試験片に衝撃を与え、破壊に要したエネルギーからその材料の衝撃値を求める試験であって、監視試験片にV型のノッチ（切り欠き）を付け、試験片の両端を支持台に置き、ノッチの背面をハンマーで打撃する。脆性遷移温度は、シャルピー衝撃試験での吸収エネルギーが41J（ジュール）になるときの温度と定義されている。

## 5. 公表された監視試験片の試験結果について

被告日本原電は、同社のウェブサイトにて、圧力容器から取り出した監視試験片の試験結果を公表している。

被告日本原電が設置した沸騰水型原発は2機存在する。1機目が1970年3月に運転を開始し2015年4月に廃炉が決定した敦賀原発1号機であり、2機目が東海第二原発である。

まず、敦賀原発1号機の監視試験片取出し結果は以下の表のとおりである。

## 監視試験片取出し結果（1／2）

### 敦賀発電所1号機（BWR）

2008年8月末現在

監視試験	照射量 ( $\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ )	脆性遷移温度 (°C)			上部棚吸収エネルギー (J)		
		母材	溶接金属	熱影響部	母材	溶接金属	熱影響部
初期値	0	-23	-23	-23	152	168	184
第1回	0.0045	-5	-16	-14	171	155	170
第2回	0.0079	-18	-15	-19	185	156	169
第3回	0.15	13	4	34	149	154	163
第4回	0.18	37	8	22	151	158	167
第5回	0.047	16	16	26	160	153	146
第6回	0.094	51	43	49	139	148	148

次に、東海第二原発の監視試験片取出し結果は以下の表のとおりである。なお、「関連温度」とは、脆性遷移温度のことである。

## 監視試験片取出し結果（2／2）

東海第二発電所(BWR)

2017年1月末現在

監視試験	照射量 ( $\times 10^{19}\text{n/cm}^2$ )	関連温度(°C)			上部棚吸収エネルギー(J)		
		母材	溶接金属	熱影響部	母材	溶接金属	熱影響部
初期値	0	-25	-25	-25	202	188	205
第1回	0.053	-21	-23	-14	220	212	218
第2回	0.011	-22	-26	-16	202	197	200
第3回	0.026	-18	-25	-5	199	174	191
第4回	0.029	-10	-27	-30	220	215	240

(以上の2件の表は、被告日本原電のウェブサイトのうち、

[http://www.japc.co.jp/safety/maintenance/content\\_01.html](http://www.japc.co.jp/safety/maintenance/content_01.html) に添

付された「監視試験片取出し結果」より引用した)

被告日本原電のウェブサイト上では、監視試験の実施時期が特定されていないが、2017年2月2日、被告日本原電は、原子力規制庁に対して、東海第二原発に関する第4回監視試験の結果を、書面をもって報告しており、同書面は、原子力規制委員会のウェブサイトで公表されている (<http://www.nsr.go.jp/data/000177987.pdf>の添付書類)。同書面には、第1回監視試験が昭和56年(1981年)9月に、第2回監視試験が昭和61年(1986年)2月に、第3回監視試験が平成10

年（1998年）1月に、第4回監視試験が平成26年（2014年）2月にそれぞれ実施されている旨の記載がある（なお、第1回監視試験については、加速試験、すなわち、実際の使用時間ではなく、測定時間を実使用時間よりもはるかに短縮させた試験として行なわれたとのことである）。要するに、東海第二原発では、監視試験片を詰めたカプセルが、少なくとも4個、圧力容器内に装荷されていたことが分かる。

敦賀原発1号機の監視試験結果によると、脆性遷移温度の初期値が、母材、溶接金属、熱影響部のいずれも $-23^{\circ}\text{C}$ であったのに対して、最終の第6回目の試験では、母材 $51^{\circ}\text{C}$ 、溶接金属 $43^{\circ}\text{C}$ 、熱影響部 $49^{\circ}\text{C}$ と、脆性遷移温度が大きく上昇している。

他方、東海第二原発の監視試験結果は、脆性遷移温度の初期値が、母材、溶接金属、熱影響部のいずれも $-25^{\circ}\text{C}$ であったのに対して、最新の第4回目の試験では、母材 $-10^{\circ}\text{C}$ 、溶接金属 $-27^{\circ}\text{C}$ 、熱影響部 $-30^{\circ}\text{C}$ と脆性遷移温度がほとんど上昇していないだけでなく、溶接金属や熱影響部に至っては初期値よりも低いという不自然な経過をたどっている。

#### 6. 監視試験片は圧力容器の照射脆化を正しく反映したものといえるか

監視試験片は圧力容器壁の内側に配置されているから、中性子照射の条件も炉内水流の温度も、圧力容器鋼材そのものが受ける状況とは異なっている。また圧力容器鋼材と同じ製造履歴を持つ鋼材とはいえ、切り出しの場所や方向によって不純物の含有状況の割合に違いがありうる。そうしたことを踏まえると、照射脆化の状況が監視試験片と現実の圧力容器鋼材とでまったく同じとはいえないのである。

さらに衝撃的な事実がドイツの原発からもたらされた。ドイツでの商業用初の原発であったグンドレミンゲン原発A（沸騰水型軽水炉25.



2万kW)は1977年に廃炉にされ、その後圧力容器鋼材の切出しが行われた。そこで判明したのは、切り出しの位置や方向によって脆化の程度が著しく異なっていたという事実だった。例えば方向の違いでは、軸方向(破壊の方向は円周方向)のものは著しく脆化し、円周方向(破壊の方向は上下方向)のものはあまり脆化していなかったという。これは鋼材製造時の圧延方向に関連していると考えられる。

東海第二原発の圧力容器の照射脆化を考える場合においても、監視試験片の採取方法いかんによっては、それが示す監視試験結果は脆化の過小評価になりうるし、少なくとも監視試験片の示す脆化の状況が圧力容器鋼材の脆化状況を代表するものと評価することに疑問があるということである。5項記載のような不自然な監視試験結果が導き出された原因も、この点にあった可能性を否定できない。

よって、原告らは、監視試験片の有効性を確かめるとともに、照射脆化の予測が適切に行なわれているか否かを検証するにあたっては、以下の「回答を求める事項」が明らかにされていなければならないと思料し、被告日本原電に対して、以下の第1ないし第3の事項について、次回期日前に書面で回答されるよう求める次第である。

#### [回答を求める事項]

第1 東海第二原発において過去4回にわたり実施された監視試験ごとに、以下の点を明らかにされたい。

- ① 監視試験片は圧力容器鋼材のどの箇所から採取されたものか、鋼材の溶接箇所との関連、ならびに、圧延方向との関連も含めて図示していただきたい(採取箇所が複数にわたる場合は、採取箇所ごとに明らかにされたい)。また、監視試験片を実際に採取した圧力容器鋼材が圧力容器のどの部位に用いられているのか図示していただきたい。

② 監視試験片を詰めたカプセルは圧力容器内のどの部位に装荷されていたのか図示していただきたい。

第2 東海第二原発の監視試験片を切り出した鋼材について、被告日本原電は、製造段階で自ら成分分析を実施しているか。あるいは、成分分析に関するデータを鋼材メーカーから受け取っているか。もしそうであるならば、鋼材に含有する元素（炭素、リン、硫黄、銅、ニッケルなど）の化学分析値を示していただきたい。また、東海第二原発の監視試験の際に、含有する元素の濃度に関する分析を実施したことがあるか。実施しているのであれば、いつ、どの監視試験片を対象に行なったのか、具体的な部位も含めて示すとともに、実際に得られた化学分析値も示していただきたい。

第3 被告日本原電が公表した東海第二原発に関する監視試験結果（5項記載の「監視試験片取出し結果（2／2）」）の正確性を確認する必要があるので、シャルピー衝撃試験、引張り試験、中性子照射量、照射温度の実測データなど、監視試験の際に得られた原データを全て示していただきたい。