解説

原子炉水化学ロードマップ

「水化学ロードマップ検討」特別専門委員会

日本原子力研究開発機構 内田俊介, 東京大学 勝村庸介,
日立-GE ニュークリアエナジー(株) 布施元正, 東京電力(株) 高守謙郎,
原子燃料工業(株) 土内義浩, 原子力安全基盤機構 前田宣喜

原子炉水化学は、従事者の受ける線量の低減、構造材および燃料健全性の維持・向上ならびに放射性廃棄物発生量の低減等において重要な役割を果たしてきた。今後も、軽水炉利用の高度化、燃料の高度化、プラントの高経年化対応等の課題に対して、一層の貢献が求められている。一方で、水化学は、接液するすべての構造、材料に影響を及ぼすと同時に、その影響を受けるため、上記諸課題への貢献に際しては、特定の課題にのみ偏ることなく、プラント全体を俯瞰した最適な制御が求められる。平成17～18年度に、原子力安全基盤機構からの請負契約により、産官学の役割分担・取組みを念頭において調和的な研究・開発戦略シナリオを水化学ロードマップとしてまとめた。水化学全体を、共通基盤技術ほかの合計11課題に分割し、それぞれのターゲットと対応策を示した。

I. はじめに

軽水炉の安全性および信頼性確保に関する研究には、明確な戦略と計画が必要とされている。このため、日本原子力学会では、平成16年度に原子力安全基盤機構からの請負契約により、産官学の専門家が参加する特別専門委員会を組織して、安全性および信頼性確保に係わる主要な課題である「燃料の高度化」、「高経年化対応」および「軽水炉利用の高度化〔炉出力向上〕」についてロードマップをまとめた¹⁾。この中でも、燃料・構造材の信頼性向上に対する水化学の寄与は議論されているが、水化学の特徴は、燃料・構造材のいずれとも相互作用することで、このためそれぞれを独立に議論するよりも、プラントシステム全体を包括的に捉えた議論によって、水化学の特徴がさらに明確になる。また、放射性腐食生成物の発生、放射化、蓄積、除去といった軽水炉固有で、しかもプラントの線量率増大あるいは放射性廃棄物発生量増大に影響する水化学固有の切り口からの議論も不可欠と考えた。このため、平成17～18年度に原子力安全基盤機構からの請負契約により、新たな特別専門委員会を組織して、原子炉水化学についてのロードマップをまとめた²⁾。

(内田俊介, 前田宣喜)

Road Maps on Research and Development Plans for Water Chemistry of Nuclear Power Systems : Special Committee on "Water Chemistry Road Maps" Shunsuke UCHIDA, Yosuke KATSUMURA, Motomasa FUSE, Kenro TAKAMORI, Yoshihiro TSUCHIUCHI, Noriyoshi MAEDA.

(2008年 2月1日 受理)

II. 水化学ロードマップのねらいとその意義

軽水炉において冷却水に求められる主な役割は、原子炉からタービンへのエネルギー輸送と核分裂維持のための中性子の減速であるが、高温の冷却水が構造材、燃料被覆材と接触することにより、腐食に起因するさまざまな事象が派生する。また、冷却水はさまざまな構造、材料の間を流れて、さまざまな材料の影響を受け、同時に影響を与える。このため、特定の部材に偏ることなく、すべての材料にとって好ましい冷却水水質が望まれる。

技術課題を、燃料、構造材、冷却水、廃棄物、それぞれに係わるものに分類し、各課題に係わる基礎現象、実機事象、実機課題を明示した(第1図)。これらを横糸とすると、水化学には、各実機事象、各実機課題(横糸)を

第1図 水化学と構造材、燃料被覆材との相関関係

つなぐ水化学制御という縦系の機能がある。水化学の最適化に当たっては、プラント全体を俯瞰して、各実機課題(横系)への確実な対応と同時に、いずれの課題に対しても悪影響を与えることのない水化学制御(縦系)が必要となる。また、最適化に当たっては、各基礎現象、各実機事象、各実機課題と水化学を定量的につなぐための現象、事象のモデル化が必須となる。

水化学ロードマップの検討では、最終目標を「水化学による原子力発電プラントの安全性及び信頼性維持への貢献」として、被ばく線源の低減など水化学の固有課題、構造材料関連課題、燃料材料課題の3つのグループでの問題点の抽出を行った。各グループおよび共通基盤技術について、第2図に示す合計11の課題に分割して、各課題について目標と対応戦略を4期20年にわたる水化学ロードマップとしてまとめた。さらに74の具体的項目に細分して、それぞれについて詳細調査票を作成して、新たなブレークスルーを生み出す基礎研究の活性化と産官学の連携による投入研究資源の重点化と開発の効率化により、新しい最適水化学制御技術を確立することを目指した。第1表に水化学に係わる研究開発の展開の全体像を示す。

(内田俊介)

Ⅲ．線量率の低減と放射性廃棄物の発生抑制

一時、世界トップレベルにあったわが国の「放射線作業従事者の集団被ばく線量」は近年、残念ながら諸外国と比較して高く推移している。プラントの線量率は諸外国に比べ必ずしも高くないが、点検・保守作業に係わる作業量が多いことが集団被ばく線量の差に現れている(第3図)。諸外国でも一層の線量率低減の努力が続けられていることを配慮すると、プラント運用の高度化に伴う線量率上昇の可能性を阻止するとともに、更なる線量率の低減を推進し、検査制度見直し等による作業量低減と合わせて、適切な被ばく線量低減対策を進める必要がある。

一方、「個人被ばく線量」は規制値を十分満足する管理がなされているが、熟練技術者を確保し、高度な点検・保守作業を余裕を持って行うためにも、線量率低減等の作業環境の改善に継続して取り組むことが水化学の使命である。線量率の低減は、点検・保守作業の円滑化により、プラントの信頼性向上に貢献するのみでなく、社会の原子力発電に対する安全・安心意識の醸成に対しても貢献する。しかし、線量率低減策は、放射性廃棄物発生量を増大させる可能性もあるため、線量率低減と放射性

第2図 水化学ロードマップの主要課題の相関および既存ロードマップとの関係

第1表 水化学に係わる研究開発の展開

	ターゲット				プロセス
	'07 第I期	'12 第II期	'17 第III期	'22 第IV期	
最適水化学制御	世界トップの低線量率達成				最適水化学制御
・被ばく線量低減	腐食生成物蓄積のプロセス別低減				燃料・構造材の信頼性向上と線量率低減のトレードオフ
・構造材の高信頼化	構造材の信頼向上のための水化学制御				構造材の寿命延長のための水化学制御
・燃料の高燃焼度化	照射下での腐食環境の緩和と腐食への影響抑制				腐食環境の緩和と材料対策による長寿命化対応
定検の期間短縮・間隔伸長	直接照射下での腐食環境定量化				燃料部材の腐食・水素吸収の機構論的評価のための水側機構の解明
水化学規準の作成と確立	状態監視保全への寄与				安全実績指標による定検間隔最適化
	水化学指標による構造材料異常の早期検知				水化学指標による構造材料異常の予知
	腐食損傷の水化学への影響の定量化と水化学管理の民間規格				材料・冷却水相互作用のモデル化と水化学の材料への長・中期影響の予測
	水化学の体系化、理論化、ドキュメント化				腐食環境緩和評価手法の標準化、ドキュメント化そして透明化

第3図 被ばく線量の状況と線量低減の取組み

廃棄物発生量低減のトレードオフに留意することが肝要である。

以上から、水化学による被ばく線量低減の目標として、わが国の原子力発電プラントにおいて、将来にわたって国際的にトップレベルの低線量率プラント（クリーンプラント）を実現することとした。

被ばく線量の原因となる配管や蒸気発生器などの機器への ^{60}Co 、 ^{58}Co などの放射性腐食生成物の蓄積は、材料の腐食に伴うコバルトなどの微量成分の溶出と燃料表面への付着・放射化、さらにそれが冷却水により各部位に運ばれ沈着するという複雑な過程を経る。このため、これまででも多くの検討がなされてきたが、一段階上の低減策を確立するためには、溶出、沈着の基礎挙動に対する一層の理解が不可欠であり、基礎研究を進める学术界と産業界との有機的な連携による新たなブレークスルーを得て、高度な課題に挑戦したい。

さらに、新保全プログラム導入の動きとも連動し、安全実績指標(PI)等を活用したクリーンプラントの定量化、可視化を進めることにより、総合的な被ばく線量低減のための合理的なシナリオ策定・見直しが可能となるものと期待される。（布施元正）

IV. 構造材料の腐食損傷と腐食環境緩和による高経年化対応

原子炉水化学技術はこれまで構成材料の健全性維持に大きな役割を果たしてきた一方で、今後も原子力プラントの高経年化対応等においてますます貢献が求められている。応力腐食割れ(SCC)については、「実用発電用原子炉施設における高経年化対策の充実について(平成17年8月31日、原子力安全・保安院)」や「高経年化ロードマップ(平成17年3月、日本原子力学会)」等の報告において、応力腐食割れの抑制が高経年化対策の重点項目として抽出されており、既存の腐食環境緩和策の高度化や新たな技術開発が望まれている。また、維持規格の導入によりこれまで単に予防保全の1つであったこれら腐食環境緩和策は、その適用や効果の有無がき裂進展評価

や点検頻度の設定にも関連する位置づけとなった。このため、腐食環境緩和策の規格化による維持規格での適用が管理の高度化においても求められている。

流動加速腐食(FAC)による配管減肉については計画的な点検を中心に管理が進められてきているが、「高経年化対策の充実に向けた基本的考え方(平成17年4月、原子力安全・保安院)」においては、減肉傾向が大きい箇所は点検の頻度が高く、取替えなどの対策が進む一方で、比較的減肉傾向が小さい部位については高経年化により減肉が進むケースがあることが予想されるため、今後は減肉発生状況のデータベース化と分析および減肉メカニズムの解明に基づく評価管理手法の確立が有用であるとしており、減肉評価の高度化について水化学技術の研究開発が望まれるところである。

また、「原子力発電施設に対する検査制度の改善について(案)平成18年9月、原子力安全・保安院」や「検査のあり方検討会」において、高経年化対策の充実のために状態監視保全や運転中を含めた新しい監視・評価技術の導入が有効であると検討している。将来的には材料の劣化パラメータとしての腐食環境のモニタリングを通じて状態監視保全を支援することが望ましく、原子炉冷却系の腐食環境測定・評価技術の高度化を進めてゆく必要がある。

腐食環境緩和策については個々の事業者が単に材料劣化抑制方策として任意に展開するのみでなく、適用効果を明確に示し、効果的な運用方法を定め、規格・基準化等を通じて高経年化対応における点検・評価の高精度化・合理化に反映すること、さらに状態監視保全を支援することが望まれる。これにより予防保全効果の向上によるプラント信頼性向上、稼働率向上、被ばく低減、原子炉高度利用化支援、コストダウンへの貢献が期待される。同時に、モニタリングや適切な情報発信の組合せによって「見える化(プラントの状態が外部から見えるようにしておくこと)」に資することができ、安全・安心意識の醸成も期待される。具体的には、

- (1) SCC/FAC緩和のための既存技術の高度化と新たな水化学制御技術の開発
 - (2) 実機腐食環境モニタリング技術およびSCCモニタリング/FAC評価技術の開発
 - (3) 腐食環境緩和技術/クライテリアの規格・基準化と腐食環境緩和効果の点検規準への反映
- に重点を置いた施策を推進する。（高守謙郎）

V. 燃料高度化における被覆管の腐食および水素吸収に対する水化学の課題

原子炉における冷却材としての水は、燃料、構造材ともに直接接している。このため、基本的には燃料の健全

性を確保しつつ、被ばく線量の上昇を抑制し、構造材の健全性を確保するための水化学手法の適用が望まれる。従来、冷却材への亜鉛注入やPWRの1次冷却材における運転サイクル初期のリチウム濃度上昇のように、被ばく線量や高経年化の観点から構造材の腐食やSCCの抑制に重点を置いた水化学手法の適用が行われ、燃料の健全性確保については被覆管・部材の腐食や水素吸収挙動が適用前後で有意に変化しないことを確認することで対応してきた。国内プラントにとって被ばく線量の低減や高経年化対策に主眼をおいた水化学の改良は今後も重要であるが、実機先行照射による実証試験型の燃料健全性評価は長い年月と膨大なコストを要することから、腐食および水素吸収の評価に適用する手法を、メカニズムに立脚しつつ、より合理的なものに改良していくことが望まれている。

ジルコニウム合金の腐食量や水素吸収量は燃焼度に対して比例的に増加することはわかっており、温度、時間等をパラメータとした経験式に基づくモデル化は行われているが、腐食や水素吸収のメカニズムについてはその複雑さゆえに統一的な理解には至っていないため、今後積極的な研究が望まれる。また、ラジオリシスによる水分解生成物、水中添加物・不純物、クラッドや放射線の影響を分析し、より精緻なモデルを構築する必要がある。

モデル開発および健全性評価のためには、実証のために必要な照射試験環境やモニタリング技術等の試験関連設備からなる試験技術の整備も重要である。さらに、実機燃料挙動に関するデータベースを構築・拡充し、モデル評価結果との比較検討によってモデルに改良を加えつつ実証性を高めていく。整備されたモデルについては、産官学が連携して標準化に努める。

このように新しい燃料健全性評価手法確立にあたっては、腐食および水素吸収モデルの開発、検証、標準化等が必要である。また、燃料、水化学ともに高度化が図られる中で、このような成果を燃料分野に展開していくためには、水化学分野と燃料分野が協調を図ることが重要である。

このような戦略的シナリオを踏まえ、燃料被覆管・部材の腐食および水素吸収抑制に係わるロードマップを作

成した。炉出力向上や柔軟な運転サイクルといったプラントの高度化に伴って燃料への負荷が増大する中で、新しい水化学の適用範囲を検討するためには、より優れた燃料健全性評価手法が必要であるが、その必要性和関連技術の整備状況に合わせて、従来の現象論的な手法から機構論的な手法に徐々に移行していくことが合理的と考えられる。また、腐食メカニズムの理解を深めることで、水化学による燃料健全性の裕度向上開発の可能性も考えられる。

(土内義浩)

Ⅵ. 水化学共通基盤技術

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すると同時に、線量率の低減・廃棄物発生量の抑制を図るためには、水と被覆材・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が不可欠である。原子炉における腐食環境が火力発電プラントの他の冷却系と本質的に異なる点は、放射線照射の影響が顕著である点である。

放射線の直接あるいは間接照射が腐食環境に与える影響を定量化し、実験室での再現実験を可能とする技術の確立が急務となる。腐食環境の定量化は理論的な評価、すなわち、ラジオリシスモデルによる評価と高温水化学センサを用いた実験的な評価を両輪として、展開する必要がある。同時に、放射線の直接あるいは間接照射効果を加味した上で、腐食環境が材料に及ぼす影響評価を、材料と水の境界に位置する酸化皮膜の挙動、特性評価を通して、主に水側からアプローチすることが不可欠となる。また、相互作用の結果生成する腐食生成物の材料表面への析出過程を解明するとともに、析出物の腐食の及ぼす、主として間接的な影響を評価する。上記、技術を確立し、材料と水化学の相互作用の再現実験、加速実験技術を確認して、線量低減、構成材料および燃料健全性の維持・向上ならびに放射性廃棄物発生量の低減のための技術開発に資することが重要である。

共通基盤技術としては、各課題に共通な技術として、第4図に示すように、4つの具体的項目を取り上げた。

- (1) 腐食環境評価技術
- (2) 腐食メカニズム(主として水化学側からの寄与)
- (3) 酸化物・イオン種の付着脱離メカニズム
- (4) 模擬および加速実験方法

腐食環境評価技術の中では、BWR、PWRの1次系、2次系の各冷却系の腐食環境評価にとってラジオリシスモデルが共通となる。ラジオリシスモデルは中性純水であるBWRの腐食環境評価のために開発されてきたが、ボロン、Li濃度を変えてpH制御を行うPWR1次系では、冷却水中でのボロンの $^{10}\text{B}(n, \alpha)^7\text{Li}$ 反応でのアルファ線照射の寄与も大きく、すでにPWR用に改修され、PWR1次系での水素濃度低減の評価のためにも使用され始めている。また、PWR2次系では、酸素除去のためヒドラジンほか添加されるため、この場合も流路に沿って反応が進行し、場所ごと、部位ごとに酸素濃度が微妙に変化するが、ラジオリシスモデルをベースにした流動解析と化学反応解析の結合により、酸素の濃度分布を得ることができている。こういった解析ツールは、腐食環境を理解するために適用されてきたが、さらに積極的にツールの標準化を図り、BWRの水素注入などの腐食環境緩和策の定量的な評価と同時に、プラントの信頼性向上策として認知されることが重要である。また、これまで実験室でしか採用されてこなかった、各種高温水化学モニタがプラントの信頼性確保のためのモニタとして採用されるよう信頼性確保を図ることも急務である。

(内田俊介)

Ⅶ. 水化学ロードマップの今後の展開

今回準備した水化学ロードマップは、これまで過去24年間、水化学関連研究専門委員会で推進されてきた水化学関連の活動を集大成したものと考えられ、今後の水化学研究開発の推進、既存の3つのロードマップとの協調、棲み分けのための第一歩と見なすことができる。2007年6月に設立された水化学部会の中に設置されたロードマップフォローアップ委員会が中心となって推進することになっている。今回の水化学ロードマップは限られた時間の中で作成したものであり、さらに深い分析評価を行うべき課題も残っており、引き続き、内容の精選、適切な見直しを継続するとともに運用、フォローアップを続けることになる。

現在、水化学部会では、高経年化対応といった観点から、具体的な取組みとして水化学管理のベース明確化、具体的にはPWR、BWRに対応した水化学管理手引書、化学分析標準法の整備を、原子力学会における水化学関連標準作成の枠組みの中で進めている。これらは「構造材の腐食損傷の防止」、「燃料性能・健全性の保持」、「被ばく線量の低減」、「放射性廃棄物の発生抑制」の観点から、よりよい水化学管理の方法を模索するとの位置づけ

である。

さらに、SCC抑制・プラント維持管理への貢献として、SCC腐食環境は炉内各所で異なり、直接測定には制約があることから、腐食測定法の標準化、精度の検証と水化学センサの高度化などからなる測定技術課題と、ラジオリシス・腐食モデルを用いた「炉内SCC腐食環境評価方法標準」(仮称)の作成を通じ、モデルの検証と精度向上などの解析技術課題に取り組み、「炉内SCC腐食環境緩和方法及び腐食評価基準」(仮称)としてまとめようとしている。

今後の取り組むべき課題としては、流動加速腐食(FAC)による配管減肉評価・抑制、その他の状態基準保全、環境疲労抑制などを取り上げたいと考えている。

上に紹介した現在の活動課題および水化学ロードマップで整理、摘出した技術課題が実際に議論の対象に選択され、実際の研究技術課題として採択され、プロジェクトとして実施されなければ、絵に描いた餅に終わってしまう。ここで、水化学は材料、燃料と互いに切り離せない、いわばトレードオフの関係であることを十分に認識し、原子力システム全体を俯瞰しつつ、保全、高経年化のマネジメントシステムにどう反映させていくかが重要である。しばしば、分野によっては言葉の意味合いも異なることが指摘されており、水化学をより普遍的な形で広げねばならない。そのためには、高経年化ロードマップや燃料のロードマップと重なる課題についてはすりあわせを進めるとともに、水化学特有の課題の区別を行い、水化学関係以外の関連する委員会への積極的な参加を行う必要がある。すでに、高経年化ロードマップの定期的な見直し・修正を行っている高経年化対応技術戦略マップアドホック委員会に水化学関係者が委員として参加している。ここでの議論は安全研究WGを経て、技術情報調整会議の議論を経て、原子力安全・保安院安全基盤小委員会に諮られ、評価や承認を受けることになる。最終的に、このような活動を経て得られる成果が、規格・基準への橋渡しになることが望ましい。

(勝村庸介)

Ⅷ. おわりに

水化学に関する11の課題に対応したロードマップには、各課題に対応した戦略性を掲げ、重点項目を明示した。一方で、74の具体的項目について、研究開発の必要性、運営主体、資金計画および研究・開発時期を明示した。重点化は難しい問題ではあるが、強いてあげれば、第2図に示した6項目を重点項目としてあげることができ。

- (1) 共通基盤技術
- (2) 被ばく線源低減
- (3) 応力腐食割れの抑制

- (4) 燃料被覆管の腐食/水素吸収抑制
- (5) 状態監視保全の支援
- (6) 流動加速腐食の抑制

本ロードマップは、今後さまざまな形で運用してゆくが、原子力をめぐる今後の動向にあわせて、適宜見直し、項目の追加、補足、修正を行うとともに、実施時期、役割分担についても修正してゆく必要がある。

最後に、本ロードマップを短時間でまとめるに当たり、ご尽力いただいた特別専門委員会委員諸兄、レビューいただいた「水化学標準」研究専門委員会の乙葉啓一主査、石樽顕吉特別顧問、ほか委員各位に謝意を表する。

(内田俊介, 前田宣喜)

— 参 考 文 献 —

- 1) 澤田 隆, 岡本孝司, 寺井隆幸, 関村直人, 木村逸郎, 前田宣喜, “原子力発電の安全に関する研究開発ロードマップ”, 日本原子力学会誌, 48[2], 94 (2006).
- 2) JNES 報告書「原子力安全研究ロードマップ整備」, 07基調報-0004, (2007).

著 者 紹 介

内田俊介(うちだ・しゅんすけ)

日本原子力研究開発機構
(専門分野/関心分野)原子炉水化学, 原子炉材料・燃料, 計測

勝村庸介(かつむら・ようすけ)

東京大学
(専門分野/関心分野)放射線化学, 原子炉水化学, 応用放射線化学

布施元正(ふせ・もとまさ)

日立-GE ニュクリアエナジー(株)
(専門分野/関心分野)沸騰水型原子炉の水化学

高守謙郎(たかもり・けんろう)

東京電力(株)
(専門分野/関心分野)原子炉構成材料の水化学と腐食

土内義浩(つちうち・よしひろ)

原子燃料工業(株)
(専門分野/関心分野)原子燃料の開発と設計, 核燃料システムと安全性, 技術開発におけるシナリオプランニング

前田宣喜(まえだ・のりよし)

原子力安全基盤機構
(専門分野/関心分野)原子力発電プラントの検査