

# MOX燃料加工施設 燃料加工建屋の鉄筋健全性 追加説明資料

2021年 2月 2日



日本原燃株式会社

# 本日の説明主旨



- 前回(12月11日)面談時のコメント回答および今後の対応について説明する。

## 【2020年12月11日面談におけるコメント一覧】

No.	面談時のコメント	資料
1	D35、D38 の鉄筋径全数計測が終了し、エリアごとの「最小径」「根元部減少率」のデータが整理できた段階で報告すること。	P2
2	鉄筋の健全性確認フローは、全体の鉄筋について健全であることの確認等を行うことが明確になるようにフローの見直しをすること。	P7
3	D35、D38 の鉄筋の全数測定からコンクリート打設までの間時間が経過するので、公称径下限値の裕度について評価を行うこと。	P13
4	D32以下についても、伸び一径_根元部のプロット図を示すこと。	P14
5	【参考資料4】ばらつきを考慮した考察において、D35について伸び率16.5%で考察し、今回設定した公称径の下限値で管理することは、ばらつきを考慮しても安全側と判断しているが、16.5を四捨五入して17としてもJIS規格値17%を満たすことにはならないので、伸び率17%により再度考察すること。	P17
6	鉄筋根元部の腐食は「マクロセル腐食」によるとのことだが、腐食要因についてさらに詳細に説明すること。	P18

## 【コメントNo.1】

D35、D38の鉄筋径全数計測が終了し、エリアごとの「最小径」「根元部減少率」のデータが整理できた段階で報告すること。

### ■計測結果の概要と考察

- ・ D35とD38の鉄筋径の計測結果の全エリアの度数分布を図1-1、図2-1に示す。
- ・ エリア別に見た場合でも度数分布に有意な差は見受けられない。(参考資料1, 2参照)
- ・ 「公称径の下限值」※1(D35:34.20mm、D38:37.33mm)を下回る鉄筋は無かった。
- ・ 径の度数分布は概ね正規分布しており、最小径※2が同じになる鉄筋は多数存在していない
- ・ 正規分布となっていることから、細い径の引張試験が規格値を満足すれば、それより太い径の鉄筋は健全であると考え得る。

※1 JISに示されている質量許容差から算出される径をここでは「公称径の下限值」と称する。  
(鉄筋径D29以上の質量許容差は±4%)

※2 腐食により部分的に径が最も細くなった鉄筋の径

# コメント回答【No.1】 —鉄筋径の計測結果—



## ■D35 鉄筋径の計測結果

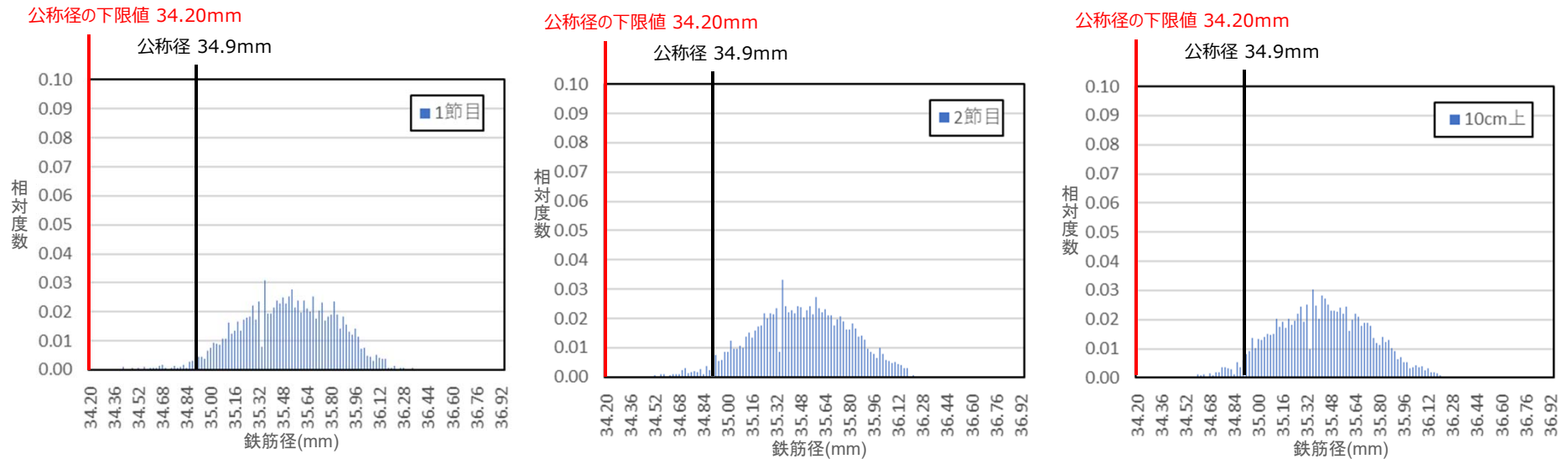


図1-1 径測定結果の度数分布(D35)(計測数:6,033本)

## ■D38 鉄筋径の計測結果

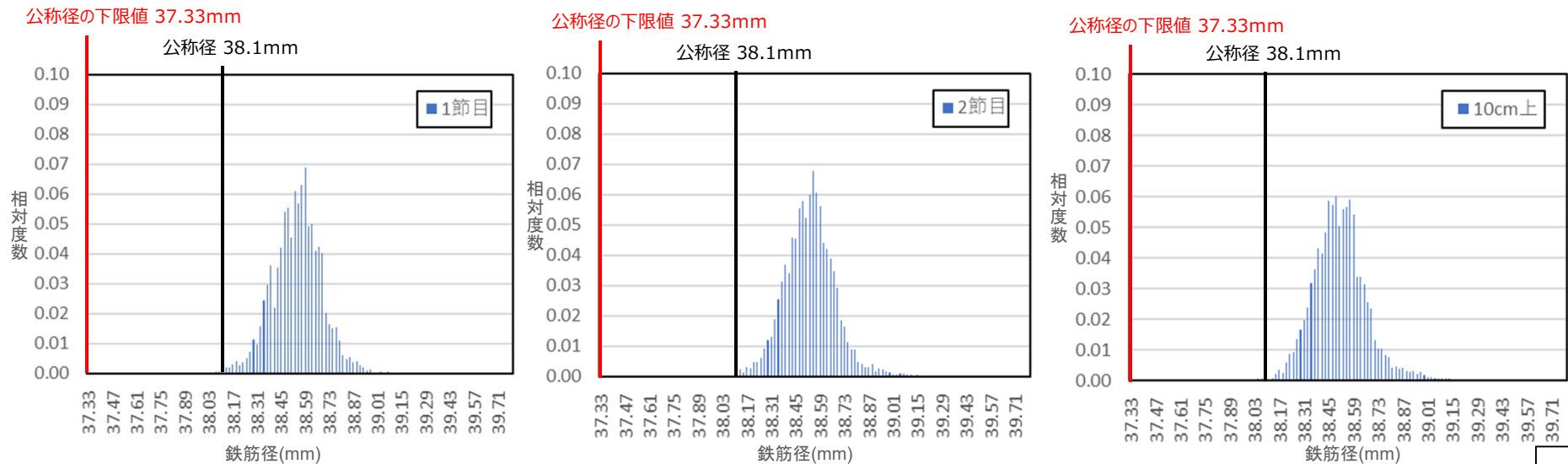


図1-2 径測定結果の度数分布(D38)(計測数:8,189本)

## ■D35 引張試験体の選定

- D35の引張試験の試験体は、各エリアから「最小径」と「根元部減少率が最も大きい」試験体を各1本ずつ採取する。表1-1に、各エリアの径と根元部減少率の順位を示す。

表1-1 径計測結果順位表(D35)

D35	Aエリア			Bエリア			Cエリア			Dエリア			Eエリア		
径	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置
	1	34.42	1節	1	34.39	1節	1	34.39	1節	1	34.37	1節	1	34.41	1節
	2	34.43	1節	2	34.41	1節	2	34.42	1節	2	34.42	1節	2	34.47	1節
	3	34.48	1節	3	34.46	1節	3	34.45	1節	3	34.42	1節	3	34.51	1節
	4	34.53	10cm	4	34.48	1節	4	34.48	1節	4	34.45	1節	4	34.52	1節
	5	34.55	1節	5	34.49	1節	5	34.49	1節	5	34.48	1節	5	34.54	1節
	6	34.55	2節	6	34.51	1節	6	34.50	1節	6	34.52	2節	6	34.54	1節
	7	34.55	2節	7	34.52	2節	7	34.51	1節	7	34.56	1節	7	34.55	1節
	8	34.56	2節	8	34.52	10cm	8	34.52	1節	8	34.56	1節	8	34.59	1節
	9	34.57	2節	9	34.58	1節	9	34.56	1節	9	34.57	1節	9	34.60	1節
10	34.57	2節	10	34.59	1節	10	34.64	1節	10	34.57	10cm	10	34.62	1節	
根元部減少率	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置
	1	0.9722	1節	1	0.9697	2節	1	0.9741	2節	1	0.9615	2節	1	0.9767	2節
	2	0.9734	2節	2	0.9734	2節	2	0.9763	2節	2	0.9769	2節	2	0.9785	2節
	3	0.9749	1節	3	0.9740	1節	3	0.9768	2節	3	0.9774	2節	3	0.9792	1節
	4	0.9756	2節	4	0.9761	1節	4	0.9774	2節	4	0.9784	2節	4	0.9800	1節
	5	0.9762	1節	5	0.9766	2節	5	0.9775	2節	5	0.9790	2節	5	0.9817	1節
	6	0.9766	2節	6	0.9770	2節	6	0.9777	1節	6	0.9793	2節	6	0.9818	2節
	7	0.9769	2節	7	0.9773	2節	7	0.9779	1節	7	0.9801	1節	7	0.9821	1節
	8	0.9770	2節	8	0.9777	1節	8	0.9780	1節	8	0.9821	2節	8	0.9826	2節
	9	0.9773	2節	9	0.9779	2節	9	0.9785	1節	9	0.9821	1節	9	0.9830	2節
10	0.9777	1節	10	0.9782	2節	10	0.9790	1節	10	0.9823	1節	10	0.9832	2節	

□: 引張試験用に採取する試験体

## ■D38 引張試験体の選定

- D38の引張試験の試験体は、「中央部エリア」から「最小径」と「根元部減少率が最も大きい」試験体を各1本ずつ採取する。なお、「1通エリア」、「11通エリア」、「A通エリア」、「I通りエリア」は最小径が公称径(38.1mm)とほぼ同じであり(公称径の下限值に対して余裕がある)、かつ根本部減少率も0.99・・・と1に近いこと、及び、以前実施したD38の引張試験(2020年11月24日の面談にて説明)の伸びの結果がJIS規格値に対して十分な余裕があったことを踏まえ(参考資料3参照)、追加の引張試験は不要と判断する。表1-2に、各エリアの径と根元部減少率の順位を示す。

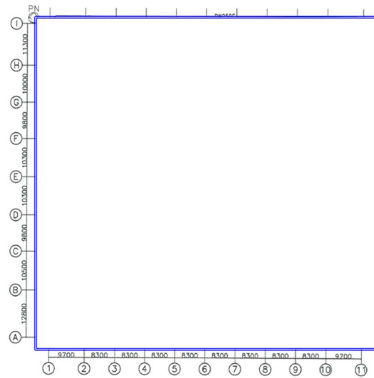
表1-2 径計測結果順位表(D38)

□: 引張試験用に採取する試験体

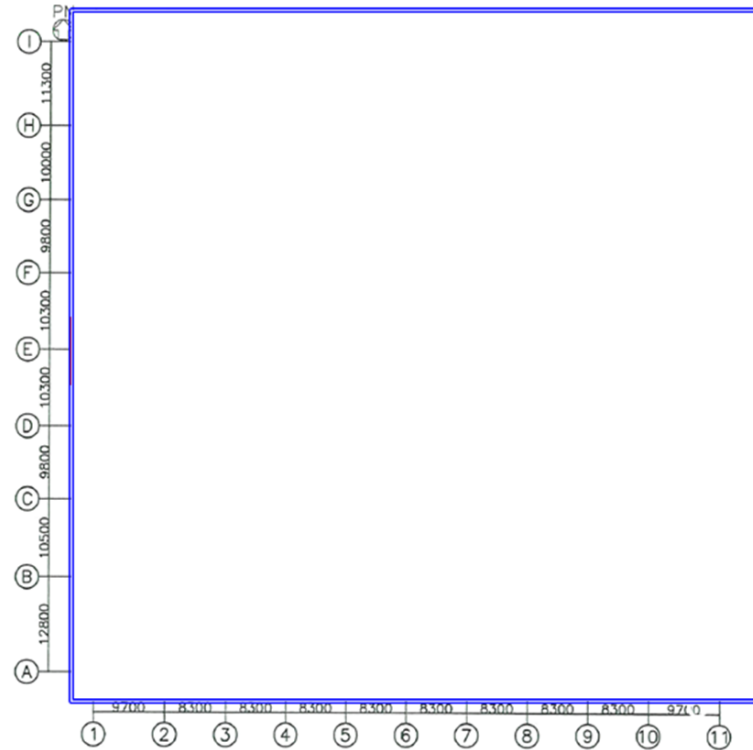
D38	1通エリア			11通エリア			A通エリア			I通りエリア			中央部エリア		
径	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置	順位	径(mm)	測定位置
	1	38.04	10cm	1	38.01	10cm	1	38.03	10cm	1	38.01	1節	1	37.75	2節
	2	38.16	2節	2	38.05	10cm	2	38.17	10cm	2	38.17	2節	2	37.80	1節
	3	38.17	10cm	3	38.05	10cm	3	38.18	1節	3	38.20	2節	3	37.88	10cm
	4	38.19	10cm	4	38.05	10cm	4	38.19	10cm	4	38.20	2節	4	37.89	10cm
	5	38.20	2節	5	38.05	10cm	5	38.20	10cm	5	38.21	2節	5	37.90	2節
	6	38.20	2節	6	38.11	10cm	6	38.20	10cm	6	38.21	2節	6	37.91	2節
	7	38.20	10cm	7	38.15	10cm	7	38.21	2節	7	38.21	10cm	7	37.91	2節
	8	38.21	1節	8	38.16	10cm	8	38.21	10cm	8	38.22	10cm	8	37.94	10cm
	9	38.21	2節	9	38.17	10cm	9	38.21	10cm	9	38.22	10cm	9	37.94	10cm
	10	38.21	2節	10	38.17	10cm	10	38.21	10cm	10	38.22	10cm	10	37.95	2節
根元部減少率	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置	順位	減少率	測定位置
	1	0.9930	1節	1	0.9948	1節	1	0.9943	1節	1	0.9969	1節	1	0.9712	1節
	2	0.9933	2節	2	0.9951	1節	2	0.9951	1節	2	0.9971	1節	2	0.9757	2節
	3	0.9943	2節	3	0.9956	1節	3	0.9961	2節	3	0.9974	1節	3	0.9766	1節
	4	0.9948	1節	4	0.9966	1節	4	0.9961	2節	4	0.9974	2節	4	0.9770	2節
	5	0.9959	1節	5	0.9966	1節	5	0.9964	1節	5	0.9974	1節	5	0.9780	1節
	6	0.9964	1節	6	0.9966	1節	6	0.9964	2節	6	0.9977	1節	6	0.9827	1節
	7	0.9964	2節	7	0.9969	1節	7	0.9964	1節	7	0.9979	1節	7	0.9830	2節
	8	0.9969	1節	8	0.9969	1節	8	0.9964	1節	8	0.9979	2節	8	0.9836	2節
	9	0.9969	2節	9	0.9969	1節	9	0.9964	1節	9	0.9979	1節	9	0.9837	2節
	10	0.9971	1節	10	0.9972	1節	10	0.9964	1節	10	0.9979	1節	10	0.9838	2節

# コメント回答【No.1】 —引張試験体の選定— (補足)

## ■引張試験を採取する試験体場所



分割エリア (D35)



分割エリア (D38)

凡例

- : 最小径の試験体
- : 根元部減少率が最も大きい試験体

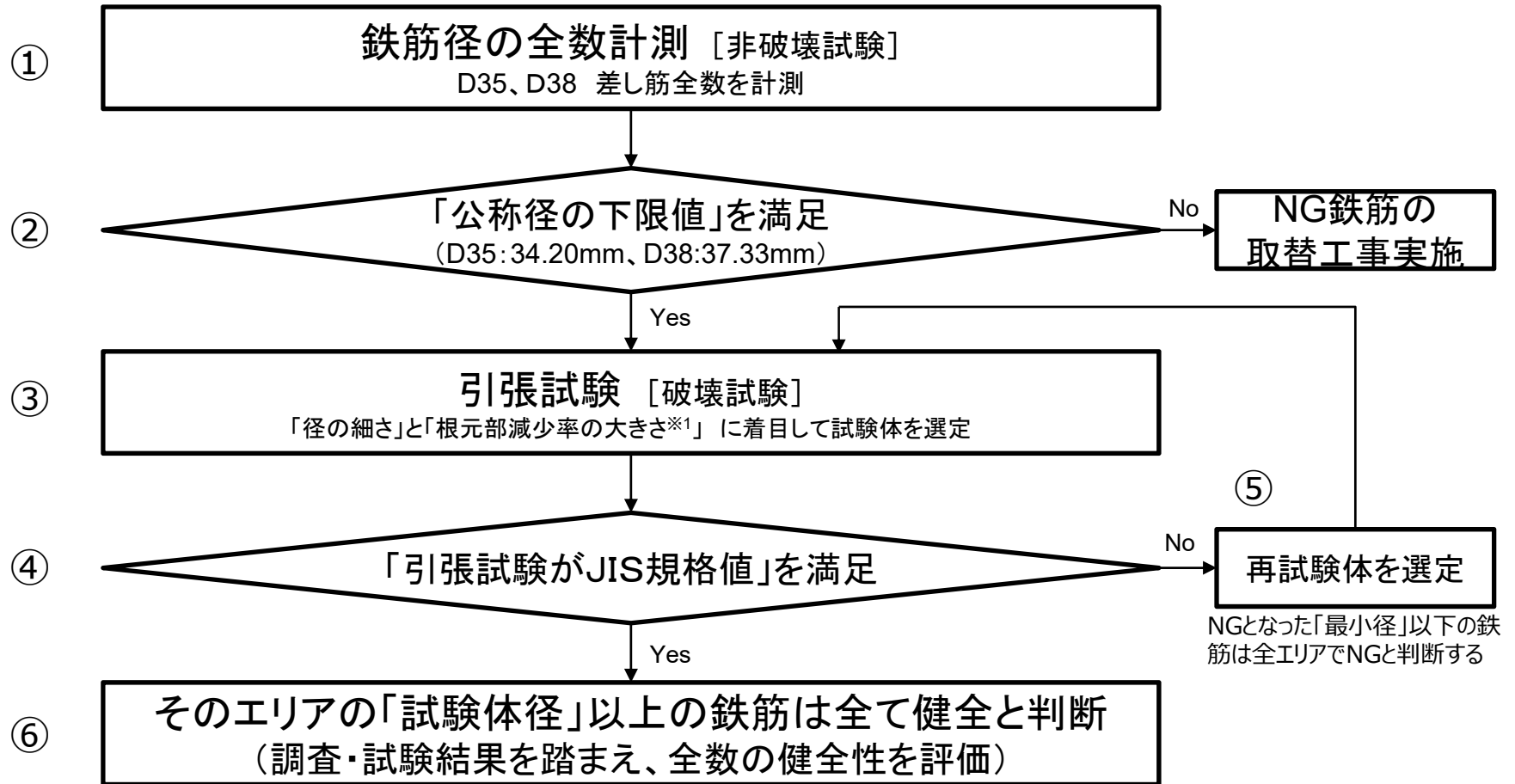
地下3階平面図

□ は核不拡散上の観点から公開できません

# コメント回答【No.2】



**【コメントNo.2】**  
鉄筋の健全性確認フローは、全体の鉄筋について健全であることの確認等を行うことが明確になるようにフローの見直しをすること。



※1 「根元部の径」を「一般部の径」で割った値が小さいほど、根元部減少率が大きいとする。なお、根元部減少率が明らかに小さい場合は最小径の試験体を採取する。

図2-1 鉄筋の健全性確認フロー



## ■ 図2-1 鉄筋の健全性確認フローにおける ①の解説（鉄筋径の全数計測）

- 腐食により根元部の鉄筋径が小さくなったことが、伸び性能の低下につながったと推定されることから、D35並びにD38の鉄筋径を計測し、根元部の腐食の進展が大きな鉄筋を抽出する
- 鉄筋径の測定箇所は図2-2に示す通りコンクリート面から露出している根元部の①第1節部分と②第2節部分、一般部として③100mm程度上方部分を測定する。  
また、計測誤差をなるべく排除するために、各節で3回計測し最小値を各節の値として用いる。

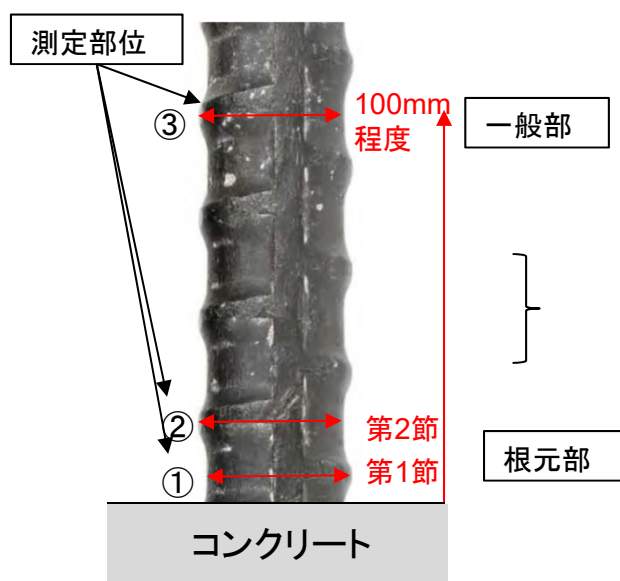


図2-2 鉄筋径測定位置

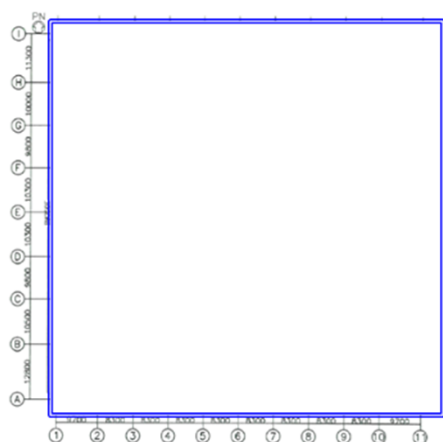
## ■つづき ②の解説（「公称径の下限値」を満足）

- 伸び性能とは別に、形状面での閾値としてJISで規定されている質量許容差(-4%)から換算される径を「公称径の下限値」として定める。  
( D35: 34.20mm 、D38: 37.33mm)
- 今回、径の計測結果において「公称径の下限値」を下回ったものについては形状面での閾値を下回ったものとみなし、鉄筋の取替を行う。
- なお、質量許容差は単位長さ当たりの規格値であることから局所的な径の低下の評価において形状面での閾値として用いることには、保守性を有していると考えている。  
ただし、「公称径の下限値」を満足しているだけで伸び性能の有無を判断するものではない。

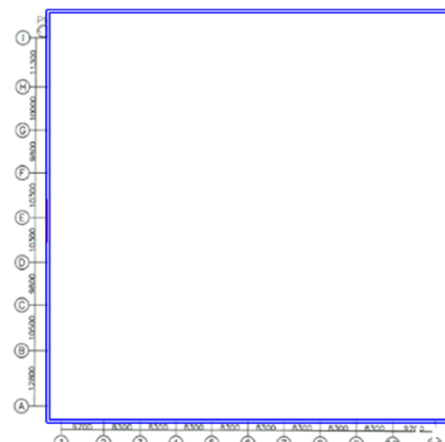
## ■ つづき ③の解説（引張試験）

- 先にランダムに採取した抜取り試験体(D35:15本、D38:12本)に加え、以下の鉄筋に対して引張試験を実施する。
- D35については、まず初めにエリア毎の「最小径の鉄筋」に加え「根元部減少率が大きい鉄筋」についてエリア毎に1本採取する。（計10本）
- D38については、先のランダムに採取した鉄筋の径や根元部減少率とに大きな差がないこと、および、ランダムに採取した鉄筋の伸びの性能が十分にあったことから、外周立ち上がり壁からの引張試験は行わない。（参考資料3）

一方、中央エリアのD38については、最小径と根元部減少率が大きな2本について引張試験を実施する。（計2本） なお、中央エリアのD38は最小径の低下割合が小さく（公称径の99%）、また伸びの規格値が15%であることから、D35に比べ伸びの性能が規格値を下回るリスクは小さいと思われるが、確認までに引張試験を実施する。




分割エリア (D35)



分割エリア (D38)

地下3階平面図

 は核不拡散上の観点から公開できません

## ■ つづき ④の解説（引張試験がJIS規格値を満足）

- 引張試験結果が以下のJIS規格値を満足するところを確認する。

D35: 17%

D38: 15%

## ■ ⑤の解説（再試験体を選定）

- 各エリアから抜き取った鉄筋がNGとなった場合、NGとなった鉄筋径以下の他のエリアの鉄筋についても取替を行う。
- P4、5で抽出した試験体がNGであれば、再試験用の試験体を選定し、引張試験を実施する。なお、試験体の選定にあたっては、試験結果の状況を踏まえ追加試験の要否、ならびに、追加試験体の選定を行う。

## ■ つづき ⑥の解説（そのエリアの「試験体径」以上の鉄筋は全て健全と判断）

- 先にランダムに採取した抜取り試験体（D35：15本、D38：12本）に加え、径の計測結果から抽出された「径の細さ」と「根元部減少率の大きさ」に着目して、試験体を選定して引張試験を実施する。  
なお、JISではロットからランダムに試験体を抜取り、試験を実施しているが、今回は伸び性能の小さいと推定される径の細い鉄筋に着目した引張試験を行うことになるので、JISの抜取りに比べ厳しめの試験体の選定となっていると考え得る。
- また、JISでは50t毎にランダムに1本の抜取り試験を行うことになっている。  
今回、腐食の見られたD35の施工重量が約90t、D38が約190tであることから、JISにおける抜取り率と同等以上である。
- 以上より、「細かい径」と「根元部減少率が大きい」試験体がJIS規格値を満足していれば、その試験体以上の鉄筋は全て健全と判断する。

## コメント回答【No.3】



### 【コメントNo.3】

D35、D38 の鉄筋の全数測定からコンクリート打設までの間時間が経過するので、公称径下限値の裕度について評価を行うこと。

- 抜き取り引張試験を実施したD35:15本、D38:12本における、径減少量を基に今後の減少量を推定し、公称径の下限値との関係を確認する。
- 地下3階差し筋は、屋外露出していた2013年から2017年の4年間で腐食が進展したと考えている。各径毎の1ヶ月当たりの減少量を表3に示す。
- D35、D38壁のコンクリート打設は、最も遅い工区で今から6ヶ月後となるが、仮に6ヶ月後まで同じ減少量で腐食が進展したとしても、公称径の下限値を下回ることはない。
- なお、鉄筋径の計測完了後に細い径の鉄筋に対してモルタルで仮養生を施しているため、腐食の進展は抑えられ、公称径の下限値に対して保守的な評価となっている。  
(仮養生:計測径34.60mm以下の鉄筋の根元部をモルタル養生の実施)

表3 鉄筋径の減少量と公称径の下限値

	A. 減少量	B. コンクリート打設までの想定腐食量 (A×6ヶ月)	C. 全数測定結果の最小鉄筋径	D. 腐食進展を考慮した6ヶ月後の想定径 (C-B)	E. 公称径の下限値
D35	0.008mm/月※1	0.048mm	34.41mm	34.36mm >	34.20mm
D38	0.004mm/月※2	0.024mm	37.80mm	37.77mm >	37.33mm

※1 抜き取り引張試験を実施したD35:15本の最大腐食量0.32mmを0.4mmに切り上げて、屋外露出されていた4年間(48ヶ月)で除した値

※2 抜き取り引張試験を実施したD38:12本の最大腐食量0.11mmを0.2mmに切り上げて、屋外露出されていた4年間(48ヶ月)で除した値

## 【コメントNo.4】

D32以下についても、伸びー径 根元部のプロット図を示すこと。

- D22、D29、D32の抜き取り引張試験結果による、根元部径と伸びの関係を図4-1に示す。
- D32以下の細径鉄筋について「公称径の下限値」を満足していても、伸びのJIS規格値を満足しなかった事に関する考察を次頁に示す。

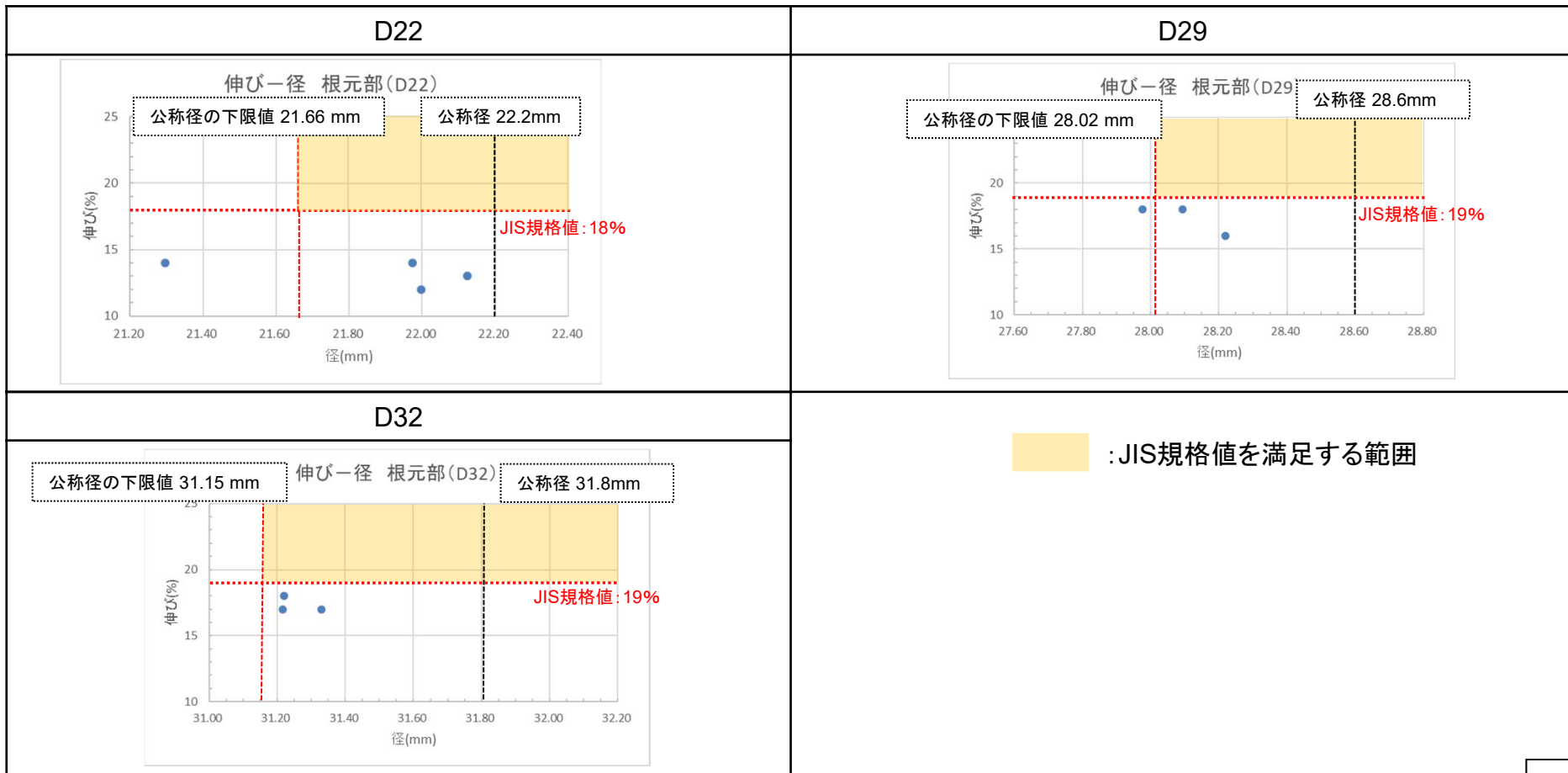


図4-1 根元部径と伸びの関係

- 鉄筋が同一環境下で暴露されている場合、腐食による径の減少量が、鉄筋径により相違しないと想定し、鉄筋径の断面積の低下率を比較する。
- 鉄筋径の減少量を仮に0.27mm<sup>\*</sup>として試算すると、鉄筋径が細くなるに従い断面積の低下率が大きくなる。(表4参照) このことが伸びの低下率に関係し、D32以下の鉄筋において公称径の下限値以上でも伸びのJIS規格値を満足しなかった要因と考えられる。
- 以上のことを概念図に示したものを次頁の図4-2に示す。

※ 抜き取り引張試験を実施したD35:15本の腐食による平均減少量

表4 鉄筋径の減少量と断面積の低下率の関係(試算)

		D22	D29	D32	D35	D38
通常	公称値(mm)	22.2	28.6	31.8	34.9	38.1
	断面積(mm <sup>2</sup> )【A】	387	642	794	957	1140
鉄筋伸びが 一様に減少すると 仮定した場合	減少量(mm)	0.27	0.27	0.27	0.27	0.27
	鉄筋径(mm)	21.93	28.33	31.53	34.63	37.83
	断面積(mm <sup>2</sup> )【B】	377	630	780	941	1123
	断面積の低下率【1-B/A】	0.026	0.019	0.018	0.017	0.015



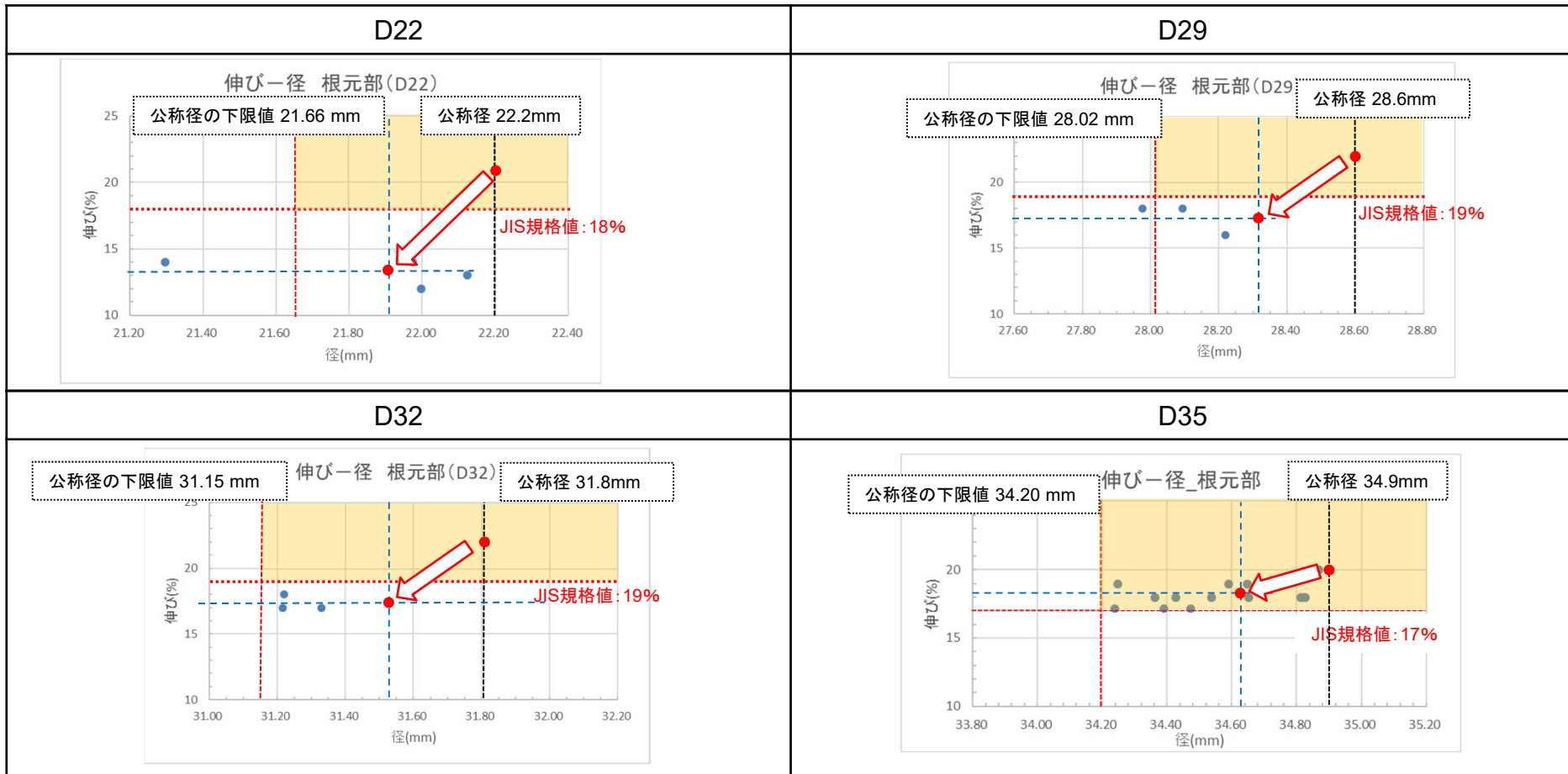


図4-2 概念図(径毎の伸び低下傾向)  : JIS規格値を満足する範囲

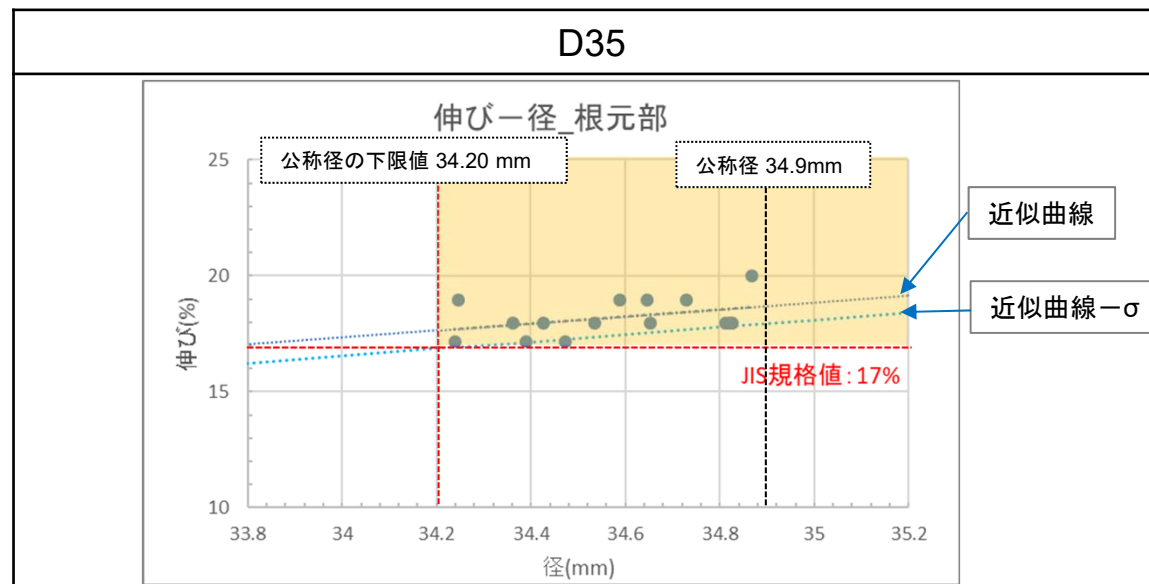
← : 径毎の伸び低下傾向  
 ● 始点: (X座標: 公称値、Y座標: 伸びのJIS規格値+3%(仮定))  
 ● 終点: (X座標: 公称値-0.27mm、Y座標: 抜取り引張試験結果による伸びの平均値)

# コメント回答【No.5】

## 【コメントNo.5】

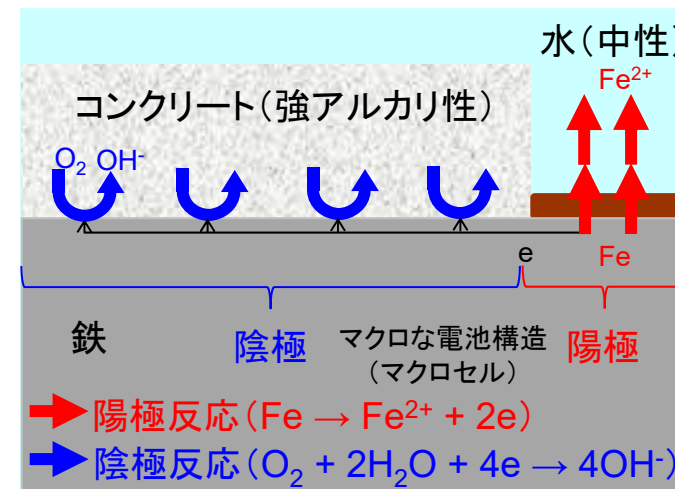
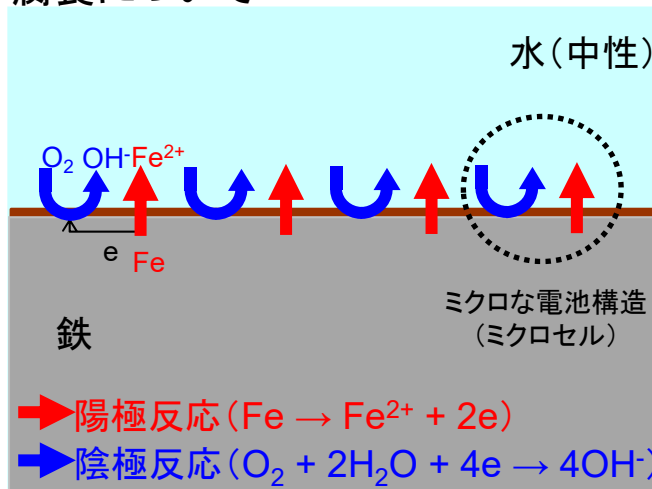
【参考資料4】ばらつきを考慮した考察において、D35について伸び率16.5%で考察し、今回設定した公称径の下限値で管理することは、ばらつきを考慮しても安全側と判断しているが、16.5を四捨五入して17としてもJIS規格値17%を満たすことにはならないので、伸び率17%により再度考察すること。

- JISにおいて伸びの引張試験結果の数値は整数値に丸めなければならないと示されており、試験結果の小数点第一位を四捨五入することは、JIS上は問題ない。
- ここでは、先にランダムに採取したD35の引張試験結果について、鉄筋径と伸びの相関の近似曲線と、標準偏差分(1 $\sigma$ )ばらついた場合の近似曲線を参考までに算出した場合、1 $\sigma$ ばらつき考慮時にJIS規格値伸び17%を満足する径の臨界点は概ね公称径の下限値に対応する傾向が見られた。



【コメントNo.6】  
鉄筋根元部の腐食は「マクロセル腐食」によるとのことだが、腐食要因についてさらに詳細に説明すること。

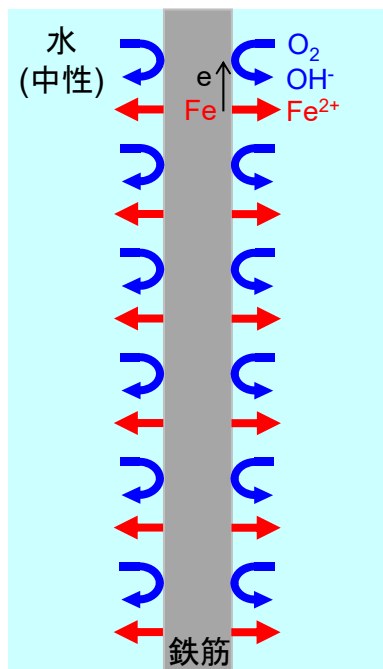
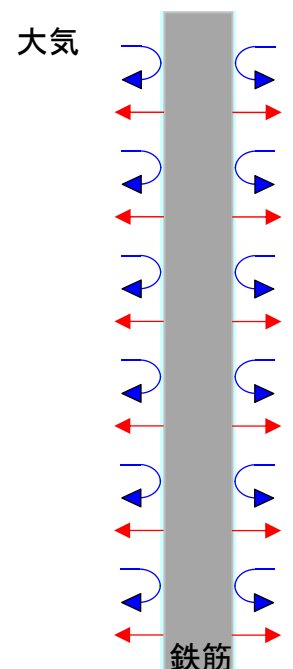
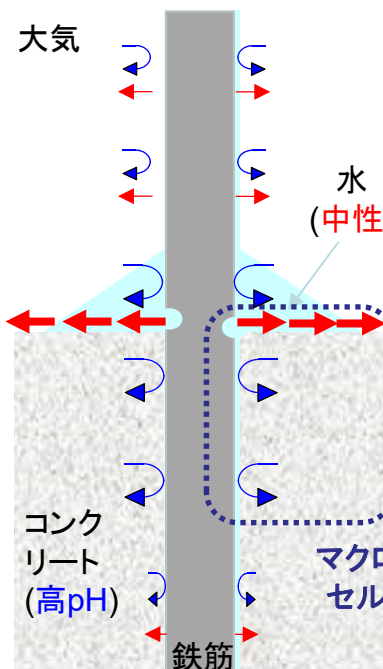
■マクロセル腐食について



- 左上図のように鉄が水中(中性)にあると、鉄の表面に陽極と陰極の無数のミクロな電池構造が形成される。
- 右上図のように鉄の表面に接する環境が局所的に異なる場合、陽極と陰極がマクロに分離する場合がある。
- このとき、陰極の面積に対して陽極の面積が小さい場合、陽極反応が局所に集中する結果として腐食速度が大きくなる。
- このように、マクロに分離した電池構造に起因して局所的に腐食が促進される現象を「マクロセル腐食」と呼ぶ。
- コンクリート中の細孔溶液のpHは強アルカリ性のため、一部がコンクリートに埋設された鉄筋がpH中性の水中や大気中に露出していると、右上図のように露出した鉄筋部位の腐食が促進される。
- 腐食の詳細要因を次頁に示す。

■鉄筋根元部の腐食の要因について

- 鉄筋根元部で腐食が進行した要因は、コンクリート埋設部に最も近い鉄筋露出部に**陽極反応**が集中した結果、腐食速度が加速されたと推定される。

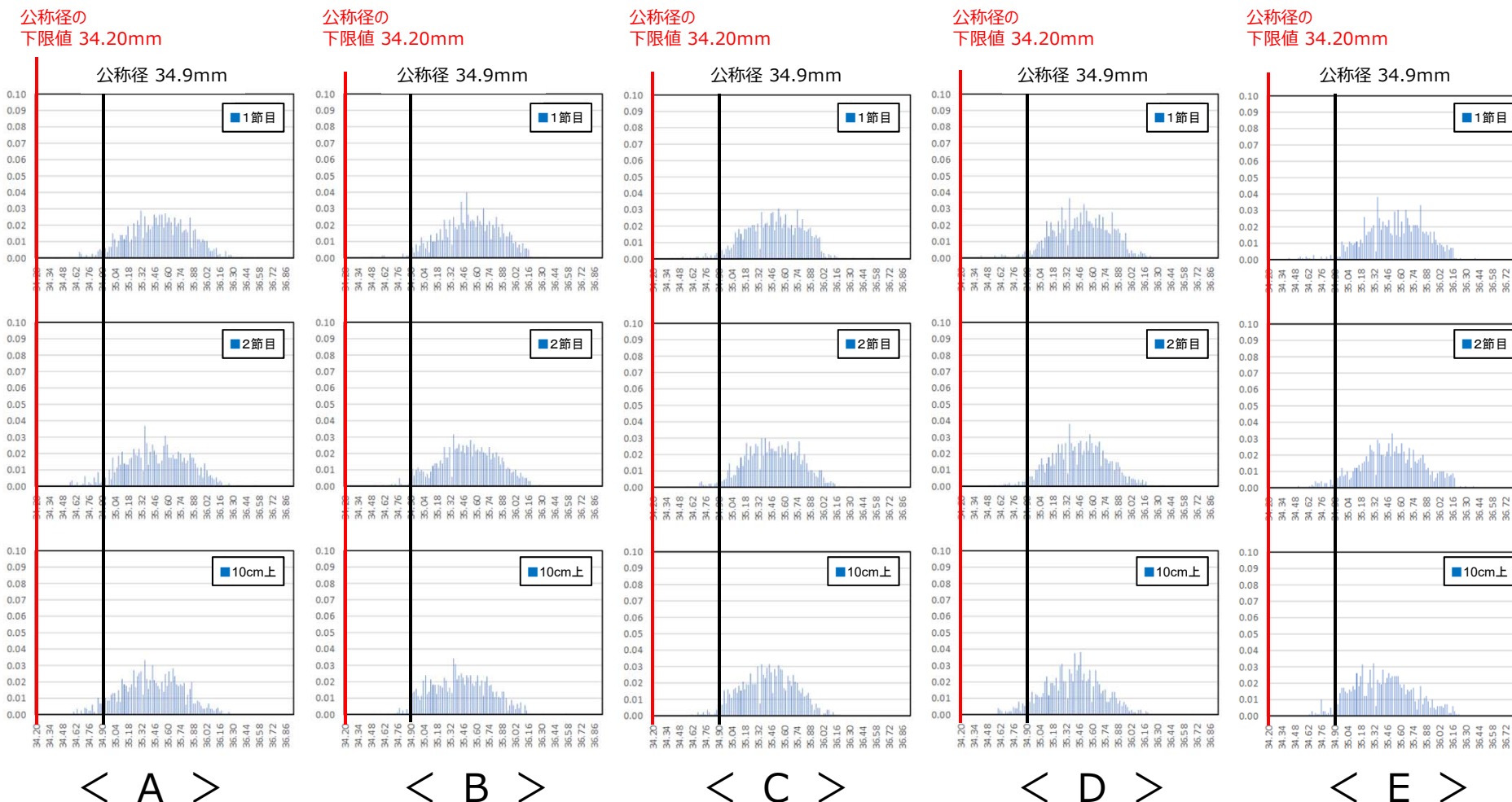
水中の鉄筋腐食	大気中の鉄筋腐食	今回の事象(推定)
		
<p>中性の水の中では<b>陽極反応</b>と<b>陰極反応</b>からなる無数のミクロナ電池構造が形成され、鉄は全面が均一に腐食する(全面腐食)。</p>	<p>湿潤大気中でも、材料表面の薄い水膜中で同様のミクロナ電池が形成され、鉄は全面腐食する。</p> <p>ただし、水分が少ない場合は腐食速度は水中より低下する。</p>	<p>鉄筋の一部が高pHのコンクリート中に埋設し、かつ地際に水たまりなどの<b>水分(中性)</b>がある場合、pH差異により<b>陽極反応</b>と<b>陰極反応</b>が露出部/埋設部の境界で分離する。(マクロセルの形成)</p>

- 健全性確認フローに基づきD35、D38の鉄筋の健全性を評価する。
- また、使用前事業者検査においては、上記評価結果も含め、確認が必要な項目について検査を実施する。
- なお、健全性が評価できたD35、D38の鉄筋については、鉄筋の更なる錆による腐食の抑制のためにもB3F壁のコンクリート打設は、配筋・型枠作業が完了し検査を行った部材から順次実施して行く。

# 【参考資料1】 D35 エリア毎の鉄筋径計測結果 分布図



各グラフの横軸は、鉄筋径 (mm)  
縦軸は、相対度数

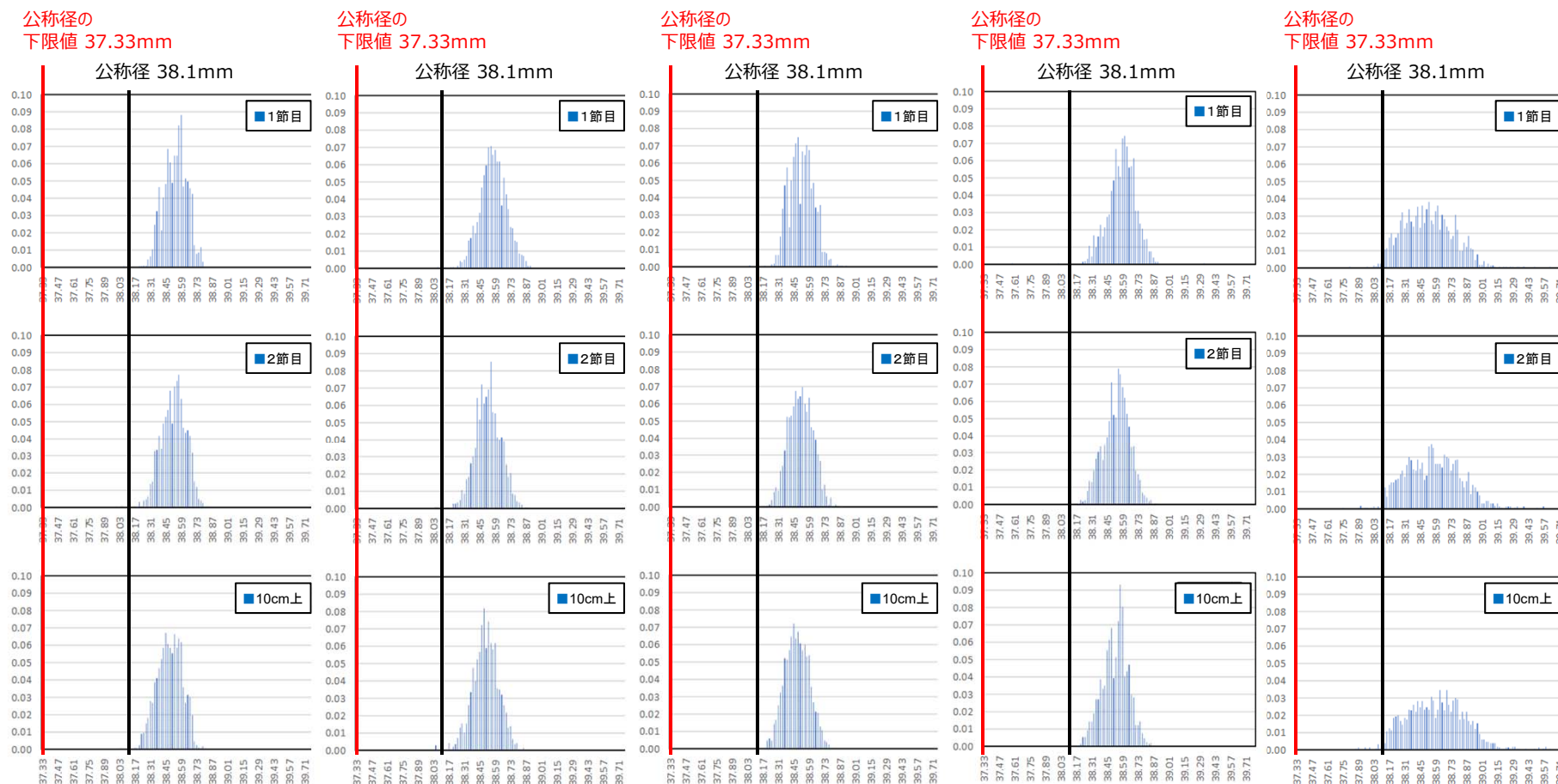


- 径の値の度数分布は概ね正規分布しており、最小径が同じになる鉄筋は多数存在していない。
- 最小径（腐食により部分的に径が最も細くなった鉄筋）の引張試験が規格値を満足すれば全体が健全であると示せる分布になっている。

# 【参考資料2】 D38 エリア毎の鉄筋径計測結果 分布図



各グラフの横軸は、鉄筋径 (mm)  
縦軸は、相対度数



< 1通 >

< 11通 >

< A通 >

< I通 >

< 中央 >

- 径の値の度数分布は概ね正規分布しており、最小径が同じになる鉄筋は多数存在していない。
- 最小径（腐食により部分的に径が最も細くなった鉄筋）の引張試験が規格値を満足すれば全体が健全であると示せる分布になっている。

## 【参考資料3】 D38の鉄筋径と伸びの関係

- D38については、「公称径の下限值」に対して十分余裕があった。伸びについてもJIS規格値を満足していた。  
なお、伸びの小さな試験体があったが、これは破断位置C(標点間外での破断)による、正しい伸びがカウントされていないデータであり、伸びの性能は確保されていると考えられる。

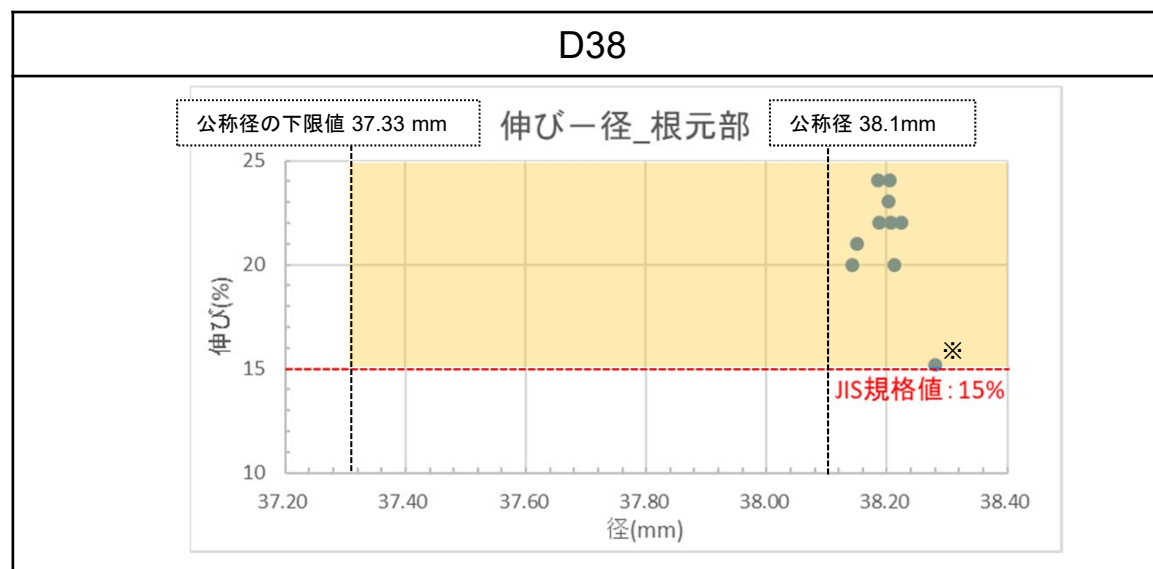


図 計測径と伸びの関係  : JIS規格値を満足する範囲