

本資料のうち、枠囲みの内容は、
営業秘密又は防護上の観点から
公開できません。

東海第二発電所 工事計画審査資料	
資料番号	補足-340-16 改0
提出年月日	平成30年7月12日

原子炉圧力容器の基礎ボルトにおける特別点検での評価について

1. 概要

原子炉圧力容器の基礎ボルトについて、耐震評価結果を添付書類「V-2-3-4-1-3 原子炉圧力容器の応力計算書（その2）」に記載しているが、運転延長認可申請における特別点検での評価手法と異なることから、差異について説明するものである。

2. 工認耐震計算書と特別点検での差異について

工認耐震計算書では既認可「49 資庁第 14239 号（昭和 49 年 7 月 22 日）」から改造等の変更を行っていないことから、既認可と同じく原子炉圧力容器の基礎ボルト全 120 本を評価対象としている。一方、特別点検においては、曲がり構造ボルト 2 本を除く 118 本にて、より保守的な評価を行っている。

詳細は、別紙「東海第二発電所 特別点検（原子炉圧力容器）補足説明資料（平成 30 年 7 月 9 日）」参照。

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK補-II-1 改20
提出年月日	平成30年7月9日

東海第二発電所 特別点検
(原子炉压力容器)

補足説明資料

平成30年7月9日

日本原子力発電株式会社

本資料のうち、枠囲みの範囲は、営業秘密
又は防護上の観点から公開できません。

目次

1. はじめに	1
2. 要求事項	1
3. 点検方法	2
4. 点検結果	26
5. 特別点検結果に対する考察	31
6. まとめ	32

1. はじめに

本資料は、東海第二発電所で実施した原子炉圧力容器の特別点検について、実施した内容をとりまとめたものである。

2. 要求事項

対象の機器・構造物，その対象の部位，着目する劣化事象及び点検方法は、「実用発電用原子炉の運転期間延長認可申請に係る運用ガイド」（以下、「運用ガイド」という。）に定められている。

表 2.1 要求事項の概要

対象の機器・構造物	対象の部位	着目する劣化事象	点検方法/点検項目
原子炉圧力容器	母材及び溶接部（ジェットポンプライザーブレースアーム溶接部を含む。）（蒸気乾燥器，気水分離器，ジェットポンプピーム及びインレットミキサーを取り外した状態で点検可能な炉心領域の全て）	中性子照射脆化	○超音波探傷試験による欠陥の有無を確認
	給水ノズルコーナー部（最も疲労損傷係数が高い部位）	疲労	○磁粉探傷試験若しくは浸透探傷試験又は渦電流探傷試験による欠陥の有無の確認
	制御棒駆動機構（CRD）スタブチューブ（全数），CRDハウジング（全数），中性子束計測ハウジング（ICM）（全数）及び差圧検出・ほう酸水注入ノズル	応力腐食割れ	○目視試験（MVT-1）による炉内側からの溶接部の欠陥の有無の確認及び浸透探傷試験又は渦電流探傷試験による CRD ハウジング及び ICM に対する，内面の溶接熱影響部の欠陥の有無の確認
	ドレンノズル	腐食	○目視試験（VT-1）による内面の確認
	基礎ボルト（全数）	腐食	○超音波探傷試験によるボルト内部の欠陥の有無の確認

3. 4 基礎ボルト

3. 4. 1 点検の概要

基礎ボルトは、原子炉圧力容器支持スカートとペDESTAL上部の基礎コンクリートを固定するため、基礎コンクリートに埋め込まれており、原子炉圧力容器支持スカートの内側と外側にそれぞれ60本ずつ円周上に配置している。基礎ボルトの長さは2種類あり、ペDESTAL上部の制御棒駆動水圧系配管用開口部周辺には短尺のボルトが据え付けられ、この他の部位には長尺のボルトが据え付けられている。この長尺ボルトのうち、2本については基礎コンクリートを貫通する配管スリーブを回避するため、曲がり構造としている。

図3.4.1.1、図3.4.1.2に基礎ボルトの概略図、曲がり構造基礎ボルト概要について示す。

供用期間中検査では、原子炉圧力容器の支持構造物（基礎ボルト含む）について目視試験（VT-3）を実施しているが、それ以外の試験方法による定期的な試験計画は無い。

今回の特別点検では、基礎ボルト全数を対象にUTを実施し、基礎ボルトの健全性を確認している。

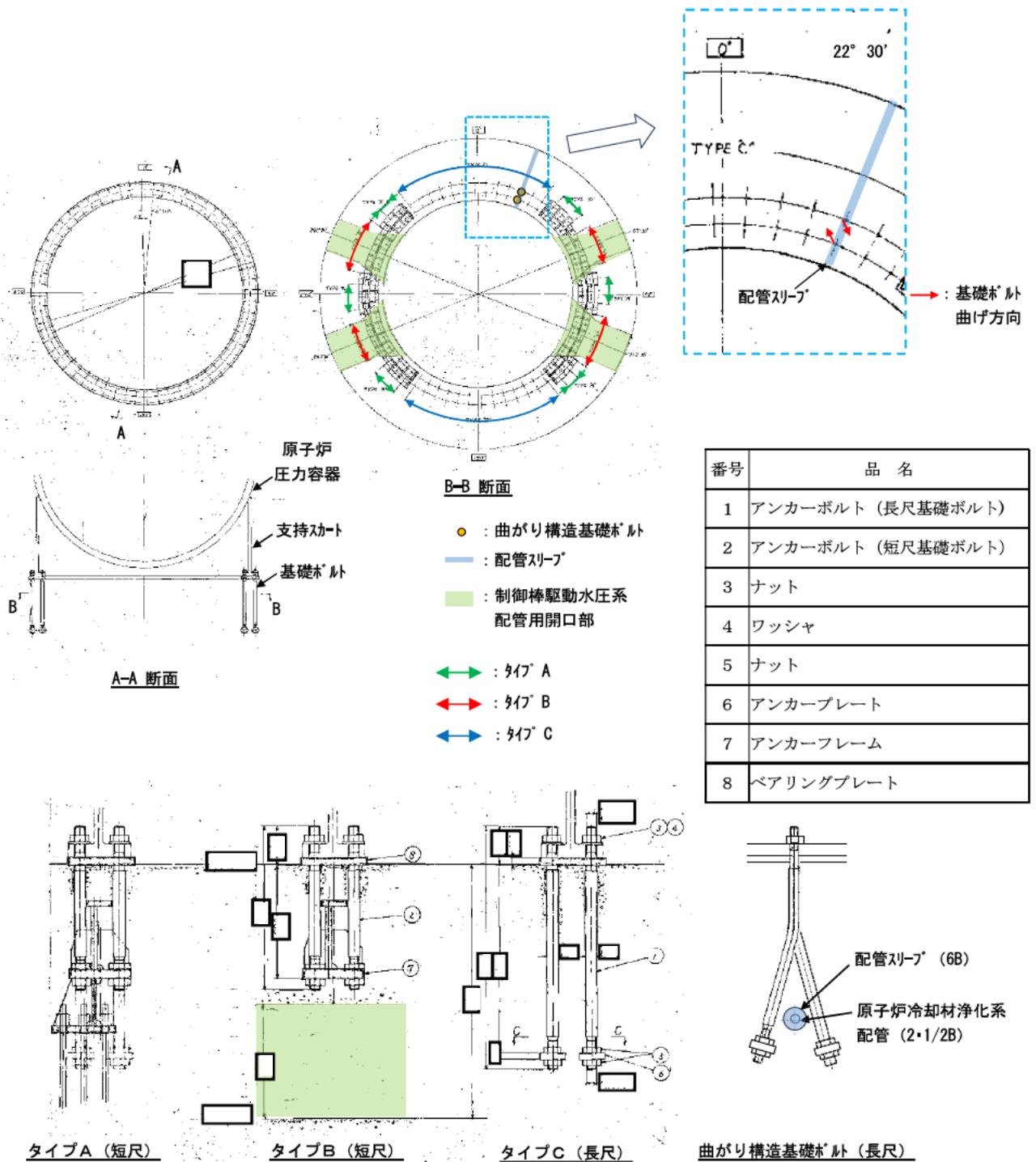


図 3.4.1.1 基礎ボルトの概略図

基礎ボルト全数 120 本の内, 2 本については基礎ボルト上部から mm の位置で 程度の曲げ加工を施している。このため, 基礎ボルト上部から mm の範囲について UT を実施した。

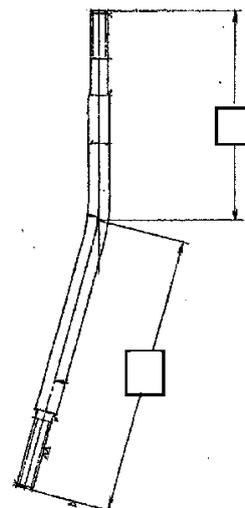


図 3.4.1.2 曲がり構造基礎ボルト概要

3.4.2 点検方法

基礎ボルトに対する UT は, 基礎ボルトの頂部から垂直法 (底面エコー方式) により実施した。感度校正については, 底面エコー方式のため試験対象ボルトの設置面中央付近で行った。基準感度による表示器目盛において 5% 以上のエコーを有する指示部の位置及び最大エコー高さを求めた。これは JANTI-SANE-G2-第 1 版「地震後の機器健全性評価ガイドライン」(以下, 「JANTI ガイドライン」という。) に従って設定したものであり, 10 数% 以上の欠陥エコーを見逃さず, 数% 程度以上の形状エコーを除去するような指示部の抽出基準を採用しているためである。JEAC4207-2008 によれば, エコー高さが DAC20% を超える場合に記録することが定められており, JANTI ガイドラインと比較するとより欠陥検出レベルが高い条件で試験を実施した。なお, 曲がり構造となっている 2 本の基礎ボルトについては, 曲がり部より上部を試験対象とし, 同じ環境下に据え付けられている他の長尺基礎ボルト (同材質, 同全長) の底面エコーで代替し, 長尺及び短尺基礎ボルト 118 本の上部探傷結果から最も高い基準感度を適用して UT を実施した。

3.4.3 試験員の力量

非破壊検査 (UT) 従事者は, JEAC4207-2008 で定められている試験評価員及び試験員の項目に基づき, JIS Z 2305 で認定された UT レベル 1 以上の要員にて作業を実施 (評価員はレベル 2 以上) し, 認定された要員については, 力量評価書にて計画時に力量を確認した。

したがって, 今回適用した点検方法は, 基礎ボルトの状態を確認する上で十分な欠陥検出性を有している。

3.4.4 点検方法の妥当性

基礎ボルトに対する UT は, JEAC4207-2008 を準拠して実施した。また, 基礎ボルトについては, JANTI ガイドラインによる手順が制定されている。今回の特別点検では JEAC4207-2008 に加えて, こちらについても準拠した。なお, JANTI ガイドラインでは地震による植込みボルトに発生する欠陥として, ねじ溝を起点とする表面欠陥を想定しているため, そのねじ部を適用範囲として記載されている。しかし, その試験要領は JEAC4207-2008 に沿った内容となっており, 基準感度の設定や記録レベルといった一部の記載で JEAC4207-2008 よりも欠陥検出レベルが高い条件を記載している (添付資料 9)。また, 基礎ボルトの UT に際し, 試験片を製作し, その欠陥検出性を確認した時に超音波がボルト内部を拡がって伝搬していることをダンピング*にて確認した。そのため,

今回の点検方法はねじ部に限定したものではなく、基礎ボルト内部の健全性を確認する方法として妥当と判断した。

また、基礎ボルトの UT に際し、深さ 1.6 mm の亀裂を付与した試験片を製作し、形状エコーとの分離識別をした上で欠陥の検出が可能であることを確認した。

なお、曲がり構造の基礎ボルトの探傷方法は、対象の基礎ボルトが曲がり構造であることから、底面エコーは確認できるものの反射を繰り返すことから、真直ぐなボルトの底面エコーよりも長い位置に検出される。そのため、仮に欠陥からの反射波を検出した場合、反射源位置を特定することが困難である。また、反射損失により底面エコーの強度が弱くなる。そのため、従来の底面エコー法を直接適用することはできないと判断した。その上で、曲がり構造となっている 2 本の基礎ボルトの曲がり部より上部にのみ適用することを考慮し、据え付け状況が同じ他の基礎ボルトの底面エコーで代替し、その探傷結果から最も高い基準感度を適用して探傷を実施した。

※ダンピングとは試験片のボルトの探傷中に側面を指で触れると超音波の一部が伝搬することを利用して、反射波のエコー高さが上下に動くことを確認するため、指で触れたり離したりする動作を指す。

4. 点検結果

原子炉圧力容器における特別点検対象部位の点検結果を以下に示す。各点検実施日を添付資料 10 に示す。

4. 母材及び溶接部

原子炉圧力容器外面からの点検については、平成 26 年 10 月 25 日から平成 26 年 12 月 19 日及び平成 28 年 1 月 23 日から平成 28 年 3 月 2 日までの間で実施した。追加の点検(9152 mm ~TAF 9203 mm の範囲)については、平成 30 年 3 月 25 日から平成 30 年 4 月 20 日までの間で実施した。なお、実施にあたってはこの範囲に対して十分に余裕をもった範囲の探傷を行った。ジェットポンプライザーブレースアーム溶接部の点検については、平成 27 年 6 月 6 日から平成 27 年 7 月 11 日までの間で実施した。

原子炉圧力容器外面からの点検により、以下の部位において、DAC20%を超える反射波が検出されているが、JEAC4207-2008「表-2712-1 UT 指示エコーの分類」に照らして、以下のように分類され、割れその他の有害な欠陥と判定されるものは無かった。なお、製造時の溶接においてできた融合不良と評価しているものが一部あるが、溶接規格(JSME S NB1-2007)の判定基準を満足し、維持規格に基づく評価を行い割れ等の有害な欠陥でないことを確認した。加えて、建設時に実施した放射線透過試験、UT 及び過去の供用期間中検査のデータとの比較・検証を行い、異常のないことを確認した(添付資料 11)。

- ・原子炉圧力容器母材部(クラッド含む):非金属介在物(スラグ巻込み)、製造時の溶接時にできた融合不良
- ・原子炉圧力容器溶接継手(胴の周継手):非金属介在物(スラグ巻込み)、製造時の溶接時にできた融合不良、境界面エコー
- ・原子炉圧力容器溶接継手(胴の長手継手):非金属介在物(スラグ巻込み)、境界面エコー
- ・原子炉圧力容器と低圧注水管台の溶接部:製造時の溶接時にできた融合不良

ジェットポンプライザーブレースアーム溶接部の点検により、DAC20%を超える反射波が検出されているが、JEAC4207-2008「表-2712-1 UT 指示エコーの分類」に照らして、以下のように分類され、割れその他の有害な欠陥と判定されるものは無かった。

- ・ジェットポンプ 1 :水エコー, 非金属介在物(スラグ巻込み)
- ・ジェットポンプ 2 :水エコー
- ・ジェットポンプ 3 :水エコー, 表面エコー, 非金属介在物(スラグ巻込み)
- ・ジェットポンプ 4 :水エコー, 非金属介在物(スラグ巻込み)
- ・ジェットポンプ 5 :水エコー, 非金属介在物(スラグ巻込み)
- ・ジェットポンプ 6 :水エコー, 非金属介在物(スラグ巻込み)
- ・ジェットポンプ 7 :水エコー, 内表面エコー, 非金属介在物(スラグ巻込み)
- ・ジェットポンプ 8 :水エコー, 内表面エコー
- ・ジェットポンプ 9 :水エコー
- ・ジェットポンプ 10 :水エコー, 内表面エコー, 非金属介在物(スラグ巻込み)

参考(JEAC4207-2008「表-27 2-1 UT 指示エコーの分類」より)

境界面エコー :溶接金属と母材部の境界面からのエコー

表面エコー :探傷面と反対面にあるテーパ部等で反射され外表面が反射源となるエコー

内表面エコー :内面の小さな形状変化によって得られるエコー

水エコー :表面の凹凸により接触媒質の層ができ、超音波が多重反射したもの

4. 4 基礎ボルト

平成 26 年 2 月 5 日から平成 26 年 2 月 25 日までの間で点検を実施した。

基準感度による表示器目盛において 5%を超える反射波が検出されているが、いずれも評価の結果、段付部近傍及びねじ部よりの形状エコーであり、割れその他の有害な欠陥と判定されるものがないことを確認できた。

なお、点検実施前に実機ボルトと同様に製作した模擬試験体のねじ部に付与したスリットの検出性を確認しており、ねじ部や段付き部からの反射エコーは探触子をボルト端面で円周方向に走査しながら探傷すると、連続的な形状指示として現れるので、欠陥のような不連続な指示と識別することが可能であった。

全数 120 本中 2 本については曲がりボルト構造のため、曲がり部より上部に対して UT を実施し、割れその他の有害な欠陥は認められなかったが、曲がり部より下部に対しては探傷ができていない。この基礎ボルトは、曲げ加工が施されており、曲げ加工による影響がないことを同材質の素材を用いた曲げ部から採取した試験片にて機械試験（引張り試験、硬さ試験、衝撃試験）を実施して確認している。また、実機の検査として、寸法検査、非破壊検査（ねじ部の浸透探傷試験、全面の磁粉探傷試験、曲げ部の超音波探傷試験）が行われている。これら試験の後、据え付けがなされていることから、同環境下にある他の基礎ボルトと同様に現在においても異常は生じていないものと考えている。

5. 特別点検結果に対する考察

原子炉圧力容器については、これまで、供用期間中検査を添付資料 12 に示すとおり定期的に実施するとともに、インコネル 182 等で発生が予想される SCC についても添付資料 3 に示すとおり適正な保全を計画・実施してきた。今回これらの現状保全に加え、特別点検の実施により得られた知見は以下のとおりである。

5. 1 母材及び溶接部

従来、炉心領域の溶接部について定点に対する UT を実施しているが、母材及び溶接部（クラッド含む）の全ての領域については UT を実施していない。

今回、点検可能な炉心領域の全てに対して UT を実施した結果、母材及び溶接部（クラッド含む）において、割れその他の有害な欠陥が無いことが確認できた。

5. 2 給水ノズルコーナー部

従来、ノズルコーナー部の体積試験として UT を実施しているが表面試験は実施していない。今回、ECT を実施した結果、有意な欠陥は確認されなかったことから、疲労による割れを生じていないことが表面試験においても確認できた。

5. 3 CRD スタブチューブ、CRDハウジング、ICMハウジング、差圧検出・ほう酸水注入ノズル

従来、漏えいの有無及び定点に対する目視試験(VT-3)を実施しているが全数を対象とした詳細な点検は実施していない。今回、各対象部位の溶接部（熱影響部含む。）の目視試験(MVT-1)、CRDハウジング、ICMハウジング内面の溶接熱影響部の ECT を実施した結果、有意な欠陥は確認されなかったことから、各対象部位において応力腐食割れを生じていないことが確認できた。

5. ドレンノズル

従来、漏えいの有無及びRPV内面ノズル近傍の目視試験(VT-3)を実施しているが、今回、ノズル第一溶接線までの範囲において目視試験(VT-)を実施した結果、腐食を含む有意な欠陥は確認されなかった。

5. 5 基礎ボルト

従来、目視試験(VT-3)を実施しているがボルト内部の欠陥の有無について点検は実施していない。今回、全数を対象に UT を実施した結果、割れその他の有害な欠陥は確認されなかったことから、腐食に起因する内部の欠陥が無いことが確認できた。ただし、試験対象のうち 2 本については干渉物回避のため曲がり構造となっており、曲がり部より下部の探傷はできなかった。

この基礎ボルトは、曲げ加工が施されており、曲げ加工による影響がないことを機械試験等により確認し、据え付けがなされている。したがって、同環境下にある他の基礎ボルトと同様に現在においても異常は生じていないものと考えている。なお、全数 120 本の基礎ボルトから、曲がり構造の 2 本を除いた 118 本と仮定して強度評価を実施し、RPV の健全性に影響がないことを確認した（添付資料 14）。

6. まとめ

原子炉圧力容器の特別点検において、以下の範囲に対して点検を行った結果、いずれの点検においても割れその他の有害な欠陥は認められなかった。

- ・母材及び溶接部（点検可能な炉心領域の全て）
- ・給水ノズルコーナー部（全6箇所）
- ・CRDスタブチューブ（全数185体）、CRDハウジング（全数185体）、中性子束計測ハウジング（全数55体）及び差圧検出・ほう酸水注入ノズル（1箇所）
- ・ドレンノズル（1箇所）
- ・基礎ボルト（全数120本）

[添付資料]

1. 原子炉圧力容器炉心領域の追加点検（超音波探傷試験）について
2. 燃料集合体の製作公差及び据付誤差について
3. 特別点検（原子炉圧力容器 母材及び溶接部）検査対象図
4. 原子炉圧力容器点検部位毎の検査方法一覧
5. 給水ノズルコーナー部 ECT における信号波形の確認プロセス
6. 原子炉圧力容器給水ノズルコーナー部渦電流探傷試験検討実施状況まとめ
7. 給水ノズルコーナー部への渦電流探傷試験適用に対する確認項目と結果について
8. 給水ノズルコーナー部渦電流探傷試験における透磁率のばらつきについて
9. 特別点検（原子炉圧力容器 基礎ボルト）の点検方法における JANTI-SANE-G2-第1版「地震後の機器健全性評価ガイドライン」の適用箇所について
10. 原子炉圧力容器特別点検データ採取日詳細一覧
11. 炉心領域の溶接部の超音波探傷試験で確認された要記録エコーについて
（原子炉圧力容器点検工事 2014年度、2015年度実施分）
12. 原子炉圧力容器に対する供用期間中検査と特別点検の比較
13. 原子炉圧力容器に対する予防保全活動
14. 原子炉圧力容器基礎ボルトのうち曲がり構造のボルトを除いた強度評価について

[参考文献]

- 1) EJAM E-Journal of Advanced Maintenance HP（日本保全学会海外向け公開文書）
文書名:Development of the Eddy Current Testing (ECT) technique for the Feedwater nozzles of Nuclear Power Plant Reactor Pressure Vessels.
(<http://www.jsm.or.jp/ejam/Vol.8No.4/NT/NT82/82.html>)

特別点検（原子炉圧力容器 基礎ボルト）の点検方法における JANTI-SANE-G2-第 1 版
「地震後の機器健全性評価ガイドライン」の適用箇所について

東海第二発電所 特別点検（原子炉圧力容器）のうち、基礎ボルトに対する超音波探傷試験（以下、「UT」という。）は、JEAC4207-2008「軽水型原子力発電所用機器の供用期間中検査における超音波探傷試験規程」（以下、「JEAC4207-2008」という。）を準拠して実施した。加えて、JANTI-SANE-G2-第 1 版「地震後の機器健全性評価ガイドライン」（以下、「JANTI ガイドライン」という。）についても準拠して実施した。表 1 に JANTI ガイドラインに準拠した項目を記載し JEAC4207-2008 との比較を示す。

表 JEAC4207-2008 と JANTI ガイドラインの比較（主要事項のみ）

項目	JANTI ガイドライン	JEAC4207-2008
基準感度	基準感度は以下とする。 1) 超音波入射側のねじ部：健全部底面からの反射エコーを探傷器画面の 80% に調整した感度 2) 超音波入射反対側のねじ部：健全部底面からの反射エコーを探傷器画面の 80% に調整した感度の 倍 (+12dB) の感度	探触子をボルト端面に当てたとき健全部における反対側端面からのエコー高さを表示器の全目盛の 80% になるように感度を調整し、このエコー高さを必要な時間範囲にわたって水平に延長して DAC 曲線とする。
記録レベル	表示器目盛において 5%	DAC20%

表 1 に示した項目については JANTI ガイドラインに準拠し実施した。なお、いずれの項目についても JEAC 207-2008 の要求事項を満足している。

参考

JANTI ガイドラインの記録レベルである「表示器目盛において 5%」を DAC% に換算すると

$$\frac{5}{80} \times 100 \approx 6(\%)$$

となる。

JEAC 207-2008 で定めている記録レベルは DAC20% であり、JANTI ガイドラインの方が小さくなる。よって、JANTI ガイドラインの方が厳しい記録レベルを設定している。

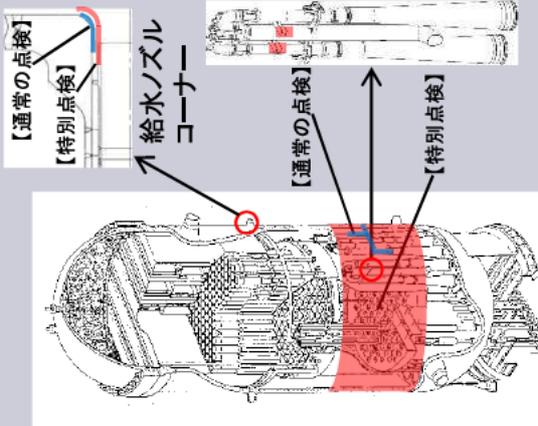
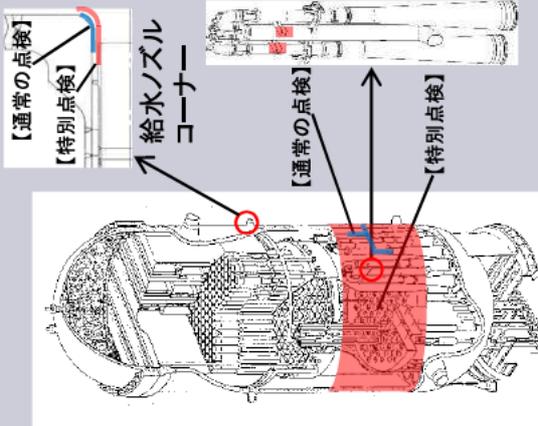
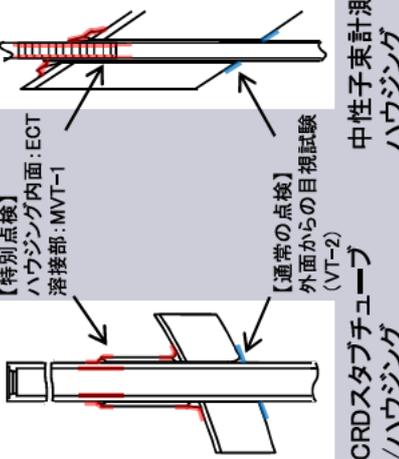
以上

原子炉圧力容器特別点検データ採取日詳細一覧

東海第二発電所原子炉圧力容器特別点検のデータ採取日について各部位・試験ごとに表のとおり記載する。

表 特別点検のデータ採取日詳細一覧

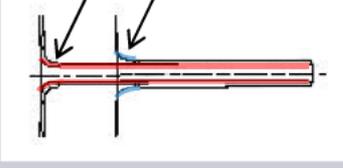
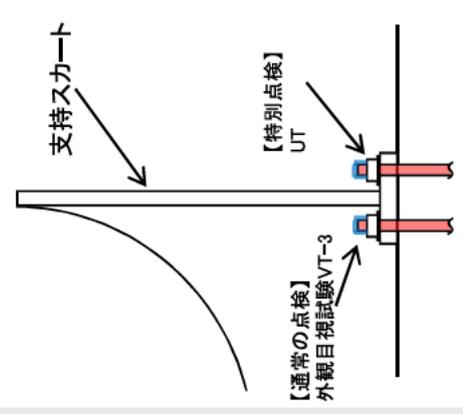
対象の部位	点検方法	データ採取日
母材及び溶接部（ジェットポンプライザーブレスアーム溶接部を含む。）（蒸気乾燥器，気水分離器，ジェットポンプビーム及びインレットミキサーを取り外した状態で点検可能な炉心領域の全て）	超音波探傷試験	原子炉圧力容器点検 ・平成 26 年 10 月 25 日～平成 26 年 12 月 19 日 ・平成 28 年 1 月 23 日～平成 28 年 3 月 2 日 ・平成 30 年 3 月 25 日～平成 30 年 4 月 20 日
		ジェットポンプライザーブレスアーム溶接部点検 ・平成 27 年 6 月 6 日～平成 27 年 7 月 11 日
給水ノズルコーナー部（最も疲労損傷係数が高い部位）	渦電流探傷試験	平成 27 年 7 月 22 日～平成 27 年 9 月 7 日
制御棒駆動機構（CRD）スタブチューブ（全数），CRDハウジング（全数），中性子束計測ハウジング（ICM）（全数）及び差圧検出・ほう酸水注入ノズル	渦電流探傷試験	制御棒駆動機構ハウジング ・平成 26 年 9 月 24 日～平成 27 年 1 月 25 日
		中性子束計測ハウジング ・平成 26 年 12 月 29 日～平成 27 年 1 月 4 日
	目視試験（MVT-1）	制御棒駆動機構スタブチューブ ・平成 26 年 2 月 7 日～平成 26 年 2 月 17 日 ・平成 26 年 9 月 9 日～平成 27 年 1 月 28 日
		中性子束計測ハウジング ・平成 26 年 9 月 18 日～平成 27 年 1 月 28 日 差圧検出・ほう酸水注入ノズル ・平成 26 年 2 月 6 日～平成 26 年 2 月 17 日
ドレンノズル	目視試験（VT-1）	平成 27 年 1 月 28 日
基礎ボルト（全数）	超音波探傷試験	平成 26 年 2 月 5 日～平成 26 年 2 月 25 日

部位	供用期間中検査	特別点検	点検対象範囲
母材及び溶接部 (点検可能な炉心領域 の全て)	<ul style="list-style-type: none"> 溶接線 + 母材10mm幅 UT 頻度 1回/検査間隔※ 	<ul style="list-style-type: none"> 母材及び溶接部 UT 	
給水ノズルコーナー部	<ul style="list-style-type: none"> 溶接部及び管台内面の丸みの部分 UT 頻度 1回/検査間隔※ 	<ul style="list-style-type: none"> 給水ノズルコーナー ECT 	
CRDスタブチューブ、 CRDハウジング、中性 子束計測ハウジング 及び差圧検出・ほう 水注入ノズル	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器外面からの目視試験(VT-2) 頻度 毎定検 外観目視試験(VT-3) 頻度 1回/検査間隔※ 	<ul style="list-style-type: none"> 管内面(差圧検出・ほう酸水注入ノズルは除く): ECT 溶接部: ビデオカメラによる目視試験(MVT-1) 	

添付資料12



※検査間隔は10年間、第4回目以降の検査間隔は7年間

部位	供用期間中検査	特別点検	点検対象範囲
ドレンノズル	<ul style="list-style-type: none"> 原子炉圧力容器外面からの目視試験(VT-2) 頻度 毎定検 	<ul style="list-style-type: none"> ドレンノズル ビデオカメラによる目視試験(VT-1) 	
基礎ボルト	<ul style="list-style-type: none"> 外観目視試験(VT-3) 頻度 1回/検査間隔※ 	<ul style="list-style-type: none"> 基礎ボルト UT 	

原子炉压力容器基礎ボルトのうち曲がり構造のボルトを除いた強度評価について

1. 経緯

原子炉压力容器（以下、「RPV」という）基礎ボルトのうち曲がり構造としている2本は、建設時に曲げ加工による影響のないことが確認されており、他の基礎ボルトと同様に異常は生じていないものと考えているが、全数120本の基礎ボルトから、この2本を除いた118本と仮定して強度評価を実施し、RPVの健全性に影響がないことを確認した。

2. 強度評価内容

工事計画認可申請書の耐震性に関する説明書での評価方法と同様に発電用原子力設備規格 設計・建設規格 JSME S NC1-2005（2007年追補版含む）及び原子力発電所耐震設計技術指針 重要度分類・許容応力編 JEAG 4601・補-1984を適用して評価し、対象は全数120本の基礎ボルトから曲がり構造ボルト2本を除いた118本とする。

(1) 形状及び主要寸法

基礎ボルトの形状・寸法・材料を図1に示す。

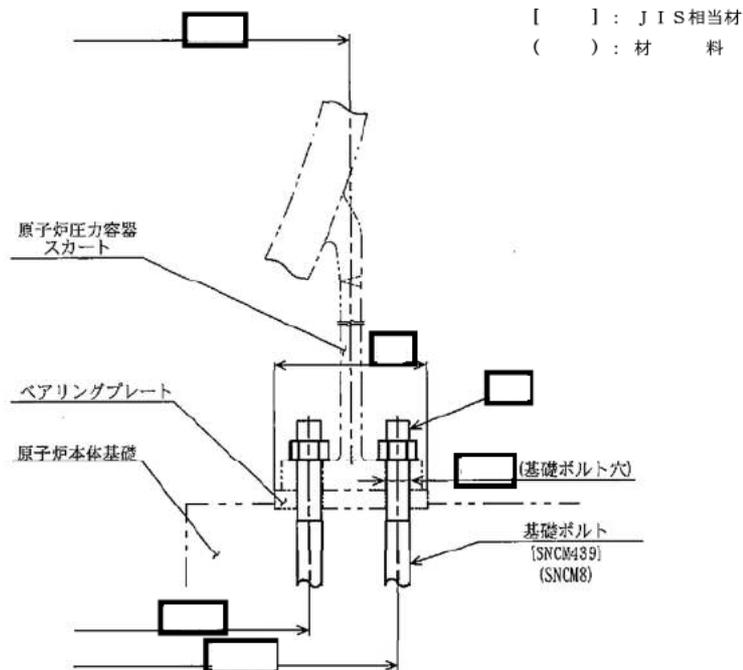


図1 基礎ボルトの形状及び主要寸法（単位：mm）

(2) 設計条件

① 荷重の組合せ及び許容応力

各運転状態と地震荷重の組合せ方とこれに対応する許容応力状態を表1に示す。

表1 荷重の組合せ及び許容応力状態

荷重の組合せ		許容応力状態
各運転状態による荷重	地震荷重	
供用状態A及びB	S_d^*	ⅢAS
供用状態A及びB	S_s	ⅣAS
供用状態D*	S_d^*	ⅣAS

注記*：冷却材喪失事故後（原子炉冷却材喪失直後を除く。）の荷重を示す。

② 外荷重条件

工事計画認可申請書「応力解析の方針」より外荷重条件を設定する。基礎ボルトに作用する応力は、この荷重値をもとに各供用状態ごとに求める。

(3) 応力計算及び評価

荷重の組合せにより許容応力状態ごとに引張応力、せん断応力、組合せ応力を算出し、各許容応力を満足することを確認する。

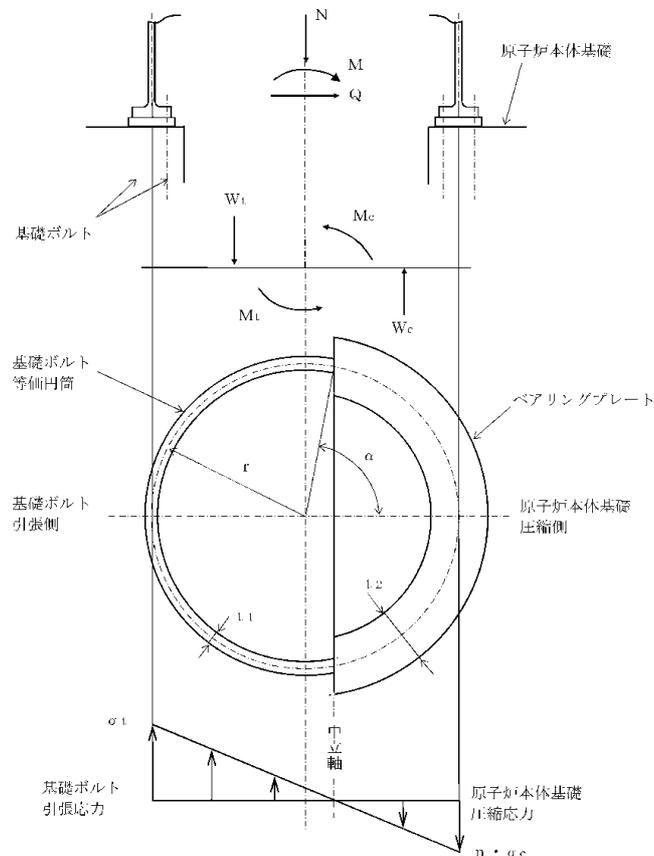


図2 基礎ボルトの等価円筒及び応力分布

3. 計算内容

応力計算は、表 1 に示す各荷重の組合せについて行い、基礎ボルトに生じる一次応力は、以下の方法で求める。

(1) 引張応力の計算方法

基礎ボルトに生じる引張応力 σ_t は、原子炉本体基礎に生じる圧縮応力 σ_c とともに以下の方法により求める。以下において基礎ボルトは、断面積の等しい等価な円筒として考える。この場合、等価円筒の板厚中心半径 r は、保守的に原子炉压力容器スカート中心半径とする。

外荷重と応力の釣合いを図 2 に示す。図 2 において、中立軸の位置 α と応力の関係は次式で表す。

$$\frac{\sigma_t}{n \cdot \sigma_c} = \frac{1 + \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} \quad \text{①}$$

また、軸力 N 及び曲げモーメント M との釣り合いから、次式が求まる。

$$N + W_t - W_c = 0$$

$$M - N \cdot r \cdot \cos \alpha - M_t - M_c = 0$$

W_t : 基礎ボルトに生じる力の合計

W_c : 原子炉本体基礎に生じる反力の合計

M_t : W_t によるモーメント

M_c : W_c によるモーメント

ここで、

$$W_t = 2 \cdot r \cdot t_1 \cdot \left\{ \frac{(\pi - \alpha) \cdot \cos \alpha + \sin \alpha}{1 + \cos \alpha} \right\} \cdot \sigma_t$$

$$W_c = 2 \cdot r \cdot t_2 \cdot \left(\frac{\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha}{1 - \cos \alpha} \right) \cdot \sigma_c$$

$$M_t = r^2 \cdot t_1 \cdot \left\{ \frac{2 \cdot (\pi - \alpha) \cdot \cos^2 \alpha + \pi - \alpha + 3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha}{1 + \cos \alpha} \right\} \cdot \sigma_t$$

$$M_c = r^2 \cdot t_2 \cdot \left(\frac{\alpha - 3 \cdot \sin \alpha \cdot \cos \alpha + 2 \cdot \alpha \cdot \cos^2 \alpha}{1 - \cos \alpha} \right) \cdot \sigma_c$$

t_1 : 基礎ボルトの等価円筒板厚

t_2 : ベアリングプレートの等価幅

前述の関係より σ_t 及び σ_c は、次式で表す。

$$\sigma_t = \frac{n \cdot (1 + \cos \alpha) \cdot N}{2 \cdot r \cdot \{(t_2 - n \cdot t_1) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) - n \cdot \pi \cdot t_1 \cdot \cos \alpha\}}$$

$$\sigma_c = \frac{(1 - \cos \alpha) \cdot N}{2 \cdot r \cdot \{(t_2 - n \cdot t_1) \cdot (\sin \alpha - \alpha \cdot \cos \alpha) - n \cdot \pi \cdot t_1 \cdot \cos \alpha\}}$$

実際の釣合い状態は、式①の α を仮定して求める。

なお、 $\alpha \geq \pi$ (rad) の場合は、基礎ボルトに引張応力は発生せず、原子炉本体基礎の圧縮応力のみが生じ、 σ_t 及び σ_c は次式で表す。

$$\sigma_t = 0$$

$$\sigma_c = \frac{N}{\pi \cdot \left\{ \left(r + \frac{t_2}{2} \right)^2 - \left(r - \frac{t_2}{2} \right)^2 \right\}} + \frac{32 \cdot (2 \cdot r + t_2) \cdot M}{\pi \cdot \{(2 \cdot r + t_2)^4 - (2 \cdot r - t_2)^4\}}$$

(2) せん断応力の計算方法

基礎ボルトに生じるせん断応力 τ は、安全側の仮定としてベアリングプレートと原子炉本体基礎の摩擦抵抗を無視し、次式で計算する。

$$\tau = \frac{Q}{N_b \cdot A}$$

Q：せん断力

N_b ：基礎ボルトの本数（ここでは 118 本）

A：基礎ボルト 1 本当たりの断面積

(3) 組合せ応力の計算方法

基礎ボルトに生じる組合せ応力の評価には、組合せ応力の許容値として許容引張応力を用いて、引張応力によって評価する。

(4) 計算条件

基礎ボルトに作用する外荷重条件を表 2-1, 表 2-2 に示す。基礎ボルトに作用する応力は表 2-1, 表 2-2 の荷重値をもとに許容応力状態ごとに求める。

表 2-1 外荷重条件 (各供用状態における荷重)

荷重		供用状態	
		A 及び B	D*
軸力 N[kN]	最大		
	最小		
曲げモーメント M[kN・m]			
せん断力 Q[kN]			

注記* : 冷却材喪失事故後 (原子炉冷却材喪失直後を除く。) の荷重を示す。

表 2-2 外荷重条件 (地震動による荷重)

荷重		地震荷重	
		S _d *	S _s
軸力 N[kN]	最大		
	最小		
曲げモーメント M[kN・m]			
せん断力 Q[kN]			

応力計算に用いた数値を表 3 に示す。

表 3 応力計算に用いた数値

記号の説明 (単位)	数値
基礎ボルトの呼び径 d (mm)	
基礎ボルトの本数 N _b	118
基礎ボルト 1 本当たりの断面積 A (mm ²)	
基礎ボルトの等価円筒の中心半径 r (mm)	
基礎ボルト穴の直径 D _h (mm)	
ベアリングプレートの幅 t _b (mm)	
基礎ボルトの等価円筒板厚 t ₁ (mm)	
ベアリングプレートの等価幅 t ₂ (mm)	
基礎ボルトと原子炉本体基礎の縦弾性係数の比 n	

4. 計算結果

表 1 の荷重の組合せにより，表 2-1，表 2-2，表 3 に示された数値を用いて求めた応力計算結果を表 4 に示す。

表 4 基礎ボルトの応力評価

許容応力状態	地震荷重	温度(°C)	応力の種類	応力評価結果 (MPa)		許容応力 (MPa)
				120 本での評価 (工事計画認可申請書での評価値)	118 本での評価 (2 本除いた評価値)	
Ⅲ _A S	S _d *	66	引張応力	66	67	491
			せん断応力	11	11	378
			組合せ応力	66	67	491
IV _A S	S _s	66	引張応力	118	120	491
			せん断応力	16	16	378
			組合せ応力	118	120	491
IV _A S	S _d *	171	引張応力	66	67	458
			せん断応力	11	11	353
			組合せ応力	66	67	458

5. 結論

基礎ボルトに生じる応力は，全て許容応力以下である。

以上