

企画セッション | 部会・連絡会セッション：水化学部会

■ 2019年9月12日(木) 13:00 ~ 14:30 | 会場 共通教育棟 2F D21

[2I_PL] 水化学ロードマップフォローアップの状況と概要

座長: 渡邊 豊(東北大)

[2I_PL01] 背景、全体概要および深層防護との関連付け

*河村 浩孝¹ (1. 電中研)

[2I_PL02] 安全基盤研究（被ばく低減、SCC抑制、燃料性能維持）

*杉野 亘¹ (1. 原電)

[2I_PL03] 共通基盤技術（FP挙動関連）

*高木 純一¹ (1. 東芝ESS)

[2I_PL04] 事故時対応の水化学

*長瀬 誠¹ (1. 日立GE)

水化学部会セッション

水化学ロードマップフォローアップの状況と概要
General Picture of the Updated Roadmap of Reactor Water Chemistry

(1) 背景, 全体概要及び深層防護との関連付け

(1) Background, Overview and Relation with Defense in Depth Concept

*河村 浩孝¹, 渡邊 豊²¹一般財団法人 電力中央研究所, ²国立大学法人 東北大学

1. はじめに

2018年7月に閣議決定された第5次エネルギー基本計画において、原子力発電は、安全性の確保を大前提として、長期的なエネルギー需給構造の安定性に寄与する重要なベースロード電源であると位置付けられた。原子力発電の活用のためには、2011年3月に発生した東京電力福島第一原子力発電所の過酷事故（以下1F事故）の反省に立って、原子力発電システムの安全性向上に対する従来の取り組みの問題点を見直し、抜本的な安全性の高度化とその不断の向上を図ることが必要条件となる。また、福島第一ならびに古い原子力発電所の廃炉を安全かつ円滑に進めていくためにも、高いレベルの原子力技術と人材の維持と発展が必要であると指摘されている。このような背景の下、総合資源エネルギー調査会 電力・ガス事業分科会 原子力小委員会の下に設置された「自主的安全性向上・技術・人材ワーキンググループ」と日本原子力学会「安全対策高度化技術検討特別専門委員会」との検討結果を基に、我が国の軽水炉の安全性向上を効率的に実現する技術開発及び人材育成の将来に向けた道筋を示すことを目的として、「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」が策定された。

水化学部会では、2007年に水化学ロードマップの第一次版、2009年に第二次版を策定した。その後1F事故を受け、原子力安全の議論が狭義の安全評価に留まっていたことを反省し、水化学の在り方について議論を重ねた。その結果、水化学分野においても、社会・一般公衆・環境に多大な影響を与えることのないよう、自主的安全性向上を基本方針に研究・技術開発及び人材育成を行っていくべきとの共通認識が生まれた。

そこで、水化学部会では、水化学ロードマップ2009のフォローアップを行い、「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」との整合を図りながら、水化学技術の意義を改めて見直し、深層防護に立脚した水化学ロードマップとすることとした。

策定にあたっては、渡邊豊部会長を主査に、大学、電力、メーカ、研究機関から16名の委員で構成される水化学ロードマップフォローアップ検討WGを水化学部会内に設置し、検討を進めている。

本セッションでは、水化学ロードマップ2020の概要を紹介するとともに、水化学と密接に関連する分野である核燃料部会、材料部会及び原子力安全部会からの意見聴取を行う。

本稿では、背景、全体概要及び深層防護との関連付けについて紹介する。

2. 水化学の役割

発電用軽水炉プラントでは、炉心から取り出したエネルギーを輸送する媒体（冷却材）、及び中性子の減速材として水が用いられており、様々な温度条件、照射条件、沸騰・流動条件下で、構造材料や燃料被覆管などの金属材料と接しながら循環している。これら金属材料と水の界面では、燃料被覆管の腐食・水素化、クラッド付着による燃料性能低下、構造材料の腐食や応力腐食割れ、構造材料へのクラッド付着による線源強度増大など安全性や信頼性に係る多様な事象が生じ、これらは水を介して相互に関連している（図1）¹⁾。したがって、原子力安全の確保とともに作業安全の確保のためには、水化学管理の側面から、下記の継続的な達成が求められる。

- ①腐食抑制による構造材料・燃料被覆管の健全性維持
- ②線源強度低減による作業従事者の被ばく低減

これら課題の調和的解決に貢献し、発電用軽水炉プラントの安全性確保と公益性向上の同時達成に寄与することが水化学の使命である。また、設備／技術への貢献に加え、環境への影響抑制も水化学の重要な課題のひとつである。

水化学は運用技術であるため、プラントの構成、材料、運用の差異に応じて、合理的な対応策の提供が可能である。一方、水化学に係わる事象は冷却材を介して通底しているため、ある課題の改善のための水化学技術が、別の課題に対しては逆に作用するなどトレードオフの関係となる場合もある。トレードオフの解消には、各事象のメカニズム把握に加え、プラントシステムを包括的に捉えた上で、最適な制御を目指す必要がある。このように、多様な課題に対し調和的解決を図ることで、プラントの安全性と信頼性、作業従事者の安全確保が高度なレベルで達成可能となる。

また、水化学は、単に冷却材の水質維持のみを対象とするのではなく、燃料・構造材料との相互作用やその制御に用いる添加薬品、その結果生成する腐食生成物の挙動などを対象としており、これらに化学的基盤を与える分野全般を包括している。さらに、従来のスコープに加え、苛酷事故への対応においても水化学が重要な役割を担う。すなわち、事故の拡大抑制、事故収束までの比較的短期間の課題、事故炉廃炉工程での長期間に亘る課題などへの対応に加え、事故時に発生する放射性核分裂生成物への対応が特に重要となる。

最適な水化学管理を将来に亘り実践していくためには、常に水化学関連技術を発展させていく必要がある。

研究開発にあたっては、目標の明確化、既存技術の透明化を図ることで、大学・研究機関における水化学研究の活性化と効率化を図り、水化学の高度化のために新たなブレークスルーを生み出す努力が重要である。このような取り組みの成果は、国内の発電用軽水炉に留まらず、プラント運用技術（ソフトウェア）として、海外、特に、拡大が著しいアジア地域の原子力発電の安全性・信頼性の向上に資するものと考えられ、我が国の原子力産業の国際展開への寄与も期待される。

このように水化学分野は、将来に向け大きな可能性を有しているにもかかわらず、近年、技術者、研究者の高齢化が進んでおり、人材育成と技術の標準化が求められている。

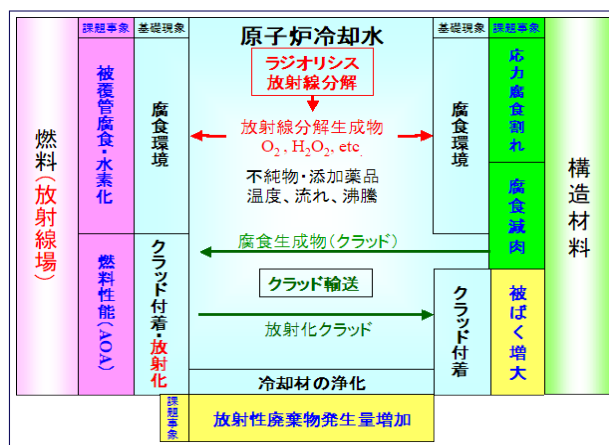


図1 構造材料、燃料と水化学の境界領域における諸課題¹⁾

3. 水化学ロードマップ2020 策定の目的

これまで水化学は、設備・機器の腐食抑制、被ばく線量低減、放射性廃棄物低減を通じて、プラントの安全性、信頼性、経済性向上に貢献してきた。水化学の基本的な役割は今後も変わらないが、エネルギー安定供給と地球環境保護の観点から、発電用軽水炉プラントの高経年化対応、燃料高度化、軽水炉高度利用の推進、そして原子力エネルギー利用の大前提となる不断の安全性向上を支援していく必要がある。水化学ロードマップは、このような取り組みにおいて新たに生じうる課題を予見すると共に、その事象を的確に把握し、効果的に対応するための研究の道筋について、その基盤と成果の活用を含め時間軸上に示したものである。

高経年化対応、燃料高度化、軽水炉高度利用の調和的実現に貢献していくためには、従来に増して、水化学分野における産官学及び学協会の適切な役割分担と、燃料や構造材料など関連分野を含めた協力連携が不可欠である。また、深層防護を構成するシナリオや技術要素は多岐に亘ることから、関係者間の認識の共有が必須である。水化学ロードマップはそのためのコミュニケーションツールとして作成される。

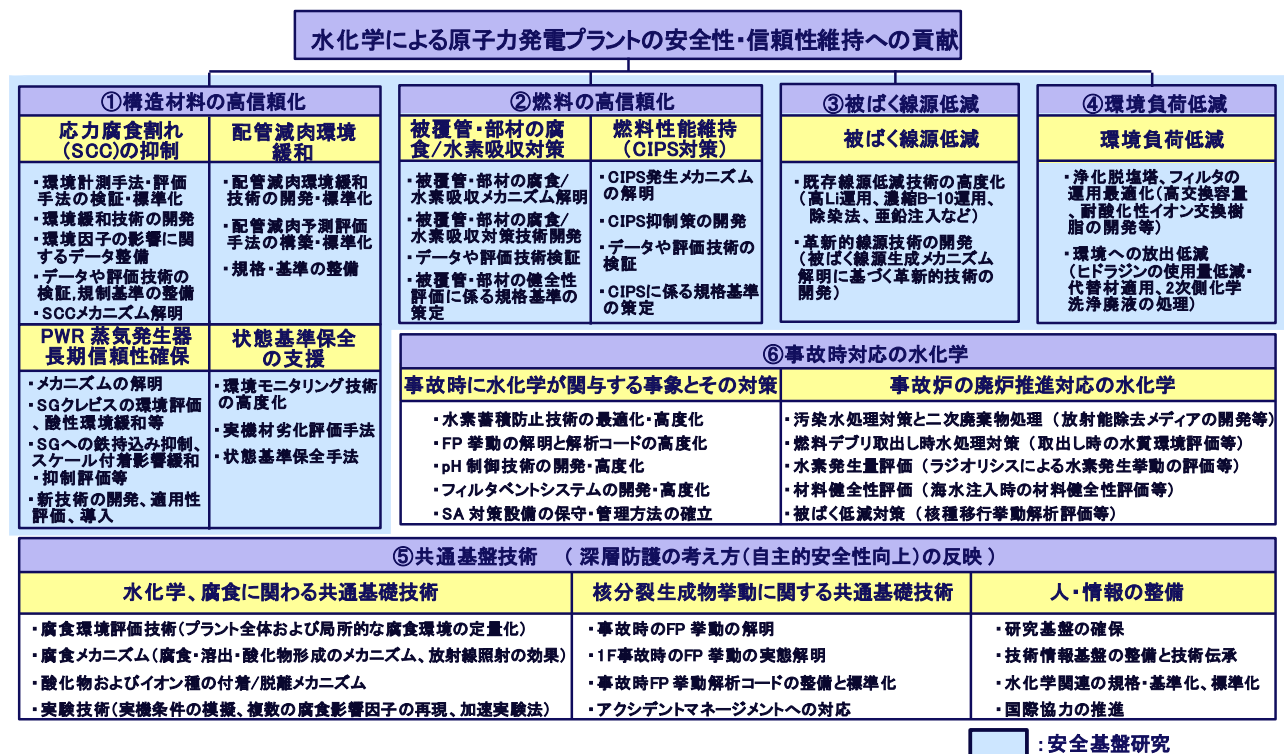
4. 水化学ロードマップ2020の概要

水化学ロードマップ2020では、第二次ロードマップで示された産官学の役割分担の考え方を引き継ぎ、「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」との整合や水化学の特徴を考慮し、下記の原子力基本法の精神に則り、取り纏めた。

① 原子力の研究開発、利用の促進（エネルギー資源の確保、学術の進歩、産業の振興）をもって人類社会の福祉と国民生活の水準向上とに寄与する。

② 平和の目的に限り、安全の確保を旨として、民主的な運営の下に、自主的にこれを行うものとし、その成果を公開し、進んで国際協力に資するものとする。

水化学ロードマップ 2020 では、水化学技術を安全基盤研究、基盤整備及び事故時対応の水化学の 3 つに整理した（図 2）。また、①構造材料の高信頼化は、HWC 効果の判断基準明確化、廃炉材を用いた従来水化学の妥当性検証、海水リーク等の影響、スケール付着抑制技術の適用効果、②核燃料被覆管の健全性維持は、事故耐性燃料（ATF）等の腐食対策、③被ばく線源低減は、通常運転時に加え既設炉の廃止措置等保管時の水化学、④環境負荷低減は、国の規制動向に鑑みヒドラジン代替剤、水質汚濁、⑤共通基盤技術は、放射性核分裂生成物挙動の解明、⑥事故時対応の水化学は、事故炉の廃炉推進対応の水化学など、新たな課題を抽出した。



■ : 安全基盤研究

図 2. 水化学の諸課題とそれらの相互関係

5. 深層防護との関連付け

1F 事故の教訓を踏まえて、深層防護の考え方は、従来の 3 層（異常発生防止、異常拡大防止、事故影響緩和）から過酷事故を含めた 5 層に拡大して再構築することが求められている。IAEA の考え方に基づけば、深層防護は下記の 5 段階に分類される。

レベル 1：異常運転や故障の防止

レベル 2：異常運転の制御及び故障の検知

レベル 3：設計基準内への事故の制御

レベル 4：事故の進展防止及び影響緩和を含む過酷なプラント状態の制御

レベル 5：放射性物質の大規模放出による環境影響の緩和

水化学ロードマップの従来のスコープは、レベル 1 に該当するものが中心であった。しかしながら、核分裂生成物の挙動や汚染水処理など、過酷事故（SA）のレベルにおいても水化学が果たす役割は大きい。したがって、今回の水化学ロードマップ 2020 では、レベル 1 や 2 に対する水化学の寄与について考察を深めながら、レベル 4 以上における水化学技術についても新たに章を設けて明記した（表 1）。

表 1 深層防護の観点から水化学に求められる防止対策

深層防護	レベル1	レベル2	レベル3		レベル4		レベル5
日本原子力学会における定義	異常・故障の発生防止	異常・故障の事故への拡大防止	事故の影響緩和		設計基準を越す自己への施設内対策		防災（核燃料RMでは地震時）
			Non LOCA	LOCA	SA前	SA後	1Fの廃止措置
	異常や故障等のトラブル発生防止のため、実証された技術に基づいて十分裕度のある設計を行うこと	トラブル発生時に直ちに検知、対応すること	事故に備え、その影響を緩和すること 設計基準事象に基づいて準備すること		シビアアクシデントを防止するための対策		—
水化学の安全目標	異常・事故の未然防止	異常・事故の早期検知	炉心損傷防止 溶解前のペレットのFP放出挙動の把握	冷却性能維持 FP放出抑制 溶解後のペレットのFP放出挙動の把握	公衆被ばく低減 事故後のFP挙動把握 炉心損傷防止	冷却性能維持 ペレット、燃料デブリからのFP放出抑制	—
水化学に求められる防止対策	構造材料の経年劣化の抑制と管理を目的とし、実証された技術や知見に基づいて十分な裕度を考慮した水化学管理、品質管理等に基づいた保守管理を行うこと	機器・配管等の腐食に起因した冷却材の漏えい等の機能喪失が起きた場合、直ちに検知し、冷却材の漏えいによる環境放出等の拡大を防ぐことを目的とした対策を講じること	環境への放射線放出を抑制し、環境への影響を緩和すること		設計基準を越すような事故状態に備え、SAを防止するための対策およびSAに至った後の影響を緩和するための対策を講じること		水化学の寄与は小さい

6. 水化学ロードマップ 2020 の成果の活用

水化学ロードマップに基づいて得られる研究成果は、以下の活用を前提とする。

- ① 既存発電用軽水炉プラントの高経年化対応、燃料高度化、高度利用、及びこれらを支える作業環境改善（被ばく線量低減）、自然環境への負荷軽減（放射性廃棄物の発生抑制）など水化学固有課題の調和的解決に資する。
- ② SA を含めた 5 層構造に拡大された深層防護の再構築、ならびに安全性向上の PDCA サイクル推進に資する。
- ③ プラントの安全に係わる成果は、アウトプットの一つとして規格・基準類の整備に反映していく。また、これら水化学関連の規格・基準類の整備に際しては、プラントの維持管理（評価、検査、補修）や、新検査制度（評価指標、予防保全）に係わる規格基準類との連携を念頭に置く。
- ④ 革新的な技術成果については、我が国原子力産業の国際展開に繋げると共に、開発中の次世代型軽水炉の設計に反映する。
- ⑤ 上記について、国際協力の観点から、原子力発電を推進する国々と情報交換し、水化学研究の効率的な推進と活用を図る。特に、大幅な増大が見込まれるアジア地域の原子力発電の安全と定着を支援するために活用する。

参考文献

- 1) “日本原子力学会 水化学ロードマップ 2009”、（一社）日本原子力学会 水化学部会、ダウンロード文書 <http://www.aesj.or.jp/~wchem/RM2009.pdf>.

*Hiroataka Kawamura¹, Yutaka Watanabe²

¹Central Research Institute of Electric Power Industry, ²Tohoku University

水化学部会セッション

水化学ロードマップフォローアップの状況と概要

General Picture of the Updated Roadmap of Reactor Water Chemistry

(2) 安全基盤研究（被ばく低減、SCC 抑制、燃料性能維持）

(2) Fundamental Study for Nuclear Safety Improvement (Dose Reduction, SCC Mitigation, Fuel Integrity)

*杉野 亘¹¹ 日本原子力発電（株）

1. はじめに

本稿では、水化学ロードマップ 2020 のうち、「安全基盤研究」に分類される構造材料の高信頼性化、燃料の高信頼化および被ばく線源低減、並びに環境負荷軽減について紹介する。

2. 構造材料の高信頼性化

2.1 応力腐食割れ（SCC）の抑制

SCC 環境緩和はプラントの安全性確保・公益性向上に大きく貢献できるポテンシャルを有しているが、その有効性が広く認知されるに至っておらず、プラント維持管理（点検・補修・取替）とのリンクも不十分である。（一社）日本機械学会が制定した「発電用原子力設備規格 維持規格」には、環境緩和の効果を取り入れた SCC 進展線図が示されているが、実プラントではこれに基づく維持管理の合理化には至っておらず、早期にその実現を図ることが必要である。特に、予防保全としての SCC 環境緩和の効果を検討した設備の点検・補修・取替の方法を、関連分野との協力の下、ガイドラインとして整備する必要がある。また、今後、新検査制度における保全活動、あるいは、評価指標としての活用の観点からも、SCC 環境緩和の検討を深めていく必要がある。そのため、以下に示す技術の開発や高度化、ならびに、検証と標準化に取り組む。

- ・ SCC 環境計測手法・評価手法の高度化・検証・標準化
- ・ SCC 環境緩和技術の開発・高度化
- ・ SCC 発生進展に及ぼす環境因子の影響に関するデータ整備・高精度化
- ・ データや評価技術の検証、規制基準の整備
- ・ SCC メカニズム解明

2.2 配管減肉環境緩和

配管減肉管理は、（一社）日本機械学会が制定した「発電用原子力設備規格 加圧水型／沸騰水型原子力発電所 配管減肉管理に関する技術規格」に基づいて実施されており、この技術規格により体系化して整理されたため、それ以前の管理と比べて、飛躍的に安全性が向上した。但し、現在の減肉管理は、十分に裕度を持って設定された減肉速度や肉厚測定結果に基づき算出した減肉速度の実績に基づいて設定されているため、新たな環境緩和技術を適用して減肉が抑制されても、肉厚測定結果が蓄積しないと減肉管理に反映できない体系となっている。今後、安全性の更なる追求と合理性の調和を達成するために、以下の技術開発をすすめていく。

- ・ 配管減肉防止技術・環境緩和技術の開発・標準化
- ・ 配管減肉予測評価手法の構築・標準化
- ・ 規格・基準の整備

2.3 PWR 蒸気発生器長期信頼性確保

国内 PWR では、蒸気発生器（SG）伝熱管材料として、より耐食性の高い TT600、TT690 合金を採用した新型 SG に取り替えるとともに、種々の水質改善対策が適用された結果、SG 二次側の信頼性にかかわる腐食

損傷は顕在化していない。しかし耐食性の高い TT600、TT690 合金においても、不純物の持ち込みにより構造上の隙間（クレビス）内部の環境が酸あるいはアルカリ側に大きく偏った環境下で酸化剤の作用により腐食電位が上昇した場合は、粒界割れ（IGA）発生感受性を有している。また、2 次系系統で材料の FAC 等の腐食によって発生した鉄が SG へ持ち込まれ、構造物に付着して、伝熱抵抗、流動抵抗となり機器の性能劣化現象が顕在化するとともに、クレビス部にスケールが蓄積することで損傷発生リスクが増大している。そこで、SG の長期信頼性およびプラント安定運転を確保していくため、以下に示す技術の高度化あるいは新技術の開発に継続的に取り組んでいく。

- ・ メカニズムの解明（SG 伝熱管腐食、スケール付着）
- ・ SG クレビスの環境評価、酸性環境緩和、濃縮環境緩和に関する技術開発
- ・ SG への鉄持ち込み抑制、スケール付着影響緩和・抑制評価、除去・改質に関する技術開発
- ・ 新技術の開発、適用性評価、導入（代替ヒドラジン、スケール分散剤）

2.4 状態基準保全の支援

SCC や流れ加速型腐食（FAC）等の経年劣化事象について、材料・応力・環境面から多面的に計測・評価可能なモニタリング技術を開発・適用することで、長期にわたる経年劣化の予測評価精度の向上や状態基準保全の充実が期待される。経年劣化予測や状態基準保全は、設備の信頼性向上による事故発生リスクの低減、冷却材の異常兆候の早期検出によるプラント運転管理への判断材料の提供につながるため、事故発生防止および拡大防止に貢献することができる。そこで、状態基準保全への支援として、以下の課題に取り組む。

- ・ 環境モニタリング技術の高度化
- ・ 実機材劣化評価手法
- ・ 状態基準保全手法

3. 燃料の高信頼性化

3.1 被覆管・部材の腐食/水素吸収対策

1F 事故を契機に、核燃料分野において、FP 放出低減/温度上昇抑制ペレットの開発と通常時材料劣化低減被覆管の開発が加速されるとともに、事故時高温酸化劣化抑制部材や事故耐性燃料の開発が求められるようになった。改良型燃料の導入に際しては、被覆管や部材の材質変更に及ぼす水化学の影響を事前に評価しておく必要がある。また、新たな水化学技術の導入に際しても、現行燃料の被覆管や部材の腐食対策及び水素吸収特性に及ぼす水化学の影響の有無を事前に評価しておく必要がある。しかし、ジルコニウム合金のブレーカウェイ現象の原因や水素吸収機構について、影響因子の定量的影響や重畳効果は判っておらず、理解の統一に至っていない。そこで、以下の課題に取り組んでいく。

- ・ 被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明
- ・ 被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発
- ・ データや評価技術の検証
- ・ 被覆管・部材の健全性評価に係る規格基準の策定

3.2 燃料性能維持（CIPS 対策）

クラッド誘起型出力シフト(CIPS)は、クラッドが燃料の軸方向に不均一に付着し、ほう素の不均一析出により、炉心の軸方向の線出力分布(偏差)に異常を生じる事象であり、事象の進行によって、炉心の安全性や燃料の健全性に問題を生じる可能性がある。CIPS の発生は、クラッド付着・剥離と密接に関連しているが、クラッド付着・剥離のメカニズムが水化学因子や熱水力因子が複雑に関与すること、さらに、炉水中のほう素取り込み機構の影響も受けることから、全体のメカニズムは明確になっていない。そこで、以下の課題に取り組んでいく。

- ・ CIPS 発生メカニズムの解明
- ・ CIPS 対策技術の開発

- ・ データや評価技術の検証
- ・ CIPS に係る規格基準の策定

4. 被ばく線源低減

我が国の原子力発電プラント1基当たりの年間平均線量（以下、「平均線量」という）は90年代後半以降、諸外国と比較して高く推移しており、この原因は1サイクルあたりの運転期間の違いによる年間作業量の違いによるとの指摘があった。しかしながら、米国やスウェーデンでは近年も着実に減少傾向にあることから、単純に年間作業量の違いのみとは言い切れず、我が国の被ばくの現状を詳細に分析し、更に被ばく低減を進める必要がある。

また我が国の原子力発電プラントでは震災後に長期停止を余儀なくされているが、長期停止による線源核種の減衰と作業量の減少に伴い、平均線量は震災以前より大幅に低減しているが¹⁾、再稼働後の平均線量がどのように推移するか注目される場所である。再稼働後も現状の線量を維持するためには、既存技術の着実な適用のみならず、新規の水化学技術の開発・適用が望まれる。

そこで、以下の課題について、技術開発とメカニズム解明を並行して進めていく。

- ・ 既存線源低減技術高度化（高Li運用、濃縮B-10運用、除染法、亜鉛注入など）
- ・ 革新的線源低減技術開発（被ばく線源生成メカニズム解明に基づく革新的技術の開発）

5. 環境負荷軽減

原子力発電プラントでは、材料・燃料の信頼性・健全性の維持確保や業務従事者の被ばく低減などを目的とした水化学制御を運用していくなかで、副次的に放射性廃棄物（使用済イオン交換樹脂、フィルタなど）や制御用薬品を含む排水などが発生してくる。今後、長期サイクル運用や出力向上運転などプラント高度化と新たな水化学制御の適用に鑑み、水化学技術改善と両立させた廃棄物／排水処理の最適運用を目指し、環境負荷の少ない発電プラントとして環境への影響を低減することが重要である。そこで、以下の課題について、改善策を立案し、実機適用実績を踏まえたPDCAサイクルを確立する。

- ・ 浄化脱塩塔、フィルタの運用最適化（高交換容量、耐酸化性イオン交換樹脂の開発等）
- ・ 環境への放出低減（ヒドラジンの使用量低減・代替材適用、2次側化学洗浄廃液の処理）

参考文献

- 1) A.SUZUKI, “The Radiation Management Reported by Licensees and the Relevant Regulations Amendment in Japan”, 2018 ISOE international Symposium, October, 2018, ダウンロード文書, <http://www.isoe-network.net/publications/pub-proceedings/symposia/international-symposia/kyoto-japan-october-2018/slides-38/4075-suzuki2018-ppt/file.html>

*Wataru Sugino¹

¹The Japan Atomic Power Company

水化学部会セッション

水化学ロードマップフォローアップの状況と概要
General Picture of the Updated Roadmap of Reactor Water Chemistry

(3) 共通基盤技術 (FP 挙動関連)

(3) Enhancement of Fundamental Knowledge Base (in relation with Fission Products Behaviour)

*高木 純一¹, 内田 俊介²¹東芝エネルギーシステムズ, ²日本原子力研究開発機構

1. はじめに

水化学ロードマップ 2020 のとりまとめに当たっては、福島第一原子力発電所 (1F) 事故の教訓から、これまで記載の無かった核分裂生成物 (FP) 挙動についての記載が必須との合意が水化学ロードマップフォローアップ検討 WG 内で得られた。FP の生成、蓄積、事故時を中心とした燃料からの放出、移行挙動に関する基礎事象を体系化し、これまで体系的な研究がなされてきた放射性ヨウ素に加えて、比較的データの少ない放射性セシウム、ストロンチウムなどの挙動に関するデータを整備することが強く望まれている。

水化学ロードマップ 2009 では、「水化学共通基盤技術」として、燃料・構造材の腐食あるいは付着物析出に起因する諸事象の本質を理解し、燃料・構造材の健全性を確保し、同時に、線量率の低減・廃棄物発生量の抑制を図るための水と燃料・構造材の相互作用の基礎メカニズムの解明と、プラント全体の腐食環境の把握に不可欠な「水化学、腐食に関わる共通基盤技術」を取り上げてきた。今回、水化学ロードマップ 2020 では、これに加えて、「核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術」を取り上げることとした。

今回の水化学ロードマップのローリングの主眼は、1F 事故を受けて、深層防護レベルに対応した水化学の研究開発の位置づけを明確にしてロードマップを見直すことにあり、先にすべての項目について深層防護レベルとの対応を述べたが、「水化学共通基盤技術」についても深層防護の各レベルとの対応を明確にした。

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

安全基盤研究 (被ばく低減、SCC 抑制、燃料性能維持) と本基盤技術との関連は比較的希薄であるが、深層防護レベル 4 までの評価を行う上では、FP 挙動との関わりが生ずる。また、事故時対応の水化学は FP 挙動と深く関わる。すなわち、汚染水の処理処分、建物の汚染とその除染あるいは環境汚染の修復についても、線源である FP 挙動とは密接に関わる。このため、FP 挙動の共通事象を理解して対応するための基盤技術として、水化学ロードマップ 2009 に記載された「水化学、腐食に係わる共通基盤技術」に加えて、「核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術」をまとめておくことが重要である。

2.1 核分裂生成物の種類と主な特性

ウランあるいはプルトニウムは、核分裂の結果、2個余の中性子を放出し、2つのFPを生じる。実際には、トリチウムを含む3体に分裂するケースもある。FPは質量数の等しいものに分裂するよりも、質量数の異なる2つのグループの原子核に分かれる。例えば、¹³¹I、¹³⁷Csなどに代表される質量数130付近の比較的重い元素と⁹⁹Mo、⁹⁰Sr、⁹⁵Zrなどに代表される質量数90付近の比較的軽い元素の2つのグループが主なものである。

表 1 に、短期・中期・長期的な観点で重要となる主な FP を示す。これらの FP は、燃料中においては以下に示すような物理化学状態で存在しており、事故時における燃料からの放出挙動や化学形態に影響を与える。

ウランまたはプルトニウム酸化物に固溶：全 FP のほぼ半数、Sr, Y, Zr, La, Ce, Nd 等

酸化物析出相を形成：ウランまたはプルトニウム酸化物への固溶限度あり、Ba, Nb 等

金属析出相を形成：Tc, Ru, Rh, Pd, Mo の一部

揮発性 FP：存在状態が完全には解明されておらず、状態に応じて、酸化物へ固溶、低温領域で凝縮相形成、

CsI, Cs₂MoO₄, Cs₂Te, Br, Rb, Te, I, Cs 等

FP ガス：低固溶率で酸化物相に固溶、粒内または粒界にバブルとして析出、Kr 及び Xe

表1 短期・中期・長期的な観点で重要となる主な核分裂生成物

短期		中期				長期			
FP	半減期	FP	半減期	FP	半減期	FP	半減期	FP	半減期
⁸⁸ Kr	2.8 h	⁹⁵ Zr	64 d	¹⁴⁰ Ba	12.8 d	³ H	12.3 y	¹³⁴ Cs	2.1 y
⁹¹ Sr	9.5 h	⁹⁹ Mo	2.8 d	¹⁴¹ Ce	32 d	⁸⁵ Kr	10.7 y	¹³⁷ Cs	30.1 y
⁹⁷ Zr	17 h	¹⁰⁵ Ru	39 d			⁹⁰ Sr	28.6 y	¹⁴⁴ Ce	284 d
¹⁰⁵ Ru	4.4 h	¹²⁷ Sb	3.8 d			¹⁰⁶ Ru	1.0 y	¹⁵⁴ Eu	8.6 y
¹³³ I	20.8 h	¹³¹ I	8.0 d			^{110m} Ag	0.7 y		
¹³⁵ Xe	6.6 h	¹³¹ Xe	5.2 d			¹²⁵ Sb	2.8 y		
¹⁴³ Ce	1.4 d	¹³² Te	3.2 d			¹²⁹ I	1.57x10 ⁷ y		

2.2 開発項目と現状分析

① 事故時の FP 挙動の解明

シビアアクシデント (SA) 時の FP 挙動の基礎の解明が重要である。実際の燃料体からの FP の放出とその移行については Phébus FP プロジェクト実験が知られているが、1F 事故時に問題となったセシウムについては必ずしもデータが多くない。過去の知見との技術的なギャップを埋める新たな研究開発が必要とされる。

② 1F 事故時の FP 挙動の実態解明

1F 事故時の FP 挙動を Phébus FP プロジェクト実験と対比させてきたが、現状では、まだ 1F 事故時の FP 挙動を十分に把握できていない。今後、継続的に実機のデータ収集と分析を続け、既存データおよび知見で理解できるものと新たなデータベースが必要なものとに弁別し、実態解明を進める必要がある。

③ 事故時 FP 挙動解析コードの整備と標準化

既存の SA 解析コードを Phébus FP プロジェクト実験データに基づくベンチマーク評価に用い、今後の SA 解析の高度化に資する。また、1F 事故と Phébus FP プロジェクト実験データの技術的なギャップを、SA 解析コードを活用して解決する。

④ アクシデントマネージメントへの対応

原子力発電所に関する新規規制基準の制定に伴い、発電プラントにおいては深層防護の考え方に則り、従来のレベル3を超えたレベル4対応を、アクシデントマネージメントとして明確化していくことが必要となる。また、その前提として、レベル4事象発生時のFP挙動に対する基礎的な知識を広く共有することが重要である。

2.3 研究方針および研究開発推進体制

1990 年代後半までは、チェルノブイリ原子力発電所事故を受けて SA に関する研究が活発で、ヨウ素を中心とする FP 挙動関連の研究が積極的に進められた。しかし、2000 年代に入ると、急激に関心が薄れ、FP を研究対象とする研究者、技術者が減少した。今後、FP 関連の技術を再整理し、次世代への確に技術伝承して行くことが不可欠である。このため、2017 年 6 月、日本原子力学会に「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会が設置され、現状の分析、関連データの収集、技術課題の発掘が進められており、共通基盤技術の整備と同時に人と情報の整備への寄与が期待されている。

3. まとめ

水化学ロードマップ 2020 では、1F 事故を契機に FP 挙動に関する共通基盤技術の整備を行う。そのため、日本原子力学会に「SA 時の FP 挙動」研究専門委員会を設置し、技術継承を図りつつ活動を継続していく。

参考文献

- 1) 日本原子力学会水化学部会「核分裂生成物挙動」研究専門委員会準備会、「Phebus FP プロジェクトにおける核分裂生成物挙動のまとめ - 福島プラント廃炉計画およびシビアアクシデントと解析への適用」、水化学部会報告 #2017-0001 (2017).

*Junichi Takagi¹, Shunsuke Uchida²

¹Toshiba Energy Systems & Solutions Corporation, ²Japan Atomic Energy Agency

水化学部会セッション

水化学ロードマップフォローアップの状況と概要
General Picture of the Updated Roadmap of Reactor Water Chemistry

(4) 事故時対応の水化学

(4) Water Chemistry During and After a Severe Accident

*長瀬 誠¹¹日立GEニュークリア・エナジー（株）

1. はじめに

事故時対応の水化学では、以前の水化学ロードマップで取り扱っていた水化学とは異なり、事故時に燃料体から放出された放射性核分裂生成物（FP）への対応が主となる。事故時対応の水化学の基礎基盤となる FP 挙動については、(3)共通基盤技術（FP 挙動関連）に記載された通りである。ロードマップ 2020 で新たに追加された事故時対応の水化学の章では、事故時対応の水化学の主要課題の変遷と、事故時に水化学が関与する事象とその対策、および事故炉の廃炉を推進する上で必要な水化学について記載している。

2. ロードマップの概要

2.1 事故時対応の水化学主要課題の変遷

商用原子炉の運転開始初期に見られた燃料損傷の問題は、燃料の改良が進み、1980 年代以降燃料破損に伴う FP の環境への放出などの課題は縮小した。一方、1979 年の スリーマイルアイランドや 1986 年のチェルノブイリの事故により従来の仮想事故を想定した対応だけでは不十分で、深層防護のレベル 4 に対応するシビアアクシデント（SA）への対応が要求されるようになり、FP の放出移行挙動や事故時の水素の爆燃・爆轟の研究などが精力的に行われた。また、SA 対策としてのイグナイターやフィルターベントの設置が普及したが、2005 年には Phébus FP プロジェクト研究も終了して研究開発は大幅に縮小した。2011 年の福島第一原子力発電所（1F）の事故を受けて、ソースターム評価の重要性と FP 挙動に係わる研究の重要性が再認識されたが、人材の散逸などによる技術の空洞化の課題が指摘されている。

2.2 事故時に水化学が関与する事象とその対策

起因事象の発生から事故が収束して安定冷却が達成されるまでの期間を事故時と定義し、この間に原子力安全に関して水化学が関与する事象としては、格納容器の健全性を脅かすジルコニウム-水反応などによって発生する水素の爆発と、燃料体から放出された FP の環境への放出量を物理的・化学的方策により抑制することである。すなわち、以下の 2 つの対策が挙げられる。

- 水素の蓄積防止（PAR などによる水素の再結合）
- 放射性ヨウ素の水中への保持（冷却水の pH 制御）

これらの対策設備は、既に世界の他のプラント等で導入実績のあるもので、現在の事故シナリオとリスク評価の観点から直ちに新たな研究開発が必要となる事項はないが、新たな知見などが得られた場合には見直しが必要になると考えられる。

2.3 事故炉の廃炉推進対応の水化学

1F 事故炉の廃炉推進に向けて取り組むべき水化学の課題としては、以下の 4 つの項目を抽出した。

- 汚染水処理対策と二次廃棄物処理（汚染水からの放射能除去メディアの開発、モデル化）
- 燃料デブリ取り出し時水処理対策（燃料デブリ取り出し時の水質環境評価と水処理システムの構築）
- 水素発生量評価（ α および β γ ラジオリシスによる水素発生挙動の評価と不純物の影響）
- 材料健全性評価（海水注入時の構造材料健全性評価と長期的な構造材料健全性評価）

抽出した課題は、1F の廃炉作業を進めていく上で重要であり、今後の研究開発の推進が望まれる。

*Makoto Nagase¹¹ Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.