

研 究 期 報

No. 124

2026 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 4 号 目次

熱力学計算による高温水中でのマグネタイト溶解挙動に関する考察.....	1
Estimation of Magnetite Dissolution Behaviors in High Temperature Water by means of Thermodynamics Calculation	
グリーン水素製造実証試験システムに関する研究.....	7
A Study on a Demonstration System for Green Hydrogen Production	
2023 年トルコ・シリア地震の強震観測記録を踏まえた伊方発電所の 地震動評価の妥当性に関する検討	11
Study on the validity of seismic motion assessment for Ikata nuclear power plant based on the strong motion observation records of the 2023 Turkey-Syria earthquake	

熱力学計算による高温水中でのマグネタイト溶解挙動に関する考察

目 的

伊方発電所 3 号機等の加圧水型原子炉二次系系統水は、最高で 250°C 超の高温となるため、系統構成材料に応じた水化学処理により、設備の防食・健全性維持を図っている。また、当該系統における鉄系配管等の内表面のうち、特に高温部では、水化学処理により防食機能を示すマグネタイト (Fe_3O_4) が酸化皮膜として形成・維持されており、これらの高温水中での生成・溶解挙動の理解は、プラント特性に応じた水化学処理を行ううえで非常に重要である。

本稿では、二次系系統水のような高温水中での Fe_3O_4 生成・溶解過程について、既知の知見に加え、熱力学計算により得た Fe_3O_4 の溶解挙動を踏まえ考察した。

主な成果

1. 熱力学計算により推定した Fe_3O_4 の溶解挙動

Fe_3O_4 の生成反応として、酸化皮膜内に存在するオキシ水酸化鉄 (FeOOH) と鉄イオン (Fe^{2+}) が反応し、脱水されるという過程を提案した。また、 Fe_3O_4 が $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ の化合物と想定した溶解反応は、熱力学計算から高温水中において酸性 (アルカリ性) 領域では Fe^{2+} (HFeO_2^-) となる反応が支配的に起きると推定された。さらに、各温度下における Fe_3O_4 から溶解したイオン成分濃度の極小値は、温度の上昇にともない減少するとともに、極小値を示す pH_T は低 pH 側にシフトすることを確認した。

2. 熱力学計算により算出した溶解鉄濃度と PWR 二次系系統水中鉄濃度の比較

伊方発電所 3 号機二次系系統水では、プラント起動直後はアンモニア (NH_3) とヒドラジン (N_2H_4) による全揮発性物質 (AVT) 処理が行われるが、その後の定常運転からは気液分配率が NH_3 よりも小さい、エタノールアミン (ETA) を追加注入する ETA 処理が行われている。

熱力学計算により算出した系統各部の溶解鉄濃度と、実測した鉄濃度を比較した結果、溶解鉄濃度と実測鉄濃度の相関性は非常に高く、AVT 処理から ETA 処理への移行にともなう pH 上昇に応じて鉄濃度が低減傾向を示すこと、さらにその効果は抽気系で大きいこと等、実態を再現できていることを確認した。

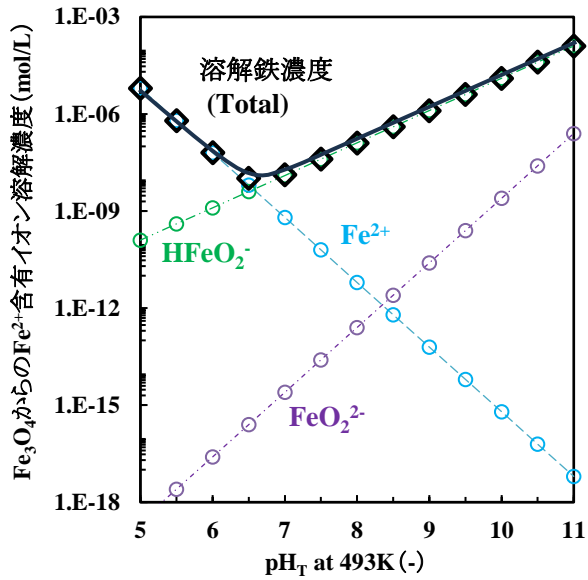


図-1 493KにおけるFe₃O₄からのFe²⁺含有イオンイオンの溶解濃度とpH_Tの関係

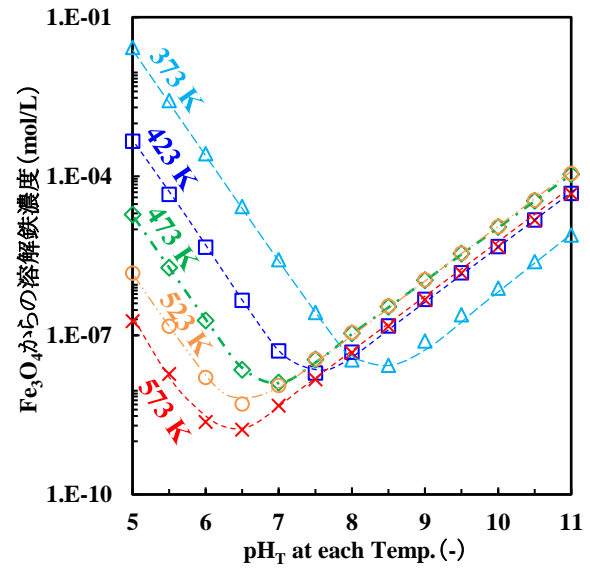


図-2 Fe₃O₄由来の溶解鉄濃度とpH_Tの関係

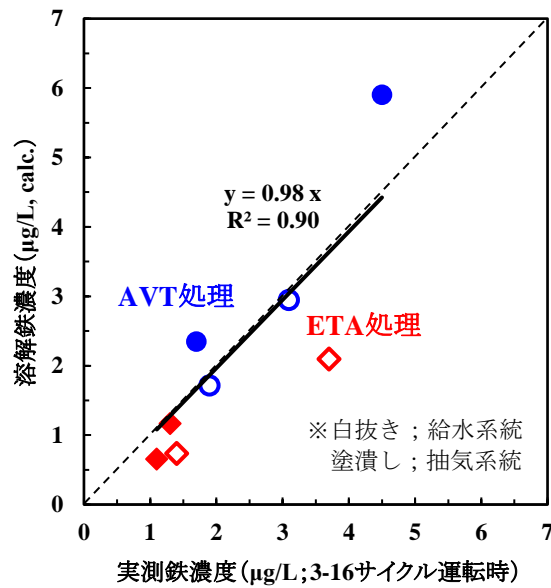


図-3 熱力学計算により求めた溶解鉄濃度と実測鉄濃度の関係

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) 知識 嵩瑛, 高須賀 仁 (四国電力株式会社 原子力部 安全グループ)
キーワード	加圧水型原子炉, 二次系系統, 酸化皮膜, マグネタイト, 腐食, 熱力学計算
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]

グリーン水素製造実証試験システムに関する研究

目 的

日本では、再エネの導入拡大に伴い出力制御が増加していることから、余剰電力の活用が重要な課題となっている。こうした余剰電力の活用方法の一つとして、電解法を用いた水素製造による電力需要の創出が期待されている。このような背景のもと、四国電力の実証試験システムによる安定した水素製造の検証と、再エネの有効活用や需給調整市場への供出を想定した追従性の検証を行うとともに、シミュレーションによるシステム改善検討を行った。

主な成果

1. 実証試験

実証試験システム（図 1、2）による安定した水素製造の検証と追従性の検証を行った結果、以下の事項が確認された。

- ・ 実証試験システムは、運転の最適化を図ることで、安定したグリーン水素の製造が可能。
- ・ 実証試験システムは、付属設備の影響で負荷指令値と負荷実測値に乖離が生じ、需給調整市場要件を満足しなかった（図 3）。

2. シミュレーションによるシステム改善検討

実証試験において実証試験システムが要求する性能を満足しなかったことを踏まえ、シミュレーションソフトを用いて、蓄電池の制御方法の改善による負荷乖離低減効果の確認を行った（図 4）。その結果、制御方法の改善により、蓄電池は乖離を吸収し、実証試験システムは要求する性能を満足することが確認された（図 5）。



図 1 実証試験システム

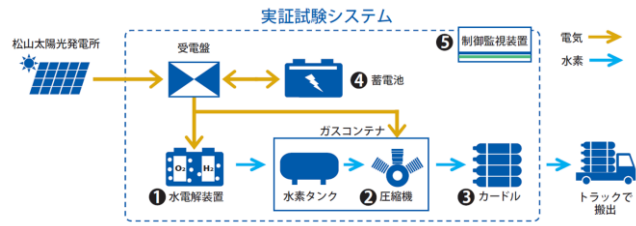


図 2 実証試験システムの構成

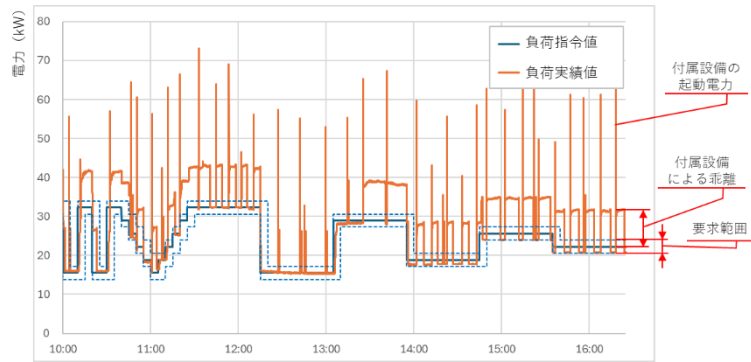


図 3 負荷指令値と負荷実測値の乖離

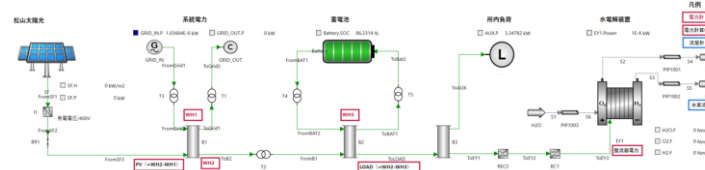


図 4 実証試験システムのモデル

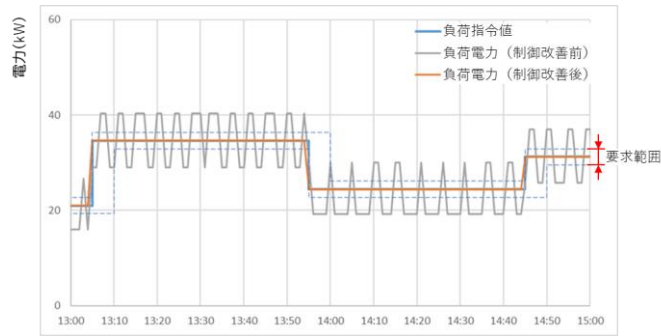


図 5 蓄電池制御方法改善結果

研究担当者	清家 良多 (株式会社四国総合研究所 エネルギー技術部) 渡邊 浩平 (四国電力株式会社 経営企画部)
キーワード	水電解装置、グリーン水素、余剰電力
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]

2023年トルコ・シリア地震の強震観測記録を踏まえた 伊方発電所の地震動評価の妥当性に関する検討

目 的

2023年にトルコ南部の東アナトリア断層帯で発生した Mw7.8 の地震（以下、「2023年トルコ・シリア地震」という。）は長大な横ずれ断層による地震であり、震源近傍を含む多数の強震観測記録が得られている。塩田ほかでは、2023年トルコ・シリア地震を対象に、拡散波動場理論に基づき基盤地震動 ($V_s=2100\text{m/s}$ 相当) を推定するとともに Morikawa and Fujiwara（以下、「MF13」という。）が大規模かつ震源近傍の地震に適用できる可能性を示している。

伊方発電所の基準地震動の評価において考慮している中央構造線断層帯と同じ長大な横ずれ断層である 2023年トルコ・シリア地震の知見は、伊方発電所の基準地震動の妥当性を確認する上で有用な知見である。

以上を踏まえ、塩田ほかで適用性が示された MF13 を用いて、伊方発電所における中央構造線断層帯の地震による地震動評価を実施するとともに、2023年トルコ・シリア地震の基盤地震動に断層最短距離および地盤条件による補正を行い、これらの評価結果と伊方発電所の基準地震動とを比較することにより、伊方発電所の基準地震動の妥当性を検証する。

主な成果

1. 断層最短距離および地盤条件による補正

断層最短距離による補正は、塩田ほかで推定された基盤地震動に対して Tajima et al. に基づく補正を行う。補正した結果を MF13 による地震動評価結果と比較して図 1 に示す。補正後の基盤地震動は、周期 0.1 秒程度以下および周期 1~2 秒程度の領域で補正後の基盤地震動がやや小さい傾向にあるものの、MF13 による地震動評価結果のばらつきの範囲内で概ね整合している。

地盤条件による補正は、塩田ほかと同様に拡散波動場理論に基づき基盤地震動 ($V_s=3500\text{m/s}$) を推定し、西坂ほかによる伊方発電所の地下構造モデルを用いた地盤応答解析を実施し、伊方発電所の解放基盤表面 ($V_s=2600\text{m/s}$) 相当の地震動を推定する。補正した結果を図 2 に示す。補正した地震動の方が短周期では地震動レベルが小さくなっており、伊方発電所の地盤は地震基盤から地表まで顕著な地盤増幅がなく、周期 0.1 秒以下ではむしろ減衰している。

2. 伊方発電所の基準地震動の妥当性確認

MF13 による伊方発電所における中央構造線断層帯の地震による地震動評価結果、2023 年トルコ・シリア地震の基盤地震動に断層最短距離および地盤条件による補正を行った結果を、伊方発電所の基準地震動と比較して図 3 に示す。MF13 による地震動評価結果は全周期帯で基準地震動 Ss-1 を下回る結果となった。また、補正した基盤地震動は全周期帯において基準地震動 Ss-1 および Ss-2 と概ね同等あるいは下回る結果となっており、原子力施設の耐震評価において重要な短周期側では基準地震動 Ss-1 および Ss-2 を下回っている。このことから、伊方発電所の基準地震動は 2023 年トルコ・シリア地震の知見を踏まえても妥当な地震動レベルとなっていることが確認できた。

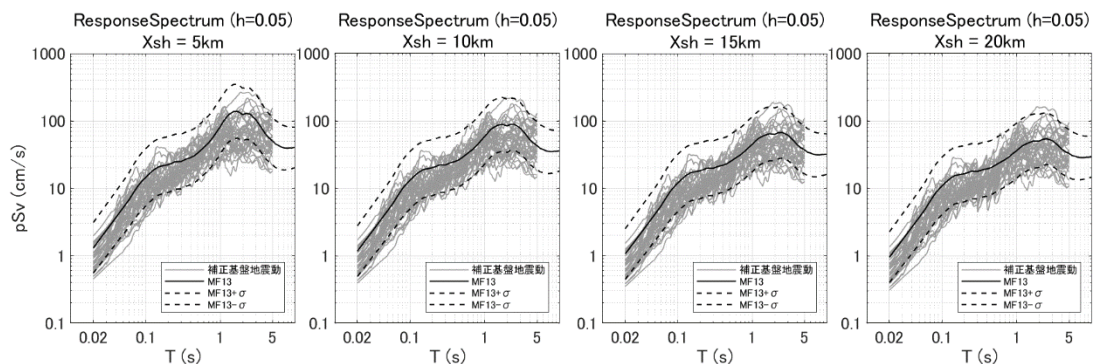


図 1 断層最短距離による補正

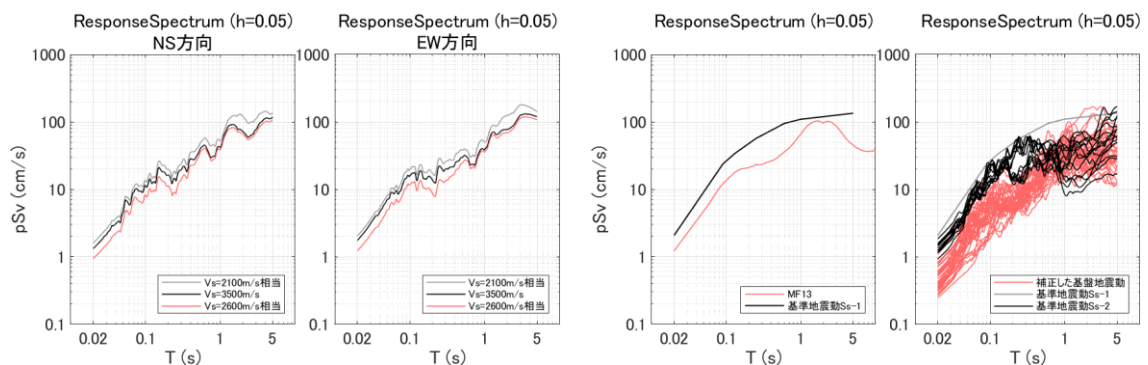


図 2 地盤条件による補正

図 3 基準地震動との比較

研究担当者	木戸智之, 塩田哲生 (四国電力株式会社 土木建築部)
キーワード	伊方発電所, 基準地震動, 2023 年トルコ・シリア地震, 長大断層, 震源近傍, 拡散波動場理論
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]

熱力学計算による高温水中でのマグネタイト溶解挙動に関する考察

(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) 原子力部 安全グループ 知識 嵩瑛
四国電力(株) 原子力部 安全グループ 高須賀 仁

キーワード： 加圧水型原子炉
二次系系統
酸化皮膜
マグネタイト
腐食
熱力学計算

Key Words : pressurized water reactor
secondary coolant system
oxide film, scale
magnetite
corrosion
thermodynamics calculation

Estimation of Magnetite Dissolution Behaviors in High Temperature Water by means of Thermodynamics Calculation

Shikoku Research Institute, Inc., Chemical Technology and Biotechnology Department
Shohei Yamamoto, Hirofumi Ishikawa, Hironori Oshika
Shikoku Electric Power Co., Inc., Nuclear Power Department, Nuclear Safety Group
Takaaki Chishiki, Hitoshi Takasuka

Abstract

Oxide films (scales) contained magnetite (Fe_3O_4) and/or oxyhydroxide (FeOOH) were formed on the inner surface of iron tubes and/or apparatus employing high temperature water. The effect of pH and temperature on Fe_3O_4 dissolve behavior were examined by means of thermodynamic calculation. In Fe_3O_4 dissolution, it was supposed the only FeO contained Fe^{2+} was dissolved to form Fe^{2+} and/or HFeO_2^- ions.

As the results, Fe^{2+} (HFeO_2^-) were generated in an acid (alkali) region and their concentrations exponentially decreased with increase (decrease) of pH by increasing temperature, these Fe_3O_4 dissolution curves were shifted to lower pH side. Furthermore, the concentrations of iron ions saturated from Fe_3O_4 by thermodynamic calculations based on the temperature and pH of the secondary coolant in Ikata Unit 3 were a strong correlation with the measured iron concentrations.

1. はじめに

伊方発電所 3 号機（以下、「伊方 3 号機」という。）等の加圧水型原子炉（Pressurized water reactor ; PWR）は、原子炉系（一次系）で取り出した熱を、蒸気発生器を介してタービン系（二次系）の系統水（以下、「二次系系統水」という。）に伝え、蒸気を生成し発電する。

二次系系統水は、最高で 250°C 超の高温となるため、系統構成材料に応じた水化学処理により、設備の防食・健全性維持を図っている。当該系統における鉄系配管等の内表面のうち、高温部では、水化学処理により防食機能を示すマグネタイト（Fe₃O₄）が酸化皮膜として形成・維持されており、これらの高温水中での生成・溶解挙動の理解は、プラント特性に応じた水化学処理を行ううえで非常に重要である¹⁾。

本稿では、二次系系統水等、高温水中での Fe₃O₄ の生成・溶解過程について、既知の知見に加え、熱力学計算により得た Fe₃O₄ の溶解挙動を踏まえて考察した。

2. 熱力学計算による鉄酸化物の溶解濃度の算出

Fe₃O₄ から溶解・飽和した鉄イオン（Fe²⁺）濃度（以下、「溶解濃度」という。）は、以下の熱力学計算を連立し得た自由エネルギー変化 ΔG(kJ/mol) から求めた。

まず、平衡定数 K は、反応前後の ΔG と (1) 式 [R: ガス定数, T: 絶対温度] の関係にある。

$$\Delta G = -RT \ln K \quad (1)$$

また、温度 T (K) における自由エネルギー変化 ΔG は (2) 式で求められる。ただし、ΔG₂₉₈ は 298K における ΔG_T、ΔS₂₉₈ は 298K における標準エントロピー S_T (J/mol・K)、C_p は定圧比熱 (J/mol・K) である。

$$\Delta G = \Delta G_{298} - \Delta S_{298} (T - 298) + \int_{298}^T \Delta C_p dT - \int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT \quad (2)$$

表-1^{2~5)} に本計算に用いた各成分の熱力学データである、ΔG₂₉₈, S₂₉₈, イオンの標準部分モルエントロピー S₂₉₈(abs) を示す。

FeO、H₂O に対する C_p の温度依存性は (3) 式で表されるが、表-2 にその係数を示す^{3,6)}。

$$C_p = a + bT + c/T^2 \quad (3)$$

表-1 溶解度計算に用いた熱力学データ^{2~5)}

成分	ΔG ₂₉₈ (kJ/mol)	S ₂₉₈ , S ₂₉₈ (conv.) (J/mol・K)	S ₂₉₈ (abs) (J/mol・K)
FeO	-246.4	59.4	—
FeOOH	-488.3	60.4	—
H ₂ O	-237.2	69.9	—
H ⁺	0	0	-20.92
Fe ²⁺	-78.9	-137.7	-179.4
Fe ³⁺	-10.5	-293.3	-356.1
FeOH ⁺	-261.9	-29.3	-50.18
OH ⁻	-157.3	-10.7	10.22
HFeO ₂ ⁻	-377.6	41.9	62.82
FeO ₂ ²⁻	-295.3	-98.1	-56.27

表-2 各成分の定圧比熱係数^{3,6)}

成分	a	b	c×10 ⁻⁵
FeO	51.8	0.0678	-1.59
FeOOH	49.37	0.0837	—
H ₂ O	30.14	0.0068	—

さらに、(2) 式中の積分項は、Criss-Cobble 法^{7,8)} により計算した高温でのイオン標準部分モルエントロピー S_T (J/mol・K) の関係を用いて (4) (5) 式から計算した。

$$\int_{298}^T \Delta C_p dT = \frac{S_T - S_{298}}{\ln(T/298)} - (T - 298) \quad (4)$$

$$\int_{298}^T \frac{\Delta C_p}{T} dT = S_T - S_{298} \quad (5)$$

なお、S_T の温度依存性は (6) 式により計算し、係数 a₁, a₂, b₁, b₂ は文献値⁷⁾ を使用した。

$$S_T = a_1 + a_2 T + (b_1 + b_2 T) S_{298}(\text{abs.}) \quad (6)$$

ただし、イオンの標準部分モルエントロピーの計算では、従来値 ($\bar{S}_{298(\text{conv.})}$) ではなく、(7) 式 [z : イオンの価数] により求めた絶対値⁷⁾を用いた。

$$\bar{S}_{298(\text{abs.})} = \bar{S}_{298(\text{Conv.})} - 20.92 z \quad (7)$$

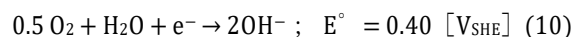
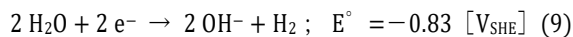
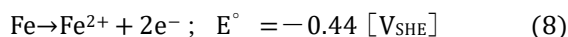
従って、鉄酸化物から発生するイオン成分 (Fe^{2+} 等) の溶解濃度は、想定される化学反応に応じ、前述の熱力学計算により求めた任意の温度での ΔG と平衡定数 K の関係から、温度 T と水分子 (H_2O) のイオン積 K_w ³⁾ を考慮した pH_T (各温度下での pH) の関数として求めることができる。

3 Fe_3O_4 の生成・溶解反応に関する考察

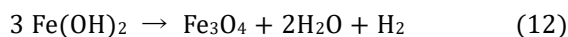
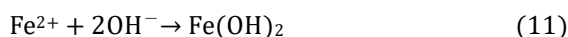
3.1 Fe_3O_4 生成反応

二次系等の鉄系配管や設備の内表面に形成される酸化皮膜は、低温から高温部にかけて、主成分がオキシ水酸化鉄 (FeOOH) から Fe_3O_4 へと遷移^{1,3)}する。特に、約 200°C 以上の高温水中での Fe_3O_4 生成反応として、シッコール (Schikorr) 反応^{1,8,9)}が提案されており、以下に反応概要を示す。

まず、発電プラントの給水系統等における鉄の腐食反応として、金属母材 (アノード) の (8) 式と、母材表面に形成された Fe_3O_4 表面 (カソード) での (9) 式または (10) 式による電極反応が想定されている^{1,9)}。なお、二次系系統水下は、鉄-水系の電位-pH 図において、水素 (H_2) 発生線よりやや貴側の電位領域に位置¹⁰⁾するとともに、実系統水には極微量ながらも溶存酸素 (DO) が存在することから、本稿では、カソード反応として主に (10) 式が生じると仮定する。



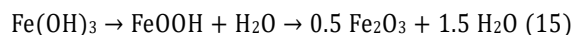
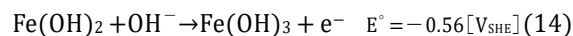
次いで、母材表面で発生した Fe^{2+} と、 Fe_3O_4 表面で発生した OH^- が (11) 式で反応し、さらに (12) 式のシッコール反応により、 $\text{Fe}(\text{OH})_2$ から脱水と H_2 生成を伴って Fe_3O_4 が生成するというものである。



一方、この (12) 式においては、左項の $\text{Fe}(\text{OH})_2$ 中で鉄は 2 価 (Fe^{2+}) であるのに対し、右項の Fe_3O_4 中では 1 個の Fe^{2+} と 2 個の 3 価 (Fe^{3+}) が含まれており、左項中の $2\text{Fe}(\text{OH})_2$ 中の 2Fe^{2+} が 2Fe^{3+} に酸化されたことになる。このような酸化条件下において、前述の (9) 式も含め、 H_2 生成に係る反応が主になるとは考えにくく、むしろ H_2 が酸化した (13) 式の反応の方が望ましいと考えることができる。

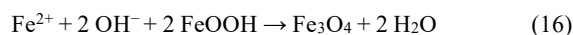


また、 Fe^{2+} が Fe^{3+} に酸化される反応として (14) 式の反応が起きうる。次いで、 $\text{Fe}(\text{OH})_3$ を高温で脱水すれば FeOOH やヘマタイト (Fe_2O_3) が (15) 式にて生成する¹⁾。



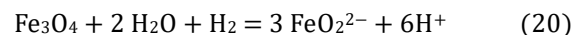
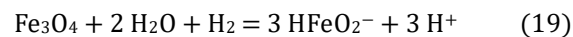
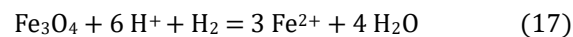
さらに、二次系系統水のような、 DO が極微量の高温水中では Fe_3O_4 生成が優勢³⁾となることから、 FeOOH から Fe_3O_4 への変換反応が想定される。この時、生成した FeOOH 表面で (16) 式の反応が起きれば、 Fe_3O_4 の生成が見込まれる。

このような Fe_3O_4 の生成反応に関する平衡は、次節の溶解反応で述べる。



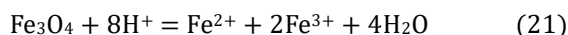
3.2 Fe_3O_4 溶解反応

高温水中での Fe_3O_4 溶解反応として、(17) ~ (20) 式が想定されている^{2,8)}。

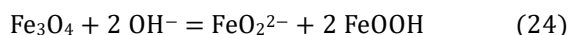
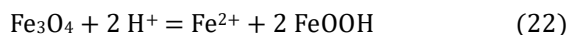


これらの反応は、いずれも H_2 存在下であるが、水の放射線分解により発生する酸素を除去するために H_2 注入される PWR 一次系とは異なり、二次系系統水での H_2 発生は主に (9) 式となるため十分な H_2 は存在せず、主反応になるとは考え難い。前節で述べたとおり、 Fe_3O_4 には 1 個の Fe^{2+} と 2 個の

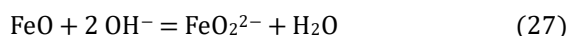
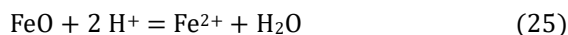
Fe³⁺が含まれていることを考慮すれば、これらの反応式ではFe₃O₄中の2個のFe³⁺がFe²⁺へ還元されていることを意味し、電子の介入が必要となる(Fe³⁺ + e⁻ → Fe²⁺)。そうでなければ、例えば、(17)式は(21)式のような反応が望ましい。なお、当該反応は水素イオン(H⁺)存在下で生じるが、二次系システム水等のような弱アルカリ環境下においても、高温ではH₂Oの乖離(H₂O → H⁺ + OH⁻)が大きくなることで、H⁺濃度は2~3桁上昇するため、反応源として十分存在することが見込まれる。



また、FeOH⁺の存在は仮説³⁾であり、事実、Fe₃O₄溶解反応に含めないケース¹¹⁾もあることから、(18)式には疑問の余地が残る。そこで、Fe₃O₄に含まれるFe²⁺がイオンとなり溶解するが、Fe³⁺は不溶性FeOOHを形成する(22)~(24)式を想定する。



これらにおいて、右項から左項への反応は、FeOOHとFe²⁺を含むイオン種によるFe₃O₄の生成反応と考えることができ、前節で仮定した(16)式と整合する。さらに、Fe₃O₄は、Fe²⁺の酸化物であるウスタイト(FeO)と、Fe³⁺の酸化物であるFe₂O₃の化合物FeO・Fe₂O₃と想定すると、Fe₂O₃の溶解速度はFe₃O₄に対して数桁低い^{9,11)}ことから、Fe₃O₄溶解反応は、FeOからFe²⁺を含むイオンの溶解が律速となる(25)~(27)式と考えることができる。



4. 熱力学計算により推定したFe₃O₄の溶解挙動

図-1に、(25)~(27)式の反応をもとに熱力学計算から求めた、493K(二次系システム水の給水温度[高压ヒータ出口]を想定)における、FeOからのFe²⁺を含む各イオン成分(Fe²⁺, HFeO₂⁻, FeO₂²⁻)の溶解濃度(以下、「Fe²⁺含有イオン溶解濃度」という。)とpH_Tの関係を示す。

Fe₃O₄を構成するFeOからの陽イオン(Fe²⁺)の溶解濃度は、pH_Tの上昇にともない指数関数的に低下した。一方、Fe²⁺を含む陰イオン(HFeO₂⁻, FeO₂²⁻)の溶解濃度は、pH_Tの上昇にともない指数関数的に増加し、pH_T5~11(at 493K)では常にHFeO₂⁻濃度の方がFeO₂²⁻濃度よりも高値となった。そのため、FeOから溶解したFe²⁺含有イオン成分の総和濃度(以下、「溶解鉄濃度」という。)において、pH_T6.5以下ではFe²⁺溶解が支配的であるが、pH_T6.5付近でHFeO₂⁻濃度と同等となり、それ以上ではHFeO₂⁻が支配的になるものと評価された。

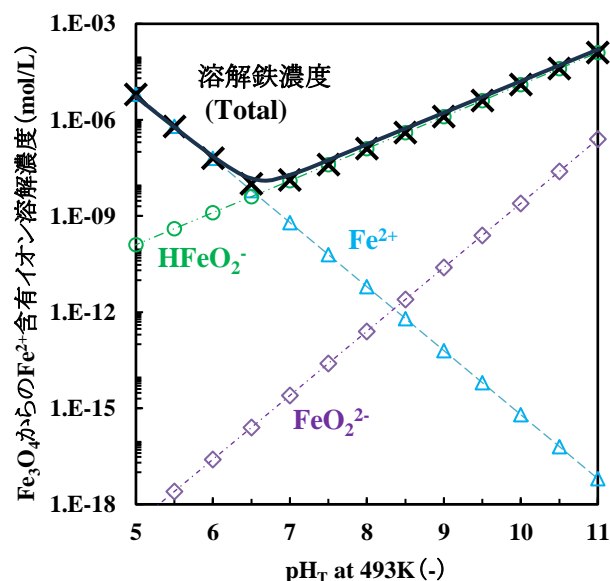


図-1 493KにおけるFe₃O₄からのFe²⁺含有イオンの溶解濃度とpH_Tの関係

次いで、図-2にFeOからの溶解鉄濃度とpH_Tの関係を、温度変化(373~573K)と併せて示す。

FeOからの溶解鉄濃度については、温度の上昇にともない極小濃度を示すpH_Tは低pH側にシフトするとともに、特に423K以上では温度の上昇にともない極小濃度も減少した。なお、373~573Kにおける中性純水はpH_T5.6~6.1であるため、溶解鉄濃度が極小となるpH_Tはいずれの温度でもアルカリ域に存在する。

また、既報の熱力学計算により求められたFe₃O₄溶解挙動^{2,11)}と比較した場合、想定するFe₃O₄の溶解反応が異なるため、溶解鉄濃度の絶対値に差異はあるものの、溶解鉄濃度に与えるpH_Tや温度の影響については比較的一致していた。

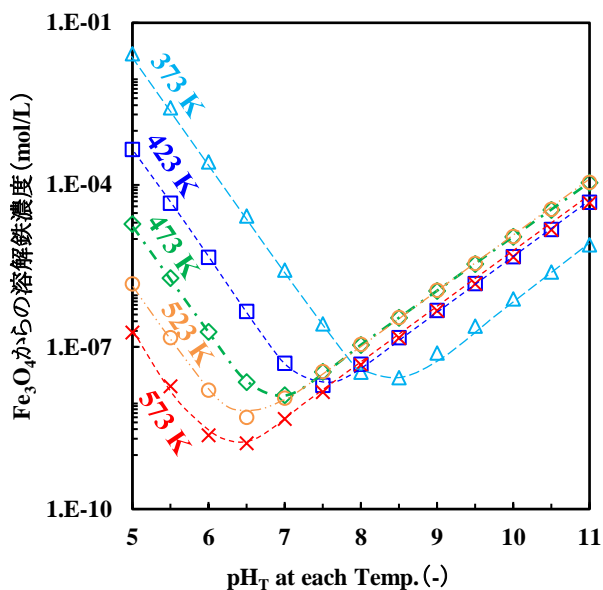


図-2 Fe₃O₄由来の溶解鉄濃度と pH_T の関係

5. 熱力学計算により算出した溶解鉄濃度と二次系系統水中鉄濃度の比較

5.1 伊方発電所 3号機二次系系統水の水化学処理

伊方3号機二次系系統水では、プラント起動直後はアンモニア (NH₃) とヒドラジン (N₂H₄) 注入により、弱アルカリかつ脱酸素環境下となる全揮発性物質 (All Volatile Treatment ; AVT) 処理が行われるが、その後の定常運転からは NH₃ と N₂H₄ に加えエタノールアミン (ETA) を注入する ETA 処理が行われている。

ETA 処理は、AVT 処理に対して、二次系給水系統の pH が僅かに高い程度であるが、ETA の気液分配率が NH₃ よりも小さいという化学的性質により、蒸気・抽気系統といった気液二相流下でのミスト (配管内表面の水膜) pH を上昇させることで防食に寄与している。事実、伊方3号機においても、AVT から ETA 処理への移行にともない、二次系各部分のうち、特に抽気系で大きな鉄濃度低減効果が得られている。

5.2 熱力学計算により算出した溶解鉄濃度と実測鉄濃度の比較

伊方3号機二次系系統水を対象に、AVT および ETA 処理下での各部分 (373~573K の給水系と抽気系で各2箇所ずつ) の水質性状 (NH₃, N₂H₄, ETA 等の濃度) と温度から、化学平衡計算ツール「ChemWorks」(米国電力中央研究所 [EPRI] 製)

を用いて pH_T を求めた。さらに、得られた pH_T から熱力学計算により、系統各部の溶解鉄濃度を算出するとともに、鉄濃度の実測値 (以下、「実測鉄濃度」という。) と比較することで、計算結果の妥当性等を評価した。

図-3 に熱力学計算により算出した系統各部の溶解鉄濃度と実測鉄濃度 (伊方3号機第16サイクル運転時; 以下、「3-16サイクル運転時」という。) の関係を示す。

算出された溶解鉄濃度と実測鉄濃度の相関性は非常に高く、AVT 処理から ETA 処理への移行にともなう pH 上昇に応じて鉄濃度が低減傾向を示すこと、さらにその効果は抽気系で大きいこと等、実態を再現できていることを確認した。この結果は、前章で想定した Fe₃O₄ 溶解反応式と熱力学計算を組み合わせることで、温度と水質性状から二次系系統水中鉄濃度の挙動を予測できる可能性を示唆している。

一方、実系統水のうち、特に給水中に存在する鉄の大半は微粒子状 (懸濁鉄) とされることや¹²⁾、今回提案した二次系系統水下での Fe₃O₄ 生成・溶解反応については、既報の反応式^{2,9,11)}とは異なるため、系統各部の溶解鉄/懸濁鉄比等を確認したうえで、反応過程等についてはさらなる精査・検証が必要である。

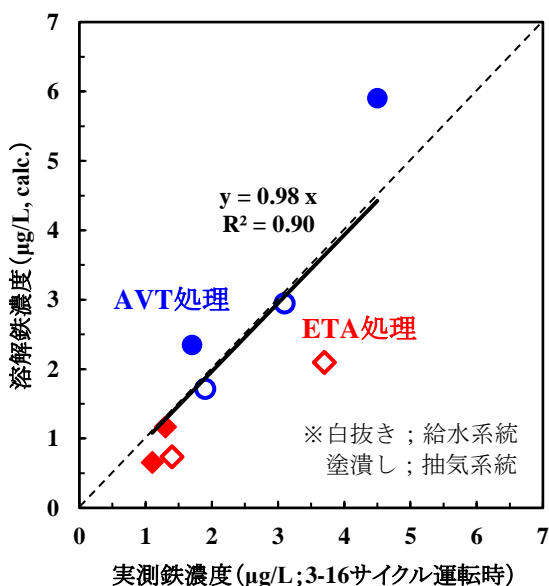


図-3 熱力学計算により求めた溶解鉄濃度と実測鉄濃度の関係

6. まとめ

二次系系統水等の高温水において、鉄系材料の接液部表面に酸化皮膜として形成し防食機能を示す Fe_3O_4 の生成および溶解反応について考察するとともに、熱力学計算により Fe_3O_4 の溶解鉄濃度に与える温度や pH の影響について検討し、以下の結果を得た。

- (1) Fe_3O_4 の生成反応として、酸化皮膜内に存在する FeOOH と Fe^{2+} が反応し、脱水されるという過程を提案した。
- (2) 熱力学計算から、 Fe_3O_4 を $\text{FeO} \cdot \text{Fe}_2\text{O}_3$ の化合物と想定した溶解反応では、高温水において、酸性（アルカリ性）領域では Fe^{2+} (HFeO_2^-) となる反応が支配的に起きるものと推定した。
- (3) Fe_3O_4 に由来する溶解鉄濃度は、温度の上昇にともない極小値が減少し、さらに極小値を示す pH_T は低 pH 側にシフトするものと推定した。
- (4) 二次系系統水の温度と水質性状から熱力学計算により求めた溶解鉄濃度と実測鉄濃度の相関性は非常に高く、当該手法により系統水中鉄濃度の挙動を予測できる可能性を得た。

【謝辞】

本検討は、四国電力(株) 原子力本部殿より委託を受け実施したもので、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) 河合登, 高久啓, 和田邦久, 平野秀朗, 朝倉祝治:「ボイラ給水模擬酸素処理条件化における炭素鋼の腐食特性」, 材料と環境, 19, No.10 (2000)
- 2) 福島香, 平野秀朗:「給水処理剤としてのアミン適用に関する溶液平衡論的考察」, 電力中央研究所報告, T97037 (1998年)
- 3) 日本原子力学会編:「原子炉水化学ハンドブック」, コロナ社出版 (2000)
- 4) 平野秀朗, 黛正己:「軽水型原子炉におけるステンレス鋼の腐食と割れ (その 3) -応力腐食割れにおよぼす溶存酸素の作用機構の検討

- 」, 電力中央研究所報告, 280064 (1981)
- 5) 日本化学編:「改訂 3 版化学便覧 基礎編 II」, p.II-308, 丸善 (1984)
- 6) Smith, J. M. and H. C. Van Ness:「Chemical Engineering Thermodynamics」 p.128-129, McGraw-Hill Kogakusha, Ltd. (1959)
- 7) C.M.Criss, J.W.Cobble;「The Thermodynamic Properties of High Temperature Aqueous Solutions. V. The Calculation of Ionic Heat Capacities up to 200°. Entropies and Heat Capacities above 200°」, J.Am. Chem. Soc., 86 (1964)
- 8) 福村卓也, 福谷耕司, 有岡孝司:「加圧水型原子力発電所 2 次系流れ加速型腐食に及ぼすエタノールアミン注入の影響」, 日本原子力学会和文論文誌, 9, No.3 (2010)
- 9) (一社)火力原子力発電技術協会:「火力発電プラントにおける水質管理ハンドブック (第二版)」 (2024)
- 10) 杉野亘:「水化学による PWR 二次系炭素鋼配管の減肉抑制への取り組み」, 日本原子力学会「水化学部会」第 5 回定例研究会 (2008)
- 11) 河村浩孝, 谷純一, 平野秀朗:「高温高圧水中における酸化鉄皮膜の安定性評価への交流インピーダンス法の適用」, 電力中央研究所報告, T95038 (1996)
- 12) (一社)日本原子力学会:「日本原子力学会標準加圧水型原子炉二次系の水化学管理指針: 2020」 (2020)

グリーン水素製造実証試験システムに関する研究

(株)四国総合研究所 エネルギー技術部 清家 良多
四国電力(株) 経営企画部 渡邊 浩平

キーワード： 水電解装置
グリーン水素
余剰電力

Key Words : Water Electrolyzer
Green Hydrogen
Surplus Electricity

A Study on a Demonstration System for Green Hydrogen Production

Shikoku Research Institute, Inc., Energy Engineering Department

Ryota Seike

Shikoku Electric Power Co.,Inc., Corporate Planning Department

Kohei Watanabe

Abstract

As renewable energy use continues to grow in Japan, power output curtailment has also increased, making the effective use of surplus electricity an important issue. One promising approach is to use surplus electricity to produce hydrogen through water electrolysis, thereby creating flexible electricity demand. In this context, Shikoku Electric Power Company conducted a demonstration study to evaluate hydrogen production using an electrolysis system and to assess its ability to respond to changes in power demand, with future applications such as renewable energy utilization and supply-demand balancing in mind.

The demonstration results showed that the system was able to produce green hydrogen in a stable manner when its operation was properly optimized. At the same time, the study identified a challenge: the influence of auxiliary equipment caused a gap between the intended power consumption and the actual system load, meaning that the targeted load-following performance was not fully achieved.

To address this issue, additional simulations were carried out to examine improvements in battery control. The results confirmed that improved control strategies allow the battery to absorb load fluctuations, enabling the overall system to achieve the required performance.

1. はじめに

日本では、再エネの導入拡大に伴い出力制御が増加しており、余剰電力の活用が重要な課題となっている。こうした余剰電力の活用方法の一つとして、電解法を用いた水素製造による電力需要の創出が期待されている。

電解法とは、水を電気分解することで水素を製造する方法であり、再エネ電力を用いて製造された水素は「グリーン水素」と呼ばれる。グリーン水素は、製造および利用の過程でCO₂を排出しないため、次世代エネルギーとして注目されている。

このような背景のもと、四国電力は、愛媛県、三浦工業株式会社などとともに、水素サプライチェーンモデル構築プロジェクト事業に取り組んでいる¹⁾。本事業において四国電力は、松山太陽光発電所の敷地内に設置した実証試験システムでグリーン水素製造実証事業を行い、四国総合研究所はその実施支援を行った。

本実証事業では2025年度、実証試験システムによる安定した水素製造の検証と、再エネの有効活用や需給調整市場への供出を想定した追従性の検証を行った。本稿では、その実証試験の結果とシミュレーションによるシステム改善検討の結果について報告する。

2. 実証試験システムの概要

実証試験システムは、松山太陽光発電所で発電した電気を利用してグリーン水素を製造する（表1、図1、2）。

表1 実証試験システム構成機器の概要²⁾

構成機器	概要
水電解装置	松山太陽光発電所で発電した電気を用いて、水を電気分解しグリーン水素を製造
圧縮機	水電解装置から供給されるグリーン水素を約20MPaまで圧縮
カードル	グリーン水素の運搬が可能なカードルに充填・貯蔵 [水素貯蔵量：約300Nm ³]
蓄電池	松山太陽光発電所からの余剰電力を充電し、太陽光発電の出力変動時のバックアップや、夜間における各機器への待機電力を供給 [容量：約150kWh]
制御監視装置	構成機器を統合的に制御し、運転状態を計測・記録するとともに、遠隔で制御や監視を行う機器



図1 実証試験システム²⁾

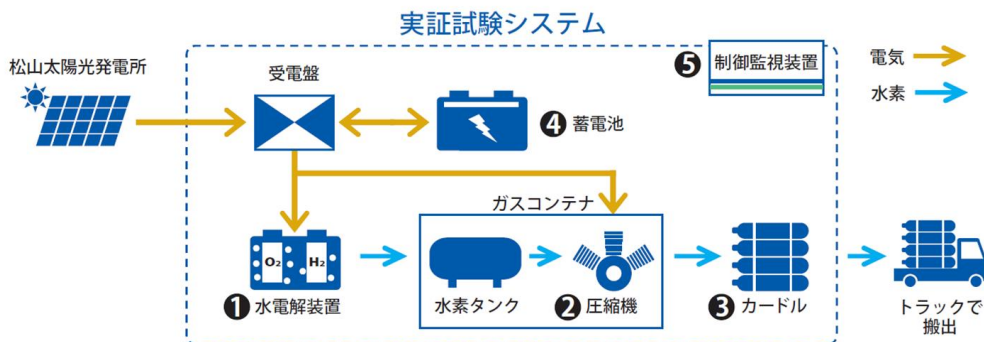


図2 実証試験システムの構成²⁾

3. 実証試験

実証試験システムによる安定した水素製造の検証と追従性の検証を行った。以下に、「安定した水素製造の検証」、「追従性の検証」について示す。

3.1 安定した水素製造の検証

安定した水素製造を実現するため、季節毎に定格運転における制御方法の調整を行い、運転の最適化を図った。その結果、年間を通じて安定したグリーン水素の製造が可能であることを確認した。

以下に、2025年度の運転実績を示す。

水素製造量：2,554.6Nm³

稼働日数：148日

定格における安定運転時には、一定(4Nm³/h)の水素製造が可能で、水電解装置単体の消費電力は、設備温度の上昇に伴い低下した(図3)。

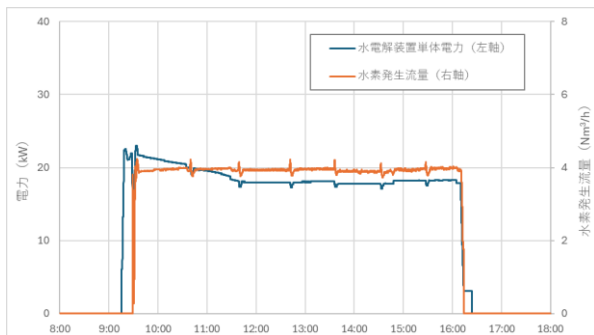


図3 定格運転時の水素製造状況

3.2 追従性の検証

再エネの有効活用や需給調整市場への調整力供出を想定し、事前に設定した負荷指令値に対する追従性の検証を行った。

検証の結果、実証試験システムのうち水電解装置単体は、要求する性能(負荷実測値が一定の時間内に指定の範囲に収まること)を一定程度満足することが確認された。一方で、実証試験システム全体は、

負荷指令値と負荷実測値に乖離が生じ、要求する性能を満足しないことが確認された(図4)。

実証試験システム全体における負荷乖離の原因は、ガスコンテナ内の付属設備が間欠運転をすることによる電力消費の変動にあることが確認された。

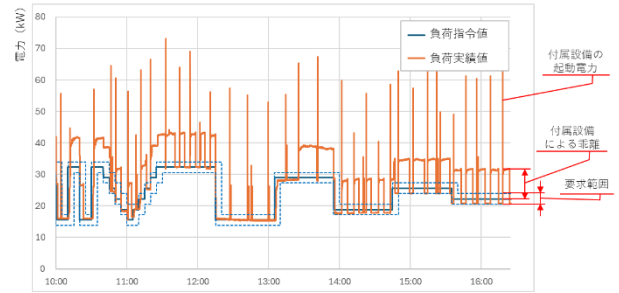


図4 負荷指令値と負荷実測値の乖離

4. シミュレーションによるシステム改善検討

実証試験において実証試験システムが要求する性能を満足しなかったことを踏まえ、シミュレーションソフト(AVEVA Process Simulation)を用いて、蓄電池の制御方法改善による負荷乖離低減効果の確認を行った。以下に、「モデルの概要」、「制御方法改善効果の評価」について示す。

4.1 モデルの概要

モデルは、実証試験システムの電力系統を重点的に模擬し、1日の日射量を入力することで、太陽光出力に応じた電力需給と水素製造を再現するものとした(図5)。このモデルに負荷変動運転をした日の実測値を元に作成した日射量を入力し、得られた消費電力量と水素製造量を実測値と比較した。その結果、シミュレーション値は実測値との相対誤差が±5.0%以下で、モデルは、実証試験システムの概略挙動を把握するのに、実用的な精度であることが確認された(表2)。

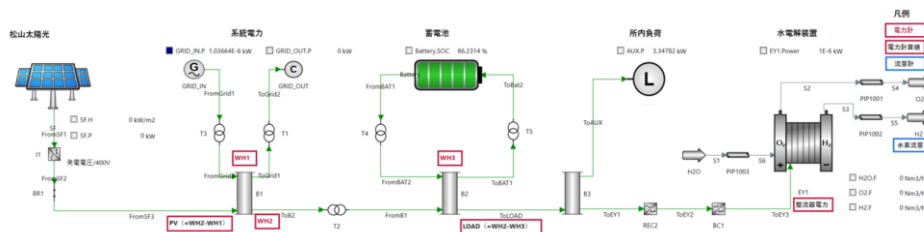


図5 実証試験システムのモデル

表 2 シミュレーション値と実測値の相対誤差

項目		単位	SIM 値	実測値	相対誤差
電力	水電解装置単体	kWh/day	74.2	73.8	0.5%
	システム全体	kWh/day	178.3	182.5	▲2.3%
水素製造量		Nm ³ /day	14.4	15.1	▲4.2%

4.2 制御方法改善効果の評価

作成したモデルにおいて、蓄電池の充放電制御を改善することで、実証試験で確認された負荷指令値と負荷実測値の乖離が低減されるかを確認した。

その結果、制御方法の改善により、蓄電池は乖離を吸収し、実証試験システムは要求する性能を満足することが確認された (図 6)。

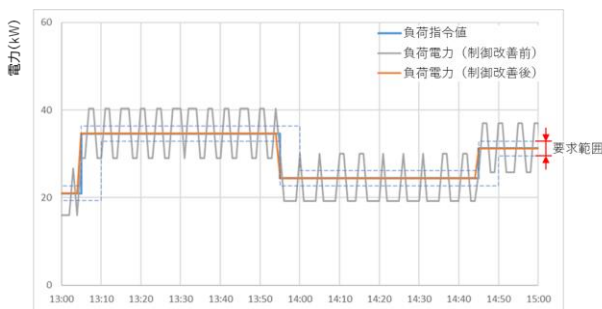


図 6 蓄電池制御方法改善結果

5. まとめ

実証試験システムを用いた試験およびシミュレーションを用いた設備改善検討を行った結果、以下の事項が確認された。

- ・ 実証試験システムは、運転の最適化を図ることで、安定したグリーン水素の製造が可能。
- ・ 実証試験システムは、付属設備の影響で負荷指令値と負荷実測値に乖離が生じ、需給調整市場要件を満足しなかった。
- ・ 負荷の乖離は、蓄電池の制御方法を改善することで低減可能と考えられる。

この結果を踏まえ、今後は実機における蓄電池制御を改善することで負荷乖離の低減を図り、需給調整市場要件への適合性を高める。

[謝辞]

本研究は、四国電力(株)経営企画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) 愛媛県、四国電力株式会社、三浦工業株式会社：「水素サプライチェーンモデル構築に向けた連携協定の締結について」、2023年3月24日
- 2) 四国電力株式会社：「グリーン水素製造実証事業の概要 ～水素エネルギーの活用に向けて～」、2025年3月

2023年トルコ・シリア地震の強震観測記録を踏まえた 伊方発電所の地震動評価の妥当性に関する検討

四国電力(株) 土木建築部 木戸 智之
四国電力(株) 土木建築部 塩田 哲生

キーワード： 伊方発電所
基準地震動
2023年トルコ・シリア地震
長大断層
震源近傍
拡散波動場理論

Key Words : Ikata Nuclear Power Plant
Design basis earthquake ground motion
2023 Turkey-Syria earthquake
Long active fault
Near the seismic source
Diffuse field concept

Study on the validity of seismic motion assessment for Ikata nuclear power plant based on the strong motion observation records of the 2023 Turkey-Syria earthquake

Shikoku Electric Power Co., Inc., Civil and Architectural Engineering Department
Tomoyuki Kido, Tetsuo Shiota

Abstract

The 2023 Turkey–Syria earthquake was caused by a long strike-slip fault, and numerous strong-motion observation records, including those from the near-source region, have been obtained. Shiota et al. estimated the bedrock ground motions (equivalent to $V_s = 2100$ m/s) for the 2023 Turkey–Syria earthquake based on diffuse field concept and demonstrated the potential applicability of Morikawa and Fujiwara (MF13) to large earthquakes occurring in the near-source region.

In this study, we conducted an evaluation of earthquakes on the Median Tectonic Line fault zone (MTL) affecting the Ikata Nuclear Power Plant using MF13, and we applied corrections to the strong-motion observation records of the 2023 Turkey–Syria earthquake for the shortest distance to the fault and site conditions so as to reproduce the same conditions as those between the Ikata Nuclear Power Plant and the MTL. Furthermore, comparison of these evaluation results with the design-basis earthquake ground motions for the Ikata Nuclear Power Plant showed that the resulting ground-motion levels are comparable to or smaller than the design-basis ground motions, confirming that the design-basis ground motions constitute an appropriate evaluation.

1. はじめに

2023年にトルコ南部の東アナトリア断層帯で発生した Mw7.8 の地震（以下、「2023年トルコ・シリア地震」という。）は長大な横ずれ断層帯による地震であり、震源近傍を含む多数の強震観測記録が取得された。塩田ほか¹⁾では2023年トルコ・シリア地震における震源近傍の観測点を対象に、拡散波動場理論に基づき地表面の強震観測記録から基盤地震動 ($V_s=2100\text{m/s}$ 相当) を推定している。さらに、地震動予測式の大規模かつ震源近傍地点への適用可能性の確認として、推定した基盤地震動と Morikawa and Fujiwara²⁾（以下、「MF13」という。）により評価した地震動を比較して概ね MF13²⁾ のばらつきの範囲内に収まることを確認し、MF13²⁾ がデータセットの外挿範囲である大規模かつ震源近傍地点であっても一定の精度で地震動評価ができる可能性を示している。

伊方発電所は、日本でも有数の長大な横ずれ断層帯である中央構造線断層帯が敷地の沖合約 8km に位置しており、伊方発電所 3 号炉の基準地震動は中央構造線断層帯の地震によって策定されている。原子力規制委員会が定めた基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド³⁾では、「基準地震動は、最新の知見や震源近傍等で得られた観測記録によってその妥当性が確認されていることを確認する。」とされており、中央構造線断層帯と同じ長大な横ずれ断層である 2023 年トルコ・シリア地震の大規模かつ震源近傍の強震観測記録に基づく塩田ほか¹⁾の知見は、伊方発電所の基準地震動の妥当性を確認する上で有用な知見である。

これを踏まえ、本報では、塩田ほか¹⁾の知見を踏まえた伊方発電所の基準地震動の妥当性を検証する。具体的には、まず、塩田ほか¹⁾で推定された 2023 年トルコ・シリア地震の基盤地震動を参照し、既往研究で実績のある断層最短距離および地盤条件による補正の適用性を検討する。そのうえで、大規模かつ震源近傍地点への適用可能性が示された MF13²⁾ を用いて伊方発電所における中央構造線断層帯の地震による評価を実施するとともに、2023 年トルコ・シリア地震の基盤地震動を伊方発電所と中央構造線断層帯の位置関係および伊方発電所の地盤条件を踏まえた補正を行い、これらの評価結果を伊方発電所の基準地震動と比較する。

2. 塩田ほか¹⁾における検討の概要

2.1 基盤地震動の推定

塩田ほか¹⁾では、断層最短距離が 20km 以内、かつ、既往研究で地下構造が評価されている観測地点を検討対象としている。図 1 に塩田ほか¹⁾で基盤地震動の推定が行われた観測地点（22 地点）の位置を、地表観測記録の最大加速度分布 (PGA) の地図上に地点名の吹き出しで示すとともに、表 1 に各観測地点の諸元 (V_s30 , 地表観測記録の PGA 及び最大速度 (PGV), 断層最短距離, 地下構造モデル構築に用いた既往研究) を示す。塩田ほか¹⁾では、対象観測地点の強震観測記録を用いて長嶋・川瀬⁴⁾の拡散波動場理論に基づき基盤地震動 ($V_s=2100\text{m/s}$ 相当) が推定されている。

拡散波動場理論の計算に用いられている地下構造モデルについて、浅部地盤は AFAD⁵⁾, Özmen et al.⁶⁾及び山中⁷⁾, 深部地盤は CRUST2.0⁸⁾に基づき設定されている。塩田ほか¹⁾の地下構造モデルの構築手順を図 2 に示す。

構築した地下構造モデルを用いて拡散波動場理論に基づき推定された基盤地震動のうち、表層地盤の局所的な影響をうけて基盤地震動が適切に評価されていない可能性が指摘されている 3125, 3126 及び 3129 地点を除いた計 19 地点について、NS 方向および EW 方向における擬似速度応答スペクトルを断層最短距離 (Xsh) 5km 毎に色分けして図 3 に示す。塩田ほか¹⁾で推定された基盤地震動は、断層最短距離が遠くなるにつれて地震動レベルが小さくなるという一般的な傾向が見て取れる。

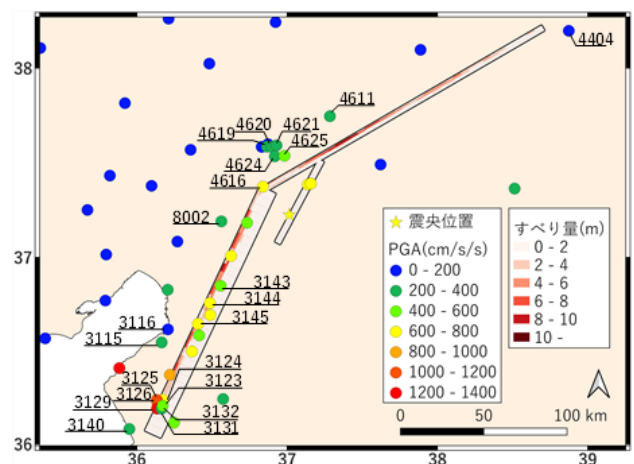


図 1 対象観測点位置図

震源断層モデルは USGS⁹⁾参照, 塩田ほか¹⁾より

表1 対象観測地点の諸元

Vs30はAFAD⁵⁾、断層最短距離XshはUSGS⁹⁾の震源断層モデルからの距離、塩田ほか¹⁾より

観測地点	Vs30 (m/s)	地表記録 (水平)		地表記録 (上下)		Xsh (km)	地下構造モデル	
		PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)	PGA (cm/s ²)	PGV (cm/s)		浅部	深部
3123	470	654	188	849	53	2.8	山中	AFAD CRUST 2.0
3124	283	620	112	583	42	2.7		
3125	448	1089	106	1100	65	2.3		
3126	350	1167	110	854	80	1.9		
3129	447	1353	172	703	43	2.2		
3131	567	356	48	146	19	4.0		
3132	377	509	67	361	35	3.9		
3115	424	287	48	213	20	13.3		
3116	870	161	40	151	19	13.1		
3143	444	379	128	384	29	4.7		
3144	4.85	177	138	471	80	3.5		
3145	533	692	158	610	65	2.6		
4404	1380	136	20	96	11	15.1		
4611	731	343	41	168	16	16.3		
4619	545	303	30	174	19	19.2		
4620	484	310	37	184	15	17.6		
4621	714	369	45	225	21	17.1		
4624	280	357	59	157	36	12.1		
8002	346	236	44	322	18	11.7		
3140	210	217	80	175	30	9.5		
4616	390	610	96	387	24	2.0		
4625	346	466	16	344	29	9.6		
							Özmen et al.	CRUST 2.0

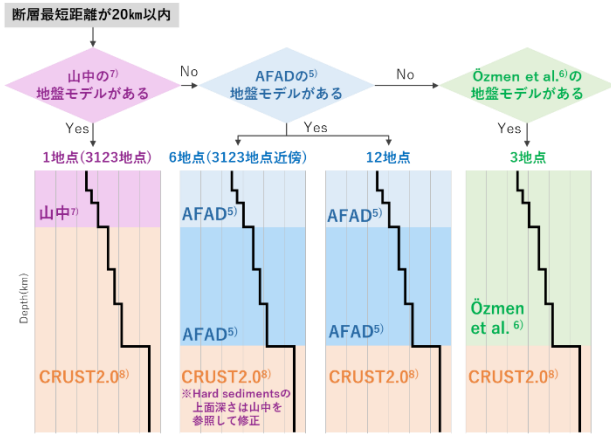


図2 地下構造モデルの構築手順
塩田ほか¹⁾より

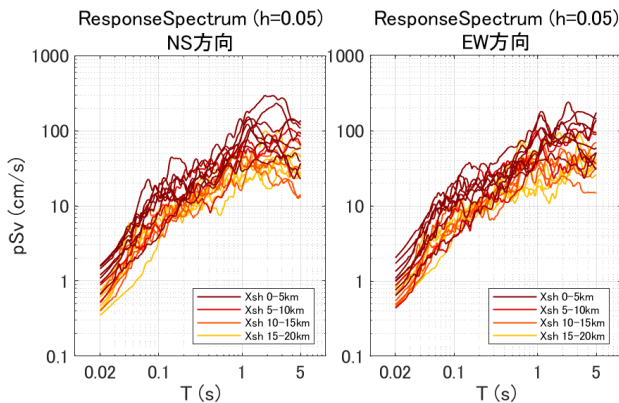


図3 推定基盤地震動の擬似速度応答スペクトル
断層最短距離 5km 毎に色分け

2.2 MF13²⁾の適用に関する検討

塩田ほか¹⁾では、2.1節で示した推定基盤地震動とMF13²⁾ (Vs30=2000m/s, D1400=0mに設定)により評価した地震動を比較することで、MF13²⁾の大規模かつ震源近傍地点への適用性について考察している。塩田ほか¹⁾で示されている適用性検討の図のうち、周期0.02秒、0.1秒、1.0秒及び5.0秒の比較結果を代表して図4に示す。なお、MF13²⁾は周期0.05秒以上の応答スペクトルを評価できる地震動予測式であるため、図4における周期0.02秒の図はMF13²⁾のPGAの評価値を示している。

塩田ほか¹⁾は、推定基盤地震動とMF13²⁾はばらつき範囲で概ねよく対応しており、MF13²⁾はデータセットの外挿範囲であっても一定の精度で地震動評価ができる可能性があるとしている。

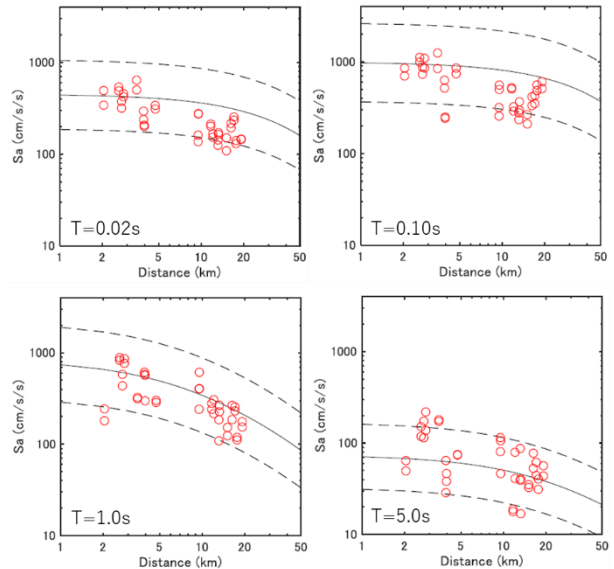


図4 推定基盤地震動とMF13²⁾の比較
赤丸が推定した基盤地震動、黒実線及び黒点線はMF13²⁾の平均及び±1σ、塩田ほか¹⁾より

3. 断層最短距離および地盤条件による補正

伊方発電所の基準地震動の策定において考慮している中央構造線断層帯と伊方発電所との断層最短距離は約8kmであるのに対して、塩田ほか¹⁾で推定した基盤地震動の評価地点における断層最短距離は2.2km~19.2kmと幅を持っている。また、伊方発電所は硬質な岩盤上に設置されており、基準地震動が策定されている解放基盤表面のせん断波速度がVs=2600m/sであるのに対して、塩田ほか¹⁾で推定された基盤地震動はVs=2100m/s相当

での地震動である。

このため、塩田ほか¹⁾で推定された基盤地震動を伊方発電所の基準地震動と比較するための事前検討として、3章では、塩田ほか¹⁾で推定された基盤地震動に対して、既往研究で実績のある断層最短距離および地盤条件による補正方法の適用性について検討を行う。

3.1 断層最短距離による補正

塩田ほか¹⁾で推定された基盤地震動の断層最短距離は2.2km~19.2kmと幅を持っている。そこで、推定した基盤地震動に対してTajima et al.¹⁰⁾の手法に基づく断層最短距離による補正を行う。具体的には、推定した基盤地震動の応答スペクトルに対して、Si et al.¹¹⁾の推定値から算出された補正係数Rを乗じることによって断層最短距離による補正を加えた基盤地震動の応答スペクトルを算定する。補正係数Rの算定方法の例を図5に示す。

塩田ほか¹⁾で推定された基盤地震動を断層最短距離5km, 10km, 15km, 20kmに補正した結果について、MF13²⁾による地震動評価結果と比較して図6に示す。補正後の基盤地震動の応答スペクトルは、周期0.1秒程度以下および周期1~2秒程度の領域でやや小さい傾向にあるものの、設定したすべての断層最短距離において、MF13²⁾を用いた地震動評価結果のばらつき範囲内で概ね整合している。MF13²⁾が上記周期帯でやや大きめの評価結果となる傾向は塩田ほか¹⁾でも指摘されており、断層最短距離による補正を加えてもその影響が残っているものと考えられる。

以上より、Tajima et al.¹⁰⁾に基づいて距離補正した地震動は、全体的な地震動レベルとしては妥当な結果が得られていると考える。

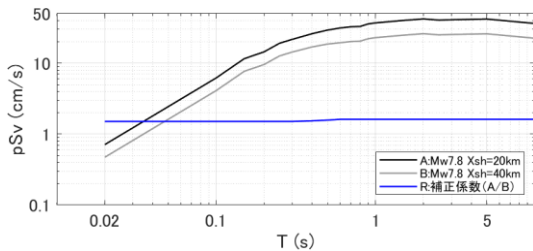


図5 補正係数Rの算定方法の例
断層最短距離を40kmから20kmに補正する場合の補正係数R

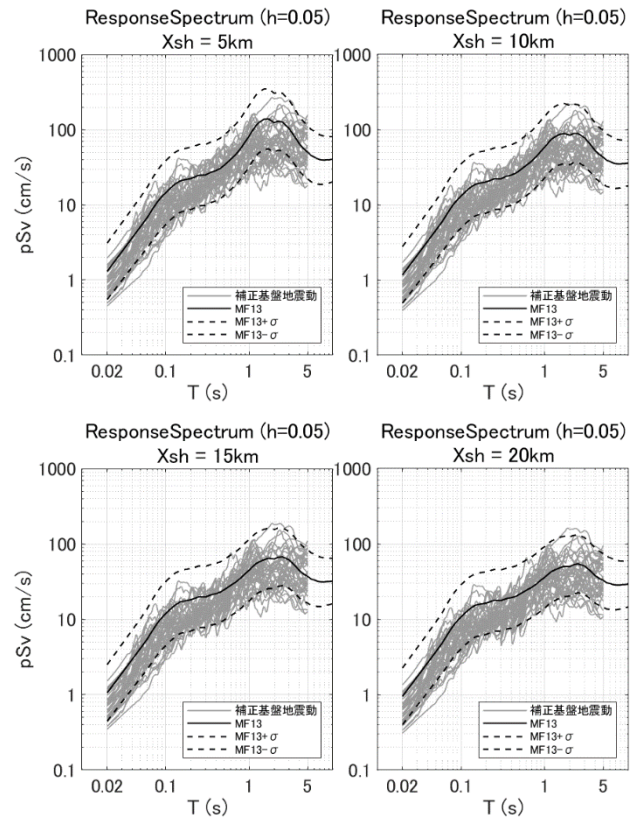


図6 断層最短距離による補正結果

3.2 地盤条件による補正

塩田ほか¹⁾で拡散波動場理論の計算に用いられた地下構造モデルのうち、深部地盤はCRUST2.0⁸⁾によりモデル化されており、推定された基盤地震動はCRUST2.0⁸⁾のHard sedimentsの層上面($V_s=2100\text{m/s}$)で評価されている。そこで、伊方発電所の地盤相当への補正にあたっては、まず、基盤地震動の評価地点を塩田ほか¹⁾の地下構造モデルのHard sedimentsからUpper crustの層上面($V_s=3500\text{m/s}$)に変更して、塩田ほか¹⁾と同様に拡散波動場理論を用いて基盤地震動を推定する。さらに、推定した $V_s=3500\text{m/s}$ の基盤地震動を用いて、伊方発電所の地下構造モデルを用いた地盤応答解析を実施し、伊方発電所の解放基盤表面($V_s=2600\text{m/s}$)相当における地震動を推定する。

地盤応答解析は、西坂ほか¹²⁾による伊方発電所の地下構造モデルを使用する。西坂ほか¹²⁾では、伊方発電所で観測された鉛直アレイ地震観測記録を用いて、地表から地下深部2000m(地震基盤)に至る地下構造モデルを同定している。西坂ほか¹²⁾で同定された地下構造モデルは、伊方発電所3号炉直下から約1km離れた地点での地下構造モデル

であるものの、同種の結晶質岩盤が連続しているとともに、せん断波速度等の地盤物性値も伊方発電所3号炉直下に相当し、地震観測記録を用いて精度の良いQ値が同定されていることから、伊方発電所において実態に即した地震動レベルを把握することに適したモデルと言える。

西坂ほか¹²⁾の地下構造モデルを表2に、地盤条件による補正方法を図7に示す。本検討では、塩田ほか¹⁾と同様の手法で推定したUpper crustの層上面($V_s=3500\text{m/s}$)の基盤地震動を、西坂ほか¹²⁾の地下構造モデルの最下層($V_s=3500\text{m/s}$)の層上面(深度2000m)に入力し、地盤応答解析に基づき伊方発電所の解放基盤表面($V_s=2600\text{m/s}$)に相当する層の層上面(深度5m)で出力する。

地盤条件による補正を加えた結果について、代表して2023年トルコ・シリア地震の観測地点3144の結果を図8に示す。塩田ほか¹⁾でCRUST2.0⁸⁾のHard sediments層上面($V_s=2100\text{m/s}$)で推定した基盤地震動よりもUpper crustの層上面($V_s=3500\text{m/s}$)で推定した基盤地震動の方が全周期帯で地震動レベルが小さくなった。また、これらの基盤地震動と伊方発電所の解放基盤表面相当に補正した地震動を比較すると、解放基盤表面相当の地震動の方が短周期側では地震動レベルが小さくなっている。西坂ほか¹²⁾において、伊方発電所の地震観測記録は地震基盤から地表まで顕著な地盤増幅はなく、1Hz以上(周期1秒以下)ではむしろ減衰する傾向が認められるとされており、その傾向が本検討の地下構造モデルを用いた補正結果にも表れていると考えられる。

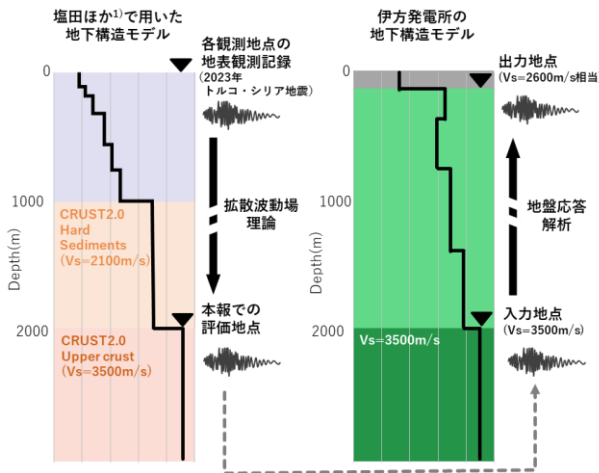


図7 地盤条件による補正方法

表2 西坂ほか¹²⁾の地下構造モデル

深度 (m)	V_s (m/s)	ρ (g/cm^3)	Q_0	f_0	α
5	647	2.3	11	15.2	1.42
180	2611	2.9	11	15.2	1.42
300	2164	2.7	144	8.8	1.45
620	3079	2.7	176	12.4	1.49
2000	3346	2.7	366	11.0	1.16
-	3500	2.7	366	11.0	1.16

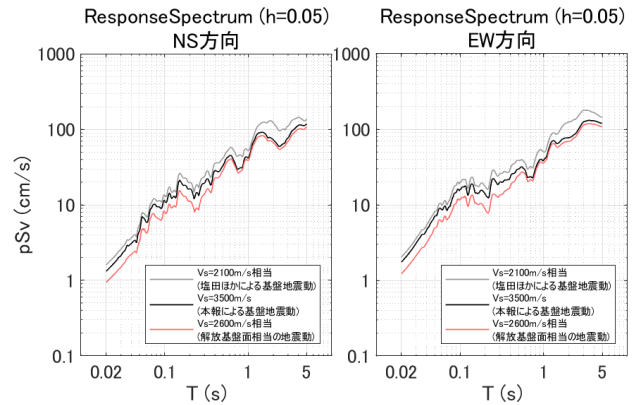


図8 地盤条件による補正結果 (3144地点)

4. 伊方発電所の基準地震動の妥当性確認

4.1 確認方法

伊方発電所の基準地震動 Ss-1 および Ss-2 については、敷地から約8kmに位置する中央構造線断層帯の地震を想定して策定されている。そこで、中央構造線断層帯と同じ長大な横ずれ断層である2023年トルコ・シリア地震で得られた塩田ほか¹⁾に基づく知見を踏まえて、伊方発電所の基準地震動の妥当性を検証する。

検証方法としては、応答スペクトルに基づく地震動評価で策定された基準地震動 Ss-1 については、塩田ほか¹⁾で大規模かつ震源近傍地点への適用可能性が示されたMF13²⁾を用いた伊方発電所における中央構造線断層帯の地震による評価結果との比較を行う。MF13²⁾を用いた中央構造線断層帯の地震の評価は、断層最短距離は8km、地震規模は基準地震動 Ss-1 の策定において考慮しているケースのうち、地震動レベルが最大となる断層長さ約480kmケースの地震規模 Mw7.9、地盤条件はMF13²⁾で考慮できる最も硬い地盤条件として、 $V_s30=2000\text{m/s}$ 、 $D1400=0\text{m}$ とする。

また、断層モデルを用いた手法による地震動評価で策定された基準地震動 Ss-2 については、2023

年トルコ・シリア地震の強震観測記録を、基準地震動 S_s-2 と同条件となるように 3 章で示した断層最短距離および地盤条件による補正を加えて評価した基盤地震動との比較を行う。具体的には、2023年トルコ・シリア地震の強震観測記録について、3.2節の地盤条件による補正で示した方法により伊方発電所の解放基盤面 ($V_s=2600\text{m/s}$) 相当における地震動を推定したうえで、3.1節の断層最短距離による補正で示した方法により距離を 8km に補正した地震動を基準地震動 S_s-2 と比較する。

4.2 確認結果

MF13²⁾を用いた伊方発電所における中央構造線断層帯の地震動評価と基準地震動 S_s-1 の比較を図 9 に示す。MF13²⁾を用いた地震動評価結果は全周期帯で基準地震動 S_s-1 を下回る結果となった。周期 1~3 秒付近では MF13²⁾を用いた地震動評価結果と基準地震動 S_s-1 との差が小さくなっているが、これは塩田ほか¹⁾で述べられている、推定した基盤地震動及び他の距離減衰式と比較して MF13²⁾が大きめの地震動レベルとなる周期帯と対応している。

また、断層最短距離および地盤条件による補正を行った 2023 年トルコ・シリア地震の基盤地震動と基準地震動 S_s-1 および S_s-2 の比較を図 9 に示す。なお、補正した基盤地震動と伊方発電所の基準地震動では震源断層と評価地点の位置関係が異なり、方角をあわせた比較に物理的な意味がないことから、NS 方向と EW 方向をあわせて図示する。

補正した基盤地震動は、全周期帯において基準地震動 S_s-1 および S_s-2 と概ね同等あるいは下回る結果となった。原子力施設の耐震評価において重要な短周期側に着目すると、補正した基盤地震動は基準地震動 S_s-1 および S_s-2 を下回っている。

基準地震動 S_s-1 は、Noda et al.¹³⁾を用いた地震動評価にあたって内陸地殻内地震に適用できる補正係数（短周期側の地震動レベルを低減する補正係数）をあえて考慮しないなどの保守性が考慮されている。基準地震動 S_s-2 は、不確かさとして、主に短周期側への影響が大きい応力降下量の値を、平均的な値の 1.5 倍又は 20MPa の大きい方に設定したケースである。また、これらの基準地

震動の策定にあたっては、アスペリティ深さを浅めに設定する、破壊伝播が敷地に向かう方向に設定するなど、基本となる震源モデル自体にも十分な保守性が考慮されている。本検討において補正した基盤地震動が特に短周期側で基準地震動 S_s-1 および S_s-2 を下回っていることは、上記の種々の保守性が相まって、実現象に対して十分な保守性が考慮できていることの裏付けと考えられる。

なお、長周期側の一部周期帯において基準地震動 S_s-1 および S_s-2 を上回る地点もあるが、これは USGS⁹⁾の震源断層モデルからの断層最短距離が 2~3km の地点である。震源断層からの距離が 2km 程度より近い震源極近傍では、地震発生層より浅い領域からの影響を受けて長周期側の地震動が大きくなるのが既往研究¹⁴⁾で指摘されており、2023年トルコ・シリア地震においても同様の事例が報告されている¹⁵⁾。本検討において長周期側の一部周期帯で大きな地震動となった地点についても、震源極近傍で生じる長周期地震動の励起が要因であり、伊方発電所と中央構造線断層帯との関係（断層最短距離約 8km）において具体的に想定されるものではないと考えられる。

以上より、伊方発電所の基準地震動 S_s-1 および S_s-2 は、2023 年トルコ・シリア地震の大規模かつ震源近傍の強震観測記録に基づく塩田ほか¹⁾の知見を踏まえても、適当な地震動レベルとなっていることが確認できた。

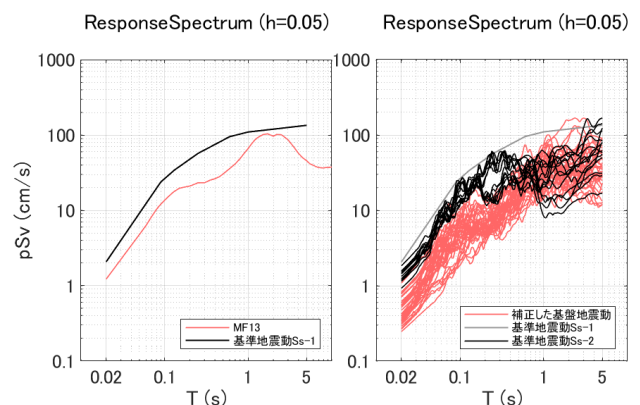


図 9 伊方発電所の基準地震動との比較

5. まとめ

本報では、塩田ほか¹⁾の知見を踏まえた伊方発電所の基準地震動の妥当性について検討を行った。

塩田ほか¹⁾で大規模かつ震源近傍地点への適用可能性が示された MF13²⁾を用いて伊方発電所における中央構造線断層帯の地震による地震動評価を実施し、伊方発電所の基準地震動 S_s-1 と比較した。また、2023年トルコ・シリア地震の強震観測記録について、断層最短距離および地盤条件の補正を行った基準地震動を伊方発電所の基準地震動 S_s-2 と比較した。いずれの評価結果も基準地震動 S_s-1 および S_s-2 と同等あるいは下回る地震動レベルであり、原子力施設の耐震評価において重要となる短周期側では基準地震動を下回る結果となった。

以上より、2023年トルコ・シリア地震の大規模かつ震源近傍の強震観測記録に基づく塩田ほか¹⁾の知見を踏まえても、伊方発電所の基準地震動は妥当な地震動レベルとなっていることが確認できた。原子力規制委員会が定めた基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド³⁾において「基準地震動は、最新の知見や震源近傍等で得られた観測記録によってその妥当性が確認されていることを確認する。」とされており、この観点からも本報の検討は重要である。

【参考文献】

- 1) 塩田哲生, 木戸智之, 飯田朋美, 元木健太郎, 加藤研一, 藤原広行:「拡散波動場理論に基づく2023年トルコ・シリア地震における震源近傍地点の基準地震動の推定と地震動予測式の適用に関する一考察」, 日本地震工学会論文集 Vol. 25, No. 12, 2025.
- 2) Morikawa, N. and Fujiwara, H.: 「A New Ground Motion Prediction Equation for Japan Applicable up to M9 Mega-Earthquake」, Journal of Disaster Research, Vol. 8, No. 5, pp. 878–888, 2013.
- 3) 原子力規制委員会:「基準地震動及び耐震設計方針に係る審査ガイド」, 2022.
- 4) 長嶋史明, 川瀬博:「K-NET・KiK-netのPS検層記録に基づくVs・Vpおよび深さの関係」, 物理探査, Vol. 72, pp. 78–100, 2019.
- 5) AFAD: <https://tadas.afad.gov.tr/map>
- 6) Özmen, Ö. T., Yamanaka, H., Alkan, M. A., Çeken, U., Öztürk, T. and Sezen, A.: 「Microtremor Array Measurements for Shallow S wave Profiles at Strong-Motion Stations in Hatay and Kahramanmaraş Provinces」, Southern Turkey, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 107, No. 1, pp. 445–455, 2017.
- 7) 山中浩明:「2023年トルコ・シリア地震の被災地域の地震動特性と地盤増幅について」, 第51回地盤震動シンポジウム, pp. 11–18, 2023.
- 8) Bassin, C., Laske, G. and Masters, G.: 「The Current Limits of Resolution for Surface Wave Tomography in North America」, Eos, Transactions American Geophysical Union, Vol. 81, No. 48, F897, 2000.
- 9) USGS Geologic Hazards Science Center and Collaborators: 「The 2023 Kahramanmaraş, Turkey, Earthquake Sequence」, 2023.
- 10) Tajima, R., Tanaka, H. and Wu, C.: 「An Empirical Method for Estimating Source Vicinity Ground-Motion Levels on Hard Bedrock and Annual Exceedance Probabilities for Inland Crustal Earthquakes with Sources Difficult to Identify in Advance」, Bulletin of the Seismological Society of America, Vol. 111, No. 5, 2021.
- 11) Si, H., Midorikawa, S., Tsutsumi, H., Wu, C., Masatsuki, T. and Noda, A.: 「Preliminary analysis of attenuation relationship for response spectra on bedrock based on strong motion records including the 2011 Mw 9.0 Tohoku earthquake」, 10th International Conference on Urban Earthquake, pp. 113–117, 2013.
- 12) 西坂直樹, 石川慶彦, 長井千明, 山内泰知, 佐藤浩章, 辻健:「結晶質岩盤サイトでの鉛直アレイ地震観測記録を用いた地盤構造モデルの同定と基準地震動の検討」, 日本地震工学会論文集 (印刷中).
- 13) Noda, S., Yashiro, K., Takahashi, K., Takemura, M., Ohno, S., Tohdo, M. and Watanabe T.: 「Response spectra for design purpose of stiff structures on rock sites」, OECD-NEA workshop on the relation between seismological data and seismic

engineering analysis, 2002.

- 14) 入倉孝次郎, 倉橋奨:「震源断層近傍の長周期地震動評価のための特性化震源モデルの拡張—2016年熊本地震(Mw7.0)の断層近傍地震動による検証—」, 日本地震工学会・大会—2017, pp.1–9, 2017.
- 15) 貴堂峻至, 永野正行, 宮腰研, 新井健介, 佐藤俊明:「2023年トルコ・カフラマンマラシュ地震(Mw 7.8)の断層ごく近傍で観測された大振幅速度パルス波形ならびに永久変位の再現のための浅部断層すべりを有する特性化震源モデル」, 日本建築学会構造系論文集, Vol. 89, No. 822, pp. 840–849, 2024.

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124号 (無断転載を禁ず)

編集兼発行人 岩部 功一
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
TEL (087) 843-8111
E-mail jigyo_kanri@ssken.co.jp