

東海第二発電所 審査資料	
資料番号	TKK補-Ⅱ-1 改19
提出年月日	平成30年7月5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5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。

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伴う影響について

1. 透磁率のばらつきによる影響

材料の化学成分や加工及び焼入れなどによる材質変化は透磁率に影響を与える。透磁率は、図1で示す磁化曲線（磁界Hと材料の磁束密度Bとの関係を表す曲線）上の点と原点を結ぶ直線の傾きで表される。透磁率が大きいほど磁束密度は大きくなるため、透磁率が大きい材料（磁性体）に渦電流探傷試験（以下、「ECT」という）を適用する場合、透磁率が小さい材料（非磁性体）と比べ試験面に強い渦電流が生じ、欠陥を検出する際のECT信号は大きくなるが、磁気ノイズも増加する。加えて、一般に磁性体へのECTでは透磁率のばらつきにより大きな磁気ノイズが発生し、点検が困難となることが知られている。

このため、磁性体材料である給水ノズルのECTにおいて、磁気ノイズが欠陥検出性に影響を及ぼさないことを事前の実機適用試験及び実機の探傷結果により確認した。

また、事前の実機適用試験に用いた実機形状模擬試験体（以下、「模擬試験体」という）と給水ノズルの材料及び製造過程が同等であることを確認した。

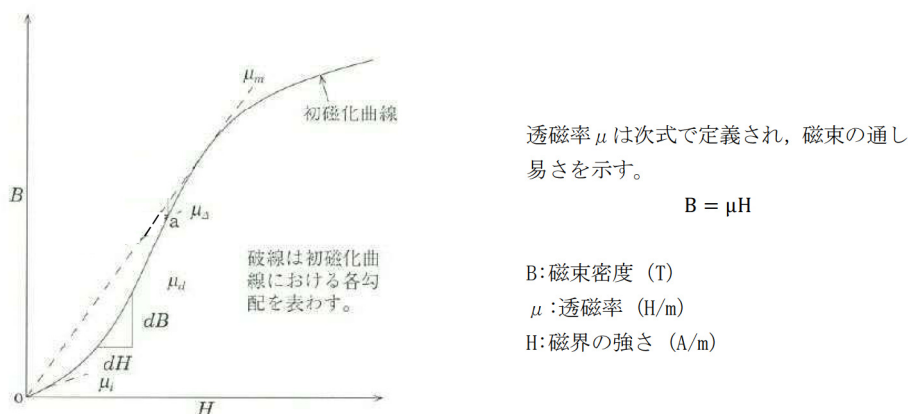


図1 磁化曲線

(1) 事前の実機適用試験，実機探傷における磁気ノイズ比較

事前の実機適用試験において用いた磁性体の模擬試験体（SA-508 CL.2）と透磁率が大きく異なる非磁性体（SUS316）について磁気ノイズを比較した結果、その差は僅かであった。模擬試験体は、給水ノズルと同材質であることから、両者の間で上述した磁性体と非磁性体以上の透磁率のばらつきがあることは考え難い。また、実機探傷において発生した磁気ノイズは、模擬試験体と同程度であることを確認した。以上のとおり、透磁率のばらつきによる磁気ノイズの差は小さく、給水ノズルECTの欠陥検出性に影響を与えることはない。

この詳細について別紙1に示し、比透磁率^{※1}の比較を表1に示す。また、実機適用試験で使用した模擬試験体を図2に示す。

※1 物質の透磁率は真空の透磁率（ $4\pi \times 10^{-7}$ H/m）と比透磁率の積で表される。非磁性体は比透磁率が約1となる。ここでは比較のため比透磁率を用いる。

表1 比透磁率の比較

材 質	比透磁率	備 考
SA-508 CL.2(低合金鋼) ^{※2}		実測データ
非磁性体	約1	教本 ^{※3} より抜粋

※2 実機適用試験の試験体。なお、実機は同材質である。

※3 社団法人日本非破壊検査協会 渦流探傷試験Ⅱ（7頁）

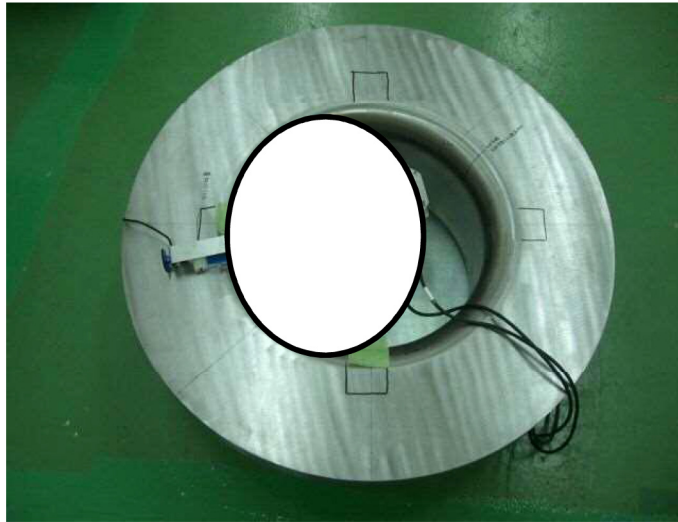


図2 模擬試験体

(2) 材料及び製造過程による透磁率の差について

給水ノズルと事前の実機適用試験に用いた模擬試験体の材料を表2に示し、製造過程を表3に示す。給水ノズルと模擬試験体は同材質であり、機械加工や熱処理（焼鈍）の内容は同様である。また、加工等によって生じた結晶格子の歪みは、焼鈍により除去することができ、加工等により低下した透磁率が再び増加し磁氣的性質が改善される^{※4}旨述べられている。したがって、給水ノズルと模擬試験体の透磁率は同等であり、仮に機械加工等により局所的に透磁率のばらつきがあった場合であっても、焼鈍によって磁氣的性質が改善され、透磁率のばらつきは低減される。

※4 社団法人日本非破壊検査協会 渦流探傷試験Ⅱ（31頁）

表2 給水ノズルと模擬試験体の材料

対象	材質・化学成分（単位：％）									
	成分	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	V
	Min.	-	0.15	0.50	-	-	0.50	0.25	0.55	-
Max.	0.27	0.40	1.00	0.025	0.025	1.00	0.45	0.70	0.05	
給水ノズル	SA-508 CL.2									
模擬試験体	SA-508 CL.2									

表3 給水ノズルと模擬試験体の製造過程の比較

対象	機械加工	熱処理
給水ノズル		焼鈍温度 □ °C ± □ °C
模擬試験体		焼鈍温度 □ °C ~ □ °C

2. まとめ

透磁率は材質や製造過程の違いによるばらつきが考えられ、一般に磁性体への ECT ではこれにより大きな磁気ノイズが発生し、点検が困難となることが知られている。今回実施した給水ノズルコーナー部の ECT では、モックアップ試験で磁性体（低合金鋼）である模擬試験体と非磁性体の磁気ノイズの差は僅かであることを確認した。このことから給水ノズルコーナー部模擬試験体と同材質である給水ノズルの間で磁性体と非磁性体以上の透磁率のばらつきが発生していることは考え難く、実機探傷における磁気ノイズも、模擬試験体と同程度であることを確認した。

給水ノズルと模擬試験体の材質・製造過程は同等であるため、透磁率も同等と考えられ、仮に機械加工等により局所的に透磁率のばらつきがあった場合であっても、焼鈍によって磁氣的性質が改善され透磁率のばらつきは低減される。

以上のとおり、今回実施した給水ノズルコーナー部の ECT において、透磁率のばらつきは欠陥検出性に影響のない範囲であり、点検結果に影響を与えるものではない。

以上

磁気ノイズの確認結果

給水ノズル ECT 実施にあたり、実機探傷の前に実機適用試験を実施している。事前の実機適用試験と実機探傷における磁気ノイズを比較し、透磁率のばらつきの影響に対する見解を以下に記載する。

事前の実機適用試験では給水ノズルと同材質の磁性体 (SA-508 CL. 2) と非磁性体 (SUS316) について試験を実施した。本試験では 磁性体における ECT 特性把握及び適用性を確認しており、磁性体 (SA-508 CL. 2) と非磁性体 (SUS316) の透磁率では約一桁の違いがあるが、磁性体 (SA-508 CL. 2) で発生する磁気ノイズが最大で V であり、非磁性体 (SUS316) と比較しても約 V の違いであった。これは事前の実機適用試験で設定した基準感度 (V 検出モード V, H 検出モード V) の記録レベルである 20 % V) を超えるものではないことから透磁率の違いによる影響は小さく、欠陥検出性への影響は小さい。また、実機探傷で発生した磁気ノイズは最大で V であり、その大きさは同程度であった。事前の実機適用試験の磁気ノイズの影響確認試験で発生したノイズについて図 1 に示し、給水ノズルの点検で発生した磁気ノイズについて図 2 に示す。また、事前の実機適用試験と実機探傷における磁気ノイズの比較について図 3 に示す。

材質：SA-508 CL.2

形状：模擬試験体

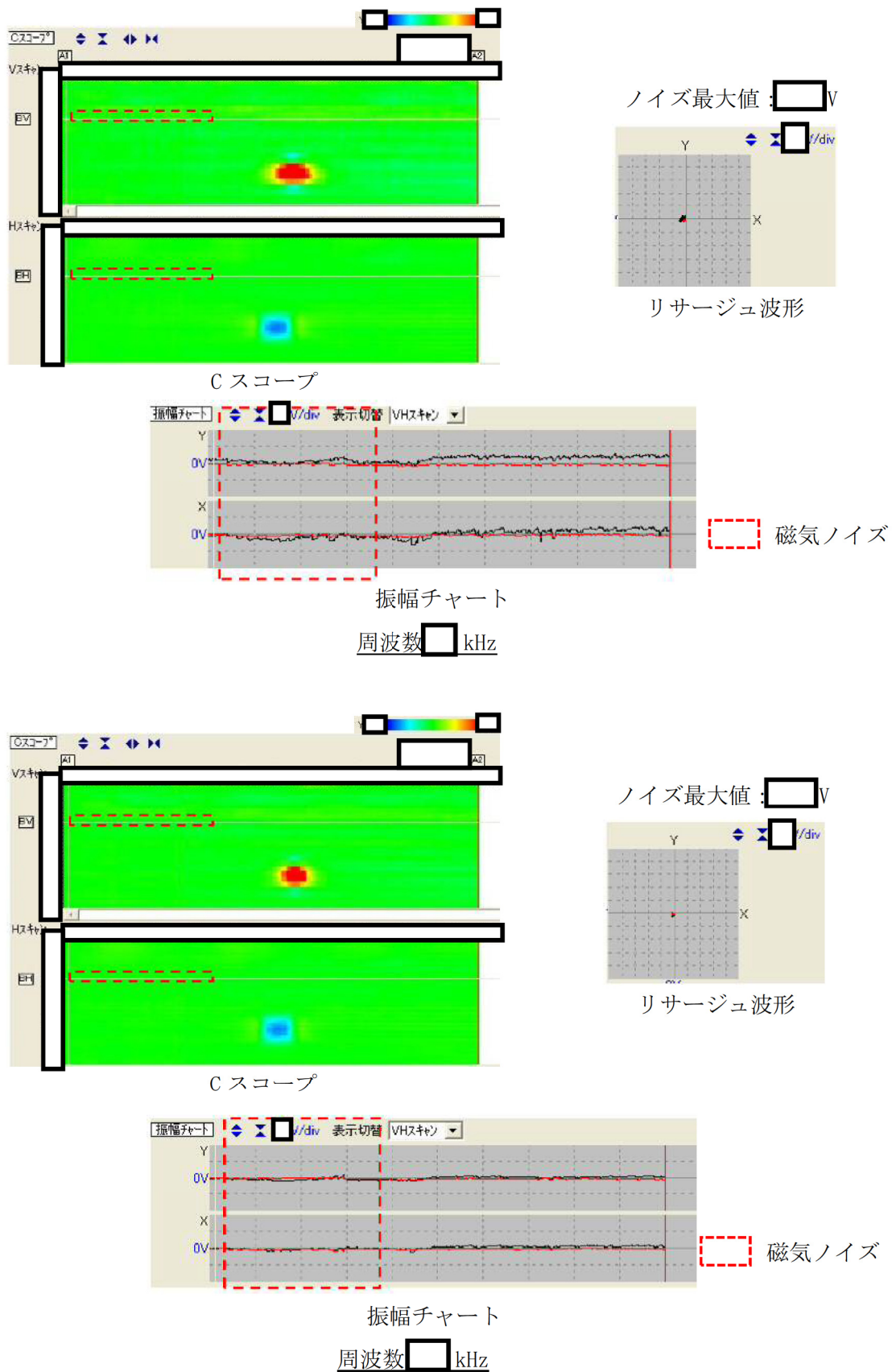
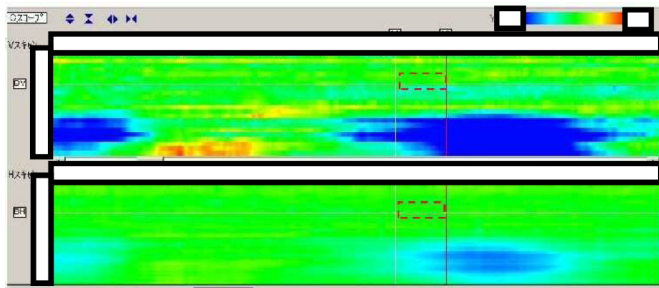


図1 事前の実機適用試験で発生した磁気ノイズ

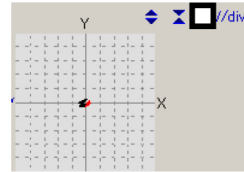
材質：SA-508 CL.2

形状：給水ノズル (N-4D ノズル第一象限 0° ~25° 範囲)

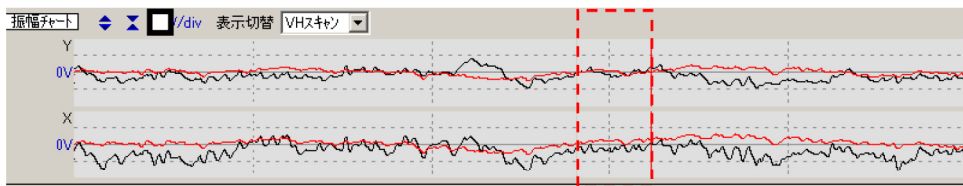


C スコープ

ノイズ最大値： V



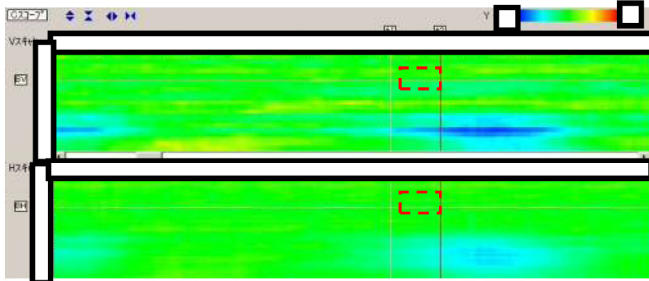
リサージェ波形



振幅チャート

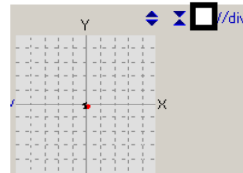
磁気ノイズ

周波数 kHz

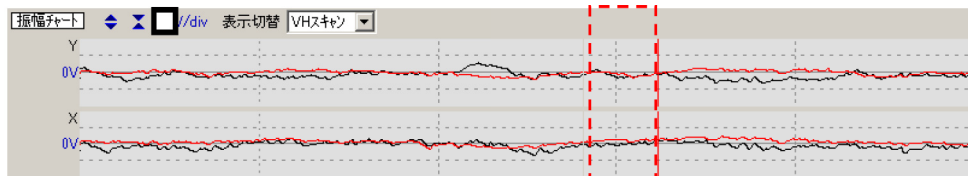


C スコープ

ノイズ最大値： V



リサージェ波形

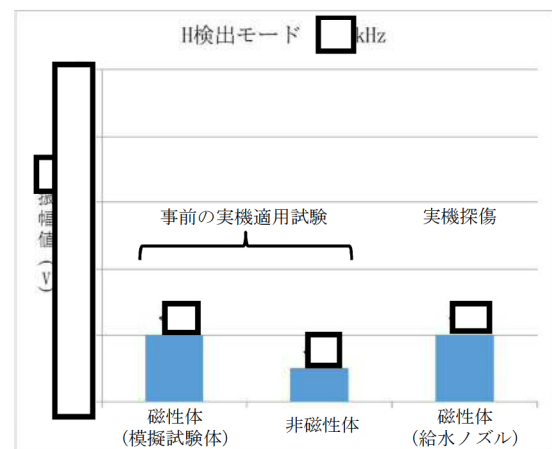
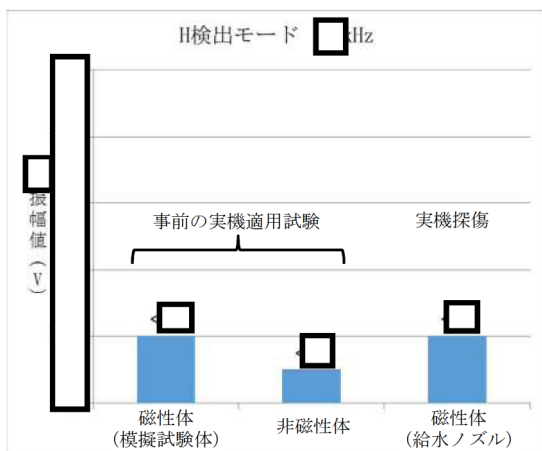
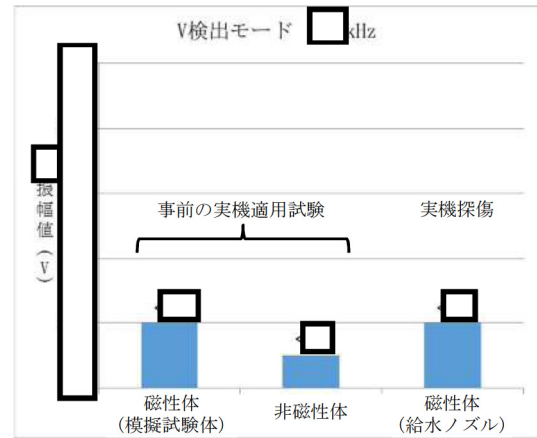
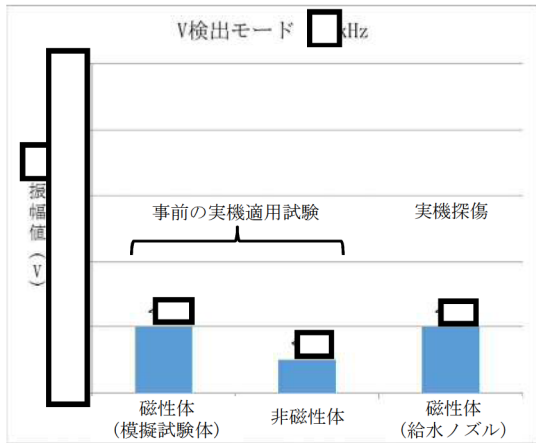


振幅チャート

磁気ノイズ

周波数 kHz

図2 給水ノズルの点検で発生した磁気ノイズ



磁性体 (SA-508 CL.2) と非磁性体 (SUS316) のノイズ信号の差は、 \square V 程度であり、事前の実機適用試験で設定した基準感度 (V 検出モード \square V, H 検出モード \square V) の記録レベルである 20 % (\square V) を超えるものではないことから透磁率の違いによる影響は小さく、欠陥検出性への影響は小さい。また、実機探傷で発生した磁気ノイズは最大で \square V であり、事前の実機適用試験と同程度であった。

図 3 事前の実機適用試験と実機探傷における磁気ノイズの比較

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

1. 経緯

原子炉圧力容器（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。

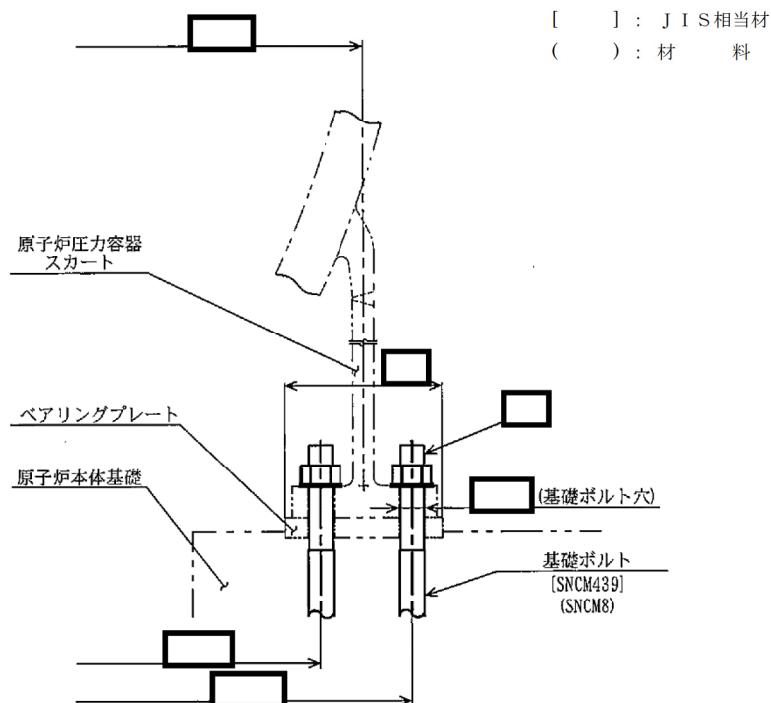


図1 基礎ボルトの形状及び主要寸法（単位：mm）

(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。

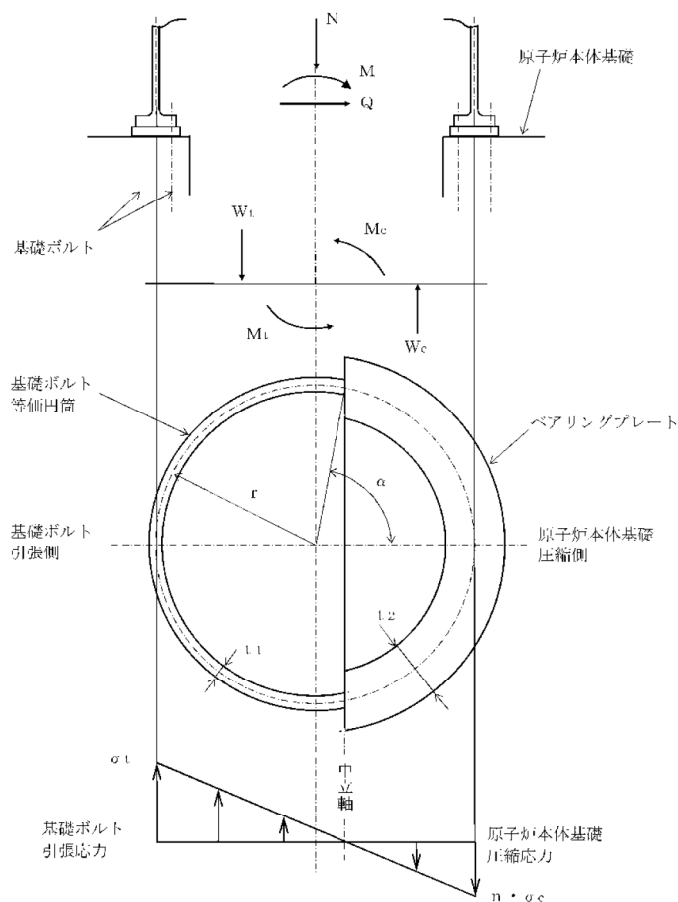


図 2 基礎ボルトの等価円筒及び応力分布

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、保守的に原子炉圧力容器スカート中心半径とする。

外荷重と応力の釣り合いを図 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) 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 _b (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 _{AS}	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 _{AS}	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 _{AS}	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