

研 究 期 報

No. 121

2024 年 12 月

四 国 電 力 株 式 会 社
四 国 電 力 送 配 電 株 式 会 社
株 式 会 社 四 国 総 合 研 究 所

研 究 期 報 1 2 1 号 目 次

コンクリート構造物の長期活用評価技術を踏まえた 余寿命診断に関する研究（その 2）	1
Research on remaining life diagnosis based on long-term utilization evaluation technology for concrete structures (Part 2)	
高性能粒子計測式水質分析装置の開発	9
Development of the High-performance Water Quality Analyzer Utilizing a Particle Counter	

コンクリート構造物の長期活用評価技術を踏まえた
余寿命診断に関する研究(その2)

目 的

我が国の沿岸部コンクリート構造物の多くは、高経年化しており、一部では塩害劣化が顕在化している。沿岸部コンクリート構造物を長期にわたり有効活用していくためには、塩害劣化進行の正確な予測や予測結果に基づく余寿命診断、適切な補修時期の判断が必要である。そこで本稿では、既報で報告した塩害劣化進行予測手法の実構造物への適用性を確認するとともに、本予測手法の実用性を考慮し、鉄筋腐食(断面断面減少量)を考慮した曲げ耐力に基づく余寿命診断、ならびにこれらを用いた補修時期の判断手法等について報告する。

主な成果

○塩害劣化進行予測手法の実構造物への適用

本研究では、既報の塩害劣化進行予測手法を実構造物に適用するため、鉄筋腐食に影響を及ぼす表面塩化物イオン濃度、鉄筋かぶり、見掛けの拡散係数の3因子のばらつきを考慮し、図1に示すような組み合わせで劣化進行計算を実行する。3因子の組み合わせは、塩分条件の厳しさに応じて4通りずつあり、3因子の組合せによって得られた劣化進行予測結果について、各環境別に鉄筋腐食量を求め、所定経年後の鉄筋腐食量のばらつきを求めるものである。

本手法を実構造物に適用したところ、実構造物の調査結果と概ね合致する結果が得られたことから、本手法の有効性が確認できたと考えられる。

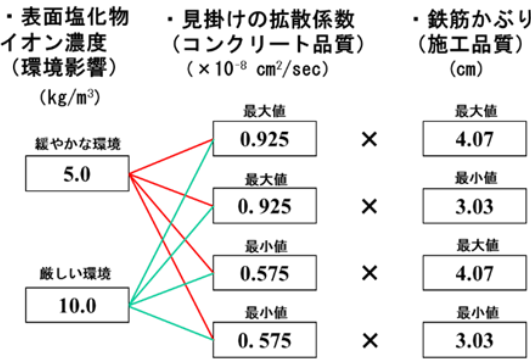


図1 影響3因子の組合せ

○余寿命診断の評価基準の設定

実構造物の余寿命診断に資するため、鉄筋腐食量（鉄筋断面減少率）と曲げ耐力の関係性を実験により確認し、限界鉄筋腐食量を 15%と設定した。塩害劣化手法により得られた塩害劣化進行曲線に限界鉄筋断面減少率を補修判断の閾値として設定した上で、想定補修時期を示した結果、補修実績とも概ね合致したことから、本研究で構築した塩害劣化進行予測手法と鉄筋腐食量に基づく余寿命評価基準を併用することで、鉄筋の断面減少量から構造物の修繕時期が予測できる可能性が得られた（図 2）。

上記の結論の総括を図 3 に示す。本検討結果を今後の修繕計画の目安として活用していくことを期待する。

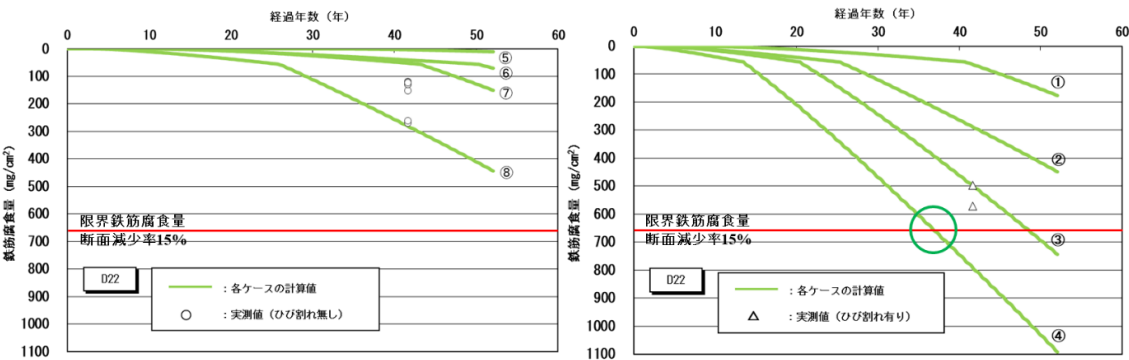


図 2 塩害劣化進行曲線および想定補修時期（左：緩やかな環境、右：厳しい環境）

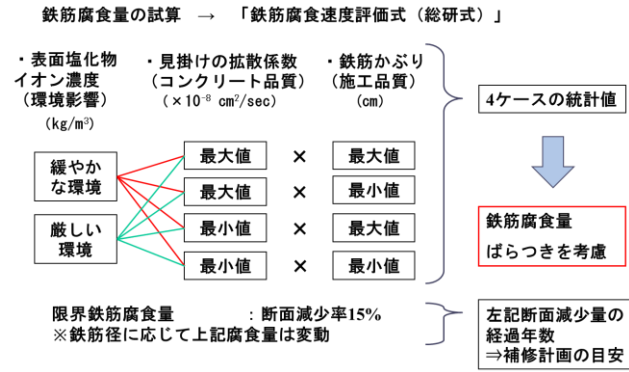


図 3 塩害劣化進行予測手法および補修判断時期の目安

研究担当者	野村悠太 (株式会社四国総合研究所 土木技術部) 廣瀬文明 (四国電力株式会社 土木建築部 (現：経営企画部))
キーワード	塩害劣化, 劣化進行予測, 鉄筋腐食, 塩化物イオン濃度, 鉄筋かぶり, 拡散係数, 塩害劣化進行曲線, 限界鉄筋腐食量
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

高性能粒子計測式水質分析装置の開発

目 的

粒子計測方式により、ボイラ給水中の懸濁物質濃度(SS 濃度)をリアルタイムに測定できる、高性能粒子計測式水質分析装置を開発した。本装置は、ボイラに持ち込まれるスケール量の積算値を管理し、ボイラ化学洗浄時期の推定等に寄与することができる。

主な成果

1. 粒子計測による SS 濃度測定方法

火力プラント水中に存在するスケールの粒度分布測定結果を基に、ボイラに持ち込まれるスケールの測定に必須の粒径範囲を定めた(図 1)。最適な粒子測定方法を検討して標準粒子測定試験を行い、使用する粒子センサを選定した。

2. 装置設計製作

製作した装置の内部は 2 段構成となっており、下段に主要機器である粒子センサ、ダイヤフラムポンプ、流量計などを配置している。また、装置前面のパネルコンピュータに専用ソフトをインストールし、各機器の制御、データ収集、および SS 濃度の算出を行っている(図 2、図 3)。

3. 検量線作成

本装置は粒子を真球として体積計算しているが、プラント給水中の粒子は真球でないため、算出した濃度が手分析濃度(真値)と一致するよう、検量線を作成してスパン調整する必要がある。JIS K 0102-1:2021 で規定される懸濁物質量の測定方法に基づき SS 濃度を求め、それらの手分析値と装置測定値を用いて検量線を作成し、スパン調整を行った。分析値と測定値の相関は決定係数で 0.85 となり、高い相関が確認できた(図 4)。

4. 現地における連続測定試験

石炭火力発電所に本装置を設置して連続測定試験を実施した結果、定格時は $0.5 \mu\text{g/L}$ でほぼ一定の SS 濃度が、発電機出力変動時は出力に連動して変化していることが確認できた(図 5)。

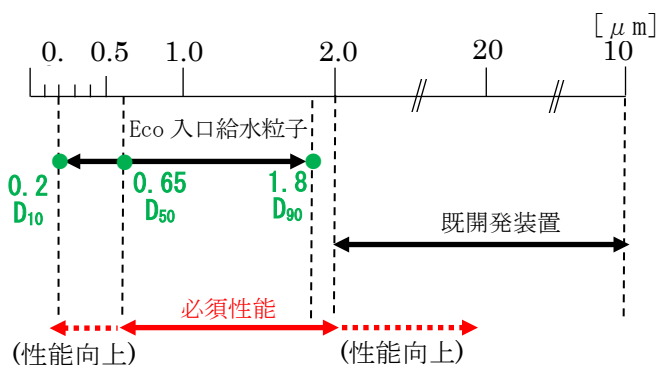


図1 Eco入口給水における粒子径と装置の可測粒径

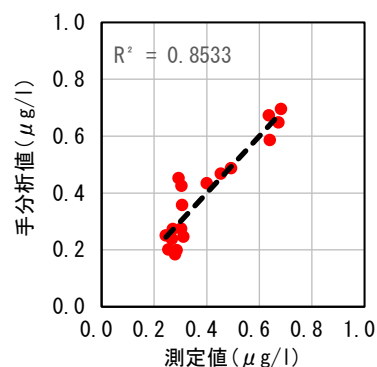


図4 測定値-手分析値(SS濃度)の相関

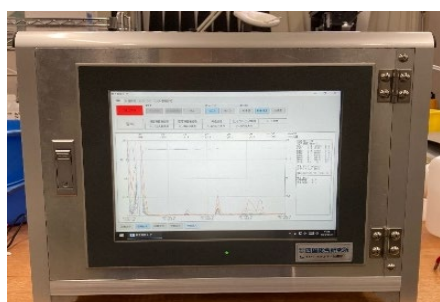


図2 装置前面



図3 装置内部

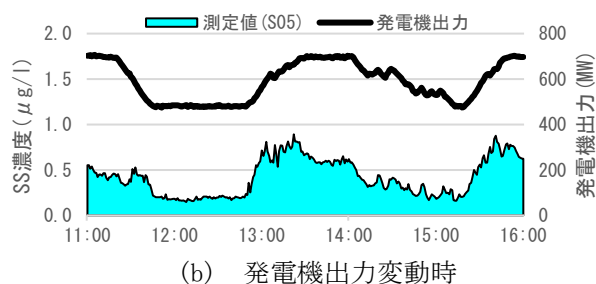
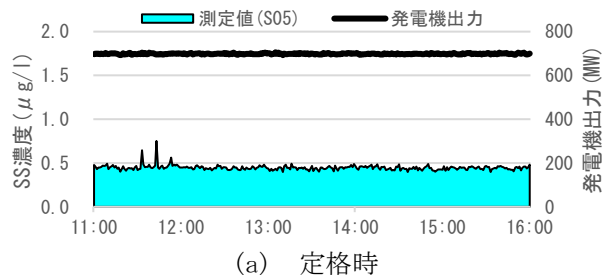


図5 現地連続測定試験時のSS濃度トレンド

研究担当者	海稻 隆成 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部) 渡邊 賢 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部 現：四国計測工業株式会社 電気計装部) 土田 雅彦 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部 現：四国計測工業株式会社 西条事業所) 山地 豪 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部)
キーワード	粒子計測器，懸濁物質濃度，検量線，全鉄濃度，スケール， ヘマトイトスケール，ボイラ給水，ボイラ化学洗浄
問い合わせ先	株式会社四国総合研究所 経営企画部 TEL 087-843-8111 (代表) E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp https://www.ssken.co.jp/

[無断転載を禁ず]

コンクリート構造物の長期活用評価技術を踏まえた余寿命診断に関する研究 (その2)

(株)四国総合研究所 土木技術部 野村 悠太
四国電力(株) 土木建築部 (現: 経営企画部) 廣瀬 文明

キーワード: 塩害劣化
劣化進行予測
鉄筋腐食
限界鉄筋断面減少率

Key Words: Salt damage deterioration
Deterioration progression prediction
Rebar corrosion
Critical rebar area reduction rate

Research on remaining life diagnosis based on long-term utilization evaluation technology for concrete structures (Part 2)

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Yuta Nomura

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil Engineering And Architecture Department

Fumiaki Hirose

Abstract

This paper confirms the applicability of the previously reported method for predicting the progression of salt damage to actual structures, and reports on a method for assessing remaining life and determining the timing of repairs based on bending strength taking into account the reduction in cross-sectional area of reinforcing bars.

In order to apply the previously reported salt damage deterioration progression prediction method to actual structures, the variations in surface chloride ion concentration, rebar cover, and apparent diffusion coefficient that affect rebar corrosion are taken into account, and the deterioration progression is calculated to determine the variation in the amount of rebar corrosion after a specified period of time. The results of this method were generally consistent with the survey results of actual structures, and therefore the effectiveness of this method was confirmed.

In order to contribute to the remaining life diagnosis of actual structures, the relationship between the rebar area reduction rate and bending strength was confirmed through experiments, and the critical rebar area reduction rate was set at 15% as the repair decision threshold in the salt damage deterioration prediction method. The estimated repair times indicated were generally consistent with the actual repair records, suggesting that it may be possible to predict the repair times of structures from the reduction in cross-sectional area of reinforcing bars.

1. はじめに

我が国の沿岸部コンクリート構造物の多くは、高経年化しており、一部では塩害劣化が顕在化している。沿岸部コンクリート構造物を長期にわたり有効活用していくためには、塩害劣化進行の正確な予測や予測結果に基づく余寿命診断、適切な補修時期の判断が必要である。

そこで、既報では、これらのうち、コンクリート構造物の塩害劣化進行予測手法について報告した(図1、図2、式(1))。

本稿では、既報の塩害劣化進行予測手法の実構造物への適用性を確認するとともに、本予測手法の実用性を考慮し、鉄筋腐食量(鉄筋断面減少率)を考慮した曲げ耐力に基づく余寿命診断、ならびにこれらを用いた補修時期の判断手法等について報告する。

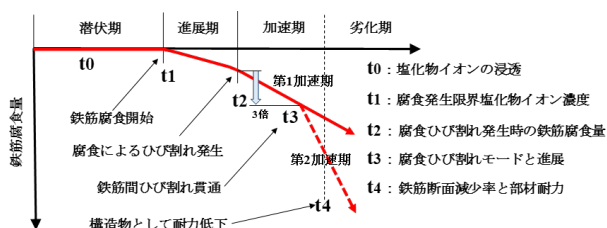


図1 塩害劣化進行過程

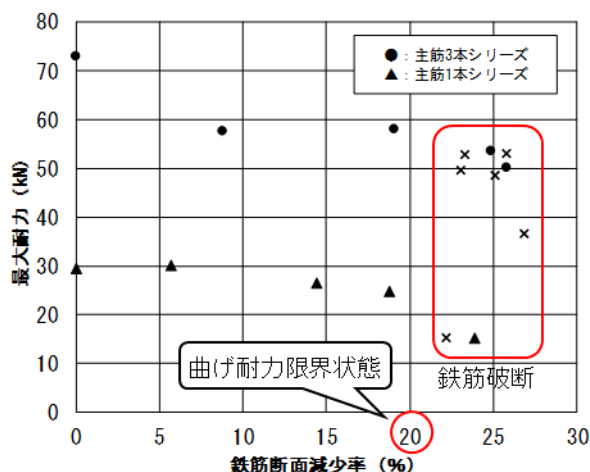


図2 鉄筋断面減少率と最大耐力の関係性

$$R(T, C, D) = R_0 \cdot C_T(T) \cdot C_C(C) \cdot C_D(D) \quad \cdots \text{式(1)}$$

ここで、 $R(T, C, D)$: コンクリート温度と塩化物イオン濃度とコンクリート品質の影響を考慮した腐食速度 (mg/cm²/年)

2. 実構造物への適用性に関する検討

2.1 ばらつきを考慮した評価の必要性

実構造物の鉄筋腐食量は、既報の通りばらつきが大きい。塩害劣化に伴う鉄筋腐食量を画一的に設定するのではなく、ばらつきを考慮して評価することが考えられる。

例えば、図3に示すように、鉄筋腐食量に影響する因子のばらつきを評価し、劣化進行予測を考慮することによって鉄筋腐食量のばらつきを合理的に評価することが考えられる。

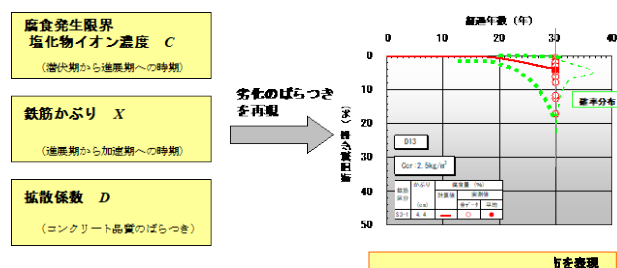


図3 ばらつきを考慮した塩害劣化進行予測のイメージ

ばらつきを考慮した塩害劣化進行予測手法の一つとしては、表1に示すように塩害劣化の各影響因子について、調査結果などから平均値、標準偏差を算定するとともに(対数)正規分布を仮定し、この条件で乱数を発生させて発生値の組合せ分だけ鉄筋腐食予測計算を行い鉄筋腐食量のばらつきを求める方法(モンテカルロシミュレーション)が考えられる(図4)。しかしながら、図5のように、各影響因子の数値のばらつきは正規分布から乖離している場合も少なくないことや実務面からは簡易な計算・評価手法の構築が望まれることから、本稿では、ばらつきの評価方法について検討するとともに、モンテカルロシミュレーションではなく各影響因子のばらつき値の最大値と最小値の組合せから鉄筋腐食量のばらつきを予測し、実構造物の調査結果との比較により、その有効性を検証することとした。

表1 影響因子の統計量の例

腐食発生限界塩化物イオン濃度 C_{cr} (kg/m ³)	平均	3.07
	標準偏差	1.26
	分布形状	対数正規分布
かぶり X (cm)	平均	4.4
	標準偏差	1.0
	分布形状	正規分布
調査時点の見かけの拡散係数 D_t (cm ² /sec)	平均	1.610×10^{-8}
	標準偏差	0.483×10^{-8}
	分布形状	対数正規分布

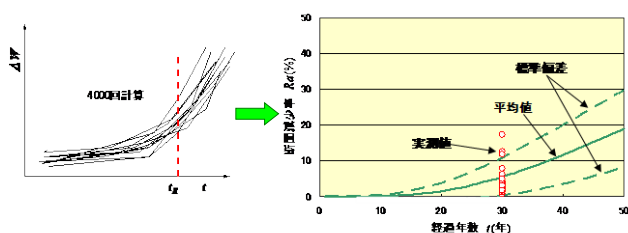


図4 モンテカルロシミュレーションによる鉄筋腐食量のばらつき

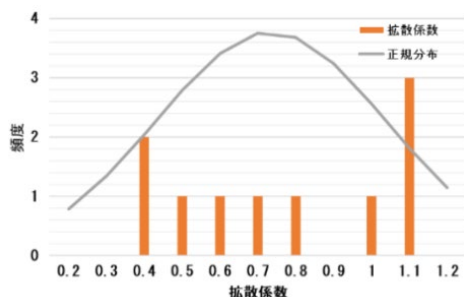


図5 コンクリートの見掛けの拡散係数の調査結果分布

2.2 塩害劣化の影響因子のばらつきの検討

(1)対象設備

ここでは、1969年（昭和44年）に竣工し、これまでに複数回の塩害補修が行われている平面形状約32m×26mの荷揚栈橋を対象に、塩害劣化の各影響因子のばらつきの評価方法について検討した。

梁部の主筋はD22が125mmピッチ、純かぶりが39mm、スラブの主筋はD16が200mmピッチ、純かぶりが42mmである。

鉄筋腐食量のばらつきに影響する因子としては、3因子（表面塩化物イオン濃度、鉄筋かぶり、コンクリートの見掛けの拡散係数）を設定する。

(2)コンクリートの見掛けの拡散係数

コンクリートの見掛けの拡散係数は、コンクリートの品質を表す指標と考えられる。本拡散係数は、新規構造物の場合には一般的に水セメント比W/Cより設定されるが、供用開始から相当の期間が経過した構造物については、施工当時のW/Cを確認することが困難な場合もある。

そこで、本研究では、コアサンプリングにより得られる奥行き方向の塩化物イオン濃度分布から求められるコンクリートの見掛けの拡散係数を採用し、本栈橋の複数の調査結果から平均値と標準偏差を求めることとした。

また、見掛けの拡散係数の頻度分布は、図5の調査結果より、正規分布ではなく矩形分布でモデル化した。なお、矩形分布については、矩形分布の簡易モデル化に関する手法であるRossen blue法を採用し、矩形分布をその分布の重心位置に集中させて、矩形分布と同等の状態にモデル化した（図6）。

上記モデル化した分布状態から、見掛けの拡散係数の統計量は以下になる。

- ・平均値： $0.75 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$
- ・標準（重心）偏差： $0.175 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec}$
 $(0.525 \sim 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{sec})$

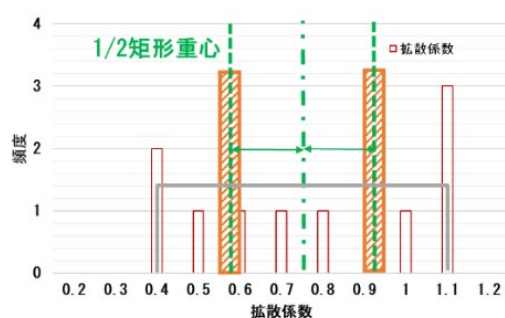


図6 Rossen blue法による矩形分布モデル化

(3)鉄筋かぶり

鉄筋かぶりは、施工品質を表す指標と考えられる。図7は、東京湾の栈橋の梁部材の鉄筋かぶりについて、設計値からの不足値（ ΔX ）の分布を示したものである。

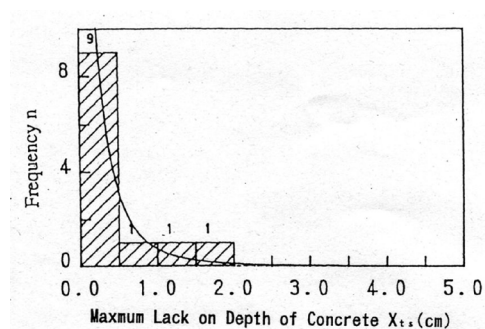


図7 栈橋実構造物の梁部材におけるかぶり不足値の分布

予測に用いるかぶり： $X^* = X_d - \Delta X$

（ここに、 X_d ：設計かぶり＝3.9cm）

ΔX は、上記の既往調査結果から、対数正規分布として以下の通りとした。

平均値：0.35cm，標準偏差値：0.52cm

よって、かぶりモデル値の範囲は、
 $3.9 - (0.35 + 0.52) \sim 3.9 - (0.35 - 0.52)$
 $= 3.03 \sim 4.07 \text{ cm}$

(4) 表面塩化物イオン濃度

図8に示す塩化物イオン濃度分布から回帰分析した結果より求められた表面塩化物イオン濃度は、1.424wt%であった。しかし、コンクリート単位重量を $2,300 \text{ kg/m}^3$ と仮定すると、コンクリート表面塩化物イオン濃度は特に飛来塩分の多い飛沫帯の 13.0 kg/m^3 (表2参照)に対し 32.7 kg/m^3 と相当大的な値となる。そこで、栈橋端部(比較的厳しい環境)の現地調査分析結果を参照したところ、コンクリートの表面部分(深度 $0 \sim 2 \text{ cm}$)の塩化物イオン濃度は $0.410 \text{ wt}\% \sim 0.483 \text{ wt}\%$ であったことから、表面塩化物イオン濃度については、 $(0.410 + 0.483) \times 1/2 = 0.445 \text{ wt}\%$ より 10.3 kg/m^3 程度となるため、現地条件を採用し 10.0 kg/m^3 とした。

また、飛沫帯から遠く汀線近傍である栈橋中央の比較的緩やかな環境における表面塩化物イオン濃度は、比較的厳しい環境と同様に現地調査分析結果を採用することとし、 5.0 kg/m^3 とした。

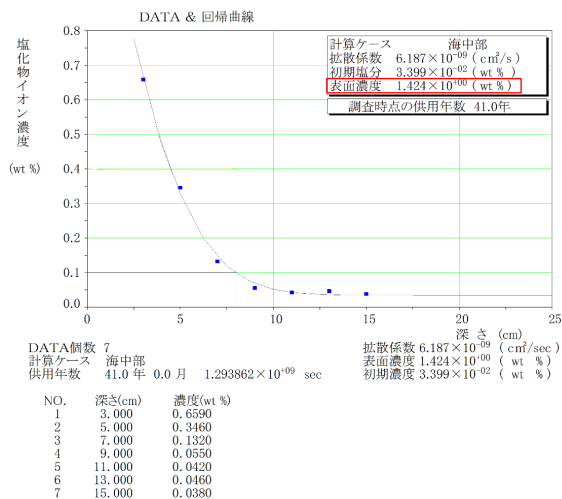


図8 回帰分析結果

表2 コンクリート表面イオン濃度

コンクリート表面塩化物イオン濃度 $\text{Co (kg/m}^3\text{)}$							
		飛沫帯	海岸からの距離 (km)				
			打継付近	0.10	0.25	0.50	1.00
飛来塩分が多い地域		13	9.0	4.5	3.0	2.0	1.5
飛来塩分が少ない地域			4.5	2.5	2.0	1.5	1.0
関東、東海、近畿、四国、九州							

2.3 荷揚栈橋への適用性検討

荷揚栈橋を対象に、前述したモデル化の適用性について検討する。

塩害劣化進行計算は、先に考慮した3因子のばらつきを以下に示すような組合せで考慮する。

図9に示すように、まず3因子の内、表面塩化物イオン濃度について、栈橋構造物が置かれている環境因子が比較的緩やかな環境として 5.0 kg/m^3 、比較的厳しい環境として 10.0 kg/m^3 を設定する。

設定した各々の環境下において、残りの2因子である見掛けの拡散係数と鉄筋かぶりの各ばらつきにおける最大値と最小値を図のように4通りに組合せ、各組合せにおいて劣化進行予測計算を行うことにより鉄筋腐食量のばらつきを再現する。

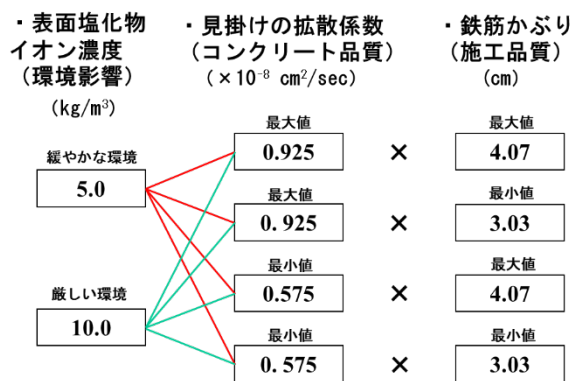


図9 影響3因子の組合せ

(1) 比較的緩やかな環境

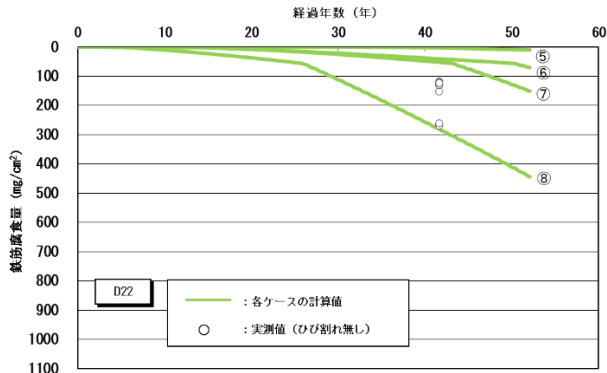
先の設定条件下での試算結果を図10に示す。計算は、既報の研究成果である塩害劣化進行評価計算式で実施した(式(1)参照)。緑線が見掛けの拡散係数と鉄筋かぶり条件の組合せによる4線である。3因子の組合せによる計算値に対し、現地調査を実施した設備設置後41年経過時点のひび割れが生じていない場合の鉄筋腐食量の実測値がほぼ含まれていることがわかる。本検討におけるモデル化によって、鉄筋腐食量実測値の腐食ひび割れが生じていない範囲のばらつきについて上手く再現できている。

(2) 比較的厳しい環境

先の設定条件下での試算結果を図11に示す。サンプル数は少ないものの、3因子の組合せによる計算値範囲内に現地調査を実施した設備設置後

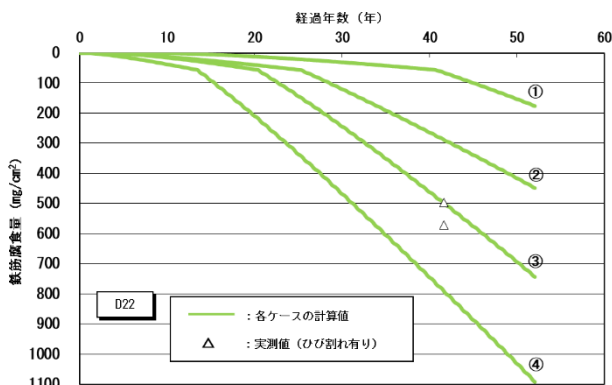
41 年経過時点の鉄筋腐食量の実測値がほぼ含まれていることがわかる。

以上の検討より、本研究のばらつきを考慮した予測手法によって、精度良く荷揚棧橋での鉄筋腐食量のばらつきを再現できていた。



No.	拡散係数	設計かぶり	表面塩化物イオン濃度
⑤	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	$5.0\text{kg}/\text{m}^3$
⑥	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	
⑦	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	
⑧	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	

図 10 塩害劣化進行曲線（緩やかな環境）



No.	拡散係数	設計かぶり	表面塩化物イオン濃度
①	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	$10\text{kg}/\text{m}^3$
②	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35-0.52): 4.07\text{cm}$	
③	平均 $-0.175 \pm 0.575 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	
④	平均 $+0.175 \pm 0.925 \times 10^{-8} \text{ cm}^2/\text{s}$	設計値 $-(0.35+0.52): 3.03\text{cm}$	

図 11 塩害劣化進行曲線（厳しい環境）

2.4 荷揚棧橋の余寿命検討

荷揚棧橋へのモデル化の適用性について確認できたことから、本棧橋の鉄筋腐食量の予測結果をもとに余寿命診断および補修時期の目安について検討を実施した。

なお、鉄筋腐食量で余寿命を評価するにあたり、鉄筋の平均断面減少率と曲げ耐力の関係性について実験を行った（図 12）。



図 12 曲げ載荷試験

図 13 は、電食により鉄筋の腐食を促進させたコンクリート梁の曲げ載荷試験を行い、破壊後に調査した主筋の平均断面減少率、曲げ耐力および破壊モードをプロットしたものである。この実験結果から、塩害劣化期の限界状態として、鉄筋腐食によってコンクリート圧壊モードから鉄筋破断モードへ移行する平均断面減少率は 20%程度と考えられる。

一方、本試験体のコンクリートの圧壊あるいは主筋の破断が生じる際の荷重から曲げ耐力を計算したところ、計算により求められる曲げ耐力は、載荷実験による曲げ耐力に比べて小さくなっていた。

そこで、算定された鉄筋破断時のコンクリート応力から、部材上端部の圧縮ひずみを求め、鉄筋が破断するより前に部材上端がコンクリート圧壊ひずみに達する鉄筋断面減少率を求めたところ、コンクリート圧壊モードから鉄筋破断モードへ移行する鉄筋断面減少率は、15%程度であることがわかった。

この結果より、余寿命診断における限界鉄筋断面減少率は安全側に $\Delta_s = 15\%$ とし、鉄筋腐食量がこの平均断面減少率を上回ると鉄筋破断のリスクが伴うこととした。

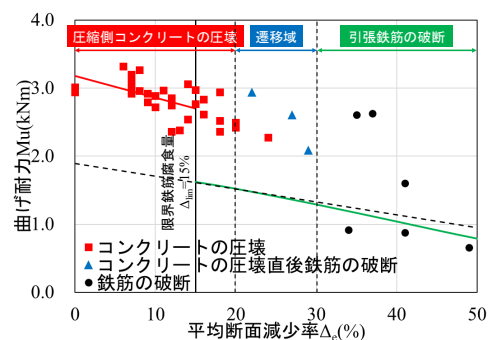
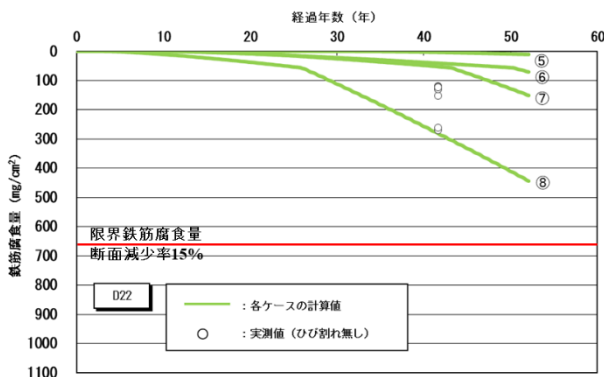


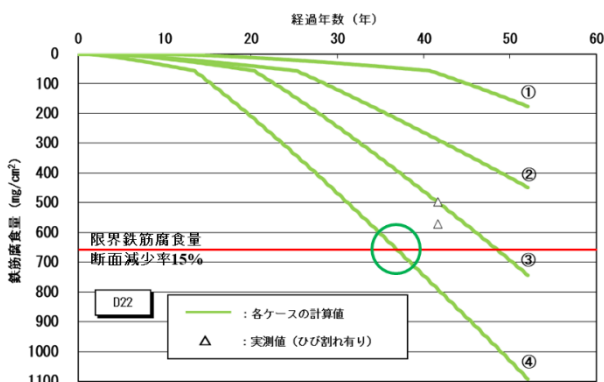
図 13 コンクリート梁の鉄筋平均断面減少率と曲げ耐力の試験結果

図 14 は図 10、図 11 に前述の限界鉄筋断面減少率を補修判断の閾値として設定した上で、想定補修時期を示したものである。

塩害劣化進行曲線(緩やかな環境)については、50 年以上経過した現在において限界鉄筋断面減少率 15%に概ね到達しておらず、健全性が保持されていると評価される。塩害劣化進行曲線(厳しい環境)については、約 15 年前に限界鉄筋断面減少率に達しており、事実、本荷揚栈橋は過去に塩害劣化に対する補修工事が数回行われている。このことから、限界鉄筋腐食量に到達または接近している設備については、健全性を有しているか点検することが望ましく、必要に応じて補修する必要があると考えられる。



(緩やかな環境)



(厳しい環境)

図 14 塩害劣化進行曲線 (想定補修時期)

3. まとめ

本研究においては以下のとおり、実構造物へのばらつきを考慮した塩害劣化進行予測手法の適用性を確認するとともに、鉄筋腐食量(鉄筋断面減少率)を考慮した曲げ耐力に基づく余寿命診断、ならびにこれらを用いた補修時期の判断手法等について検討を行った。

- (1) 実構造物のばらつきを考慮した鉄筋腐食量を予測するため、表面塩化物イオン濃度、鉄筋かぶり、見掛けの拡散係数を影響因子とし、調査結果などをもとに各因子のばらつきを評価して最大値および最小値の組合せより鉄筋腐食量を予測した結果、実構造物の調査結果と概ね整合する結果が得られたことから、本手法の有効性が確認できた。
- (2) 鉄筋腐食量(鉄筋断面減少率)と曲げ耐力の関係性を実験により確認し、限界鉄筋断面減少率に基づく余寿命評価基準を設けることで、構造物の補修時期が予測できる可能性が得られた。

これらの検討結果の総括を図 15 に示す。本検討結果を今後の修繕計画の目安として活用していくことを期待する。

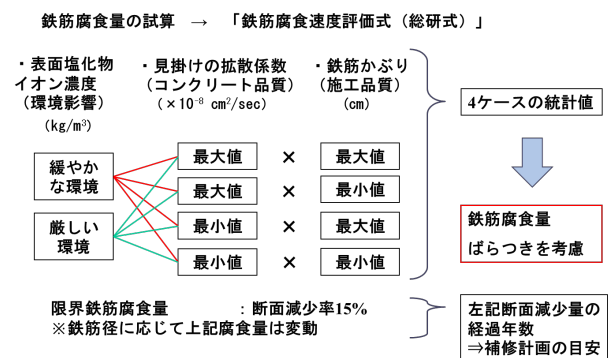


図 15 塩害劣化進行予測手法および補修判断時期の目安

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)土木建築部殿より委託を受け実施したもので、ご協力いただいた関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 土木学会コンクリート標準示方書
- 2) コンクリート標準示方書【維持管理編】
- 3) 荒木 弘祐, 服部 篤史, 宮川 豊章: 鉄筋の腐食膨張によるかぶりコンクリートの剥離現象とその予測, 土木学会論文集, No.802/V-69, pp.209-222, 2005.11.
- 4) コンクリート標準示方書【設計編】
- 5) 竹田 宣典, 十河 茂幸, 迫田 恵三, 出光 隆: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に考えられる実験的研究, 土木学会論文集, No.599, V-40, pp.91-104, 1998.8.
- 6) 宮川 豊章: Early chloride corrosion of reinforcing steel in concrete, 京都大学学位論文, 1985.2.
- 7) Stratfull, R.F.: Corrosion autopsy of a structurally unsound bridge deck, HRR433, pp.1-11, 1973.12.
- 8) Stewart, C.E.: Consideration for repairing salt damaged bridge decks, ACI journal Vol.72, No.12, pp.685-713, 1975.12.
- 9) 山路 徹, 横田 弘, 中野 松二, 濱田 秀則: 実構造物調査および長期暴露試験結果も基づいた港湾 RC 構造物における鉄筋腐食照査手法に関する検討, 土木学会論文集 E, Vol.64, No.2, pp.335-347, 2008.5.
- 10) 堤 知明, 本橋 賢一, Misra Sudhir, 山本 明雄: 若材齢で海水に接するコンクリート中の鉄筋腐食に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.13, No.1, pp.651-656, 1991.
- 11) 片脇 清士: 最新のコンクリート防食と補修技術, 山海堂, 2000.10.
- 12) 中川 裕之, 松崎 康晴, 横田 優, 松島 学: 確率論に基づいた塩害劣化を受けるコンクリート構造物の劣化予測システムの開発, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 8 巻, pp.139-144, 2008.10.
- 13) Manabu Matsushima, Masaru Yokota, Hiroyuki Nakagawa: Study on Prediction of Deteriorated RC Structures Received Chloride Induced Damage Based on Reliability Theory, Advances in Concrete Structural Durability, Proceedings of the International Conference Durability of Concrete Structure, Vol.2, pp.1026-1031, 2008.11.
- 14) 松崎 康晴, 松島 学, 横田 優, 中川 裕之: 外部塩害を受ける鉄筋コンクリート構造物の塩害劣化予測モデル, 土木学会第 63 回年次学術講演会講演概要集, 第 5 部, pp.363-364, 2008.9.
- 15) 横田 優, 中川 裕之, 松島 学: 曝露試験結果に基づいた外部塩害を受けるコンクリート構造物の鉄筋腐食進行予測法の提案, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 6 巻, pp.67-74, 2006.10.
- 16) 横田 優: 埋設電極によるコンクリート中の鉄筋腐食モニタリング, コンクリート構造物の補修, 補強, アップグレードシンポジウム論文報告集, 第 2 巻, pp.333-338, 2002.
- 17) 榊田 佳寛, 安田 正雪, 花榮 浩, 松林 裕二: 塩分環境下におけるコンクリート中の鉄筋腐食速度に関する一実験, コンクリート工学年次論文集, Vol.12, No.1, pp. 569-574, 1990.
- 18) 松村 卓郎, 金津 努, 西内 達雄: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価手法, 土木学会論文集, No.634, V-45, pp.303-314, 1999.11.
- 19) 森永 繁: 鉄筋の腐食速度に基づいた鉄筋コンクリート建築物の寿命予測に関する研究, 東京大学博士論文, 1986.
- 20) 竹田 宣典, 十河 茂幸, 迫田 恵三, 出光 隆: 種々の海洋環境条件におけるコンクリートの塩分浸透と鉄筋腐食に考えられる実験的研究, 土木学会論文集, No.599, V-40, pp.91-104, 1998.8.
- 21) 中川 貴之, 堤 知明, 松島 学: 塩害劣化を受ける RC 構造物の劣化予測, コンクリート工学年次論文集, Vol.22, No.1, pp.419-420, 2000.
- 22) 松村 卓郎, 西内 達雄: 海岸での暴露実験によるひび割れ発生後の鉄筋腐食評価, 土木学会第 61 回年次学術講演会, pp.583-584, 2006.
- 23) 堀口 賢一, 武田 均, 丸屋 剛: 自然電位を

- 用いた鉄筋腐食の定量的評価手法に関する研究, コンクリート工学年次論文集, Vol.26, No.1, pp.1065-1070, 2004.
- 24) H.H.ユースリック, R.W.レヴィー: 腐食反応とその制御 (第 3 版), 産業図書, pp.97, 1989.
- 25) Takahiro Nishida : Influence of Temperature on Deterioration Process of Reinforced Concrete Members Due to Steel Corrosion, 東京工業大学博士論文, 2006.1.
- 26) 松村 卓郎, 金津 努, 西内 達雄: 海岸近くの大気中に位置するコンクリート構造物の鉄筋腐食進行評価方法, 電力中央研究所報告, 1999.3.
- 27) セメント協会 コンクリート専門委員会: 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告 F-18, セメント協会, 1967.9.
- 28) セメント協会 コンクリート専門委員会: 硬化コンクリートの配合推定に関する共同試験報告 (その 2) F-23, セメント協会, 1971.3
- 29) 佐藤 和郎, 茂村 達也, 永井 文雄: ぜい性材料からなる円筒の内圧破壊に及ぼす延性の影響, 日本機化学会論文集 (A 編), Vol. 45, No.391, pp.220-226, 1979.3.
- 30) 原田 哲夫, 出光 隆, 渡辺 明: 静的破砕剤を用いたコンクリートの解体に関する基礎的研究, 土木学会論文集, No.360, V-3, pp. 61-70, 1985.8.

高性能粒子計測式水質分析装置の開発

(株)四国総合研究所	エネルギー技術部	海稻 隆成
(株)四国総合研究所	エネルギー技術部	渡邊 賢
(現：四国計測工業(株) 電気計装部)		
(株)四国総合研究所	エネルギー技術部	土田 雅彦
(現：四国計測工業(株) 西条事業所)		
(株)四国総合研究所	化学バイオ技術部	山地 豪

キーワード： 粒子計測器
懸濁物質濃度
スケール
ボイラ給水
ボイラ化学洗浄

Key Words： Particle Counter
Suspended Matter Concentration
Scale
Boiler Feed Water
Boiler Chemical Cleaning

Development of the High-performance Water Quality Analyzer Utilizing a Particle Counter

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department

Takashige Kaine, Ken Watanabe, Masahiko Tsuchida

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical Technology and Biotechnology Department

Tsuyosi Yamaji

Abstract

We developed a new High-performance Water Quality Analyzer which can measure suspended matter concentration of boiler feed water in a thermal power plant.

There were some troubles about thermal damage of boiler evaporation tubes and accumulation of powdery scale on the inner surface of tubes might cause those troubles. If we can measure the amount of iron carried into a boiler, the period of boiler chemical cleaning to remove the powdery scale can be expected. However, it is very difficult to measure, because the concentrations of total iron is under minimum limit of determination.

Therefore, we devised a new method, suspended matter concentration of feedwater, to manage the amount of scales carried into a boiler and developed a new analyzer to measure suspended matter concentration in real time.

In this paper, we describe a measuring method of suspended matter concentration utilizing a particle counter, system configuration of the analyzer and the result of the field test in a thermal power plant.

1. はじめに

火力発電用ボイラの給水処理方法に酸素処理を適用しているプラントでは、給水中の微細な粒子（以下、スケール）がボイラに持ち込まれ、火炉壁管内面にパウダー状のヘマタイトスケールとして付着し、同管の熱損傷を引き起こす事象が問題となっている¹⁾。

当社では、プラント起動時など粒径が大きく濃度が高い場合の鉄濃度測定を対象に、粒径 $2\mu\text{m}$ 以上の粒子が測定できる粒子計測式水質分析装置（以下、既開発装置）を開発しており²⁾、日本産業規格「ボイラの給水、ボイラ水及び蒸気の質—試験方法」（以下、JIS B-8224:2022）の附属書 C17 の測定方法にも採用されている。

しかし、通常運転中の Eco 入口給水の鉄粒子は、大部分が $2\mu\text{m}$ 以下で濃度も極めて低いため、既開発装置を用いて精度よく濃度測定することは困難であった。また、JIS B-8224:2022 の分析法である TPTZ 法による定量下限 ($2\mu\text{g/L}$) 以下となる場合が多く、ボイラに持ち込まれる鉄スケールを短時間で精度良く測定できる方法はあまりないのが実情であった。

そこで、当社化学バイオ技術部は、ボイラ化学洗浄時期の推定等のために、プラント水を孔径 $0.45\mu\text{m}$ のメンブレンフィルタに数 m^3 程度連続通水し、懸濁物質濃度（以下、SS 濃度）の積算値によりボイラに持ち込まれるスケール量を評価する方法を考案した。しかしこの方法は、プラント水を数日程度通水する必要があるため、スケール量の変化を連続監視することはできない。このため、通常運転中に、Eco 入口給水等の粒径 $2\mu\text{m}$ 以下のスケールをリアルタイムに測定できる高性能粒子計測式水質分析装置（以下、本装置）を開発した。

本稿では、粒子計測による SS 濃度の測定方法について述べた後、装置概要ならびに石炭火力発電所で実施した現地試験結果等について報告する。

2. 粒子計測による SS 濃度測定方法の検討

2.1 測定粒子と可測粒径

通常運転時に、ボイラに持ち込まれる鉄スケール量を連続監視するためには、既開発装置では測定できない粒径 $2\mu\text{m}$ 以下の粒子をリアルタイムで連続測定する必要がある。

粒子の一般的な評価方法に、粒子の頻度を小粒

径から順に積算し、その積算が全体（累積分布）の 10%、50%、90% になる粒径をそれぞれ、10% 粒子径 (D_{10})、50% 粒子径 (D_{50})、90% 粒子径 (D_{90}) と定義して、各試料の D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} を比較する方法がある。また、 D_{50} は特別にメディアン径と呼ばれ、その粒度分布の代表粒径として用いられている（図 1）。

化学バイオ技術部が実施したプラント水の粒度分布測定結果を基に、 D_{10} 、 D_{50} 、 D_{90} を求めると、Eco 入口給水において、ボイラに持ち込まれるスケール量の管理に必要な粒径 D_{50} 以上の粒子を測定するためには、 $0.65\mu\text{m}$ 以上の可測粒径範囲が必要となる（表 1）。

ここで、既開発装置は $2\mu\text{m}$ 以上の粒子を測定できるため、必須の可測粒径範囲を $0.65\sim 2\mu\text{m}$ と定め、それ以外の粒径については性能向上の検討範囲とした。検討範囲のうち $2\mu\text{m}$ 以上の粒子については既開発装置の適用を、また $0.65\mu\text{m}$ 以下の粒子については最適な測定方法を検討した（図 2）。

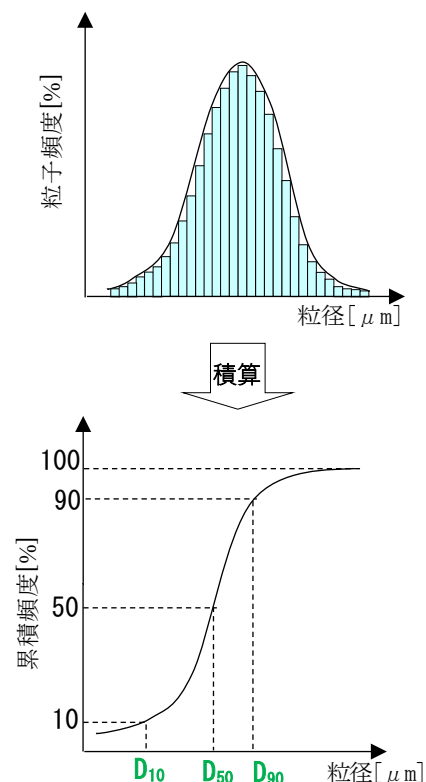


図1 粒子の評価方法

表 1 プラント水中粒子の粒径

サンプル 個所	粒径 [μm]		
	D_{10}	D_{50}	D_{90}
Eco 入口	0.2	0.65	1.8

化学バイオ技術部提供

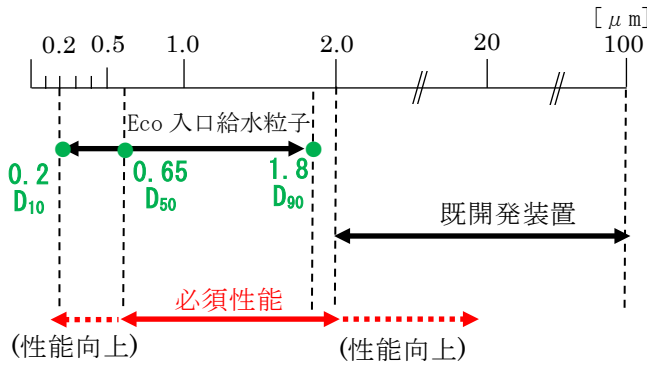


図2 Eco入口給水における粒子径と装置の可測粒径

2.2 最適な測定方法の検討

液中粒子を測定する一般的な原理は、光散乱式、光遮蔽式、画像計測式、電気的検知式、粒子軌道解析式、プラズマ質量分析式、共振質量測定式などがあり、様々な粒子センサが開発されている³⁾。その中で、測定レンジに $0.65 \sim 2 \mu\text{m}$ を含み、かつインライン計測できることが必須条件であり、それらを満たす市販の粒子センサは光散乱式のみであったため、同方式を採用することとした。

2.3 粒子センサの選定

(1) 光散乱式粒子センサ

光散乱式粒子センサを比較検討し、上述の必須条件を満たし、最大粒子濃度や、定格サンプル流量、寸法、外部からの制御方法、価格等を考慮し、2機種を選定した(表2)。

表2 光散乱式粒子センサ比較

メーカー	A社	B社
方式	光散乱方式	光散乱方式
可測粒径	$0.5 \sim 20 \mu\text{m}$	$0.5 \sim 20 \mu\text{m}$
粒径区分	15段階任意設定	10段階任意設定
最大粒子濃度	10000 個/mL	1200 個/mL
計数損失	10%未満	5%以内
定格流量	80mL/min	10mL/min
重量	約 2.8kg	約 3kg
寸法 [W×H×D]	108×114×324 [mm]	240×125×151 [mm]

(2) 粒子センサ基本性能確認試験

両粒子センサの性能を評価するため、流量は定格流量一定とし、サンプル水の粒子濃度を変えて測定する粒子濃度特性試験と、粒子濃度を一定と

し、サンプル水の流量を変化させながら測定する流量特性試験を実施した(図3)。標準粒子には、Thermo社製PSL粒子液(粒径： $0.5 \mu\text{m}$ 、 $1.5 \mu\text{m}$)を使用した。なお、両粒子液の試験結果は同様であったため、本稿では、最小粒径($0.5 \mu\text{m}$)の粒子について結果を記載する。



図3 粒子センサ基本性能確認試験状況

(a) 粒子濃度特性試験

定格流量で各センサにサンプル水を通水し、その粒子濃度を変えながら測定を行った。各供給粒子濃度(A社：10000 個/mL、B社：1000 個/mL)時の、粒径 $0.5 \sim 0.6 \mu\text{m}$ の測定値を基準とし、想定される供給粒子濃度(グラフ中 点線)と、実際の測定粒子濃度との誤差が10%以内に収まる場合を、測定可能な粒子濃度範囲とした。

測定誤差が10%以上となる粒子濃度は、A社製センサは20000 個/mLで、B社製センサは、5000 個/mLであった(図4)。

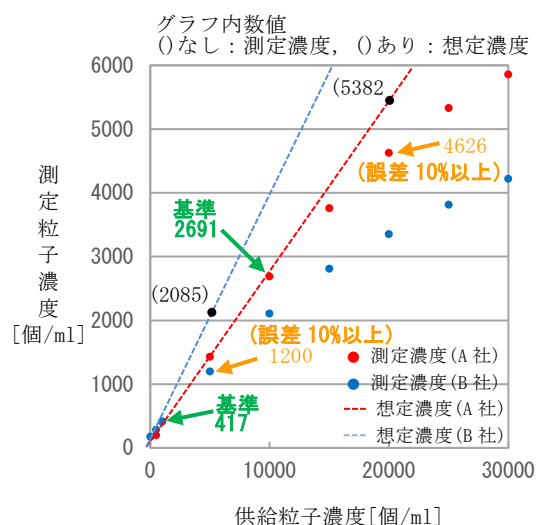


図4 供給粒子濃度－測定粒子濃度相関

(b) 流量特性試験

供給粒子濃度が一定のサンプル水を流量を変えながら測定し、定格流量時の測定値を基準として流量変動の影響を評価した。

A 社製センサは、定格流量 (80mL/min) $\pm$ 10mL/min 以内の変動幅であれば、粒子濃度変動が 10%以内に収まるが、B 社製センサは定格流量 (10mL/min) より+10mL/min もしくは-5 mL/min 変動すると濃度変動が 10%以上となった(図 5)。

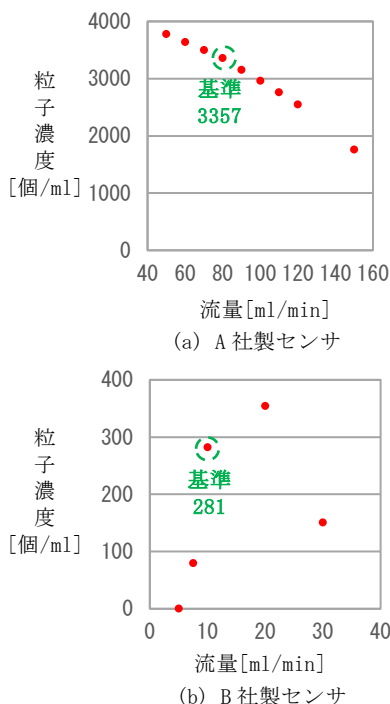


図 5 流量-粒子濃度相関

(3) 粒子センサの選定

前述の結果より、高い粒子濃度まで測定でき、また定格流量が大きい流量変動時の測定誤差も少ない A 社製の粒子センサを本装置に適用することとした。なお、同センサの可測粒径最大値は $20\mu\text{m}$ のため、既開発装置を併用することなく通常運転時の SS 濃度の測定が可能である。

2.4 測定精度の向上検討

(1) 気泡の影響

前述の特性試験時に、超純水のみを循環しながら測定しているにも関わらず、粒子濃度が徐々に上昇する事象が発生した。原因を検討すると、微小粒子を測定できるセンサは液中の気泡も粒子としてカウントするため、サンプル水中に溶存して

いる気体が気泡として発生し、粒子数が増加することで外乱となることが分かった(図 6)。

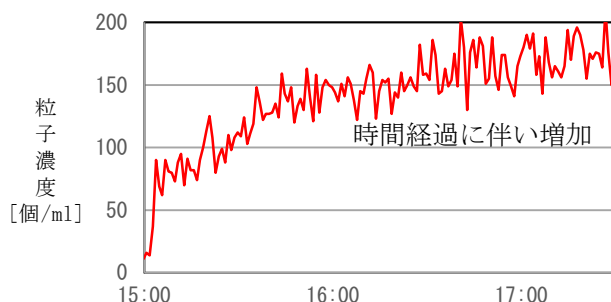


図 6 超純水測定時の粒子濃度推移(対策なし)

(2) 気泡抑制対策の検討

気泡抑制対策として、圧力変動が少ないダイヤフラムポンプを採用したキャビテーション抑制による発生気泡の低減、サンプル水が酸素と接触する超純水タンクのバイパス、および酸素透過が少ないガスバリアチューブの使用などを実施した。

その結果、循環測定した場合において、2 時間で数個/mL 程度の粒子数増加にまで抑制することができた(図 7)。

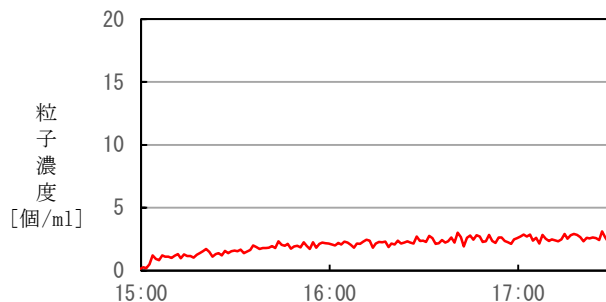


図 7 超純水測定時の粒子濃度推移(対策あり)

(3) $0.5\mu\text{m}$ 以下の粒子測定方法検討

Eco 入口給水中粒子の粒度分布解析を行うと、 $0.2\mu\text{m}$ 以上の粒子が測定できると、全スケールの約 90%を測定可能であることが分かった。

そこで、A 社製の可測粒径 $0.2\sim 2\mu\text{m}$ のセンサを使用し、Eco 入口給水の測定を行った。しかし、同センサは 1 日程度の通水でセル汚損の指標である DC ライト値が上昇し、測定誤差が大きくなることが分かり、実用上支障があるため適用は見送った。なお、 $0.5\mu\text{m}$ から測定できれば、全粒子数の約 65%を測定でき、後述の測定値と手分析値との相関を基にした検量線により、 $0.5\mu\text{m}$ 以下の粒子を含めた SS 濃度を算出することが可能となる。

3. 本装置概要

3.1 ハードウェア

主要機器構成図を図 8 に、装置前面を図 9 に、装置内部を図 10 に示す。装置内部は 2 段構成としており、下段は主要機器であるサンプル水系統の機器(ダイヤフラムポンプ、粒子センサ、流量計等)を配置し、上段は各種変換器類やスイッチング HUB、電源等を取り付けしている。

発電機出力によりサンプル水の圧力が変動するため、ブロー系統を設けている。圧力低下時にブロー系統よりエアを吸い込まないように、リリース弁を取り付けし、逆流を防止している。

粒子センサは測定粒径を 15 区分に設定しており、その粒径毎の粒子数を 1 分間の積算値として出力している。また装置前面にパネル PC を取り付けし、後述の専用ソフトウェアをインストールして各機器を制御している。

使用法は非常にシンプルで、背面コネクタにサンプルホースを接続して通水し、電源を入れるだけで測定可能となる。装置重量は 25kg 程度で容易に移動ができるため、ポータブル装置として使用することも可能である。

本装置は試薬を必要とせず、ウォーミングアップも不要で、操作性やメンテナンス性に優れており、また純水を通水するだけで保管ができるため、非常に実用的な装置となっている。

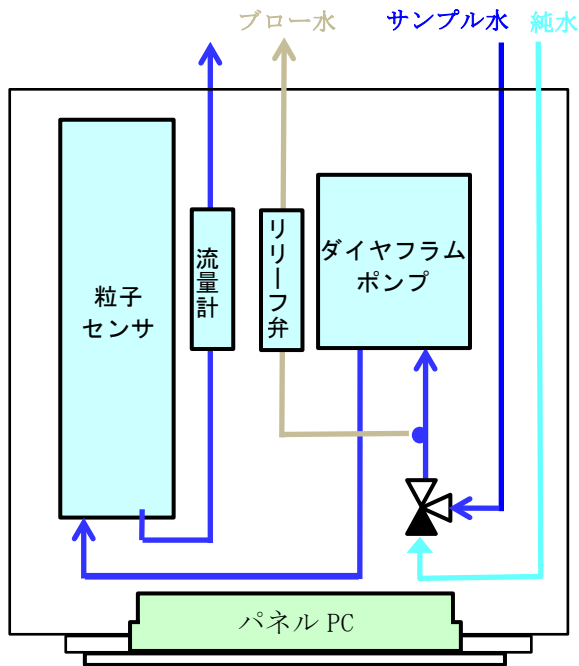


図 8 主要機器構成図(装置下段)



図 9 装置前面

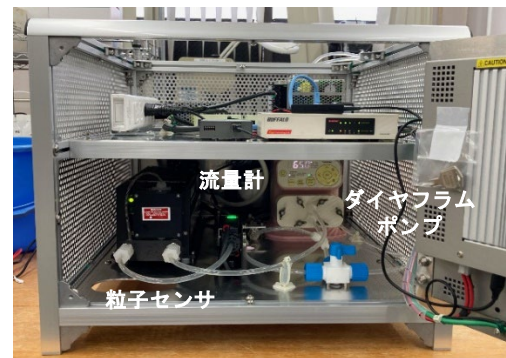


図 10 装置内部

3.2 ソフトウェア

粒子センサや流量計、その他機器類を制御し、各測定値を取得したり、得られた粒径毎の粒子個数と比重、流量より粒径別の粒子濃度を求めた後、検量線により SS 濃度を算出し、そのデータを 1 分毎に出力している。

またトレンドや履歴をグラフ表示する機能や、懸濁物質の累積量を出力する機能(プラント給水量入力時のみ)、各種警報を出力する機能等も持っている(図 11)。



図 11 ソフトウェアメイン画面

4. 現地試験

4.1 試験概要

石炭火力発電所のプラント水サンプリングラックに本装置を設置し、現地試験を実施した。装置に、サンプリングラックから分岐したボイラ Eco 入口給水を通水し、装置測定値と手分析値を比較した他、連続測定試験を行った(図 12)。



(a) 全体状況



(b) 本装置設置状況

図 12 現地試験状況

4.2 検量線作成

本装置は粒子を真球として体積計算するが、実際の粒子は真球ではなく、また測定下限粒径以下の微粒子も含まれるため、誤差が生じる可能性がある。そこで、算出した濃度が手分析濃度(真値)と一致するように、検量線を作成してスパン調整をする必要がある。

(1) 既開発装置の検量線作成方法

既開発装置の検量線を作成するために、装置入口で分岐した手分析ラインより、装置測定と同時刻に該当するプラント水を採取し、その作業を複数回行った後、TPTZ 法等によりそれぞれのサンプルの全鉄濃度を分析している。それらの手分析値

と装置測定値を用いて検量線を作成し、スパン調整をしている。

(2) 本装置の検量線作成方法

本装置の検量線を作成するために、JIS K 0102-1:2021 で規定される懸濁物質質量が 2mg 以上になるよう、数 m^3 の試料水をフィルタでろ過し(図 13)、捕集後にフィルタ重量を秤量して SS 濃度を求めている(図 14)。それらの手分析値と装置測定値を用いて検量線を作成し、スパン調整をしている。

分析値と測定値の相関は決定係数で 0.85 となり高い相関が確認でき、現状では、この方法が精度の高い手分析値を得るための唯一の方法だと考えている(図 15)。

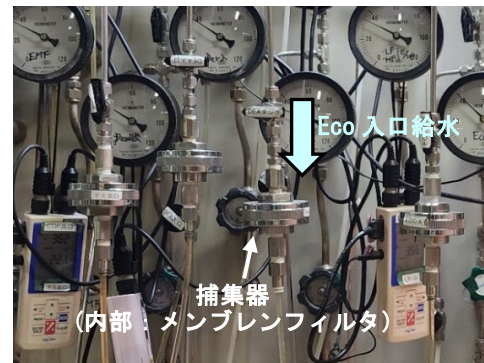


図 13 懸濁物質捕集状況

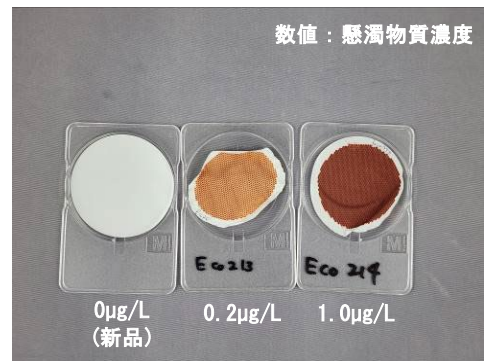


図 14 懸濁物質秤量時のフィルタ

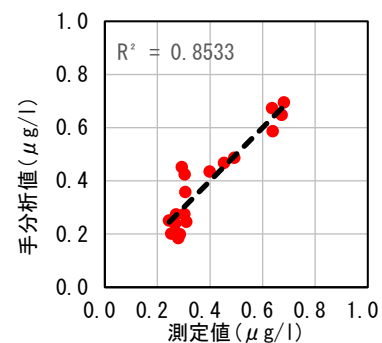


図 15 測定値-手分析値(SS 濃度)の相関

表 3 本装置と既開発装置の特徴比較

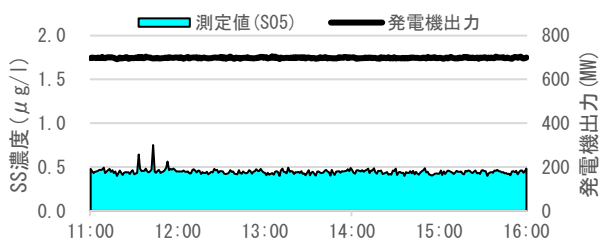
項目	本装置 (特許出願中)	既開発装置 (JIS B 8224:2022 附属書 C17)
用途	パウダースケール対策のためのボイラ持ち込み懸濁物質濃度の計測など	ボイラ水質管理のためのボイラ起動時における粒子状鉄の計測など
測定対象	ボイラ給水(通常運転中)	ボイラ給水(起動中) 低圧給水加熱器ドレン他(通常運転中) ^{※1}
可測粒径	0.5～20 μm	2～100 μm
測定原理	光散乱方式	光遮蔽方式
サンプル流量制御	ダイヤフラムポンプを用いた自動制御	ヘッドベッセル・装置バルブによる調整
サンプル圧力調整	リリーフ弁により、作動圧力以上となればサンプルが系外に排出される	ヘッドベッセルによる調整
検量線の求め方	フィルタ収集した粒子重量との相関により決定	JIS B-8224 で定める TPTZ 法等で求めた全鉄量との相関により決定

※1 通常運転中の測定はできるが、精度は低い

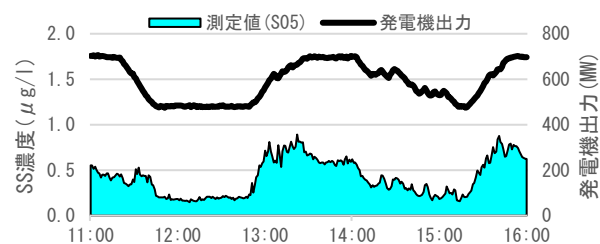
4.3 連続測定試験

連続測定試験のデータより抜粋した測定値を掲載する。定格時は 0.5 $\mu\text{g/L}$ 程度でほぼ一定の SS 濃度が、発電機出力変動時は、出力に連動して変化している。これは、プラント系統内の懸濁物質がプラント水の圧力や流量の変化に伴い、プラント水中に流出したためと推測している(図 16)。

保守性に関しては、1 ヶ月程度はメンテナンスフリーでの測定が可能であり、運用上大きな支障はないことが分かった。またセル汚損による測定感度低下時も、10 分程度の簡易なセル洗浄で測定可能な状態となる。



(a) 定格時



(b) 発電機出力変動時

図 16 SS 濃度のトレンド

5. まとめと今後の予定

通常運転時におけるボイラ給水中の SS 濃度をリアルタイムで測定できる装置を開発した。本装置の特徴と既開発装置との比較を表 3 に纏める。本装置は、JIS K 0102-1:2021 に基づく SS 濃度と高い相関関係が確認できており、SS 濃度からボイラに持ち込まれるスケール量の積算値を管理することにより、ボイラ化学洗浄時期の推定にも寄与できる。

現在は特許出願中で、既開発装置と同様に四国計測工業(株)に製造を移管し、販売する予定である。

【謝辞】

本研究は、四国電力(株)火力部殿からの委託を受けて実施したもので、発電所をはじめご協力いただいた関係各位に深謝する。

【参考文献】

- 山地豪, 難波正徳. OTユニットにおけるパウダースケール対策技術の検討(第1報). 四国電力, 四国総合研究所研究期報No.108. 2018/6. p.43-47
- 海稻隆成, 市川幸司, 福島孝典. 粒子計測式水質分析装置の開発. 四国電力, 四国総合研究所研究期報 No.95. 2010/12. p.5-9
- 車 裕輝. 液中粒子数濃度の測定技術と標準に関する調査研究, 産総研計量標準報告 Vol 10, No.2. 2020/2

最後に執筆者、編集ならびに審査にあたられた方々のご協力に対して厚くお礼申し上げます。

研 究 期 報 第 121 号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 塚 本 正 敏
(株)四国総合研究所

発 行 (株)四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
T E L (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp