

研 究 期 報

No. 122

2025 年 6 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 總 合 研 究 所

研究期報 1 2 2 号 目次

3次元 FEM モデルを用いた非線形地震応答解析における減衰モデルの検討.....	1
Study of Damping Models with 3D FEM Model in Nonlinear Seismic Response Analysis	
MADR システム（メール連動型自動 DR システム）の開発	12
Development of MADR system (Mail-linked automatic DR system)	
伊方 3 号機原子炉補機冷却海水システムを対象とした海水処理の適正化について	17
Improvement of chemical treatment in the seawater system at pressurized water reactor Ikata Unit 3	

3次元 FEM モデルを用いた非線形地震応答解析における 減衰モデルの検討

目 的

原子力建屋の3次元 FEM モデルを用いた地震応答解析では、一般的に Rayleigh 減衰が使用される。Rayleigh 減衰は、減衰比が振動数に依存する課題がある一方、幅広い振動数において一定の減衰比で評価できる拡張 Rayleigh 減衰が近年提案されている。今回、新たな試みとして拡張 Rayleigh 減衰を実機モデルに適用し、従来の減衰モデルと比較検討を行い、3次元 FEM モデルに対する非線形地震応答解析における適用性を検証した。

主な成果

1. 3次元 FEM モデルの非線形地震応答解析

地震応答解析モデルは図 1 に示すような基礎及び地盤を一体化したモデルとし、鉄筋コンクリートの材料構成則や基礎底面の浮上りに非線形特性を考慮した。入力地震動は、水平方向に 2 波、鉛直方向に 1 波を作成し、3 方向の地震動を同時入力することとした。基礎底面位置における地震動の最大加速度は、水平 1 と水平 2 で $6.8[\text{m/s}^2]$ 及び鉛直で $3.5[\text{m/s}^2]$ である。これらの解析諸元により地震応答解析を実施した。

2. 減衰モデルの検討

減衰モデルは表 1、図 2 に示す 4 ケースとし、既往研究でモード減衰（ひずみエネルギー比例型減衰）とほぼ等価な結果が得られている拡張 Rayleigh 減衰（ERay）を目標（精解）とするモデルとした比較検討を行った。なお、拡張 Rayleigh 減衰を実機モデルに適用する解析は著者の知る限り初めての試みであったが、妥当な解析結果が得られた。

全体 Rayleigh 減衰（Ray1, Ray2）では、基準振動数の設定次第で応答が過小や過大な結果となることが示された。要素別 Rayleigh 減衰（Ray0）では、拡張 Rayleigh 減衰（ERay）と同等か、あるいは保守性のある結果であることが示されたため、妥当性を有するモデルであるといえる。また、連成による影響が顕著に表れる場合では、むやみに Rayleigh 減衰の振動数を変えて、連成同士の一方向の減衰比を過大評価することは危険側の設定につながるため慎重であるべきと考えられる。そういったケースでは、拡張 Rayleigh 減衰モデル（ERay）は、幅

広い振動数において一定の減衰比で評価でき、実用性を有しかつ合理的な応答を得ることが可能であるため、将来的に期待できる減衰モデルであると考えられる。

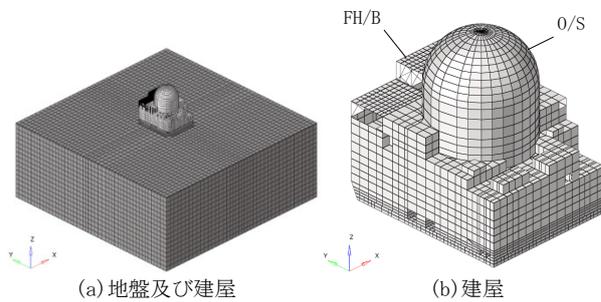
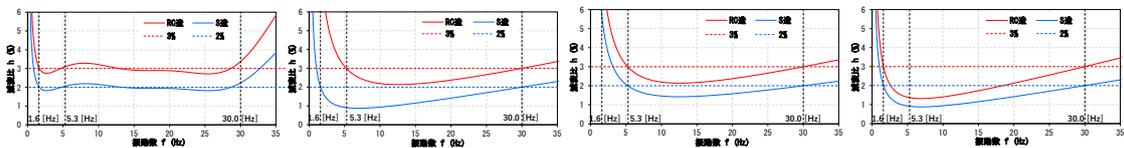


図1 地震応答解析モデル

表1 減衰モデルの解析ケース

ケース名	減衰モデル	設定する振動数
ERay	拡張 Rayleigh 減衰	ALL: $f_{lim}=35.0$ [Hz]
Ray0	要素別 Rayleigh 減衰	Gr1: $f_1=5.25$ [Hz], $f_2=30.0$ [Hz], Gr2: $f_1=1.61$ [Hz], $f_2=30.0$ [Hz]
Ray1	全体 Rayleigh 減衰	ALL: $f_1=5.25$ [Hz], $f_2=30.0$ [Hz]
Ray2	全体 Rayleigh 減衰	ALL: $f_1=1.61$ [Hz], $f_2=30.0$ [Hz]



拡張 Rayleigh 減衰[ERay] 要素別 Rayleigh 減衰[Ray0] 全体 Rayleigh 減衰[Ray1] 全体 Rayleigh 減衰[Ray2]

図2 減衰モデル

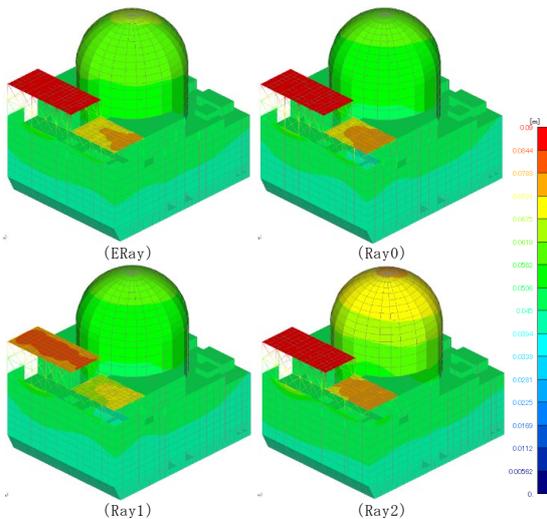


図3 合成変位の最大値分布

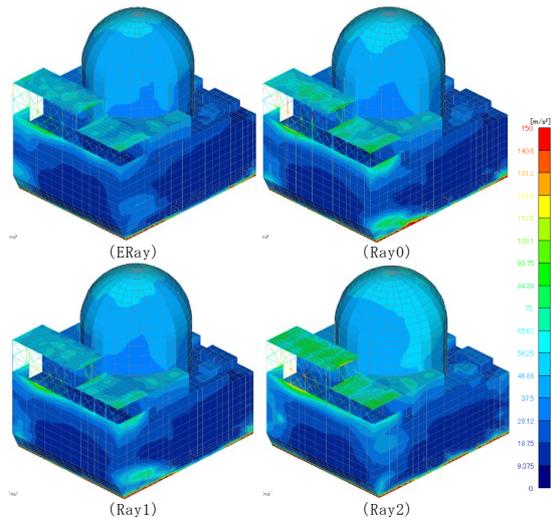


図4 合成加速度の最大値分布

研究担当者	西内佑太, 増田博雄 (株式会社四国総合研究所 土木技術部) 日根居亮佑, 坂本潤哉 (四国電力株式会社 土木建築部)
キーワード	Rayleigh 減衰, 拡張 Rayleigh 減衰, 因果的履歴減衰, 非線形解析, 基礎浮上り, 時刻歴応答解析, 3方向同時入力, 3次元 FEM モデル
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]

MADR システム(メール連動型自動 DR システム)の開発

目 的

天候等により発電量が変動する太陽光発電などの再生可能エネルギー発電導入が急増し、需給運用の安定化や再生可能エネルギー発電の抑制回避への取り組みが必要になっている状況から、需要側が供給状況に応じて賢く消費量を変化させるデマンドレスポンス (DR) 技術の重要性が高まっている。このため、空調機などの負荷抑制運転をお客さまの手動操作に依存している現状を自動化可能とするシステムを開発したので紹介する。

主な成果

1. 開発した MADR システムの概要

契約する多数のお客さまに電子メールで DR 要請を行う手法に、僅かな修正を加えるだけで、空調機などの負荷抑制運転を自動化するシステムを開発した。

(図 1)

2. 電子メールによる空調機などの自動 DR システム

MADR システム向けの DR 要請メールには、現時点で最も安全な標準暗号化などを用いた高いセキュリティ対策を施したシステムを構築、安価なコストで広域通信が可能な LTE-M 通信機能を搭載した DR コントローラを製作した。

お客さま承諾が得られた空調機などに DR コントローラを設置することで、自律制御で DR 要請時間内の負荷抑制運転を行う。確実な DR 供給力が得られると共に、お客さまの機器操作手間を軽減する。(図 2)

3. MADR システムの検証結果

業務用空調機 2 台 (2 メーカー機種) およびセントラル空調・熱源機 1 台での制御検証において、DR 要請メールを良好に受信し、自律制御による確実な供給力が得られると共に、機器操作手間を軽減できることを確認した。

暖房利用時の検証であったが、室内温度変化も小さく快適性への影響はないことも確認した。(図 3)

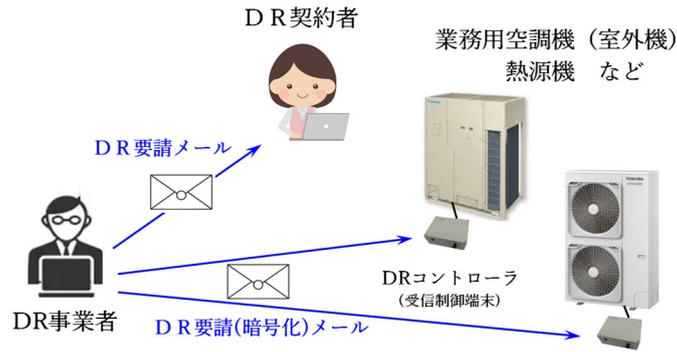


図1 MADRシステムの概要

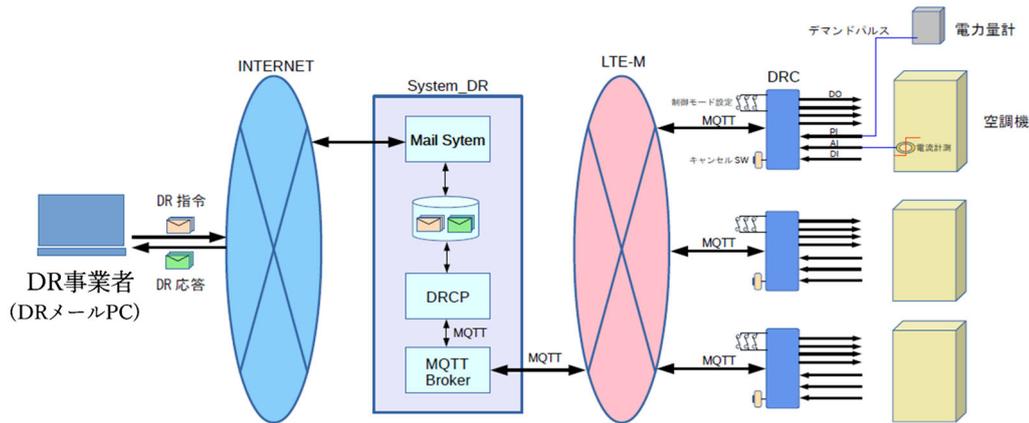


図2 電子メールによる空調機などの自動DRシステム

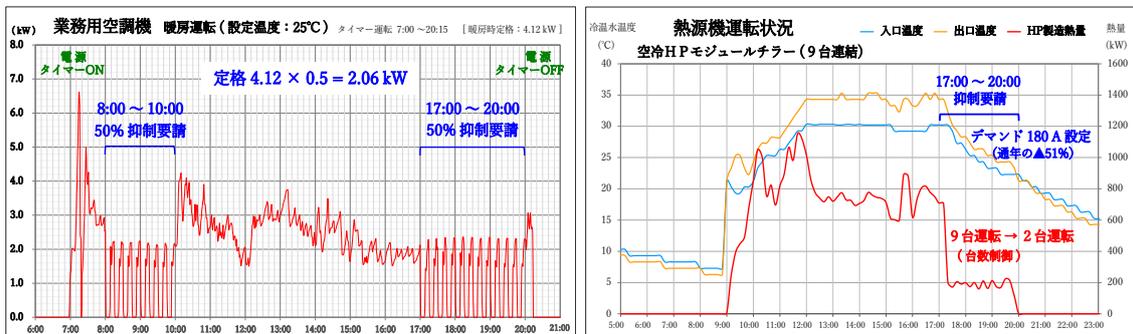


図3 MADRシステムの検証結果(冬期検証)

研究担当者	吉田正志 (株式会社四国総合研究所 電力技術部) 中西美一 (株式会社四国総合研究所 電子アグリ技術部)
キーワード	デマンドレスポンス, DRシステム, メール連動型自動システム, 空調機, 業務用空調機, セントラル空調, 熱源機, 需要家機器制御, 需給運用, 再エネ普及, 再エネ抑制回避
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]

伊方 3 号機原子炉補機冷却海水系統を対象とした 海水処理の適正化について

目 的

伊方 3 号機原子炉補機冷却海水系統に設置された非常用ディーゼル発電機 (D/G) の空気冷却器においては、2017 年 6 月の定期運転時に汚損による伝熱性能低下が認められた。汚損対策として海水処理による対応を求められたが、処理方法を変更するにあたっては、設備構成や伝熱管材質等を考慮したうえで、系統全体の伝熱性能向上と防食性維持を両立できる条件を検討する必要がある。

本稿では、伊方発電所構内で実施した、実海水と伝熱管を用いた連続通水試験 (モデルチューブ試験) による海水処理条件の適正化に係る試験並びに実機適用結果について報告する。

主な成果

1. 伝熱管性状に与える海水処理条件の影響

原子炉補機冷却海水系統に設置された熱交換器の伝熱管に使用されている白銅とアルミニウム黄銅を対象に、生物皮膜量 (伝熱性能低下要因) と鉄皮膜量 (防食に寄与) に与える海水処理の影響を調査した結果、空気冷却器にも使用される白銅においては、塩素注入濃度を従来よりも上昇させることで、生物皮膜量を低減しながらも、鉄皮膜量を増加傾向に維持できることを確認した。一方、アルミニウム黄銅については、塩素注入濃度の上昇は生物皮膜量の低減には有効だが、鉄皮膜増加量が減少するため防食面で不利となることが判った。

2. 原子炉補機冷却海水系統を対象とした海水処理の適正化

当該系統の設備構成・配置等を考慮した場合、取水海水の塩素注入濃度は従来の 0.20ppm (D/G を除く熱交換器出口の残留塩素濃度 ; 約 0.05ppm) のまま、鉄注入濃度を 0.015ppm から 0.010ppm に低減するとともに、これまで未使用であった追加塩素注入系統を使用し D/G 海水系統のみ局所的に残留塩素濃度を 0.15ppm 以上に上昇させる海水処理が適正と判断した。また、当該処理を実機適用し、その効果をプラントデータから評価した結果、課題であった空気冷却器の伝熱性能を従来よりも高く維持しながら、系統全体の防食性が維持されていることを確認した。

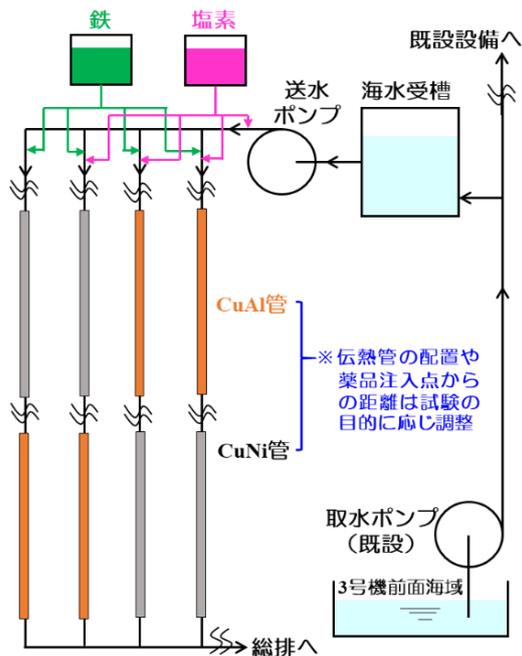


図-1 モデルチューブ試験装置の概要

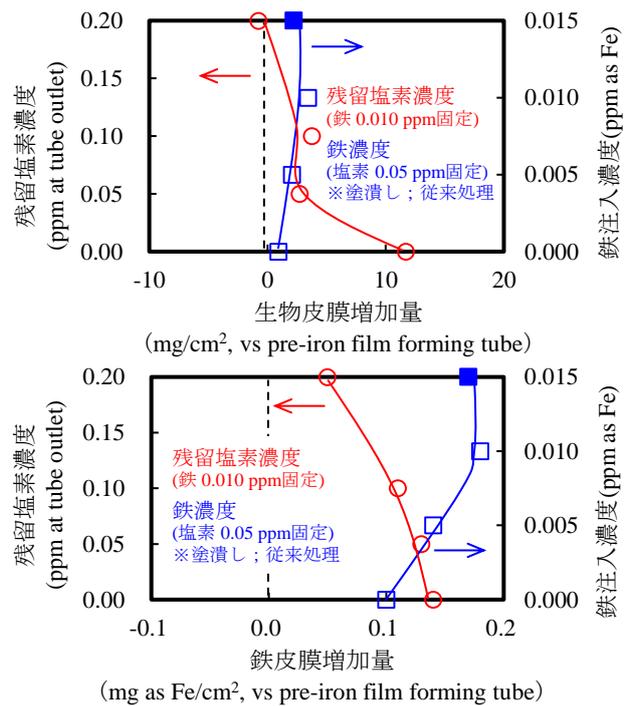


図-2 白銅の性状と海水処理条件の関係

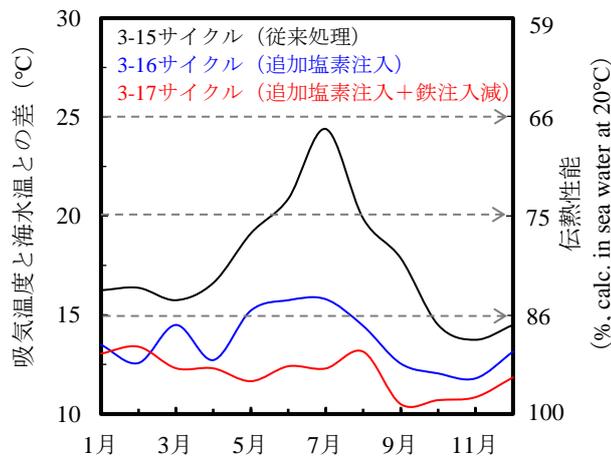


図-3 D/G 空気冷却器における吸気温度と海水温度の差並びに伝熱性能の推移

研究担当者	山本松平, 石川裕史, 大鹿浩功 (株式会社四国総合研究所 化学バイオ技術部) 三好靖宏, 曾根諒 (四国電力株式会社 原子力本部)
キーワード	伊方発電所 3号機, 原子炉補機冷却海水系統, 化学処理, 伝熱性能, 生物皮膜, 腐食
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]

3次元 FEM モデルを用いた非線形地震応答解析における 減衰モデルの検討

(株)四国総合研究所 土木技術部 西内 佑太
(株)四国総合研究所 土木技術部 増田 博雄
四国電力(株) 土木建築部 日根居亮佑
四国電力(株) 土木建築部 坂本 潤哉

キーワード : Rayleigh 減衰
拡張 Rayleigh 減衰
因果的履歴減衰
非線形解析
時刻歴応答解析
3次元 FEM モデル

Key Words : Rayleigh Damping
Extended Rayleigh Damping
Causal Hysteretic Damping
Nonlinear Analysis
Time History Response Analysis
3D FEM Model

Study of Damping Models with 3D FEM Model in Nonlinear Seismic Response Analysis

Shikoku Research Institute, Inc., Civil Engineering Department

Yuta Nishiuchi, Hirotaka Masuda

Shikoku Electric Power Co.,Inc., Civil &Architectural Engineering Department

Ryosuke Hinei, Jyunya Sakamoto

Abstract

The Rayleigh damping model is often used in nonlinear seismic response analysis with 3D FEM models for nuclear power plants. The Rayleigh damping has the problem that the damping ratio depends on frequency. In the recent study, extended Rayleigh damping was suggested as a model with low dependency of the damping ratio on frequency over a wide range of frequencies. However, extended Rayleigh damping has never been used in actual building model. In this paper, comparative study of these damping models is conducted using a 3D FEM model of an actual nuclear power plant building in nonlinear seismic response analysis.

1. はじめに

四国電力グループの建築部門では、近年の研究において、鉄筋コンクリートの材料構成則や基礎底面の浮上りに非線形特性を考慮した原子力建屋の3次元 FEM モデルを用いた地震応答解析を実施している。

3次元 FEM モデルは数万程度の膨大な節点を有しているため、解析に多くの計算時間を要する。また、振動特性としては、構造全体が変形するモードだけでなく、床や壁などの局所的な変形モードも含まれるため、多数の固有モードが存在する。一方、従来の質点系モデルでは、節点数が数十～数百程度であるため、全モードで一定の減衰比が考慮できるひずみエネルギー比例型減衰（以下「モード減衰」という。）が設定されている。しかしながら前述の通り、3次元 FEM モデルにモード減衰を導入することは、計算負荷の観点から困難であるため、一般的には Rayleigh 減衰が使用される。Rayleigh 減衰は、減衰比が振動数に依存する課題があり、図 1 に示すように基準振動数 $f_1 \sim f_2$ 間の振動数の減衰比は過小に評価され、建屋に生じる応答が大きくなる傾向にある。これらの課題を解決するため、近年、中村¹⁾によって提案された因果性に基づく減衰モデル（因果的履歴減衰及び拡張 Rayleigh 減衰）（図 2）では、幅広い振動数において一定の減衰比で評価でき、計算負荷も従来の Rayleigh 減衰とほぼ同程度とされている。また、太田²⁾は、実規模モデルを想定した仮想の原子力発電所の FEM モデルを用いて、この減衰モデルが、図 3 のように減衰比を一定で計算できるモード減衰の結果と同程度で、高速に計算可能であることを示し、さらに、コンクリート非線形モデルに対しても適用可能と示しているが、実機適用には至っていない。

本報では、鉄筋コンクリートの材料構成則や基礎底面の浮上りに非線形特性を考慮した原子力建屋の3次元 FEM モデルに対して、3方向の地震動を同時入力する地震応答解析において、新たな試みとして拡張 Rayleigh 減衰を実機モデルに適用し、従来の減衰モデルと比較検討を行い、適用性を検証した。

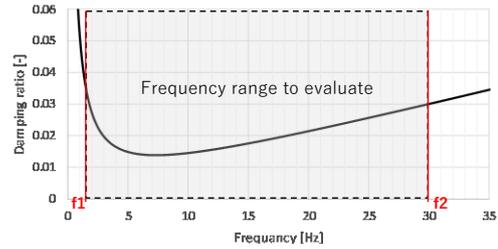
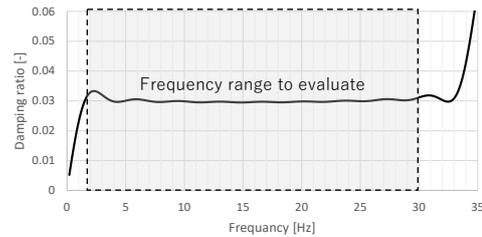
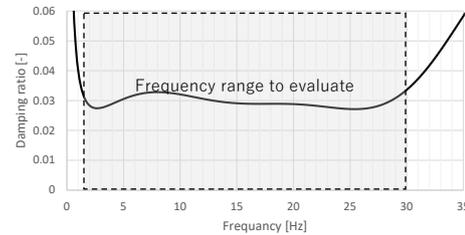


図 1 Rayleigh 減衰(二点間の振動数が広い例)

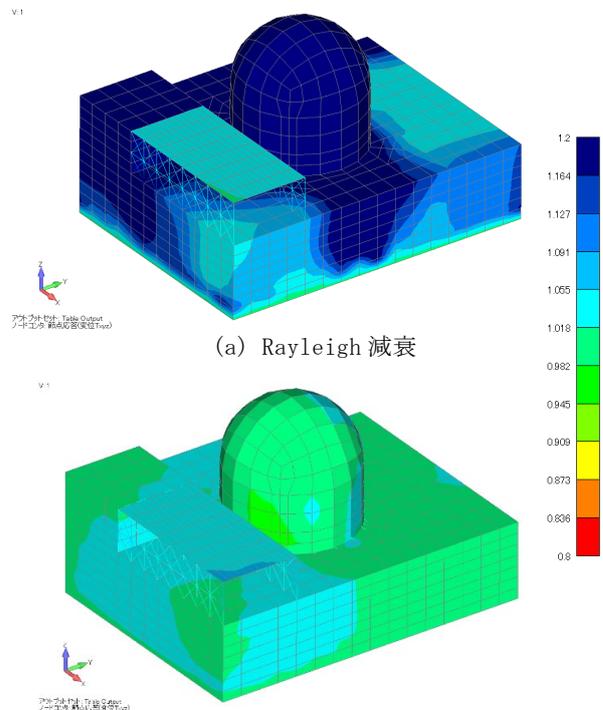


(a) 因果的履歴減衰



(b) 拡張 Rayleigh 減衰

図 2 因果性に基づく減衰モデル



(b) 拡張 Rayleigh 減衰

※モード減衰の合成加速度に対する比を取っており 1.0 (緑) であるほど精度が良いことを示している

図 3 Rayleigh 減衰と拡張 Rayleigh 減衰の比較²⁾

2. 解析モデルの概要

2.1 モデル化の基本事項

地震応答解析モデルを図 4 に示す。解析モデルは、原子炉格納容器 (C/V)、外周コンクリート壁 (O/S)、内部コンクリート (I/C)、原子炉周辺補機棟 (RE/B)、燃料取扱棟 (FH/B)、基礎及び地盤を一体化したモデルとし、建屋の耐震壁及び床を積層シェル要素、鉄骨部を梁要素、基礎をソリッド要素、基礎底面の地盤をソリッド要素とした。コンクリート及び鉄筋の物性値を表 1 に、地盤の物性値を表 2 に示す。解析コードは、3 方向の地震動を同時入力することを踏まえ、コンクリートの多方向ひび割れが実装されている TDAPⅢ とした。

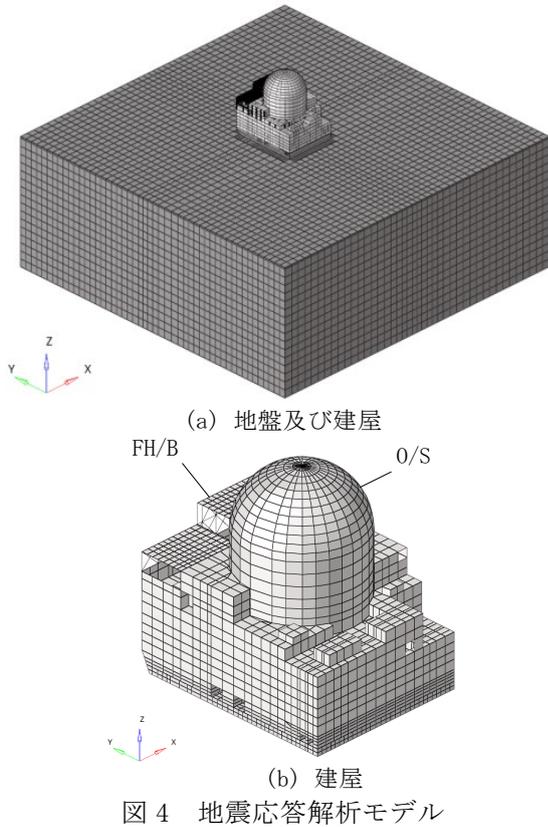


図 4 地震応答解析モデル

表 1 コンクリート及び鉄筋の物性値

材料	ヤング係数 (kN/m ²)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比
コンクリート	2.61×10 ⁷	1.09×10 ⁷	0.20
鉄筋	2.05×10 ⁸	7.88×10 ⁷	0.30

表 2 地盤の物性値

V _s (m/s)	ヤング係数 (kN/m ²)	せん断弾性係数 (kN/m ²)	ポアソン比	質量密度 (ton/m ³)
2587	5.38×10 ⁷	2.01×10 ⁷	0.34	3.0

2.2 材料構成則

鉄筋コンクリートの材料構成則には、TDAPⅢ³⁾ で実装されている材料構成則を用いた。コンクリート及び鉄筋の材料構成則を図 5 に示す。コンクリートの材料構成則は、長沼モデル⁴⁾ をもとに設定されており、非直交固定ひび割れモデル (直交 2 方向×2 組の 4 方向ひび割れモデル) が考慮されている。破壊基準は、Kupfer-Gerstle の提案式である。また、圧縮特性としてひび割れ後の圧縮低減を、引張特性として圧縮損傷による引張強度低減を考慮しているとともに、ひび割れ後のせん断伝達特性についても考慮している。鉄筋の材料構成則は、修正 Menegotto-Pinto モデルをもとに設定されている。用いたモデルは、実験の再現解析で検証⁵⁾ されている。

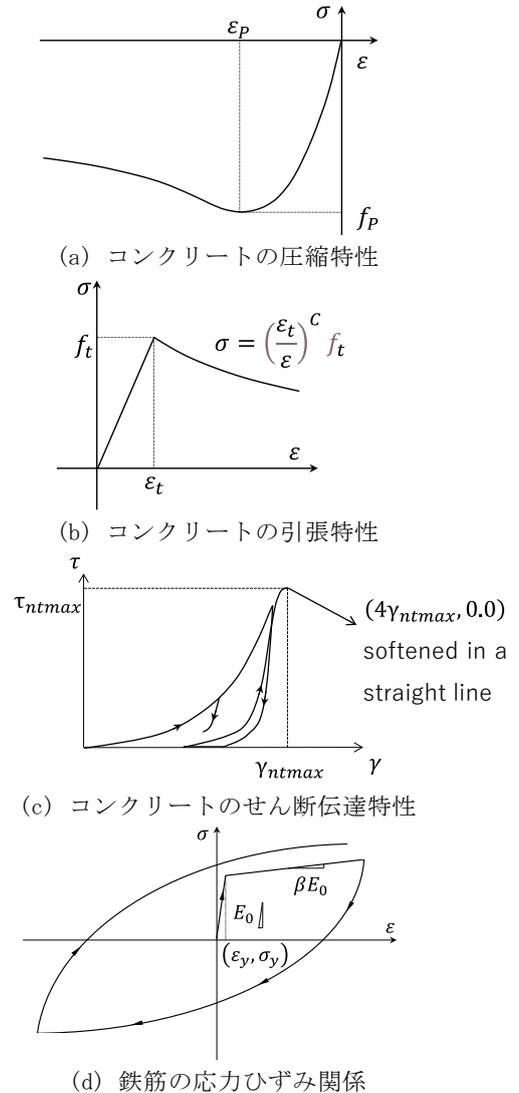
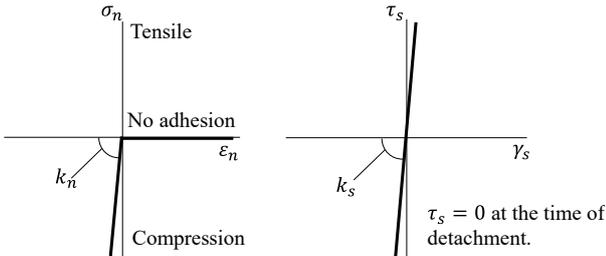


図 5 コンクリート及び鉄筋の材料構成則

2.3 基礎浮上り非線形

基礎底面と地盤との間には、図 6 に示す非線形特性を考慮したジョイント要素を設ける。垂直方向は基本的な浮き上がり現象を把握するために付着力は 0 とし、せん断方向は底面の粘着力を大きくすることで滑動現象が生じない設定とした。

また、解析の精度と安定性を考慮し、ジョイント要素の剛性と減衰を設定⁶⁾している。



(a) 垂直方向の特性 (b) せん断方向の特性 (接触時)
図 6 ジョイント要素の非線形特性

2.4 建屋の減衰

建屋の減衰は、表 3 に示す 4 ケースの解析を行った。目標 (精解) とする減衰モデルは、文献²⁾によりモード減衰とほぼ等価な結果 (図 3) が得られている拡張 Rayleigh 減衰とした。各ケース共通として、減衰比は、鉄筋コンクリート造 (RC 造) は 3%、鉄骨造 (S 造) は 2% とする。また、減衰マトリクス of 剛性項は、瞬間剛性比例型とする。

評価する振動数帯については、低次側は O/S の一次モード振動数の 1.6 [Hz] 程度と FH/B の一次モード振動数の 5.3 [Hz] 程度とし、高次側では、累積の有効質量比と機器評価で考慮すべき振動数 30.0 [Hz] 程度とした。

表 3 減衰モデルの解析ケース

ケース名	減衰モデル	設定する振動数
ERay	拡張 Rayleigh 減衰	ALL: flim=35.0 [Hz]
Ray0	要素別 Rayleigh 減衰	Gr1: f1=5.25 [Hz], f2=30.0 [Hz] Gr2: f1=1.61 [Hz], f2=30.0 [Hz]
Ray1	全体 Rayleigh 減衰	ALL: f1=5.25 [Hz], f2=30.0 [Hz]
Ray2	全体 Rayleigh 減衰	ALL: f1=1.61 [Hz], f2=30.0 [Hz]

(1) 拡張 Rayleigh 減衰

拡張 Rayleigh 減衰については、減衰比が一定と

みなせる範囲で、誤差を極力抑えた (5%程度) 高精度版と、誤差はある程度許容 (10%程度) しつつ一定の範囲を広げた中精度版が提案⁷⁾されている。今回の検討では、減衰比が一定となる振動数の範囲を広く設定したいため、中精度版を採用することとした。中精度版の減衰モデルで設定する振動数としては、0.04flim~0.86flim 程度が一定の減衰比 (10%程度の誤差を許容) で提案⁷⁾されていることから、35.0 [Hz] (1.4Hz~30.1Hz 程度が一定) とした (図 7)。

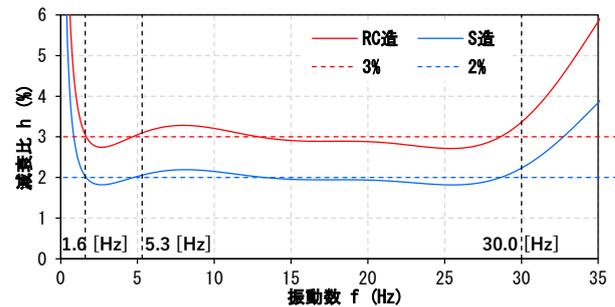
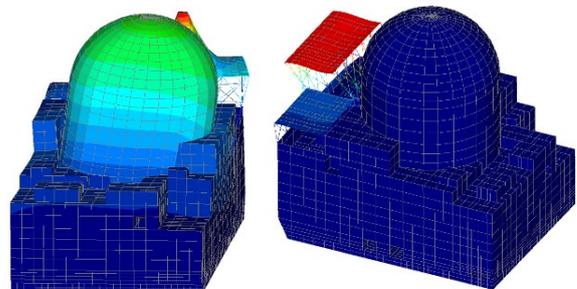


図 7 拡張 Rayleigh 減衰 [ERay]

(2) 要素別 Rayleigh 減衰

本報では、3 方向の地震動を同時入力することとしており、図 8 に示すように鉄筋コンクリート造 (RC 造) と鉄骨造 (S 造) では一次モードの特徴が異なることから、RC 造である O/S、RE/B 及び I/C のグループ (Gr.1) と、S 造である FH/B のグループ (Gr.2) に分けた要素別 Rayleigh 減衰を設定する。Rayleigh 減衰に与える基準振動数 (f1 及び f2) は、Gr.1 では、f1 は最も低次モードである O/S の一次モードである 5.25 [Hz] とし、f2 は 30 [Hz] とした。Gr.2 では、f1 は FH/B の一次モードである 1.61 [Hz] とし、f2 は 30 [Hz] とした。設定した要素別 Rayleigh 減衰を図 9 に示す。



(左) O/S 一次モード (5.3 [Hz] 程度)
(右) FH/B 一次モード (1.6 [Hz] 程度)

図 8 固有値解析結果の一例

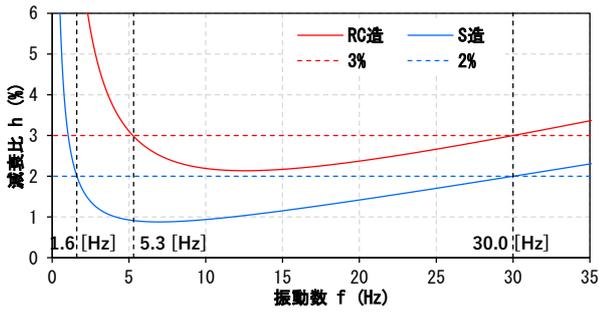


図9 要素別 Rayleigh 減衰 [Ray0]

(3) 全体 Rayleigh 減衰

モデル全体に同一の振動数で与えて設定し、Ray1 の f1 は 0/S の一次モードである 5.25 [Hz] とする。FH/B の部分で危険側の設定である。Ray2 の f1 は FH/B の一次モードである 1.61 [Hz] とする。これは最も保守的な設定である。また f2 は要素別 Rayleigh 減衰と同様に 30 [Hz] とした。それぞれの設定した Rayleigh 減衰を図 10、図 11 に示す。

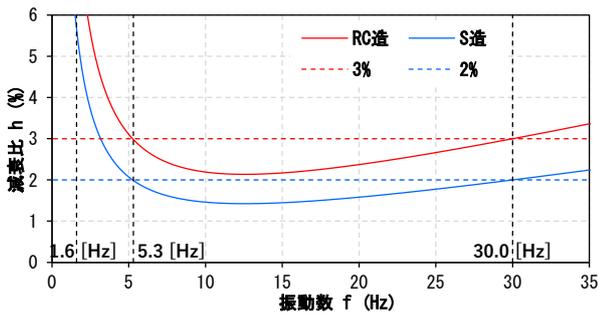


図10 全体 Rayleigh 減衰 [Ray1]

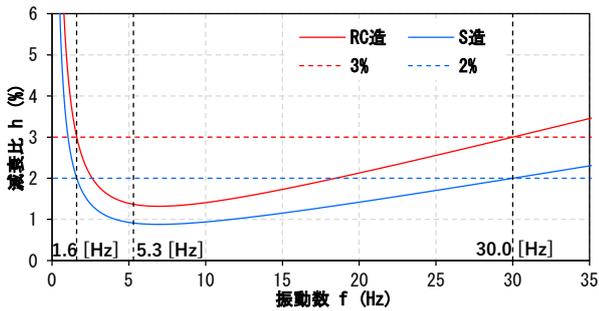


図11 全体 Rayleigh 減衰 [Ray2]

3. 解析条件の概要

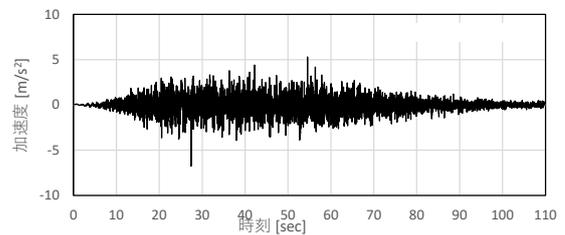
3.1 地震応答解析方法

2章で構築した建屋と地盤を一体化し非線形特性を考慮した解析モデルを用いて、時刻歴応答解析を実施する。数値積分法は、Newmark- β 法 ($\beta = 0.25$, $\gamma = 0.5$) とする。

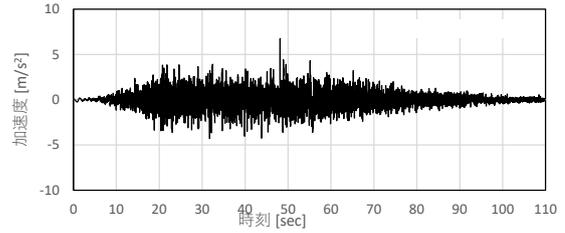
3.2 入力地震動

入力地震動は、水平方向入力用に 2 波（水平 1 及び水平 2）、鉛直方向入力用に 1 波（鉛直）を作成することとし、3 方向の地震動を同時入力することを踏まえ、それぞれの地震動の位相が異なるように設定した。

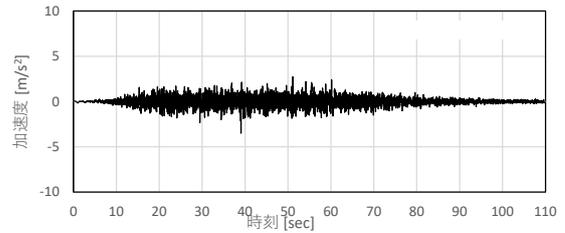
地震動は、地盤モデルの底面位置に入力することとし、建屋基礎底面位置の応答が図 12 に示す地震動の加速度応答スペクトルと概ね一致するように補正した地震動とした。図 12 に示す基礎底面位置における地震動の最大加速度は、水平 1 と水平 2 で $6.8 [m/s^2]$ 及び鉛直で $3.5 [m/s^2]$ である。



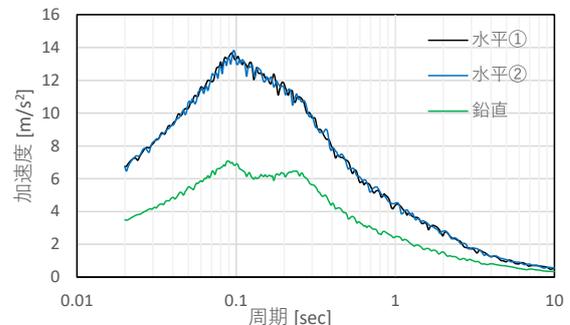
(a) 水平 1



(b) 水平 2



(c) 鉛直



(d) 加速度応答スペクトル

図 12 基礎底面位置における地震動

4. 解析結果

解析結果の考察に当たっては、2.4 節に示した通り、モード減衰とほぼ等価な結果が得られている拡張 Rayleigh 減衰 (ERay) を目標 (精解) とするモデルとし、主に結果に差が見られた O/S の部分と FH/B の部分に着目して結果を分析する。なお、拡張 Rayleigh 減衰を実機モデルに適用する解析は著者の知る限り初めての試みであったが、以降に示すように妥当な解析結果が得られた。

4.1 接地率

接地率を図 13 に示す。いずれの減衰モデルにおいても大きな差異はなかったが、最も接地率が低い Ray2 (最も保守的な減衰) では、接地率が 100% を下回る時間帯が、他のケースに比べると多い傾向であった。

4.2 合成変位の最大値分布

合成変位の最大値分布を図 14 に示す。ERay (目標とする減衰) と Ray0 はほぼ同じような分布であることが確認できる。Ray1 (FH/B が危険側になる減衰) については、O/S 部については ERay と同じような分布であるが、FH/B については減衰比が大きくなるため、応答が小さくなっている。Ray2 については、O/S 部の頂部応答が大きくなっていることが確認できる。

4.3 合成加速度の最大値分布

合成加速度の最大値分布を図 15 に示す。ERay と Ray0 については、O/S の部分はほぼ同じような傾向であるが、FH/B の部分では Ray0 の方が大きい傾向となった。これは FH/B の減衰設定 (1.6Hz から 30Hz の間は減衰比が小さくなる) が、ERay に比べ保守的な設定であるためである。Ray1 については、ERay と同じような傾向であった。この合成加速度は、FH/B の X 方向の一次モード (7.0Hz 付近に存在) の影響が支配的であるため、合成変位とは異なり Ray1 の応答値が大きくなった。Ray2 については、全体的に応答が大きくなっている。

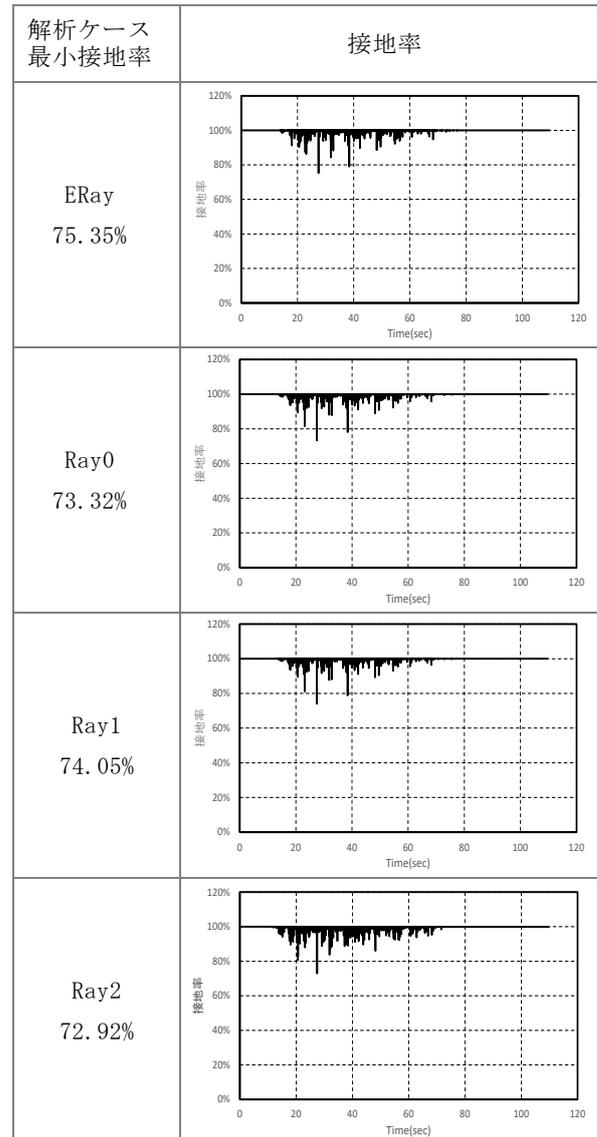
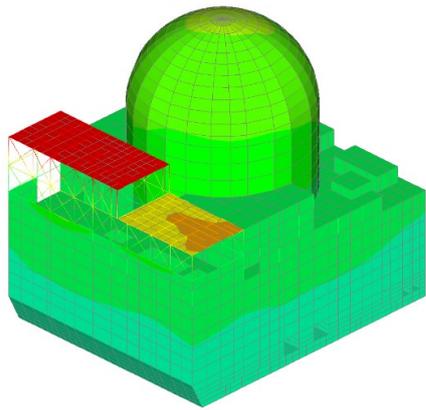
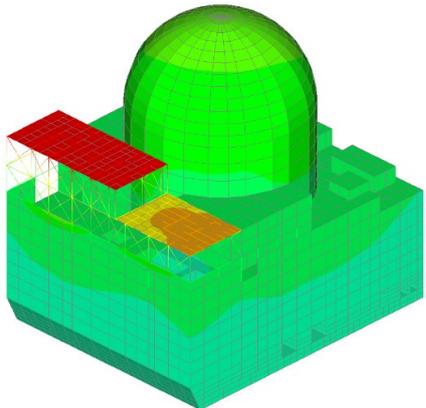


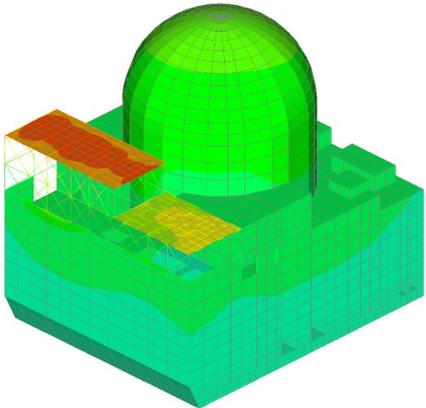
図 13 接地率



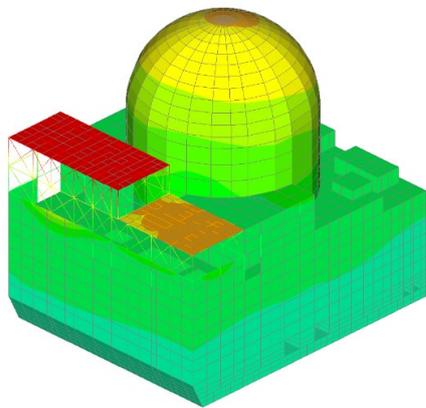
(ERay)



(Ray0)



(Ray1)



(Ray2)

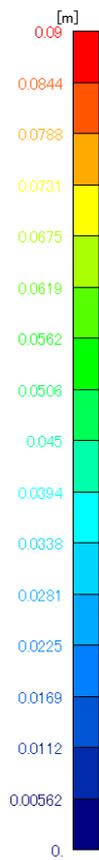
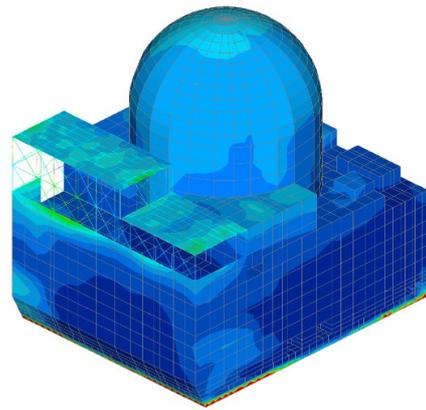
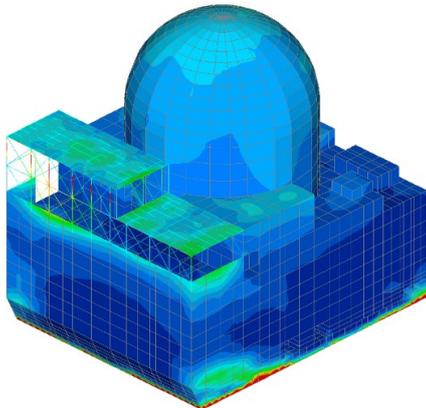


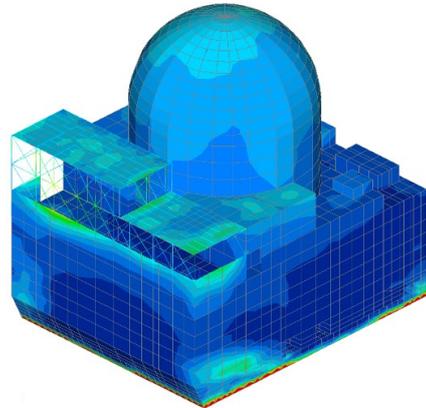
図 14 合成変位の最大値分布



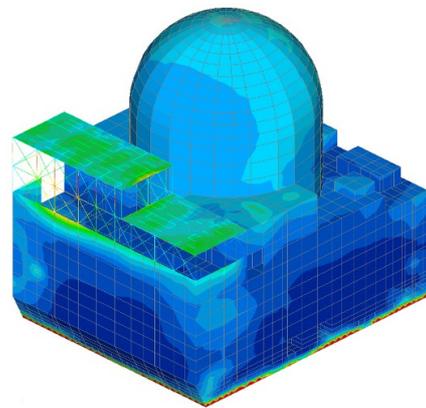
(ERay)



(Ray0)



(Ray1)



(Ray2)

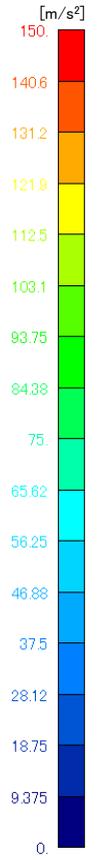
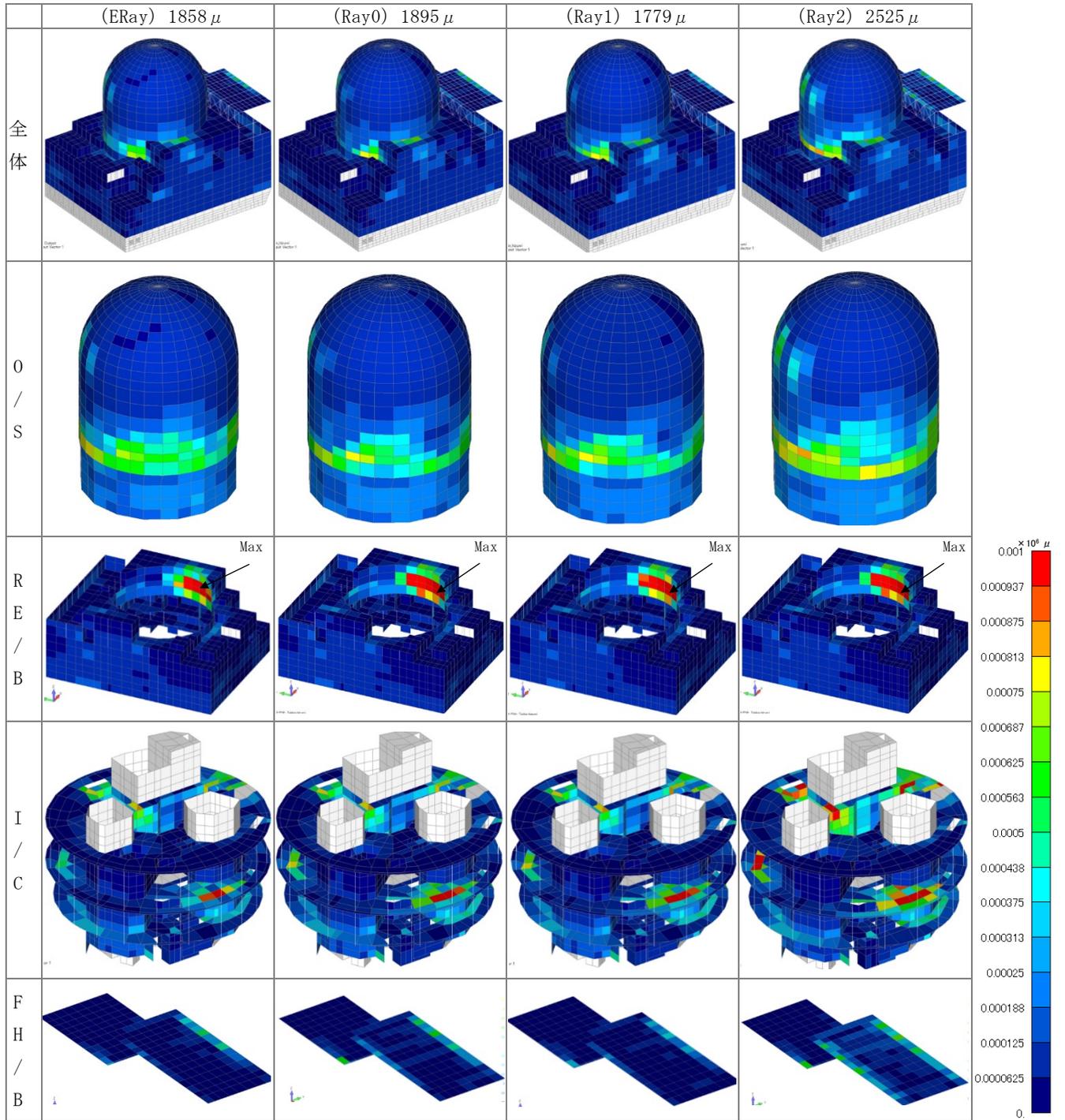


図 15 合成加速度の最大値分布

4.4 鉄筋の最大軸ひずみ分布

鉄筋の軸ひずみの最大値分布を図 16 に示す。
ERay と Ray0 についてはほぼ同じような分布であ

ることが確認できる。Ray1 も ERay と同じような
結果であるが、Ray2 についてはひずみの値も大き
く生じている。



※先頭行は解析ケースと最大値を示す
図 16 鉄筋の最大軸ひずみ分布

4.5 加速度応答スペクトル

加速度応答スペクトルの結果を図 17 に示す。加速度応答スペクトルの結果も概ね減衰比と関係しており、減衰比が同程度となる振動数では同じような応答となっており、1.6Hz～5.3Hz の範囲の応答では、Ray2 > Ray0 > ERay > Ray1 で、5.3Hz

～30Hz の範囲では、Ray2 > Ray0 > Ray1 > ERay となるような傾向である。ただし、前述の傾向と相違している O/S (Node:2241415) の Y 方向及び FH/B (Node:2222232) の Z 方向について、以降で分析した。

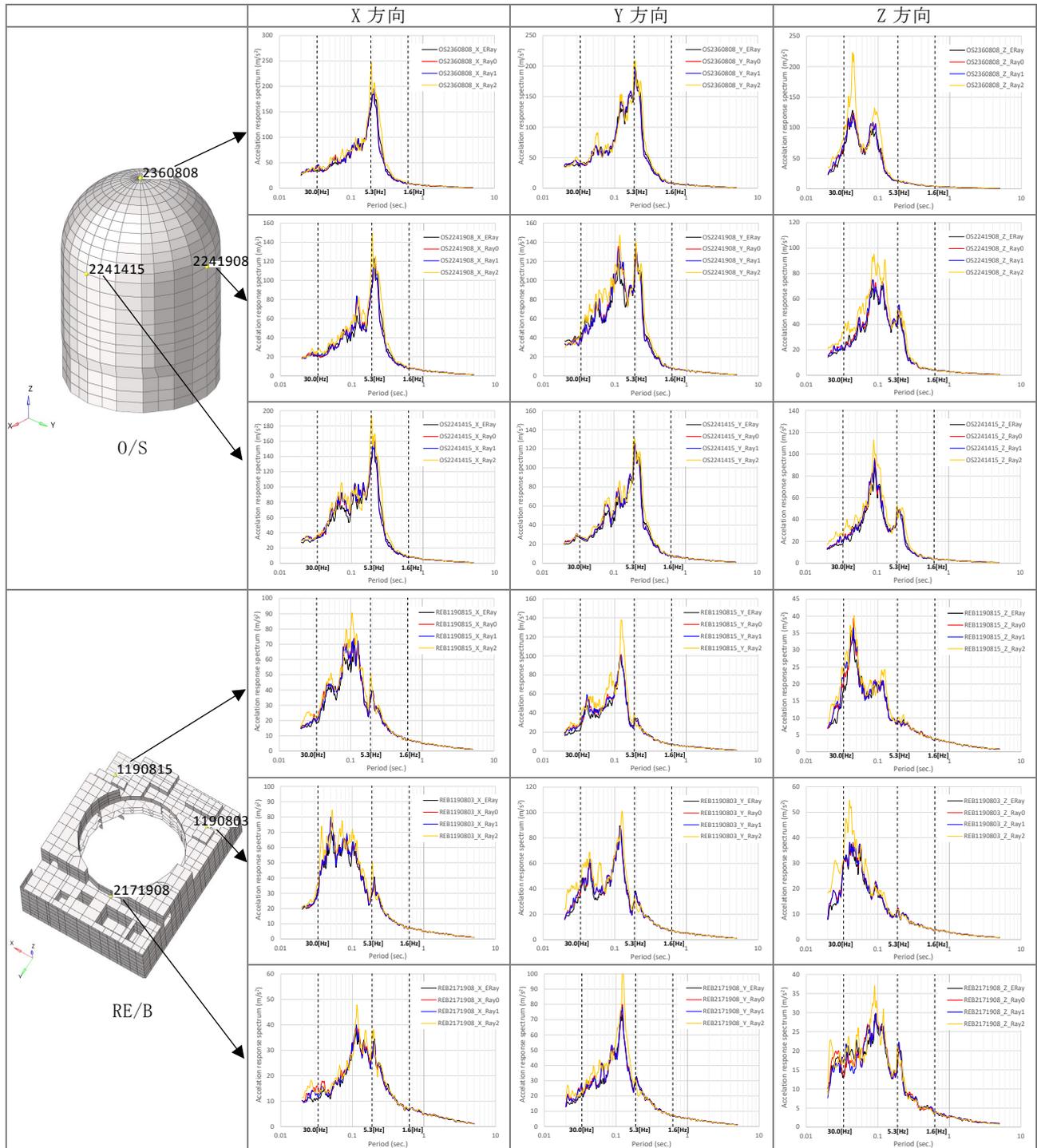


図 17 加速度応答スペクトル (1/2)

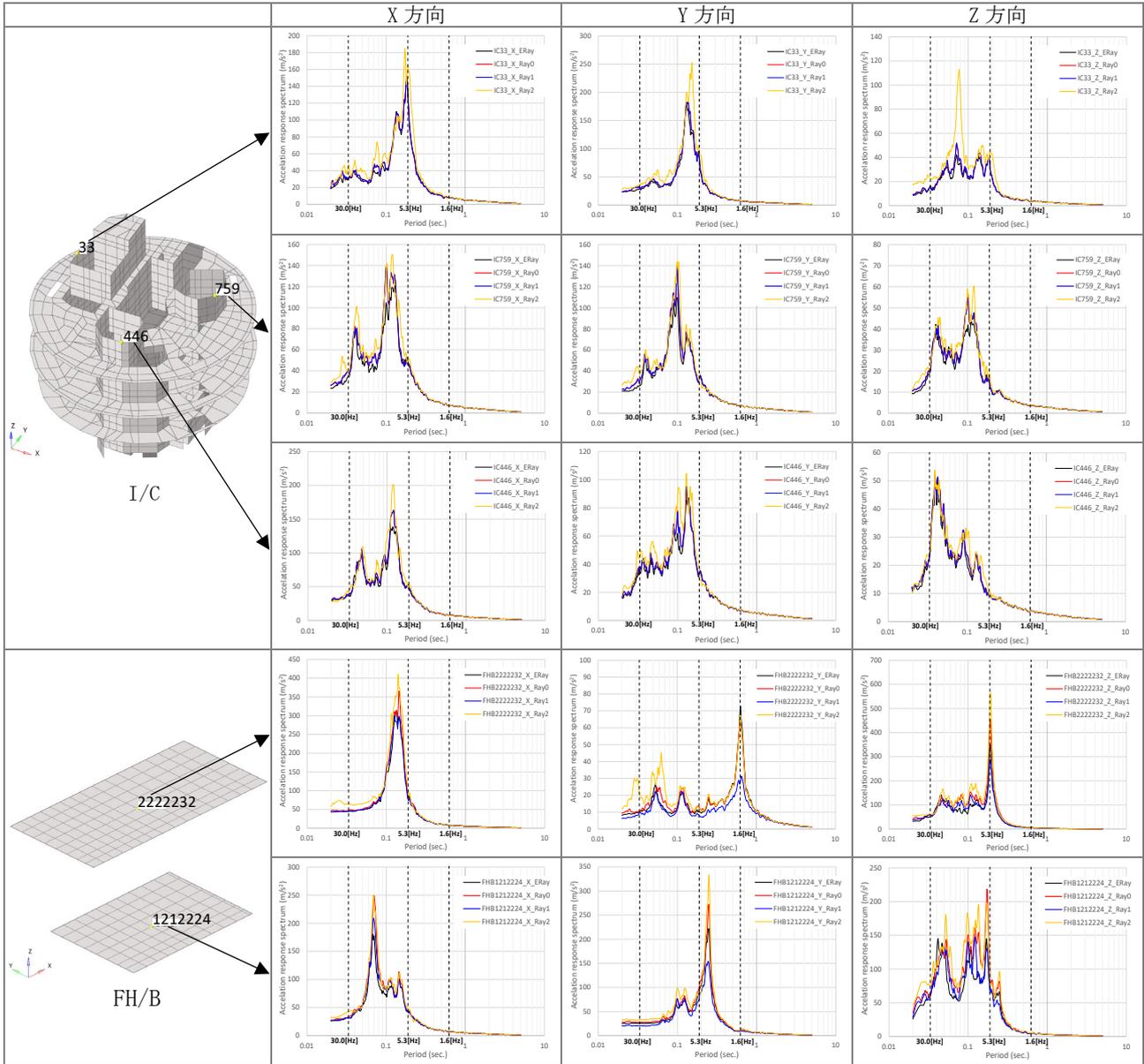
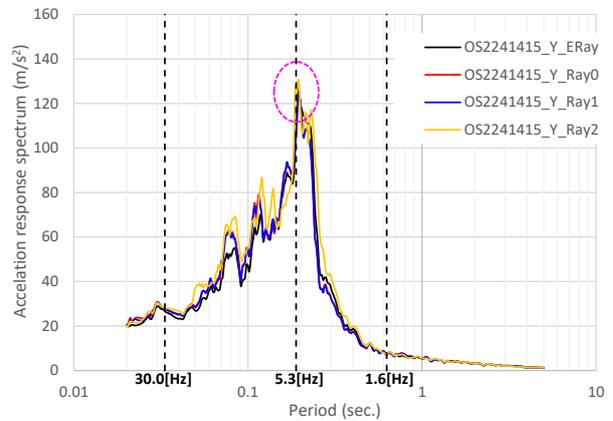


図 17 加速度応答スペクトル (2/2)

(1) O/S 部分

Node:2241415 で Y 方向の応答に着目すると (図 18), 5.3Hz 付近の応答について Ray2 の応答が他の減衰モデルの結果と同じような値となっているが, 減衰比の関係のみ考えれば応答が大きくなることが予測される。O/S 部脚部のひずみ分布を確認すると, Ray2 は他の減衰モデルに比べて大きくなっており非線形化が進んでいる。部材が損傷し, ピーク位置が長周期側 (右) にシフトするとともに, 履歴による減衰効果が生じ応答が同程度になったものと考えられる。

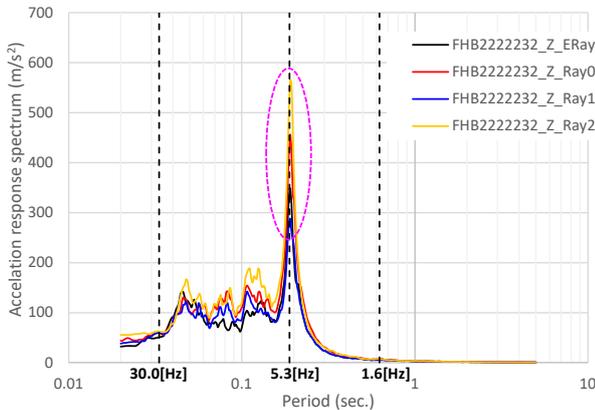


(Node:2241415, Y 方向, O/S)

図 18 加速度応答スペクトル (再掲)

(2) FH/B 部分

Node:2222232 で Z 方向の応答に着目した (図 19)。これも 5.3Hz 付近 (正確には若干低次側で 5.15 Hz) の応答であるが, 特に Ray0 と Ray2 について応答の差が生じている。FH/B 部分の減衰については両モデルに違いは無いが, RE/B 部分については Ray0 に比べ Ray2 では減衰比が小さくなるため, 応答に違いが生じたものと考えられる。もし分析通りであれば連成による影響と言えるが, この応答のように顕著に確認できる場合や, できない場合 (例えば Y 方向の一次モード) もある。また, ERay と Ray1 について差があるが, この理由を明らかにすることは困難であるものの, 減衰比は Ray1 の方が僅かであるが大きいのでその差が一因であるといえる。



(Node:2222232, Z 方向, FH/B)

図 19 加速度応答スペクトル (再掲)

5. まとめ

近年提案されている拡張 Rayleigh 減衰について, 新たな試みとして実機モデルに適用した。解析結果から, 全体 Rayleigh 減衰 (Ray1, Ray2) では, 基準振動数の設定次第で応答が過小もしくは過大な結果となることが示された。要素別 Rayleigh 減衰 (Ray0) は, モード減衰とほぼ等価な拡張 Rayleigh 減衰 (ERay) と同等か, あるいは保守性のある結果であることが示されたため, 妥当性を有するモデルであるといえる。

また, 連成による影響が顕著に表れる場合では, むやみに Rayleigh 減衰の振動数を変えて, 連成同士の方の減衰比を過大評価することは危険側の設定につながるため慎重であるべきと考えられる。そういったケースでは, 拡張 Rayleigh 減衰モデル

(ERay) は, 幅広い振動数において一定の減衰比で評価でき, 実用性を有しかつ合理的な応答を得ることが可能であるため, 将来的に期待できる減衰モデルであるといえる。

現状の許認可実績を考慮し, 当面は従来の Rayleigh 減衰モデル (Ray0) を基に検討することが現実的な判断と考えられるが, 必要に応じて新たな減衰モデル (ERay) による妥当性の確認を併せて検討することも有用と考えられる。

【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, 検討に際してご協力いただいた大成建設(株)殿はじめ関係各位に深く感謝いたします。

【参考文献】

- 1) 中村尚弘:「因果的履歴減衰の実用的評価法」, 日本建築学会構造系論文集,第 70 巻,第 596 号,pp.33-39,2005.10
- 2) 太田成:「因果性に基づく減衰モデルの 3 次元有限要素モデルによる RC 非線形地震応答解析への適用に関する研究」,広島大学博士論文,2024.3
- 3) アーク情報システム:TDAPIII 理論説明書バージョン 3.15, 2024.1
- 4) 長沼ら:「鉄筋コンクリート壁体の FEM による正負繰返し及び動的解析」,日本建築学会構造系論文集,第 544 号,pp.125-132,2001.6
- 5) 太田ら:鉄筋コンクリートの壁式構造を対象とした非線形解析の精度検証,日本建築学会大会学術梗概集,構造 I, pp.209-210, 2023.9
- 6) Ito et al.:「Nonlinear Dynamic Analysis by Three-Dimensional Finite Elements Model Considering Uplift of Foundation」, SMiRT-27,Division 5,2024.3
- 7) 中村尚弘:「Rayleigh 減衰の高度化に関する研究- Rayleigh 減衰の高度化に関する研究:因果的履歴減衰モデルの付加による精度向上の試み-」,日本建築学会構造系論文集,第 79 巻,第 706 号,pp.1751-1761,2014.12

MADR システム(メール連動型自動 DR システム)の開発

(株)四国総合研究所 電力技術部 吉田 正志
(株)四国総合研究所 電子アグリ技術部 中西 美一

キーワード : デマンドレスポンス
DR システム
メール連動型自動システム
空調機
業務用空調機
セントラル空調
熱源機
需要家機器制御
需給運用
再エネ普及
再エネ抑制回避

Key Words : Demand response
Demand response system
Mail-linked automated system
Air conditioner
Commercial air conditioners
Central air conditioning
Heat source machine
Consumer equipment control
Supply and demand management
Spread of renewable energy
Avoidance of renewable energy suppression

Development of MADR system (Mail-linked automatic DR system)

Shikoku Research Institute, Inc., Electric Power Technology Department

Masashi Yoshida

Shikoku Research Institute, Inc., Electronics and Agricultural Technology Department

Yoshikazu Nakanishi

Abstract

The introduction of renewable energy sources such as solar power generation, whose power generation varies depending on weather conditions, is rapidly increasing. This calls for efforts to stabilize supply and demand operations and avoid suppression of renewable energy generation. In these circumstances, the importance of demand response (DR) technology, which allows the demand side to intelligently control consumption according to supply conditions, is increasing. To address this issue, we have developed a system that automates load reduction operations for air conditioners and other devices that currently rely on manual operation by customers. This article introduces a system that can automate load reduction operations by making only a slight change to the method of notifying a large number of contracted customers of DR requests by email.

1. はじめに

天候等により発電量が変動する太陽光発電などの再生可能エネルギー発電導入が急増し、需給運用が益々困難化し、需給運用の安定化や再生可能エネルギー発電の抑制回避への取り組みが必要となっている。

こうした状況から、需要側が供給状況に応じて賢く消費量を変化させるデマンドレスポンス (DR) 技術の重要性が高まっている。

当社では、既に市場にある家庭用電気給湯器 (電気温水器・エコキュート) 等を活用し、昼間上げ DR に利用でき早期実現性ある「放送型無線通信を用いた需要家機器活用技術」を開発している。

今回、下げ DR に空調機などの負荷抑制運転をお客さまの手動操作に依存している現状を自動化可能とする DR システム (MADR システム) を開発したので紹介する。

2. MADR(メール連動型自動 DR)システムの概要

契約する多数のお客さまに電子メールで DR 要請を行う手法に僅かな修正を加えるだけで、空調機などの負荷抑制運転を自動化する。

お客さま向けの DR 要請メールは現状のまま、MADR システム向けの DR 要請メールのみ暗号化して送信し、安価なコストで広域通信が可能な LTE-M 通信機能を搭載した DR コントローラを負荷抑制機器に設置することで、DR 要請時間内の負荷抑制運転を自律制御で行う^{※1}。

確実な DR 供給力を得ることができると共に、お客さまの機器操作手間を軽減する。

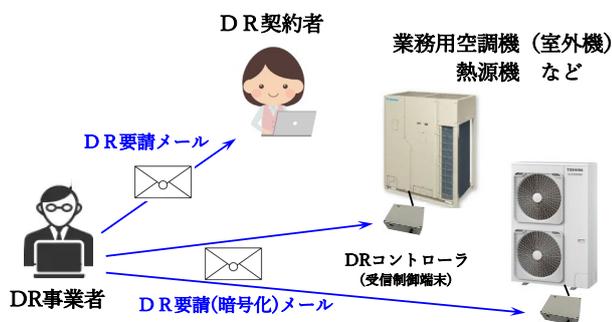
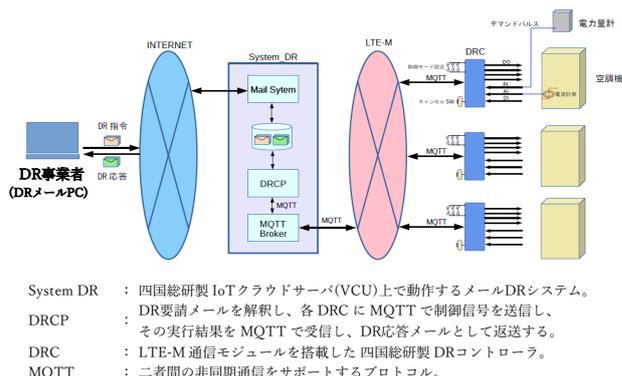


図1 MADR システムの概要

※1：四国電力(株)および当社の共同で特許出願 (2025. 4)



System DR : 四国総研製 IoTクラウドサーバ(VCU)上で動作するメールDRシステム。
DRCP : DR要請メールを解釈し、各DRCにMQTTで制御信号を送信し、その実行結果をMQTTで受信し、DR応答メールとして返送する。
DRC : LTE-M通信モジュールを搭載した四国総研製DRコントローラ。
MQTT : 二者間の非同期通信をサポートするプロトコル。

図2 MADR システム設計

2.1 空調設備の外部制御機能

業務用途や産業用途の空調設備機器には、デマンド制御用の機能が搭載されている。

この機能を利用することで容易に外部から制御することが可能である。

(1) 業務用空調機・マルチ空調機

業務用空調機やビル用マルチ空調機の室外機には、メーカーや機種により設定抑制量は異なるものの定格消費電力の抑制や強制サーモOFFできる機能が搭載されており、機種に応じた外部入力アダプタを介して、選択する機能端子に接点信号を入力することで運転制御が行える。

(2) 熱源機

セントラル空調に用いられる熱源機には、デマンド制御機能が搭載され、熱源機を制御するコントローラ部のデマンド信号入力端子に接点信号を入力することで、任意設定するデマンド値の運転が行える。

2.2 セキュリティ対策

(1) MADRシステム向けDR要請メール

DR要請メールに含まれる制御データ部は、現時点で最も安全な標準暗号方式AES256で暗号化し、復号鍵を持たない第三者による解読は極めて困難である。

System DR(クラウドサーバ)では、受信したメール中の暗号化された制御データを復号鍵で復号して、制御データに含まれる事業者IDとメール平文に含まれる事業者IDを比較しメールの信憑性を検証するなど、偽りメールによる誤ったDR制御を防止する。

(2) デバイスネットワーク

DR コントローラは、LTE-M 回線上で暗号化 MQTT 通信により、System DR 内で動作する MQTT Broker と双方向のデータ通信を行う。

MADR システムでは、クライアントデバイスが Broker に接続する際の認証を安全性の高い双方向認証とし、System DR が発行したクライアント証明書の内蔵した DR コントローラしか MQTT Broker に接続することができない。

また、PC 上で動作するソフトウェアが MQTT Broker に接続する際にもクライアント証明書が必要で、証明書を持たない第三者による DR コントローラの遠隔操作は行えない。

MQTT Broker には外部サービスを使用せず、System DR 内で MADR 専用システムを運用しており、サイバーアタックにも高い耐性を備える。

更に、DR コントローラは、定期的に生存確認情報を System DR に送信し、故障や盗難の発生時には自動的に当該クライアント証明書を一時的に無効化することで、証明書の悪用を防ぐことができる。

2.3 DR コントローラ

System DR から DR 制御データを受信し、メモリ上の処理待ちキューに追加する。新規の制御データを追加する都度、キューの構造全体を不揮発メモリ上のファイルに上書き保存し、キューの先頭から順次制御データを取り出し、制御データで指示される開始日時～終了日時の間、制御信号を出力すると共に DR 実行中 LED を点灯する。

また、キャンセルスイッチを設け、実行中の DR 制御を中止することも可能で、制御対象機器のお客さま操作にも対応する。

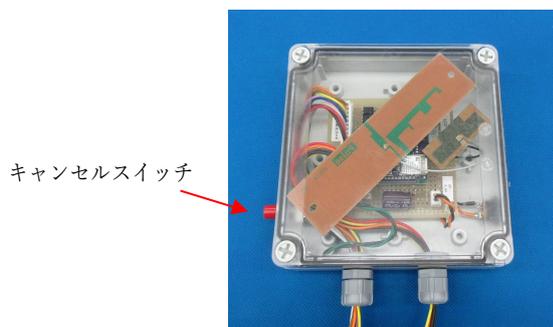


図 3 DR コントローラ (本体・試作機)

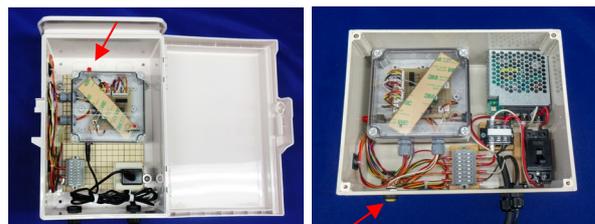


図 4 DR コントローラ (設置用・試作機)

2.4 制御出力の詳細設計

空調機の制御出力には、3つのモードを有し、DR コントローラ基板上的選択スイッチにより切り替える。

- ① 空調機搭載機能や熱源機デマンド制御などに適した、DR 要請時間内接点信号を ON 出力する「単純 ON/OFF モード」
- ② DR 要請メールで負荷抑制率を指示することができ、負荷抑制率の時間設計に応じた DR 要請時間内の接点信号を間欠 ON/OFF 出力する「遠隔設定間欠 ON/OFF モード」
- ③ お客さま要望等の負荷抑制率に個別設定でき、設定した負荷抑制率の時間設計に応じた DR 要請時間内の接点信号を間欠 ON/OFF 出力する「個別設定間欠 ON/OFF モード」

抑制率	1800 秒 (30分)			
	900 秒スロット		900 秒スロット	
50% 抑制	450 秒	450 秒	450 秒	450 秒
40% 抑制	360 秒	540 秒	360 秒	540 秒
30% 抑制	270 秒	630 秒	270 秒	630 秒

・ 1 スロット (900 秒) を ON 時間と OFF 時間に分割する。

※ 出力信号 ON は空調機停止 (強制サーモOFF)、OFF は空調機稼働 (通常状態)

図 5 間欠運転の時間設計

2.5 その他の機能

DR コントローラの制御出力は接点信号 4 出力の他、4-20mA リニア制御にも対応する。

また、パルス/デジタル/アナログ入力による計測機能も備えている。

商業施設などの業務用空調機を数多く設置する店舗対応として、制御出力信号を分配する拡張ユニット (接点信号 8 出力) も用意した。1 台の DR コントローラ出力に、それぞれ拡張ユニットを付加することで、最大 32 台の空調機制御に対応できる。また、設置工事用や運用管理用のアプリケーションも用意した。

当社がこれまでに開発した IoT クラウド技術、高信頼広域分散制御技術をベースに構築しており、当社既存の他用途システムなどとの連携も容易に行うことができる。



図 6 動作状況確認・データ抽出用 Web アプリ

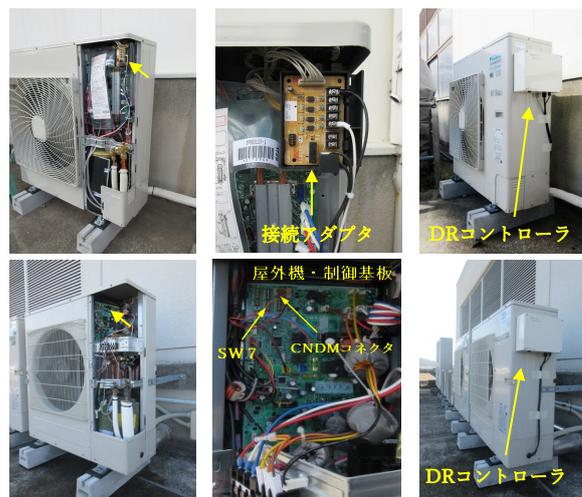


図 7 DR コントローラ設置 (業務用空調機)

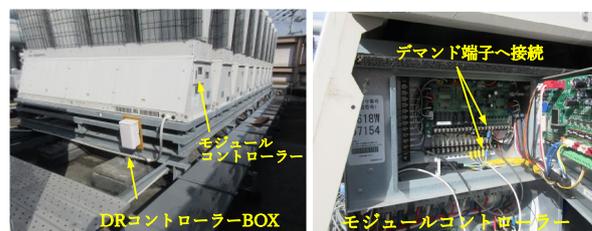


図 8 DR コントローラ設置 (熱源機)

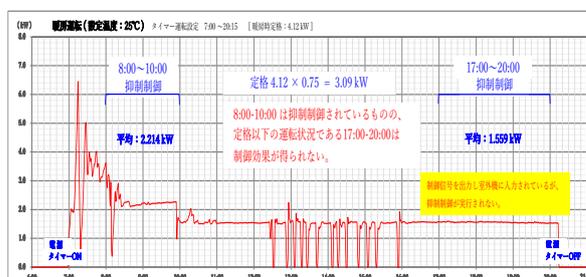
3. MADR システムの検証結果

メーカー 2 社の業務用空調機および商業施設利用の熱源機 (空冷 HP モジュールチラー) を用いて MADR システムの検証試験を行った。

DR コントローラからの制御出力は、業務用空調機の場合は、室外機基板に専用外部入力アダプタを用いて入力する。熱源機の場合は、制御用コントローラのデマンド端子に入力する。

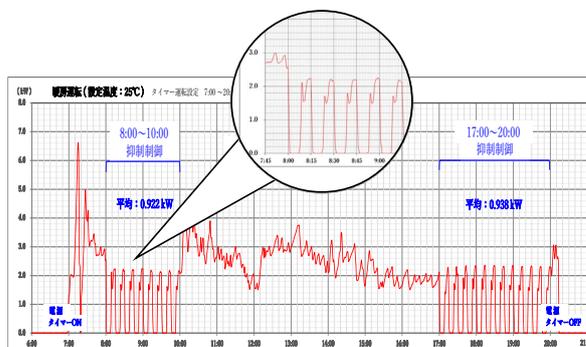
業務用空調機・室外機や熱源機の制御用コントローラは屋外設置されることから、屋外設置となる DR コントローラは、容易に LTE-M 通信を受信することができる。検証のため、DR コントローラを屋内設置に変更しても良好に受信し、確実に制御できることを確認した。

業務用空調機では、空調負荷の小さい時など、機器保有の抑制制御運転では抑制機能が動作しない場合もある。DR への活用では、強制サーモ OFF 機能を利用した間欠 ON/OFF モードの有効性を確認した。また、暖房利用時の短時間制御検証であったが、本制御時の室内温度変化は小さく、空調利用環境に影響ないことも確認した。



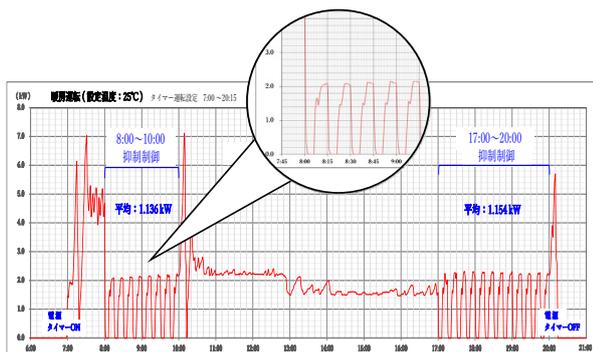
※ 定格25%抑制 [機器機能利用]

図 9 単純 ON/OFF モード (業務用空調機)



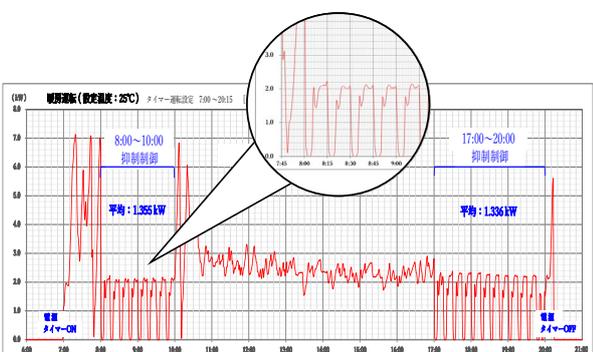
※ 間欠モード 50%抑制 [遠隔設定利用]

図 10 遠隔設定間欠 ON/OFF モード (業務用空調機)



※ 間欠モード 40%抑制 [遠隔設定 利用]

図 11 遠隔設定間欠 ON/OFF モード (業務用空調機)



※ 間欠モード 30%抑制 [遠隔設定 利用]

図 12 遠隔設定間欠 ON/OFF モード (業務用空調機)

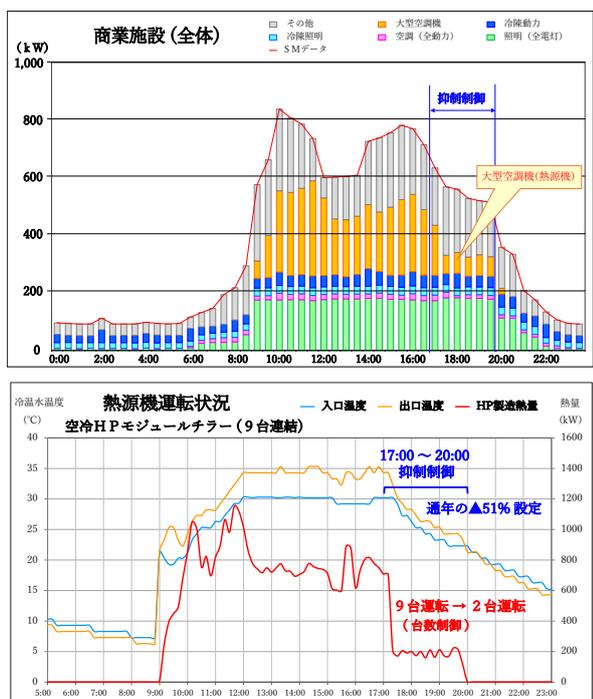


図 13 単純 ON/OFF モード (熱源機)

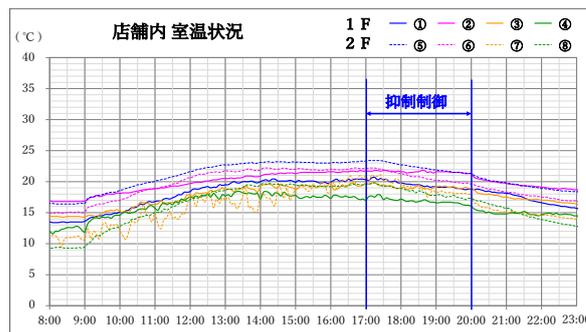


図 14 商業施設 店舗内室温状況

大規模商業施設・空調熱源機停止前 3 時間の抑制制御では、フロア平均で通常より 1~2℃早い温度低下傾向であったものの室温変化は小さく、空調機抑制運転を感じず影響はなかった。

4. まとめ

既存の電子メールによる DR 要請手法を利用することで、1 対 1 の双方向通信を必要とせず、安価で容易に下げ DR 構築を行うことができ、DR リソースの確実な制御に繋がり、契約お客さまの機器操作手間を軽減することができる。また、空調機器を抑制制御しても室温変化は小さく快適性への影響はないことも確認した。

点在する大量な需要家機器を制御する手法として、本技術が有効であることを確認した。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)エネルギーソリューション室殿より委託を受け実施したもので、検証試験など、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) 吉田正志:「放送型無線通信を用いた需要家機器活用技術の開発」, 四国電力, 四国電力送配電, 四国総合研究所 研究期報, No117, p21-24 (2022.12)

伊方3号機原子炉補機冷却海水システムを対象とした海水処理の適正化について

(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部	山本 松平
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部	石川 裕史
(株)四国総合研究所 化学バイオ技術部	大鹿 浩功
四国電力(株) 伊方発電所 放射線・化学管理課	三好 靖宏
四国電力(株) 原子力部 安全グループ	曾根 諒

キーワード： 伊方発電所3号機
原子炉補機冷却海水システム
化学処理
伝熱性能
生物皮膜
腐食

Key Words : Ikata Unit3
seawater system
chemical treatment
heat transfer performance
biofilm
corrosion

Improvement of chemical treatment in the seawater system at pressurized water reactor Ikata Unit 3

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

Shohei Yamamoto, Hirofumi Ishikawa, Hironori Oshika

Shikoku Electric Power Co., Inc., Nuclear Power Division

Yasuhiro Miyoshi, Ryo Sone

Abstract

Heat transfer performance of the air cooler for the emergency diesel generator (D/G) in seawater system was degraded in the 14th operation cycle of pressurized water reactor Ikata Unit 3 on June, 2017. This event would be caused by biofilm formation on the seawater side of the heat transfer tubes and/or excessive deposited of iron ion oxidized injected into the seawater for corrosion protection. To prevent the events due to biofilm formation and excessive iron deposited, we carried out to investigate the adequate chemical treatment for concentrations of chlorine (Inhibition of biofilm formation) and iron ion injected into the seawater that would be improved the heat transfer performance of the air cooler while maintaining the corrosion protection of two other heat exchangers, component cooling water heat exchanger (CCWHx) and chiller in the system. As a result of study using an apparatus simulating the system, it was elucidated that chemical treatment is appropriate to manage with concentration for chlorine of 0.05 mg (total residual oxidant as Cl₂) / L at CCWHx etc. outlet and iron ion of 0.10 mg / L at the injection concentration while locally increasing the chlorine concentration above 0.15 mg / L in the D/G seawater only by dedicated additional injection system. And then, improvement chemical treatment in the actual system, we have been able to both improve heat transfer performance and maintain corrosion protection.

1. はじめに

日本国内の原子力および火力発電所の多くは、蒸気タービン復水器や補機設備の冷却に大量の海水を利用しているが、海水による設備の汚損や腐食はトラブルの原因となるため、発電所毎に海域や設備に応じた保守・管理が行われている^{1,2)}。

瀬戸内海に面する四国電力(株)伊方発電所3号機(加圧水型原子炉)は、新規制基準に適合した2016年から通常運転を再開した。また、運転再開後も、さらなる安全性の向上に取り組んでおり、その一環として我々は、化学的な知見・観点から海水系統設備の保守・管理の高度化について調査・研究を実施している。

本稿では、伊方3号機原子炉補機冷却海水系統を対象とした化学処理(以下、「海水処理」という。)の適正化に係る調査・研究成果について報告する。

2. 伊方3号機原子炉補機冷却海水系統と海水処理

2.1 原子炉補機冷却海水系統の概要

図-1 に原子炉補機冷却海水系統の概要を示す。当該系統には、原子炉補機冷却水冷却器(以下、「CCWHx」という。)や空調用冷凍機(以下、「チラー」という。)に加え、非常用ディーゼル発電機(以下、「D/G」という。)の補機(熱交換器)が分岐し設置されている。また、海水処理として、汚損対策に海水電解液(次亜塩素酸ソーダ;以下、「塩素」という。)を、腐食対策に硫酸第一鉄水溶液(以下、「鉄」という。)を微量連続注入している。なお、D/G海水系統にのみ塩素を追加注入(以下、「追加塩素注入」という。)できる系統を設けているが、従来は未使用であった。

続いて、表-1 に各熱交換器の伝熱管材質並びに塩素や鉄の注入点から各機器までの到達時間と、機器出口での実測濃度(2020年6月時)を示す。

当該系統の伝熱管には白銅(C7060;以下、「CuNi」という。)やアルミニウム黄銅(C6871;以下、「CuAl」という。)等が使用されている。また、防汚効果により伝熱性能維持に寄与する塩素を取水海水に0.20mg/L(ppm)で注入するが、酸素や還元性物質等と反応・消費され、機器出口での残留塩素濃度は0.05ppm以下となる。さらに、鉄皮膜形成により銅系伝熱管の防食に寄与する鉄イオンを各機器への分岐前に注入(従来;0.015ppm as Fe)するが、皮膜形成・維持に寄与する量は極僅かである。

なお、同じ銅系材料であっても、異常潰食が生じにくいCuNiは、CuAlと比較して鉄注入を必ずしも要しないことが知られている³⁾。

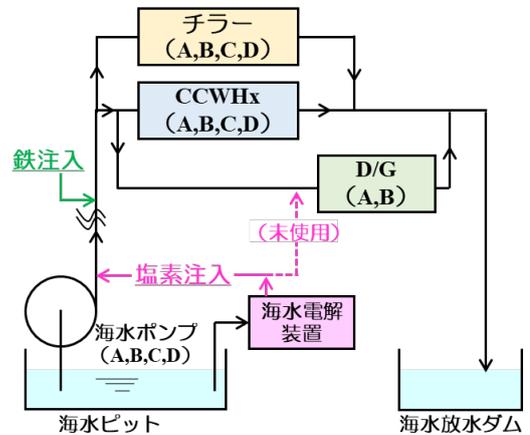


図-1 原子炉補機冷却海水系統の概要

表-1 熱交換器の伝熱管材質並びに海水処理状況

		CCWHx	チラー	D/G 熱交換器
伝熱管材質		CuAl	CuNi	CuNi, チタン
塩素	注入からの到達時間(秒) ^{※1}	80	100	120
	出口残留塩素濃度(ppm)	採水不可	<0.05	≤0.05
鉄	注入からの到達時間(秒) ^{※1}	10	30	50
	出口濃度 ^{※2} (ppm as Fe)	採水不可	0.014	0.014

※1: 海水流量と配管設計図等から算出した値

※2: フィルタ(0.45μ孔)ろ過により懸濁鉄分を除いた濃度

2.2 海水処理の課題と適正化について

原子力発電所に設置されたD/Gは、重大事故等による外部電源喪失時に電源を供給する重要設備であり、複数の補機で構成されている。その補機の1つである空気冷却器(CuNi)は、過給機から供給される約160℃の圧縮空気を海水で冷却し、機関内シリンダへの空気充填効率等を高めることで、発電効率の向上・維持に寄与している。

伊方3号機D/Gにおいては、2017年6月の定期運転時に、空気冷却器の出口空気温度(以下、「吸気温度」という。)に上昇傾向が認められたため、伝熱管海水側の臨時清掃が実施された(図-2)。当該事象では、フジツボ等の大型海生生物による

伝熱管閉塞は認められず、冷却機能低下の原因は、管内面の生物皮膜や注入鉄の過剰付着と推察されたことから、海水処理による対応が求められた。

一方、生物皮膜等の汚損に効果的な塩素濃度は海域に加え季節の影響を受ける^{4,5)}とともに、当該系統には空気冷却器以外にも複数の機器が設置されていること、さらに鉄皮膜性状（鉄皮膜量や緻密性≒防食性）は鉄注入から機器までの到達時間や塩素濃度等の影響を受けるため⁶⁾、海水処理を変更するにあたっては、これらを考慮したうえで空気冷却器の伝熱性向上と、系統全体の防食性維持を両立できる条件を検討する必要がある。

そこで、我々は、伊方発電所構内に3号機前面海域から取水した海水を用いて任意の海水処理を再現できる「モデルチューブ試験装置」を作製・設置し、当該系統を模擬した条件下で伝熱管性状に与える海水処理の影響について調査を行った。

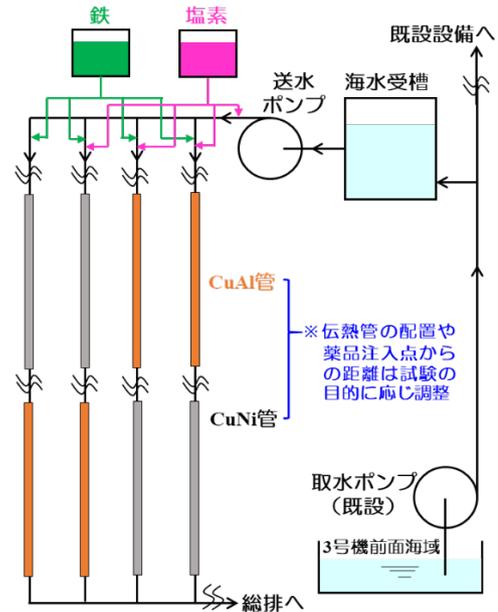


図-3 モデルチューブ試験装置の概要

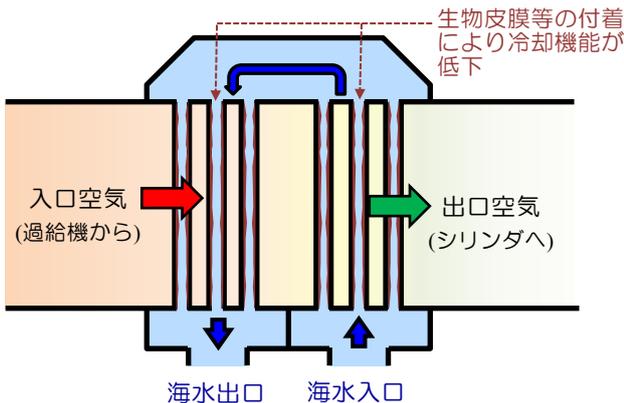


図-2 D/G 空気冷却器の概要

3. 実海水を用いたモデルチューブ試験による海水処理条件の適正化に係る調査

3.1 試験方法

(1) モデルチューブ試験装置の概要

図-3 にモデルチューブ試験装置の概要を示す。当該装置は、発電所構内の既設装置から取水海水の一部を分取し、試験用伝熱管内に実機相当の管内流速 1.8m/s で連続通水が可能である。また、「塩素と鉄注入濃度【各薬品をポンプ注入】」や、「薬品注入点から伝熱管までの到達時間【注入点から伝熱管までの距離を接続ホースの長さで調整】」を任意に調整でき、最大4条件の海水処理を並行して行える。なお、薬品注入後の海水は3号機総合排水処理装置に移送し処理される。

(2) モデルチューブ試験

(a) 伝熱管性状に与える海水処理の影響に係る試験

本試験では、原子炉補機冷却海水系統において、鉄注入点からの距離が比較的近い CuAl (CCWHx) と CuNi (チラー) を想定し、伝熱管性状に与える海水処理条件の影響を評価した。

表-2 にモデルチューブ試験に供した CuAl と CuNi の化学組成を示す。

伝熱管には主要化学組成が実機と同等のものを選定し、鉄注入点から各管までの到達時間を10～30秒に調整した。また、実機伝熱管には鉄皮膜が形成・蓄積されていることを考慮し、表-3の条件で各管に予め鉄皮膜を形成(以下、「予皮膜形成管」という。)させたうえで、以下の試験に用いた。

表-2 試験用伝熱管の主要化学組成

	化学組成 (weight %)			
	Al	Ni	Fe	Cu
CuAl (C6872)	1.9	0.22	< 0.05	Bal.
CuNi (C7060)	No.Data	10.2	1.6	Bal.

表-3 伝熱管の予皮膜形成条件

管出口残留塩素濃度 (ppm)	鉄注入濃度 (ppm as Fe)	処理期間 (日)
0 (無注入)	①0.050, ②0.075	①13, ②7

① 鉄注入濃度の影響

予皮膜形成管を対象に、表-4 に示す試験条件のとおり、管出口の残留塩素濃度を 0.05ppm に固定したうえで、鉄注入濃度 0~0.015ppm の範囲で 52 日間連続通水 (2021/5/21~7/12) を行った後、伝熱管を回収し分析に供した。

表-4 試験条件 (鉄濃度の影響)

試験条件	管出口残留塩素濃度 (ppm)	鉄注入濃度 (ppm as Fe)
①	0.05	0 (無注入)
②		0.005
③		0.010
④ (従来処理)		0.015

② 塩素濃度の影響

予皮膜形成管を対象に、表-5 に示す試験条件のとおり、鉄注入濃度 0.010ppm に固定したうえで、管出口の残留塩素濃度 0~0.20ppm の範囲で 50 日間連続通水 (2021/7/26~9/14) を行った後、伝熱管を回収し分析に供した。

表-5 試験条件 (塩素濃度の影響)

試験条件	管出口残留塩素濃度 (ppm)	鉄注入濃度 (ppm as Fe)
①	0 (無注入)	0.010
②	0.05	
③	0.10	
④	0.20	

(b) 実機海水処理条件の適正化に係る試験

本試験では、原子炉補機冷却海水系統を対象とした海水処理の実機適用を想定し、経験的に当該系統において伝熱性能の低下が認められる春から夏にかけての伝熱管性状の経時変化を、海水処理毎に比較・評価した。

試験は、鉄注入点から伝熱管 (表-2) までの到達時間を実機と同等の CuAl (CCWHx) で約 10 秒、CuNi (D/G 空気冷却器) で約 50 秒に調整した。また、表-6 の条件で予皮膜形成を 7 日間 (2022/5/9~5/16) 実施した後、実機適用を想定するうえで現実的な表-7 の条件で 121 日間連続通水 (2022/5/16~9/14) を行いながら、月 1 回の頻度で伝熱管を定期的に回収し分析に供した。

表-6 伝熱管の予皮膜形成条件

管出口残留塩素濃度 (ppm)	鉄注入濃度 (ppm as Fe)	処理期間 (日)
0 (無注入)	0.10	7

表-7 試験条件

試験条件	管出口残留塩素濃度 (ppm)	鉄注入濃度 (ppm as Fe)	対象	
			CuAl	CuNi
① (従来処理)	0.05	0.015	○	○
②	0.05	0.010	○	○
③	0.15	0.010	-	○

(3) 伝熱管の性状分析

回収した伝熱管の性状評価として、以下の分析を実施した。

(a) 付着物性状分析

① 生物皮膜量

伝熱管内面に形成された生物皮膜量は、伝熱性能と高い負の相関を示すことが知られている^{3,6)}。そこで、試験前後の伝熱管の質量 W および容積 V (管内が満水となる海水容積) の変化から、以下の計算により生物皮膜量 W_{fd} を求めた。

海水通水にともなう伝熱管の腐食減肉を考慮すると、伝熱管の質量変化 ΔW は、付着した生物皮膜質量 W_f と減肉質量 W_c から式【1】で、容積変化 ΔV は、生物皮膜容積 V_f と減肉容積 V_c から式【2】で表すことができる。ここで、伝熱管比重 d (CuAl: 8.40g/cm³, CuNi: 8.94g/cm³) と生物皮膜比重 1g/cm³ (水分が主) は式【3】【4】であるから、これらの連立式【5】【6】と管内面積 S から、生物皮膜量 W_{fd} が得られる。また、経時的に生物皮膜量を比較することで、任意の期間での生物皮膜増加量を算出できる。なお、本計算においては、母材由来の酸化物 (酸化皮膜) 量が多いほど、生物皮膜量の算出結果に正の誤差を含む可能性がある。

$$\Delta W = W_f - W_c \quad \dots \text{【1】}$$

$$\Delta V = V_c - V_f \quad \dots \text{【2】}$$

$$W_c = dV_c \quad \dots \text{【3】}$$

$$W_f = V_f \quad \dots \text{【4】}$$

$$W_c = \frac{-d(\Delta V + \Delta W)}{d-1} \quad \dots \text{【5】}$$

$$W_{fd} = \frac{\Delta W + W_c}{S} \quad \dots \text{【6】}$$

② 鉄皮膜量

鉄皮膜量は、酸洗浄液（5%塩酸/0.5%インヒビター溶液）を用いて伝熱管内をブラシ洗浄し、回収した溶液と鉄濃度より得た管内面の全鉄量から、未使用管を対象に同処理を行い得た母材由来の鉄量を減算して求めた。

(b) 伝熱性能

伝熱性能は、電気加熱法（電気化学協会・海生生物汚損対策懇談会制定「復水器引抜管汚れ係数測定方法」）により伝熱管の熱貫流率を測定し、未使用伝熱管に対する比率として求めた。

(c) 付着物構造評価

管内面における生物皮膜や鉄皮膜等の付着物状態（構造）は、伝熱管を樹脂包埋・研磨処理後、電子線マイクロアナライザによるエネルギー分散型X線分光分析により得た、管断面部の元素分布（MAP）像より評価した。

3.2 試験結果および考察

(1) 伝熱管性状に与える海水処理条件の影響

予皮膜形成以降の伝熱管性状の変化と海水処理条件の関係のうち、生物皮膜増加量との関係を図-4に、鉄皮膜増加量との関係を図-5に示す。

(a) 生物皮膜増加量

生物皮膜量の増減は、両材質ともに鉄注入濃度よりも塩素濃度の影響を大きく受け、既形成の生物皮膜に対して管出口の残留塩素濃度 0.05～0.10ppm で増加抑制（維持）効果が、0.20ppm で減少効果が認められ、試験海域等は異なるが既報の調査とも比較的一致した結果^{4,5)}であった。また、CuAl は、CuNi と比較して塩素の影響度が大きいことに加え、実機相当の低残留塩素濃度（0.05ppm）下では、鉄注入濃度 0.015ppm のみ 0.010ppm 以下の処理と比較して生物皮膜量の増加が認められた。この原因は明確には不明だが、低塩素濃度下では、注入された鉄イオン（還元性物質）濃度が高いほど消費される塩素の割合も多くなるため、特に塩素の効果度が大きい CuAl の生物皮膜形成に影響を与えた可能性が考えられる。

(b) 鉄皮膜増加量

鉄皮膜量の増減は、両材質ともに鉄と塩素濃度双方の影響を大きく受け、それぞれ鉄注入濃度の上昇にともない鉄皮膜増加量も多くなるが、鉄注入濃度 0.010ppm 以上では増加量に差がなかった。

また、CuAl では、鉄無注入を除き今回の試験条件の範囲では鉄皮膜量を増加傾向に維持できたが、CuNi では鉄無注入下でも鉄皮膜量の増加が認められた。これは、CuNi 自体に1～2%の鉄を含むため、酸化皮膜内に僅かながらも鉄が存在する可能性や、海水中の鉄以外に母材側からの鉄供給により皮膜形成が維持されたものと推察される。なお、既報⁶⁾のとおり、両材質ともに塩素濃度の上昇は鉄皮膜形成に対して抑制的に働くことを確認した。

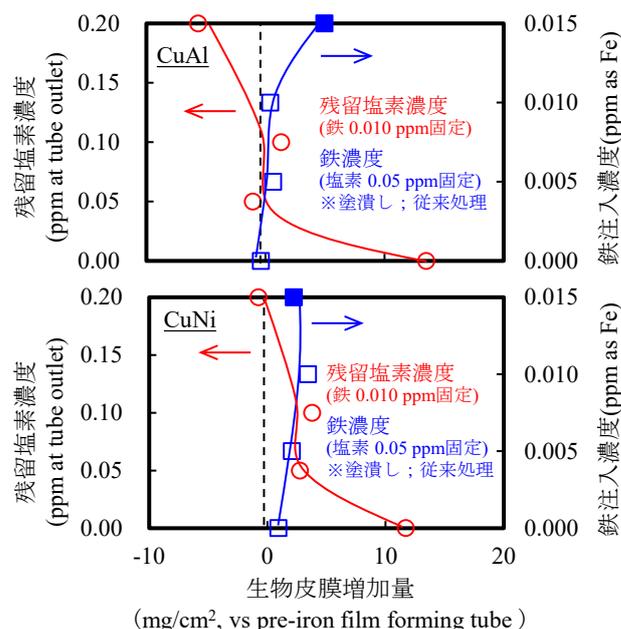


図-4 生物皮膜増加量と海水処理条件の関係

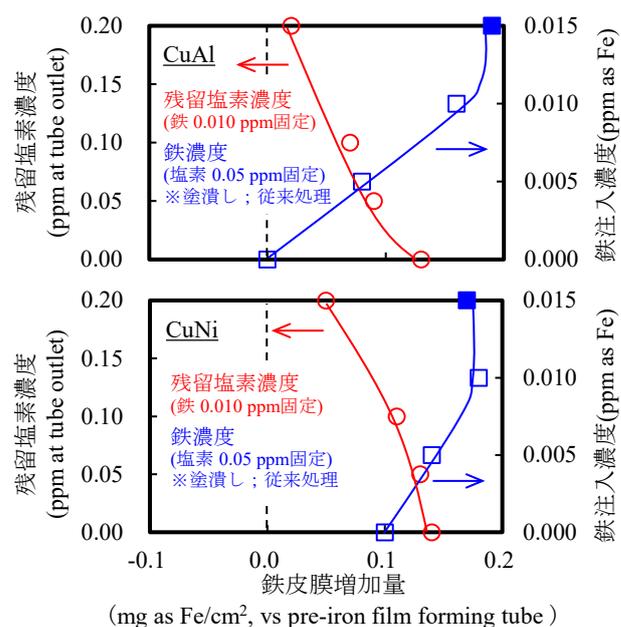


図-5 鉄皮膜増加量と海水処理条件の関係

以上の結果から、材質に関わらず生物皮膜量は塩素の、鉄皮膜量は鉄と塩素濃度双方の影響を受けるが、その影響度は材質間で異なることが判った。CCWHx とチラーを想定した場合、系統全体（流量 4,220t/Hr）の塩素注入濃度を従来よりも上昇させる処理は生物皮膜量の低減には有効だが、CCWHx の防食面で不利となることや、環境負荷の面も考慮すると現実的ではない。一方、塩素注入濃度は従来のまま、鉄注入濃度を 0.010ppm に低減する処理では、両機器の防食性を維持しつつ CCWHx の生物皮膜量を低減できる可能性を得た。

(2) 実機を想定した海水処理の適正化に係る調査

各海水処理における伝熱管性状（伝熱性能・生物皮膜量・鉄皮膜量）の経時変化について、CuAl の結果を図-6 に、CuNi の結果を図-7 に示す。また、図-8 には各管断面部の MAP 像を示す。

(a) CCWHx を想定した海水処理の比較

CCWHx を想定した CuAl の伝熱性能は、鉄注入濃度 0.015ppm では 8 月に 80% まで、0.010ppm では 83% まで低下した。一方、鉄注入濃度低減時は、伝熱性能の低下速度が緩やかで、生物皮膜量も少なく維持できており、前項の結果と併せても鉄注入濃度の低減は CCWHx の伝熱性能維持に一定の効果をも有することを確認した。さらに、鉄皮膜量は、注入濃度に応じて付着速度に差が認められたが、飽和皮膜量や皮膜厚さは同程度で、皮膜の部分欠陥等も認められておらず、鉄注入濃度低減による防食性への悪影響はないものと推察される。

(b) D/G 空気冷却器を想定した海水処理の比較

D/G 空気冷却器を想定した CuNi の伝熱性能は、従来処理では 8 月に 77% まで低下したが、鉄注入濃度低減により 81%、さらに塩素濃度上昇時は 86% と高く維持できた。また、鉄注入濃度低減かつ塩素濃度上昇時は、生物皮膜量の増加を顕著に低減でき、鉄皮膜量等も処理間で差がないことから、空気冷却器の伝熱性能維持には、特に塩素濃度の上昇が効果的であることを確認した。なお、CuNi では、CuAl と比較して母材表面に厚く均一な酸化皮膜層が形成されており、局部腐食が発生しづらい一因と推察されるが、酸化皮膜と鉄皮膜の間には生物皮膜を含む等、密着性の悪い 3 層構造となっており、このような材質間での付着物構造の違いが、海水処理に対する伝熱管性状の挙動差に影響した可能性が高い。

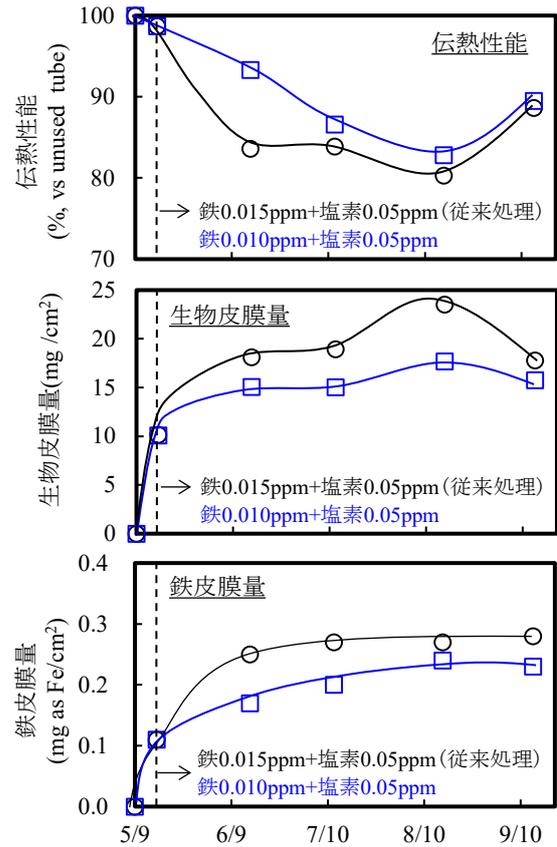


図-6 CuAl 性状の経時変化と海水処理の関係

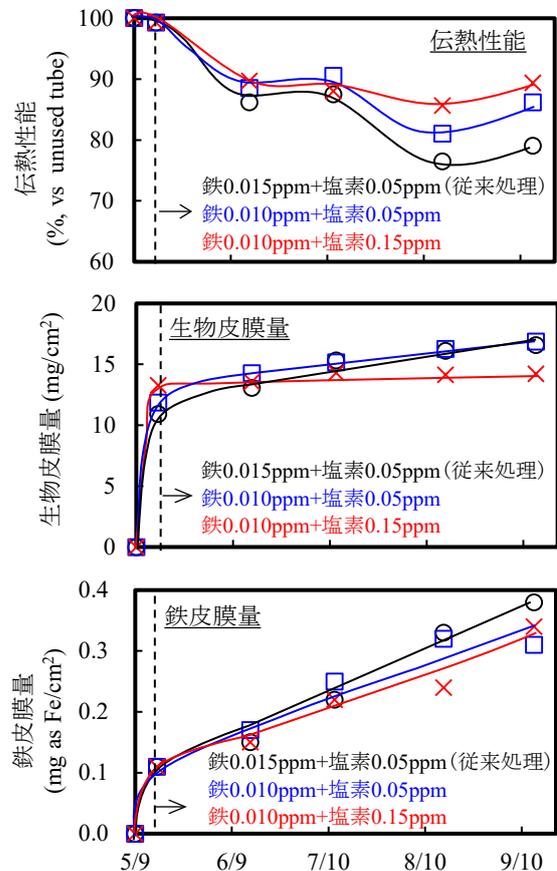


図-7 CuNi 性状の経時変化と海水処理の関係

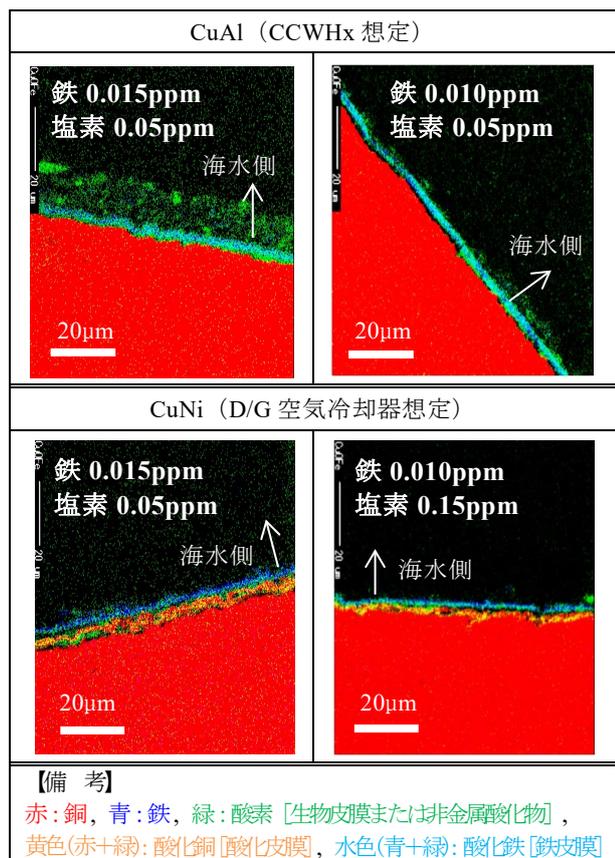


図-8 伝熱管断面のMAP像（一例；7月回収分）

以上の結果から、当該系統に設置された各熱交換器の伝熱性向上と防食性維持を両立するうえでは、鉄注入濃度を従来の0.015ppmから0.010ppmに低減するとともに、これまで未使用であったD/G海水系統（海水流量680t/Hr）への追加塩素注入系統を使用し、空気冷却器のみ局所的に残留塩素濃度0.15ppm以上とする海水処理が適正と考えられる。なお、実機と同様に、本試験においても春から夏（5～8月）にかけて伝熱性能の低下が認められたが、その後自然に回復しており、この推移は鉄皮膜量よりも生物皮膜量の挙動と良く一致している。従って、当該系統の夏季における伝熱性能低下の原因は、主に生物皮膜形成によるものと推察される。

4. 原子炉補機冷却海水系統を対象とした海水処理の適正化とその効果について

原子炉補機冷却海水系統においては、モデルチューブ試験の結果を基に、プラント状態を考慮しながら、段階的に海水処理の変更を行った。

表-8に当該系統の海水処理の変遷を、図-9にD/G空気冷却器の伝熱性能の目安となる吸気温度

と海水温度の差の年間推移について、海水処理条件毎に整理した結果を示す。なお、図-9には、空気冷却器の設計条件並びに吸気温度と海水温度の差より求めた、伝熱性能も併せて示す。

3-15サイクル運転における従来処理では、特に6～8月にかけて吸気温度と海水温度の差が20℃以上となっており、伝熱性能が70%前後まで低下していたと考えられる。

一方、3-16サイクル運転では、D/G海水系統への追加塩素注入により、生物皮膜形成が抑制されたことで同時期の吸気温度と海水温度の差を17℃以下（伝熱性能85%前後）に、3-17サイクル運転では、追加塩素注入を継続しつつ鉄注入濃度を0.010ppmに低減させたことで、過剰な鉄付着も抑制され、年間をとおして吸気温度と海水温度の差を15℃以下（伝熱性能90%前後）に維持できた。さらに、定期点検時に測定したCCWHxの鉄皮膜量は、鉄注入濃度低減前後で差がなく、現在まで渦電流探傷試験等でも伝熱管の健全性に異常が認められていないことから、海水処理の変更が当該系統の防食性に悪影響を及ぼさないことを確認した。なお、鉄注入濃度低減により、硫酸第一鉄の薬品費や溶解作業頻度の低減等、副次的な効果も得られている。

以上の結果から、モデルチューブ試験の結果を基に立案した海水処理条件の実機適用により、課題であったD/G空気冷却器の伝熱性能向上と系統全体の防食性維持の両立が成されたことを確認した。

表-8 3号機原子炉補機冷却海水系統における海水処理の変遷（3-15サイクル運転以降）

	サイクル運転		
	3-15	3-16	3-17
運転期間	2018/10～ 2019/12	2021/12～ 2023/2	2023/6～ 2024/7
海水ポンプ出口 塩素注入濃度 (ppm)	0.20	0.20	0.20
D/G追加塩素 注入濃度(ppm)	0	≧0.15	≧0.15
鉄注入濃度 (ppm as Fe)	0.015	0.015	0.010

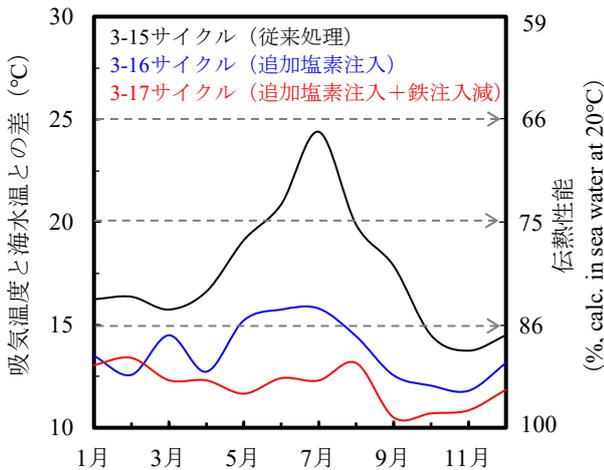


図-9 D/G 空気冷却器における吸気温度と海水温の差並びに伝熱性能の推移

- 4) 古田岳志, 野方靖行, 石井晴人: 「模擬管路を用いた付着生物に対する塩素注入効果の評価」, 火力原子力発電, Vol.67 No.1 (2016)
- 5) 古田岳志, 野方靖行, 小林卓也, 石井晴人: 「模擬管路試験法による次亜塩素酸ナトリウム溶液と海水電解液との防汚効果の比較」, 日本マリンエンジニアリング学会誌, 第54巻 第6号 (2019)
- 6) 火力原子力発電技術協会: 「復水器及び復水器管管理ハンドブック」 (2005)

5. まとめ

伊方3号機海水系統設備の保守・管理の高度化に係る取り組みの一環として、原子炉補機冷却海水系統を対象とした海水処理条件の最適化を目的に、発電所構内にて実海水と伝熱管を用いたモデルチューブ試験を実施した。

その結果、当該系統の伝熱管材質や機器構成・配置等を考慮したうえで、伝熱性能向上と防食性維持を両立するには、取水海水の塩素注入濃度は従来の0.20ppmのまま、鉄注入濃度を0.010ppmに低減するとともに、これまで未使用であった追加塩素注入システムを使用し、D/G海水系統のみ局所的に残留塩素濃度を0.15ppm以上に上昇させる処理が適正と判断した。さらに、実機プラントデータから、当該処理の実機適用により、課題であったD/G空気冷却器の伝熱性能向上と系統全体の防食性維持の両立が成されたものと評価した。

【謝辞】

本研究を実施するにあたり、ご協力頂いた関係各位に深謝の意を表します。

【参考文献】

- 1) 電気化学協会海生生物汚損対策懇談会: 「海生生物汚損対策マニュアル」, 技報堂出版 (1911)
- 2) 火力原子力発電技術協会: 「発電所海水設備の汚損対策ハンドブック」, 恒星社厚生閣 (2014)
- 3) 藤井哲, 川邊允志: 「復水器—理論と実際—」, 愛智出版 (2001)

最後に執筆者、編集ならびに審査にあ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122号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 塚本正敏
株式会社四国総合研究所

発行 株式会社四国総合研究所
〒761-0192
香川県高松市屋島西町 2109 番地 8
TEL (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp