

材料試験炉ホットラボ排気筒におけるアンカーボルト減肉 及びフランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間に 関する原因調査

Cause investigation for thinning of anchor bolts and gaps between anchor bolt nuts and a flange plate at the JMTR hot laboratory exhaust stack

日本原子力研究開発機構	柴田 晃	Akira SHIBATA	
日本原子力研究開発機構	北岸 茂	Shigeru KITAGISHI	
日本原子力研究開発機構	渡士 克己	Katsumi WATASHI	Member
日本原子力研究開発機構	松井 義典	Yoshinori MATSUI	
日本原子力研究開発機構	近江 正男	Masao OHMI	
日本原子力研究開発機構	相沢 静男	Shizuo SOZAWA	
日本原子力研究開発機構	那珂 通裕	Michihiro NAKA	

Abstract

The exhaust stack of Japan Materials Testing Reactor Hot laboratory is a part of gaseous waste treatment system. It was built in 1970 and is 40 m in height. In 2015, thinning was found at some anchor bolts on base of the stack. When thinning of anchor bolts were investigated, gaps between anchor bolt nuts and flange plate was found. JAEA removed steel cylinder of stack which is 33 m in height for safety. In the end of investigation, thinning was found in all anchor bolts of the stack. Cause investigation for the thinning and the gaps were performed. It is concluded that the thinning was caused by water infiltration over a long period of time and the gaps were caused by elongation of thinning part of anchor bolts by the 2011 earthquake off the Pacific coast of Tohoku.

Keywords: Thinning, Ageing, Water infiltration, Anchor bolt, Grains size, Earth quake, Hot laboratory

1. 緒言

日本原子力研究開発機構(原子力機構)大洗研究開発センターに設置されている材料試験炉ホットラボの排気筒は、気体廃棄設備の一部として1970年に設置された高さ40m(円筒鋼板部33m、コンクリート基礎部7m)の自立式排気筒である[1](Fig. 1)。2015年、ホットラボの建家屋根の補修中に排気筒基礎部アンカーボルトの1本に減肉が確認されたため、排気筒の状況調査を実施した。その結果、排気筒のアンカーボルト(外側16本、内側16本)のうち、外側アンカーボルトの5本、内側アンカーボルトの全数に減肉が確認された。また、フランジ

プレートとアンカーボルトナット間に隙間が確認された。これを受け、安全確保のため排気筒円筒鋼板部を撤去したところ、最終的にアンカーボルト全数に減肉が確認された。原子力機構は再発防止を図るため、当該事象の原因調査を実施した。本書はアンカーボルト減肉及びフランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間の発生に関する原因調査結果について報告する。

2. 概要

2.1 アンカーボルト減肉

原子力機構では平成27年1月末より、排気筒外側に設置されたアンカーボルト周りのモルタルの補修及び防水塗装の工事を開始していた。平成27年2月3日ホットラボの建家屋根の補修中、ひび割れたモルタル(Fig. 2)を撤去したところ、排気筒基礎部アンカーボルトの1本に減肉が確認された(Fig. 3)。また、同年6月29日から7月2

連絡先 :柴田 晃、〒311-1393 茨城県東茨城郡大洗町成田町4002、国立研究開発法人 日本原子力研究開発機構、E-mail: shibata.akira@jaea.go.jp

日にかけて排気筒外側及び内側のアンカーボルトの状況調査を実施した。排気筒アンカーボルトは、排気筒西側より反時計回りに No. 1～No. 16 まで、排気筒円筒鋼板部の内側と外側に計 32 本存在し、そのうち、外側で 5 本、内側全数で減肉を確認した。内側アンカーボルト減肉の例を Fig. 4 に示す。これを受け、排気筒円筒鋼板部を撤去し、ベースプレート下部の調査を実施した。ベースプレート下部には礫状の碎屑物が広がっており(Fig. 5)、これを除去したところ、アンカーボルト周りにはラップ管状の埋め込み跡(ラップ管部)が存在し、このラップ管部内において全数の減肉を確認した。減肉の一例を Fig. 6 に示す。アンカーボルトの公称外径は 25mm であるが、減肉量が最大のアンカーボルトでは残存直径が 6.75mm であった。アンカーボルトの残存直径を Table 1 に示す。

2.2 フランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間

アンカーボルトの減肉状況を調査する過程で、フランジプレートとアンカーボルトを固定する全てのナット(アンカーボルトナット)の間に隙間を確認した。隙間の一例を Fig. 7 に示す。フランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間について、内側を隙間ゲージ、外側を鋼尺で測定した。測定結果を Table 2 に示す。フランジプレート上面とアンカーボルトナット間の隙間は 5～10mm であった。

3. 調査方法

原因調査は「アンカーボルト減肉の発生」と「フランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間の発生」について、それぞれ実施した。起こり得る様々な原因を推測し、それに対する評価を行った。

3.1 アンカーボルト減肉に関する調査方法

アンカーボルト減肉について、起こり得る原因の主な候補として、

- ①排気筒から放出される排気中への腐食性ガスの混入による腐食
- ②アンカーボルトの鉄鋼材料に規格外材料を使用したことによる不純物からの腐食
- ③雨水の浸入による腐食の促進
- ④海塩による腐食の促進

が挙げられた。原因を特定するために、以下の方法で原因調査を実施した。

(1)アンカーボルトの設置されていた排気筒基礎部の構造調査。(2)雨天時等における浸水の有無を確認するための排気筒基礎部に対する散水試験。(3)減肉した排気筒外側及び内側のアンカーボルトについて、SEM エネルギー分散型 X 線分析法(SEM-EDX)による母材と腐食生成物の境界付近の断面の元素分布分析。(4)腐食生成物についての X 線回折による結晶構造解析(XRD)。(5)アンカーボルトの材料を確認するための硬さ試験。(6)金属組織観察及び鋼材の溶鋼分析方法(JIS G 0320)に従った化学成分分析。

3.2 フランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間に関する調査方法

フランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間の発生について、起こり得る原因の主な候補として、

- ①振動等によるアンカーボルトナットの緩み
- ②建設時のアンカーボルトナットの締め付け忘れ
- ③排気筒筒身の沈降
- ④アンカーボルトの伸び

が挙げられた。原因を特定するために、以下の方法で原因調査を実施した。(a)アンカーボルトナットの状況の経年変化を確認するためのアンカーボルトナット状況の写真記録調査。(b)内側アンカーボルト No. 1 及び外側アンカーボルト No. 1、No. 10 について減肉部と荷重分担のないアンカーボルトナット上部の金属組織の比較。(c)ベースプレート及びベースプレート下面の状況調査。

4. 結果

4.1 アンカーボルト減肉に関する調査結果

(1)、(2)の調査として、排気筒外側からの雨水の浸入の有無を確認するために排気筒外側のベースプレート上面から散水試験(Fig. 8)を実施した結果、排気筒外側から散布された水は、ベースプレート下部を通り、遅滞なく排気筒内側に抜け、ベースプレートに沿って広がっていくことを確認した。浸水ルート概念図を Fig. 9 に示す。

(3)の排気筒外側アンカーボルト及び内側アンカーボルトの SEM-EDX の結果を Fig. 10、Fig. 11 に示す。酸素(O)は腐食生成物に分布していること、鉄(Fe)は母材及び腐食生成物ともに分布していること、微量の塩素(Cl)が一部の試料上に形成された層状の腐食生成物の境界面に存在することが確認された。この塩素(Cl)は雨水等とともに海塩が浸入した外部由来(環境)のものと考えられる。また、(4)の腐食生成物の XRD による検出物の一覧を Table 3 に

示す。(3)、(4)より、内側アンカーボルトと外側アンカーボルトで腐食の性質に顕著な差がないことから、排気中に腐食性ガスが混入していた可能性は低い。また、ホットラボの使用実績に対する聞き取り調査では腐食性ガスを取り扱う実験は無かったとの回答を得た。これらの結果より、アンカーボルトの減肉には腐食性ガスが関与していないと判断した。

(6)として外側アンカーボルト No. 11 の分析を行った。Table 4 にアンカーボルト No.11 の成分分析の結果を示す。これらの成分は SS400 材の JIS の規格範囲内であることを確認した。また、(5)としてピッカース硬さ試験法により、アンカーボルト健全部分(外側アンカーボルト No. 11 上部)の硬度値を調査した。Table 5 に硬さ試験の結果を示す。硬度値(平均)は 112.8Hv であり、SS400 相当の硬度値(約 122.9Hv)より低い値であった。これは供試材が丸鋼材であり、かつ、測定点がアンカーボルトの中心寄りであったためと考えられる(一般的に、丸鋼は成型時の圧延加工により外周部分は硬くなるが、その内部は外周部分より軟らかい)。よって、硬度値は SS400 相当であると言える。これらの成分分析及び硬さ試験の結果から、アンカーボルトの材質は、排気筒と同一材料の SS400 相当であると判断した。

これらの結果より、アンカーボルトの減肉は雨水がベースプレート下へ浸入し易かった事、礫が存在したためベースプレート下部は雨水が溜まり易い環境であった事が主たる原因であると結論づけた。ラップ管部及び礫の存在により雨水の溜まり易い環境を助長し、ラップ管部内のアンカーボルトは、高湿潤環境を形成しやすい環境下に曝されていた。このような高湿潤環境下においては、炭素鋼材の腐食が促進され、20℃、100%湿度条件下では約 0.5mm/年の腐食速度に達する事が報告されている[2]。アンカーボルト周辺では、天候によって湿潤・乾燥条件を繰り返され、腐食が促進されていたものと推察される。

4.2 フランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間に関する調査結果

内側アンカーボルトを取り外した直後のフランジプレートの写真を Fig. 12 に示す。アンカーボルトナットの形状に塗装がなく地金が露出している部分が存在する事から、建設当時に塗装を行った時点ではナットが締められていたと判断できる。また、(a)より、平成 21 年度に行われた補修時、平成 24 年の東北地方太平洋沖地震(3.11 地震)後調査時及び平成 27 年の外側アンカーボルト No. 13 の写

真を Fig. 13、Fig. 14 及び Fig. 15 に示す。排気筒外側のフランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間は、外側アンカーボルト No.13 において平成 21 年には存在していない。Fig. 14、Fig. 15 の写真中の外側アンカーボルト No. 13 のナットの高さ(20mm)より隙間の広さを比例計算で求めた結果、平成 24 年には約 1mm、平成 27 年には約 4mm である事が確認された。この事から、隙間は平成 24 年から平成 27 年の間に広がっていったことが明らかになった。

排気筒のベースプレート下は礫が詰まっており、排気筒が礫を圧縮することにより沈降する可能性について検討した。(c)の調査の結果、Fig. 16 に示す位置で比重の高いモルタルと金属の当て板による支持が存在していたことから、礫の圧縮による沈み込みにより当該事象の様な大きな隙間が発生する事は無い事を確認した。

(b)より、アンカーボルトの伸びの可能性について検討した。伸びが発生する場合、細くなった減肉部分に応力が集中する事から、伸びが発生する可能性のある減肉部分と、荷重分担のないアンカーボルトの上端部(ナットより上部の部分)を切出し、縦断面試料を作製して、当該試料の金属組織を現出させるために、ナイタールを用いてエッチング処理を実施してから、光学顕微鏡による観察を行い、金属組織中の結晶粒(フェライト)の軸方向及び径方向の粒径比の比較を行った。それぞれの金相写真から、フェライト結晶の粒径比(軸方向の長さ(縦長さ)と径方向の長さ(横長さ)の比)を 100 点無作為に抽出し、計測した。内側アンカーボルト No.1 について、金相写真及びフェライト結晶の粒径比の正規分布を Fig. 17 に示す。粒径比はアンカーボルトナット上部より減肉部の方が大きいことが分かった。この傾向は、外側アンカーボルト No. 1、No. 10 についても同様であった。この結果、アンカーボルト減肉部では、引張荷重を受け軸方向に伸びが生じていたことが明らかになった。

また、煙突構造設計指針に準じて、排気筒に係る地震時水平方向加速度からアンカーボルトに発生する応力の評価を実施した。アンカーボルトの直径をパラメータとして、地震時水平方向加速度とアンカーボルトに発生する引張応力の関係の評価の結果を Fig. 18 に示す。仮に 1.0G の地震力(地震時水平方向加速度)が発生しても、アンカーボルトが公称外径の 25mm であれば炭素鋼の設計降伏点(235MPa) [3]以下であることから弾性領域内であること、アンカーボルトが平均減肉外径(14.5mm)まで減肉しているとして計算すると、0.5G の地震力でも塑

性領域となり、伸びが発生する結果となることを確認した。また、実際には地震荷重が発生しても 19mm 厚さのフランジプレート、6mm 厚さのリブプレート、9mm 厚さのベースプレート及び 12mm 厚さの排気筒筒身に挟まれて配置されている構造物であり複数のアンカーボルトに分散され、平均化されることなどを考慮すると、上記評価は今回の隙間の事象として妥当な範囲内である。

5. 結言

排気筒のアンカーボルトの減肉及びフランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間について調査した結果、以下のことが確認された。

アンカーボルトの減肉の原因は、雨水がベースプレート下の礫（ラップ管部含む）に染み込み 45 年以上に亘って高湿潤環境を形成したこと、及び排気の流れや天候により乾湿が繰り返されて腐食が促進されたことが原因である。また、フランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間は、腐食により減肉したアンカーボルトが、3.11 地震で発生した引張応力により伸び、その隙間が 3.11 地震以降の余震等により進行したことが主な発生原因である。

このため、高湿潤・乾湿を繰り返さない環境にすることが重要であり、ベースプレート下部への雨水浸入を防止するための対策をとることでアンカーボルトの減肉及びフランジプレートとアンカーボルトナット間の隙間の発生を防ぐことが可能である。また、排気筒を支える排気筒基礎部のアンカーボルトナット、ベースプレート、フランジプレート等の健全性を維持するための適切な保全活動の実施も今後の再発防止対策として重要である。

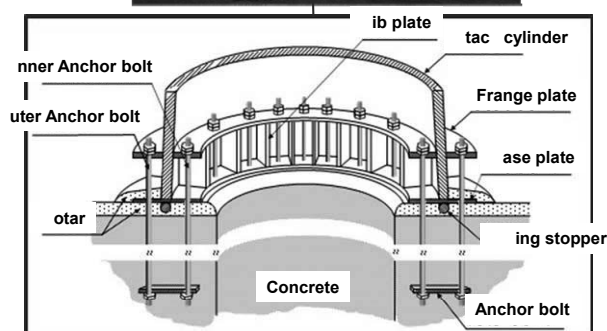
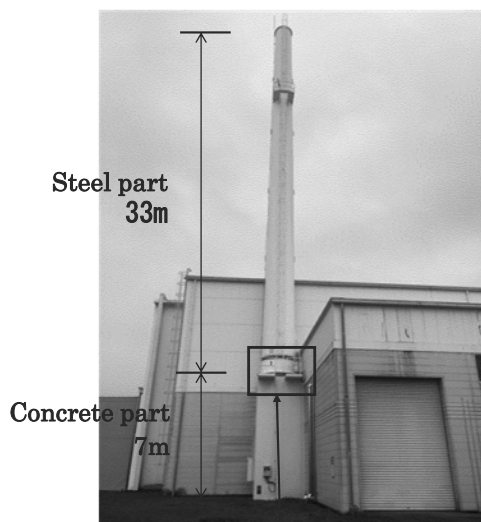


Fig. 1 Exhaust stack of T of laboratory

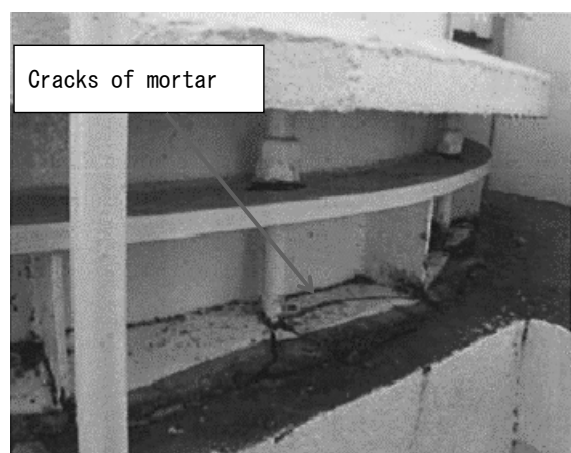


Fig. 2 Cracks of mortar around anchor bolts

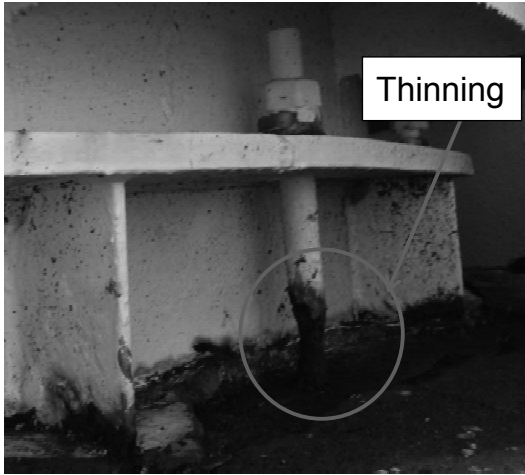


Fig. 3 Thinning of outer anchor bolt



Fig. Thinning of anchor bolts in remain of wrapper tube



Fig. 4 Thinning of inner anchor bolt



Fig. Photo of under base plate condition

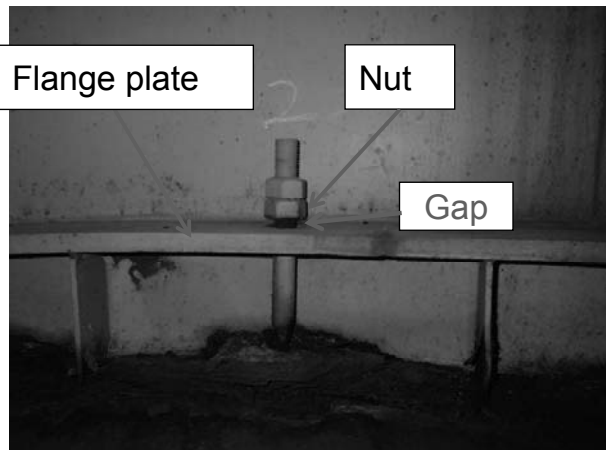


Fig. Gap between flange plate and nut

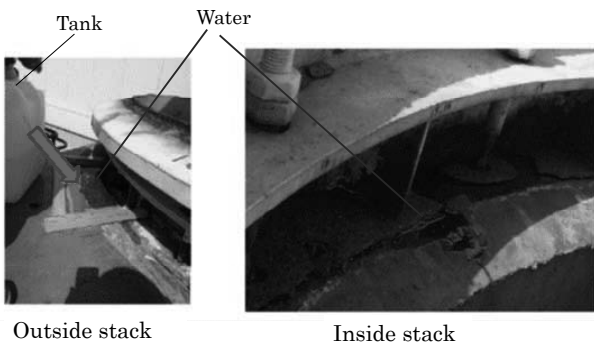


Fig. Water infiltration test

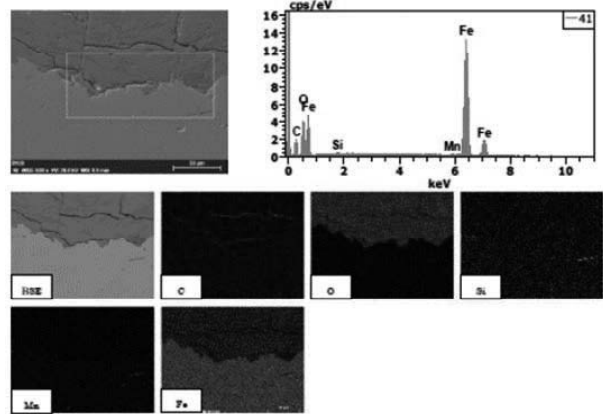


Fig. 11 result of Ducter anchor bolt o. 11

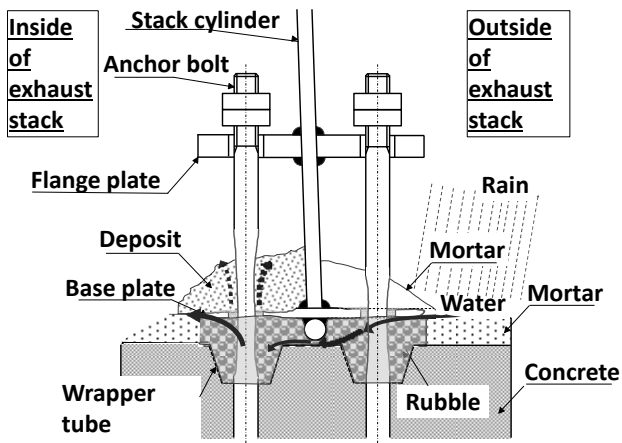


Fig. Schematic drawing of water path



Fig. 12 Photo of flange plate and anchor bolt hole

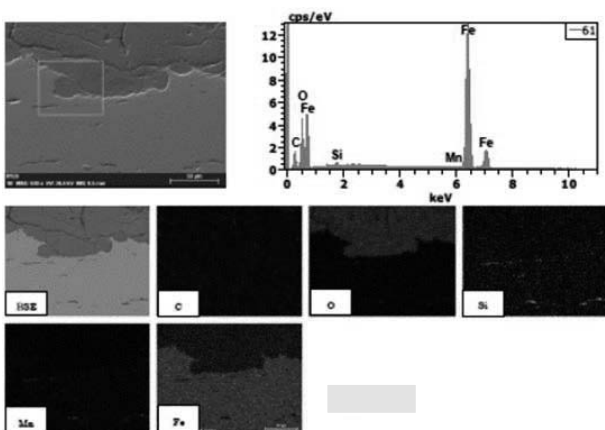


Fig. 1 result of Duct inner anchor bolt o. 2

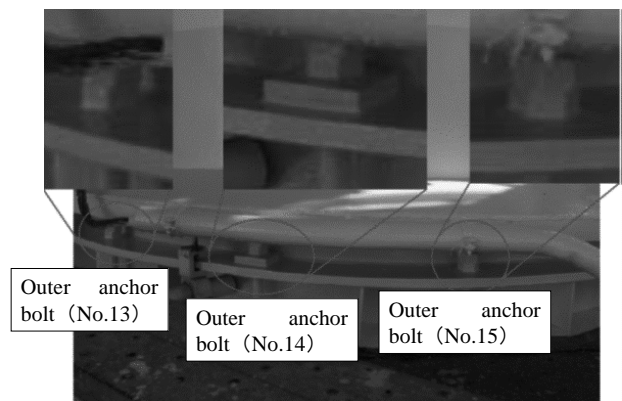


Fig. 13 Photo of outer anchor bolts in 2

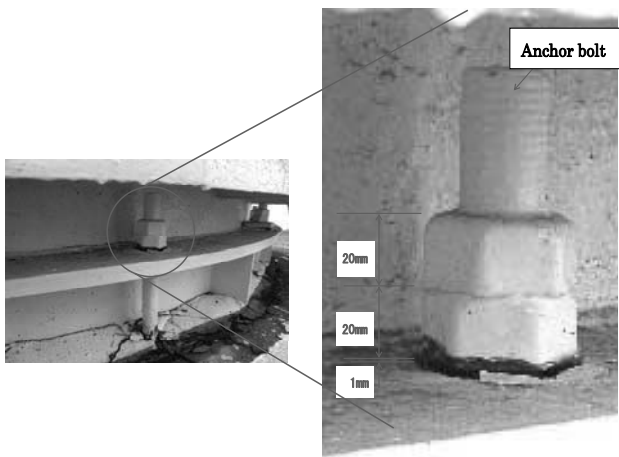
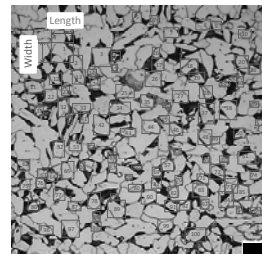
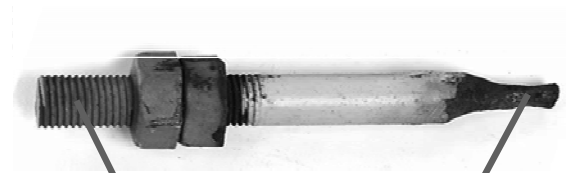
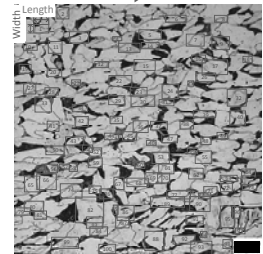


Fig. 14 Photo of the outer anchor bolt o. 13 in 2 12



Upper than nut 50 μm



Thinning part 50 μm

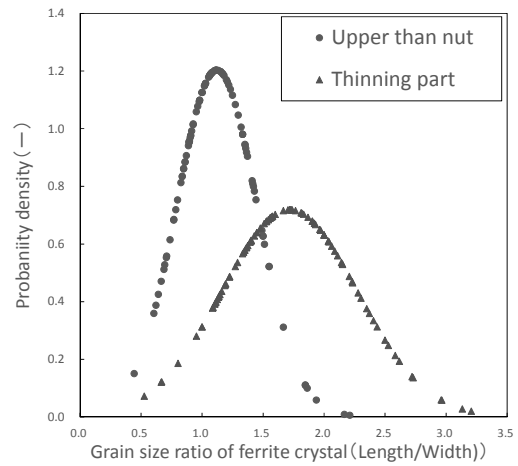


Fig. 1 Comparison of the grain size ratio of ferrite crystal

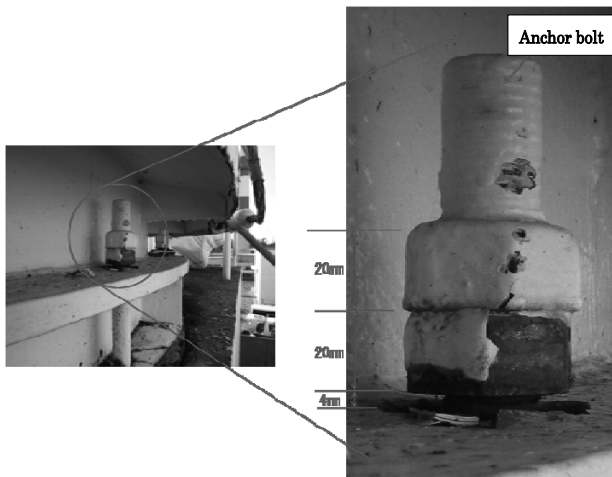


Fig. 1 Photo of the outer anchor bolt o. 13 in 2 1

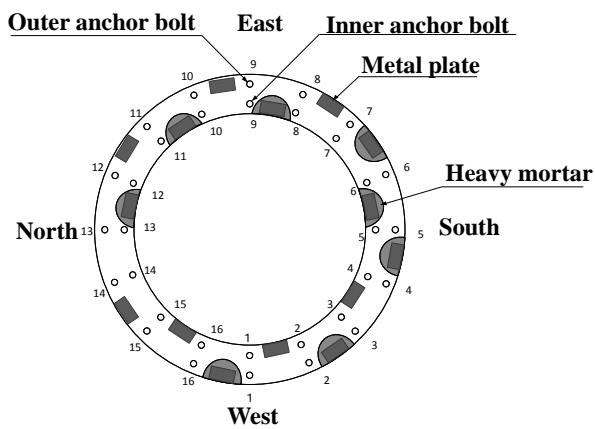


Fig. 1 support of heavy mortar and metal plate

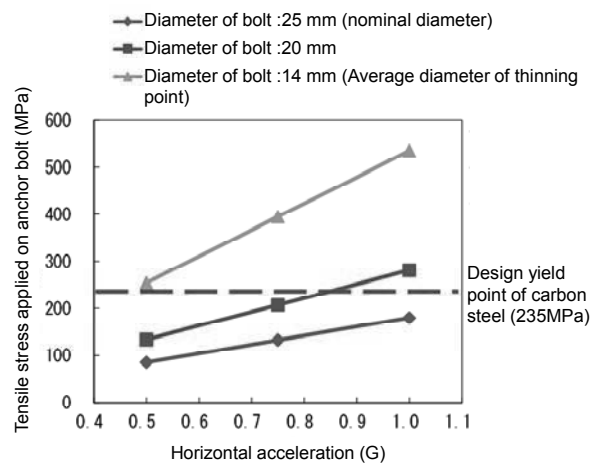


Fig. 1 valuation of stress applied on anchor bolt by horizontal acceleration

Table 1 remaining diameter of anchor bolts

No.	Upper than base plate	In wrapper tube	Minimum
Outer 1	20.90	9.00	9.00
Outer 2	16.40	12.00	12.00
Outer 3	21.00	20.30	20.30
Outer 4	18.80	20.30	18.80
Outer 5	23.80	9.75	9.75
Outer 6	25.50	21.30	21.30
Outer 7	25.20	20.00	20.00
Outer 8	25.30	7.50	7.50
Outer 9	25.50	14.50	14.50
Outer 10	24.30	11.80	11.80
Outer 11	25.30	13.00	13.00
Outer 12	25.10	21.50	21.50
Outer 13	21.30	18.50	18.50
Outer 14	24.60	21.00	21.00
Outer 15	24.80	20.00	20.00
Outer 16	24.40	20.30	20.30
Inner 1	9.46	21.80	9.46
Inner 2	12.70	22.80	12.70
Inner 3	11.90	14.00	11.90
Inner 4	15.60	17.00	15.60
Inner 5	16.60	14.50	14.50
Inner 6	18.60	19.30	18.60
Inner 7	19.40	15.00	15.00
Inner 8	19.80	6.75	6.75
Inner 9	17.40	15.00	15.00
Inner 10	16.50	18.00	16.50
Inner 11	9.79	19.00	9.79
Inner 12	15.70	18.50	15.70
Inner 13	9.85	20.00	9.85
Inner 14	10.00	21.00	10.00
Inner 15	13.00	19.00	13.00
Inner 16	10.60	20.50	10.60

(mm)

Table 2 gaps between flange plate and nuts

No.	Gap (mm)	No.	Gap (mm)
Inner 1	8.35	Outer 1	10
Inner 2	7.85	Outer 2	10
Inner 3	8.70	Outer 3	10
Inner 4	7.30	Outer 4	10
Inner 5	7.25	Outer 5	8
Inner 6	6.40	Outer 6	8
Inner 7	7.15	Outer 7	7
Inner 8	7.05	Outer 8	8
Inner 9	6.65	Outer 9	8
Inner 10	6.25	Outer 10	8
Inner 11	6.30	Outer 11	7
Inner 12	6.15	Outer 12	5
Inner 13	6.80	Outer 13	5
Inner 14	6.95	Outer 14	5
Inner 15	6.55	Outer 15	5
Inner 16	7.90	Outer 16	7

Table 3 result of D analysis

	Fe ₃ O ₄	FeO	FeOOH	SiO ₂	CaCO ₃	TiO ₂
Outer anchor bolt (No.2)	○		○	○	○	
Outer anchor bolt (No.11)	○				○	○
Inner anchor bolt (No.1)	○		○	○		
Inner anchor bolt (No.8)	○		○	○		

Table 4 results of chemical composition analysis

	C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr
SS400 JIS G 3101	—	—	—	≤0.05	≤0.05	—	—
Anchor bolt	0.21	0.06	0.49	0.011	0.021	0.02	0.02

(wt%)

Table results of hardness test

No.	Hardness (Hv)	Remarks
1	113.0	Hardness of SS400 is equivalent to 122.9Hv
2	112.4	
3	112.9	
Ave.	112.8	

参考文献

- [1] 日本原子力研究開発機構, “独立行政法人日本原子力研究開発機構大洗研究開発センター(北地区)核燃料物質使用変更許可申請書.” p. 42, 2009.
- [2] Bruce D. Craig et al., *Handbook of Corrosion Data*. ASM International., 1995.
- [3] 日本機械学会, 発電用原子力設備規格 材料規格. 2012.

