

副 本

平成23年(ワ)第886号 浜岡原子力発電所運転終了・廃止等請求事件
原 告 石 垣 清 水 外33名
被 告 中 部 電 力 株 式 会 社

証 拠 説 明 書 (19)

平成31年2月25日

静岡地方裁判所民事第2部合議B係 御中

被告訴訟代理人弁護士 奥 村 救 軌
外11名



前記当事者間の頭書事件に係る平成30年12月4日の進行協議期日において、原告らの同年3月15日付け準備書面37に対する同年11月27日付け被告準備書面(31)における反論について、「疲労評価に関して補足を検討する」(同年12月4日進行協議調書)とされたことに鑑み、被告は、証拠を提出するとともに下記のとおりその説明をする。

記

乙B号証(原子力発電所の自然的立地条件(地震, 地盤, 津波等)に関するもの)

乙B第108号証 原子力耐震工学(抜粋)

[表紙, 目次, 77~90頁, 奥付]

作成者 濱田政則, 曾田五月也, 久野通也

作成年月日 平成26年12月20日

原本・写しの別 原本

立証趣旨

○原子力発電所の機器の耐震設計の概要と、そこで行われる疲労評価に関して、以下のことを証する。

- ・ 原子力発電所の機器(配管を含む。以下同じ。)の耐震設計は、対象となる機器を重要度に応じて耐震クラスS, B, Cに分類したうえで、各耐震クラスに応じた考慮すべき地震力に対して設計を行うものであり、耐震重要度や設計条件等を基に対象機器の構造を決定し、解析等により健全性を確認するとの流れで実施されること(78頁)
- ・ 具体的な機器の耐震設計は、①機器構造・配置・据付計画として、機器の耐震重要度や設計条件を基に基本構造, 配置及び据付け方法を計画する, ②機器主体構造設計として、一般社団法人日本機械学会の

「設計・建設規格」等の技術基準に基づき機器の具体的な形状や寸法、使用する材料、板厚の設計を行う、③耐震支持構造概念設計として、機器の耐震性を高める耐震サポートの設計を行う、④設計用地震力の算定として、基準地震動に基づいて対象の機器が設置されている位置の地震動を求め、これを対象の機器の解析モデルに入力するなどして、設計上用いる地震力を算定する、⑤解析による評価として、設計用地震力と機器に想定される自重や内圧等による解析をそれぞれ行い、これらの荷重の組合せを考慮して発生応力等を算出する、⑥試験による評価として、必要に応じて動的機能維持評価を行い、地震時に機器に発生する加速度や変位が既往の加振試験で機能維持が確認された加速度や変位以下であることを確認する、⑦健全性評価として、解析及び試験の結果、発生応力などが許容値を満たすことを確認するとともに、許容値を満たさない場合には、構造の変更や耐震サポートの位置等を見直して再度解析を実施し、許容値を満たすまでこの手順を繰り返す、との流れであること（78、79頁）

・ Sクラスの機器の耐震設計に当たっては、基準地震動 S_s による地震荷重（地震力）に、運転時に加わる自重及び内圧等による荷重を加算して発生応力を算定し、強度評価を行うものであって、その際には、機器の損傷を防止するため、延性破壊や疲労損傷といった機器の破損様式を踏まえ、発生応力を、一次応力、二次応力及びピーク応力に分類していること（82頁）

・ 原子力発電所の機器の耐震設計に用いられる許容応力（許容値）は、耐震クラスや機器の種類、応力の種類（一次応力、二次応力及びピーク応力）に応じて設定され、このうち、一次+二次+ピーク応力に対するものとして疲労評価に基づく疲労累積係数の許容値（1.0）が設定されていること（83頁）

この点に関し、耐震クラスがSクラスの配管について具体的に述べれば、乙B第103号証340頁には、耐震クラスがSクラスである、圧力バウンダリを構成する配管(クラス1配管)の許容応力(許容値)が示されている。そこでは、配管に発生する応力を、一次応力、二次応力及びピーク応力に分類したうえで、一次応力について、許容応力(許容値)として $3S_m$ (設計応力強さの3倍)等を設定しており、基準地震動 S_s により発生する一次応力とその他の荷重による一次応力とを足し合わせた応力がこれを下回ることを確認して、当該配管に延性破壊が引き起こされるような過大な一次応力が発生しないことを確認するとしている。次に、一次+二次応力について、許容応力(許容値)として $3S_m$ を設定しており、基準地震動 S_s により発生する一次+二次応力がこれを下回るか否かを確認して、当該配管が全体として弾性挙動の範囲にあるかどうかを確認するとしている。更に、一次+二次+ピーク応力について、機器主体構造設計において用いられる設計・建設規格(乙B第104号証)に定められた疲労評価を行って疲労累積係数が1.0以下であることを確認するとの許容値を設定しており、基準地震動 S_s により発生する一次+二次+ピーク応力の繰り返しを考慮しても、当該配管が損傷するおそれがないことを確認することとしている。

○原子力発電所の機器の耐震設計の結果生ずる耐震上の余裕に関して、以下のことを証する。

- 原子力発電所の機器の耐震設計の信頼性を実証するため、安全上重要な機器について実物大モデルの試験体等を用いて大型振動台により、設計上想定している地震動を上回る地震動を入力して加振試験が行われ、耐震上の余裕が十分にあることが確認されており、とりわけ、

多度津工学試験所において行われた配管系の加振試験では、振動台に固定された実際の配管系に対して設計許容限界（許容値）の8.5倍の応力レベルを用いた加振を繰り返したうえで、5回目の地震波加振中に配管が疲労損傷したとの結果が得られたことから、原子力発電所の安全上重要な配管に非常に大きな耐震上の余裕があることが確認されていること（86～88頁）

乙B第109号証 機械工学便覧 基礎編 応用編（抜粋）

[表紙, A4編表紙, A4編目次, A4-116～136頁, 奥付]

作成者 社団法人日本機械学会 編

作成年月日 平成元年9月30日

原本・写しの別 原本

立証趣旨

○変動応力に対する保守的な疲労評価の方法に関して、以下のことを証する。

- ・ 応力振幅が変動する場合の疲労寿命の推定は、通常、マイナー則（Miner's law）と呼ばれる線形被害則（線形累積損傷則）を用いて行われること（A4-122頁）
- ・ マイナー則は、疲労曲線（応力の大きさと疲労による破損に至るまでの繰り返し数との関係等を示した曲線）において、一定応力振幅 σ_i のときの寿命を N_i とするとき、 σ_i の n_i 回の繰り返しの被害を n_i/N_i と考え、これをすべての σ_i について線形に加算し、 $D = \sum n_i/N_i$ として疲労損傷度 D を求め、 $D=1$ のときに寿命であるとする方法であること（同頁）
- ・ 変動応力に対する保守的な疲労評価の方法には、修正マイナー則による方法や、疲労評価の寿命に対して安全率を考慮する方法があると

されていること。すなわち、疲労限度以下の応力の頻度が多く、設計上これらによる影響を考慮する場合には、S-N曲線（疲労曲線）の傾斜部分をそのまま長寿命域に延長したうえで上記の $D = \sum n_i / N_i$ との式を適用する修正マイナー則（modified Miner's law）と呼ばれる方法や、マイナー則のDの値に安全率を取り、 $D = 0.2$ ないし 0.3 のときに寿命であるとする方法が採られていること（同頁）

- 米国機械学会の原子力施設用機器の設計規格である ASME Boiler & Pressure Vessel Code, Section IIIでは、機器に作用する応力を、外部から加えられる力に平衡して発生する一次応力、周囲から自由な変形が拘束されることにより生じる二次応力及び応力集中等によって局部的に発生するピーク応力に分類し、これらが許容応力（許容値）以下となるよう設計することとしており、このうち、ピーク応力に対する設計が必要となる場合には、ピーク応力が発生する部分は、局部的に塑性変形が発生しても周囲の変形に拘束されて一定のひずみが繰り返されることとなることを踏まえ、繰り返しひずみを試験片に加えて疲労試験を行い、このような疲労試験によって求められた疲労曲線に対して、安全率として応力で2、寿命で20（この安全率は、上記の疲労試験によって求められた疲労曲線を用いて求められる破損に至る疲労損傷度を $D = 1$ と仮定すれば、 $D = 0.05$ 以下のときに寿命であることに相当する。）を考慮して定めた許容応力線図（設計疲労線図）を用いて設計上の評価を行うとしていること、すなわち、ASME Section IIIにおいては、修正マイナー則を用いるのではなく、疲労曲線全体に安全率を考慮した設計疲労線図を用いることによって、寿命に対して安全率を考慮したのと同様の結果となるようにしていること（A4-135, 136頁）

この点に関し、一般社団法人日本機械学会が策定した設計・建設規

格（乙B第104号証）は、「本付録の設計疲労線図の表は、ASME Sec.Ⅲ Appendix Iをベースにした」（同号証I－解説4－147頁）としており、「ひずみ制御完全両振り疲労試験を行って求めた応力と繰返し回数の関係から、応力に対して2倍の安全率、繰返し回数に対して20倍の安全率を考慮して作成されたものである」（同48頁）として、上記のASME Section IIIと同じ疲労評価方法を用いている。

乙B第110号証 原子力教科書 原子炉構造工学（抜粋）

[表紙, 目次, 138, 139頁, 奥付]

作成者 上坂充, 鬼沢邦雄, 笠原直人, 鈴木一彦

作成年月日 平成21年4月20日

原本・写しの別 原本

立証趣旨

○原子力発電所の機器の耐震設計において行われる疲労評価の保守性に関して、以下のことを証する。

- ・ 軽水型原子炉（軽水炉）の設計における疲労評価の目的は、構造物に疲労き裂が生じないことを保証することとされていること（138, 139頁）
- ・ 設計疲労線図の作成においては、疲労試験データの回帰曲線として最適疲労曲線を求めたうえで、これに対して、サイクル数（繰返し数）に対し20、応力振幅に対し2の設計係数（安全率）を除して、その包絡線（両者のうちいずれか下側となる線）を設計疲労曲線としていること。このうち、上記の応力振幅に対する設計係数（安全率）は、サイクル数（繰返し数）に対する設計係数（安全率）だけでは高サイクル疲労側で許容応力振幅が変わらないことから、高サイクル疲労側において設計疲労曲線を更に押し下げ、考慮する応力の範囲に

保守性を持たせるために設定されたといわれていること（同頁）

- ・ 設計疲労線図の保守性を定量的に把握するため、実機構造物を用いた疲労試験が米国で行われ、その結果、実機構造物において、疲労き裂の発生は設計疲労線図から求まる許容サイクル数（許容繰返し数）以下では観察されず、き裂成長も、許容サイクル数（許容繰返し数）の3倍までは生じていないことがわかったとされ、設計疲労線図自体に大きな保守性があるとされていること（139頁）

乙B第111号証 金属疲労の基礎と疲労強度設計への応用（抜粋）

〔表紙，目次，1～13，84～113頁，奥付〕

作成者 中村宏，堀川武

作成年月日 平成25年6月25日

原本・写しの別 原本

立証趣旨

○変動応力に対する保守的な疲労評価の方法に関して、以下のことを証する。

- ・ 鉄道車両の板車輪やたわみ板ばねの寿命がマイナー則を用いて推定した寿命の $1/100 \sim 1/1000$ になるとの実例が報告され、これにより疲労限度以上の過大応力と過小応力が組み合わされた場合には、過小応力が疲労損傷累積に及ぼす影響が大きいとされることを踏まえても、実用的には線形累積損傷則が便利であり、例えば推定寿命に10倍の安全率を設定して対応することも一つの考え方であるとされていること（98，104頁）
- ・ 疲労寿命推定を行うに当たって、過大応力と過小応力が組み合わさって作用して過小応力の影響が無視できない場合には、 $\sum (n_i / N_i) = 1$ との式に1ではなくて0.3の値を使うことがある、すな

わち、疲労寿命に3倍の安全率を考慮することがあるとされていること。また、それ以外の方法としてS-N線図（疲労曲線）を修正する方法も複数提案されており、具体的には修正マイナー則を用いる方法だけでなく、Haibachの方法やCorten-Dolanの方法があるとされていること（111～113頁）

○疲労を考慮する設計方法に関して、以下のことを証する。

- ・ 疲労を考慮する設計方法には、疲労限度設計（耐久限度設計）、疲労寿命設計、疲労き裂進展寿命設計及び損傷許容設計があるとされ、このうち、マイナー則等は疲労寿命を検討するための法則であり、疲労寿命設計に用いられるものであること（4、10、11頁）

なお、鉄道分野における鋼鉄道橋、車軸及び台車枠の設計においては、後記乙B第112号証及び同113号証において示されているとおり、現在では疲労限度設計が行われるなどしており、いずれの設計においても、原告らのいう「全ての応力範囲レベルによる疲労損傷を累積する修正マイナー則」（原告準備書面375頁）は用いられていない。

乙B第112号証 平成21年7月 鉄道構造物等設計標準・同解説－鋼・合成構造物（抜粋）

[表紙、目次、228～243頁、奥付]

作成者 公益財団法人鉄道総合技術研究所 編

作成年月日 平成30年11月30日

原本・写しの別 原本

立証趣旨

○鉄道分野（鋼鉄道橋）の設計に関して、以下のことを証する。

- ・ 「平成21年7月 鉄道構造物等設計標準・同解説一鋼・合成構造物」(本標準)は、鋼鉄道橋等の鋼構造の鉄道構造物に適用されるものであって、鋼鉄道橋では、列車荷重による応力変動及び繰り返しの影響が大きいため、以前から疲労を設計の重要なファクターとして扱ってきており、前々標準では、応力と繰り返し数の影響の評価線図を修正マイナー則に従って長寿命側にも適用することとしていたが、前標準では、試験結果やデータベースを基にして、疲労設計曲線(設計に用いる疲労曲線)が新たに設けられるとともに、一般社団法人日本鋼構造協会の指針の考え方が取り入れられ、現在用いられている本標準においても、前標準と同様に、まず疲労限(疲労限度)による照査を行い、必要となったものについてのみ、繰り返し数の影響を考慮した耐疲労性の照査を行えばよいとしていること(228, 229頁)
- ・ 本標準では、繰り返し数の影響を考慮した耐疲労性の照査については、累積疲労損傷度(疲労損傷度)を用いた方法に変更することとしており、これは、従来の照査方法は疲労に影響を及ぼさないレベルの応力範囲も照査の計算に含んでいたため安全側の設計であるものの不経済な設計結果を与える場合があったのに対して、応力範囲の打切り限界を考慮することができるものとされるものであること(229頁)
- ・ 本標準では、一定振幅応力に対する打切り限界については、一定振幅応力試験によって求められた疲労限(疲労限度)をベースに、代表的な継手の疲労試験を補足してこれを設定したとし、変動振幅応力に対する応力範囲の打切り限界については、変動振幅応力下では疲労損傷が進行(疲労き裂が進展)するに従って疲労限(疲労限度)以下の小さい応力範囲まで疲労損傷に寄与するようになるとの現象を考慮してこれを設定したとしていること(233頁)

この点に関し、原子力発電所の機器の耐震設計において行われる疲

劣評価については、前記乙B第110号証において示されているとおり、その目的が構造物に疲労き裂が生じないことを保証することとされているとともに、実機構造物を用いた疲労試験においては、疲労き裂の発生は設計疲労線図から求まる許容サイクル数（許容繰返し数）以下では観察されず、き裂成長も許容サイクル数（許容繰返し数）の3倍までは生じていないことがわかったとされている。

- ・ 本標準では、疲労限（疲労限度）による照査を満足できなかった場合に行う、繰返し数の影響を考慮した耐疲労性の照査を行う場合には、Miner 則（マイナー則）に基づいた疲労設計曲線（設計に用いる疲労曲線）を用いており、発生する応力が変動振幅応力に対する応力範囲の打切り限界以下の場合には、発生応力に対する疲労寿命を ∞ （無限大）として、その影響を無視してよいとしていること（242、243頁）

乙B第113号証 初心者のための疲労設計法（抜粋）

[表紙、目次、67～78頁、奥付]

作成者 公益社団法人日本材料学会 疲労部門委員会 編

作成年月日 平成28年10月25日

原本・写しの別 原本

立証趣旨

○鉄道分野（車軸及び台車枠）の設計に関して、以下のことを証する。

- ・ 鉄道分野において疲労による影響が考えられる車軸及び台車枠のJIS規格（日本工業規格）に基づく強度設計では、いずれも部品に繰返される最大応力を許容応力（許容値）以下に設定することを基本とした疲労限度設計が行われており、マイナー則等を用いた疲労寿命設計は行われていないこと（67、77頁）

- ・ 台車枠の強度設計から量産までの過程において、現車走行試験が実施されることが一般的であり、その中では、走行に伴う台車枠・台車枠部品の振動加速度や荷重試験での高応力部の実応力を測定し、得られた測定データを用いて修正マイナー則等による疲労寿命評価が行われるとされているが、これはあくまで当該台車枠の量産に当たり、強度設計で考慮した荷重値の妥当性も含めた総合的な強度信頼性の検証を目的として行われるとされるものであること（73頁）

以 上

