

## 6.2.1 被覆管・部材の腐食/水素吸収対策

燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収を設計基準範囲内に維持するための通常運転時の水質管理は、プラントの安全性維持に必要な深層防護のレベル1「異常・故障の発生防止」に該当する。また、通常運転時の状態を逸脱した場合の対応はレベル2「異常・故障の拡大防止」に該当する。さらに、シビアアクシデント前後における被覆管のZr-水反応、炉心溶融後の水素発生挙動、炉心溶融に伴うFPの核種、性状、放出・移行挙動、及びATF等改良型燃料の被覆管・部材の耐食性向上には水化学の関与が想定されることから、レベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」に該当する。一方、設計基準事故やシビアアクシデント発生時のサンプスクリーン、及び事故時の燃料プール内の燃料の腐食/水素吸収対策に果たす水化学の役割は殆どないため、レベル3「事故の影響緩和」には該当しない。

実機に新たな水化学技術を導入する際、燃料健全性評価に対し、想定される燃焼度を包絡した照射試験による評価手法が用いられてきた。これに対し、1F事故後、国内の多くの照射試験炉の廃炉が決定され、当面は新設の計画もない。このため、日本原子力学会核燃料部会で検討中の『燃料高度化に関するロードマップ』では、新たな燃料評価手法が必要と指摘されている。これは、現象論的(経験論的)健全性評価手法から、メカニズムに立脚した機構論的な健全性評価手法への転換の重要性と必要性を示しており、核燃料-水化学の境界領域では、燃料被覆管・部材の腐食、及び腐食に密接に関連した水素吸収のメカニズム解明とそれに基づくモデル開発のニーズがあるといえる。

腐食/水素吸収メカニズムに立脚したモデルが開発され、それを包含した機構論的評価手法が確立されれば、水化学高度化やATF等の改良型燃料の被覆管の開発に対し、実証的な健全性評価手法の全部、または一部を省略でき、加えて加速試験による評価も可能となる。これにより、現行炉のみならず、次世代炉の燃料開発や燃料健全性評価に係わる時間とコストの削減に繋がるものと考えられる。また、このような評価手法を標準とすることで、公開性・透明性のある安全審査を迅速に行うことが期待される。さらに、構築したモデルや健全性評価手法を国際標準とすることにより、我が国の燃料開発や水化学高度化に対する国際競争力の強化に繋がる可能性がある。このためには、国外動向を見極めつつ、モデル構築と水化学影響を考慮した機構論的評価手法を駆使した燃料開発を、産官学連携により効率的に行う必要がある。このアプローチは当該分野の嚆矢となるものと考えられる。

国内の軽水炉においては、プラントの安全運転と事故時対応が喫緊の課題であり、核燃料分野においては、事故時の更なる安全性向上に向け、FP放出低減/温度上昇抑制ペレットの開発と専用の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(LOCA、Post-DNB)高温酸化劣化抑制部材(被覆管/集合体)やATFの開発と実機への早期導入が検討されている。また、『燃料高度化に関するロードマップ』の中では、従来の軽水炉利用高度化(出力向上、最適運転サイクル対応)及び燃料高度化(高燃焼度化、MOX)もプラント運用のオプションとして位置づけられている。

一方、水化学分野では、2011年3月の1F事故前は、水化学の高度化は主に構造材料と燃料の健全性維持・向上や線源強度低減等を目的に実施されてきた。事故後は、先行する海外事例を参考に、高経年化対応、線源強度低減に向けた新たな水化学技術の開発が計画されている。

燃料被覆管の腐食は、ジルカロイ合金と水との反応により生じた水素がジルカロイ合金中に取り込まれ生じる。ジルカロイ合金中に Nb 等の微量元素を添加し、結果的に表面酸化皮膜を介しての水素の拡散を抑えているが、水素取り込み抑制のメカニズムについては未だ定説がない。

また、燃料被覆管/冷却水界面は水化学の影響を大きく受ける。さらに、MOX 燃料の採用等によりラジオリシスが変化する可能性もある。このことから、燃料被覆管・部材、及び運転管理が変更したとしても、燃料被覆管・部材への酸化物付着の制御により線源強度の上昇を抑制しながら、燃料被覆管・部材の耐食性を確保する役割が水化学に新たに求められるようになった。このため、従来、先行照射によって実証してきた燃料被覆管・部材の腐食や水素吸収特性について、そのメカニズムに立脚したモデルを構築し、様々な運転条件や水化学環境における使用範囲を合理的に（迅速かつ精度良く）評価できる手法を確立することが重要となった。

被覆管・部材の腐食/水素化に関する現状、研究方針と課題、及び産官学の役割分担について以下に述べる。

#### (A) 現状分析

ジルコニウム合金の一樣腐食は燃焼度に比例することは判っているが、時間に対して単調増加せず変極点をもって急増するプレーカウェイ現象<sup>[6.2.1-1]</sup>の原因や水素吸収機構については諸説あり、理解の統一に至っていない。水化学が被覆管と部材の腐食に影響することは明らかであるが、影響因子の定量的影響や重畳効果はほとんど判っていない。また、ジルコニウム合金中に吸収される水素の大半は、腐食によって生成すると考えられているが、吸収機構については諸説あり、その複雑さゆえに統一的理解に至っていない。

#### (1) 被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明

新規に開発した燃料の健全性評価は、現在、先行照射等の試験結果に基づく評価(現象論的評価)が主体となっている。燃料被覆管の耐食性/水素吸収特性と水質因子との相関を含め、ATF 等の改良型燃料のみならず現行燃料に対しても、被覆管・部材の腐食/水素吸収性に係わる統一的な機構論は明確になっていない。また、水質変更の際、燃料被覆管への影響も考慮すべきであるが、水化学の変更が ATF 等の改良型燃料の被覆管腐食にどのように作用するか明確になっていない。燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収特性は、プラント、水化学、燃料の材料因子が複雑に関与しており、これら因子を結び付ける統一的なモデルの構築に着手できていない。

実施にあたっての問題点としては、本課題は原子力安全とも大きく関連することから、課題解決には緊急性を要する。

#### (2) 被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発

ATF 等の改良型燃料の被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムに立脚した水化学対策技術は確立されていない。対策技術の開発にあたり、燃料被覆管の腐食/水素吸収に及ぼす水質やプラント運転に係わる因子等について、現知見を下記に示す。

### 燃料被覆管の腐食/水素吸収に関する評価手法の確立

現行の燃料被覆管の腐食/水素吸収に関する評価手法では、想定する燃焼度を包絡した照射試験が不可欠であり、専用設備の整備等過大な時間及びコストが必要となる。

### 燃料被覆管の腐食/水素吸収挙動への水環境中水素の影響評価

ジルカロイ腐食量に対する溶存水素の影響については、1960年代の古いデータ<sup>[6.2.1-2]</sup>は存在するものの、比較的最近の、かつ詳細なデータが不足している。

水化学高度化の影響評価(溶存水素最適化、pH管理最適化、亜鉛注入、NMCA、新SCC対策技術)

ジルカロイ-2被覆管への一様腐食や水素吸収に対しては、NMCA (noble metal chemical addition、貴金属注入)、酸化チタン注入、OLNC (on-line noble metal chemical addition、オンラインNMCA)とHWCや亜鉛注入を併用した場合においても、その影響は認められていない<sup>[6.2.1-3, 6.2.1-4, 6.2.1-5, 6.2.1-6]</sup>。

材料やプラントの既取得データを基に、フィッティングにより水化学の影響を評価している。例えば、米国EPRIのB. Chengらは、Li濃度、熱流束、照射、水素化物加速因子等を取り込んだ酸化膜厚さ予測モデルを提案している<sup>[6.2.1-4]</sup>。しかしながら、依然として新たな水化学に対するデータやデータベースが不足している。

一方、国内のプラントでは、水化学の変更に伴い、定期検査時に燃料被覆管の酸化皮膜厚さを計測する場合がある。しかしながら、計測の労力と費用削減の観点から、データベース等の整備やモデルの構築が望まれている。

### 軽水炉利用高度化等による影響評価

軽水炉利用高度化(出力向上、最適運転サイクル)及び燃料高度化(高燃焼度、MOX)に伴い、燃料被覆管の腐食に影響する水化学因子の特定、影響度について明らかになっていない。また、プラント状態、水化学、核燃料分野をまたぐ横断的な評価法も存在しない。

### 水化学を利用した燃料健全性維持・向上策の検討

PWRでは、燃料被覆管・部材の腐食低減策にはリチウムの低減が好ましいが、サイクル初期ではほう素濃度が高いため冷却系のpHが低下し、線源強度低減及びプラント材料健全性の点からは好ましくない。このため、濃縮<sup>10</sup>Bの適用、またはカリウム(K)等、リチウム(Li)に代わるpH調整剤の検討が進んでいる<sup>[6.2.1-7]</sup>。被覆管の腐食はpHが11.5を超えると加速される<sup>[6.2.1-8]</sup>。影響はリチウム濃度が20~30ppm程度以上の場合、ジルカロイ被覆管表面の酸化皮膜内にリチウムが取り込まれ、腐食を加速する<sup>[6.2.1-9]</sup>。このとき酸化皮膜中のリチウム濃度は50~100ppm程度であり、照射場における表面酸化皮膜中のリチウム濃度は15~115ppm程度と報告されている<sup>[6.2.1-10, 6.2.1-11]</sup>。<sup>6</sup>Li(n, α)<sup>3</sup>H反応により生成した水素のジルカロイ合金中への取り込みも想定されるが、生成する水素量は微量であり、その影響については不明である。

米国の一部のPWRでは24カ月運転を採用している。この場合、サイクル初期は炉心反応度制御(ケミカルシム)を適切に管理するため、ほう素濃度を13か月運転時の比べ高く

維持する必要があることから、添加するリチウムを 6~7ppm に高める必要がある [6.2.1-12]。一方、カリウムはリチウムに比べ燃料被覆管腐食に及ぼす影響が小さいことに加え、リチウムの資源量の制約から、近年、代替剤として KOH の代替適用が検討されるようになってきた。しかしながら、カリウムは運転サイクル中にも添加する必要があることから、 $^{10}\text{B}(n,\alpha)^7\text{Li}$  反応により生成するリチウムとの共存により、浄化プロセスや pH 管理が複雑化することへの対応等、課題解決が残っている。

BWR では、構造材料の腐食抑制を目的とした水化学の導入に際し、燃料被覆管の腐食に及ぼす影響評価も行っている。しかしながら、PWR、BWR とも、燃料被覆管に対する腐食抑制対策についての具体的な検討は十分でない。

#### 燃料腐食モニタリング技術開発

オンサイトでの追加検査は大掛かりになる傾向があり、腐食モニタリングデータの拡充の上では障害となっている。

#### 水素分析簡便化技術開発

超音波探傷(UT)による支持格子への適用検討例はあるが、簡便な水素分析手法はない。

#### オンラインクラッド付着モニタリング技術開発

現状、確立されたオンラインモニタリング技術はない。

### (3) データや評価技術の検証

ATF 等の改良型燃料を含め、被覆管・部材の腐食/水素吸収と水化学との相関に係わるデータの整備や評価技術は確立されていない。

### (4) 被覆管・部材の健全性評価に係わる規格基準の策定

ATF 等の改良型燃料を含め、被覆管・部材の腐食/水素吸収性に対し、通常運転時の水質変化が及ぼす影響に関する最新知見に基づいた管理項目等を原子力学会指針に規定している。

### (B) 研究方針と実施にあたっての問題点

今後、導入が計画されている ATF 等の改良型燃料に対し、被覆管・部材の腐食/水素吸収対策を講じることにより、プラントの安全性・効率、公益性のさらなる向上に大きく貢献できる可能性がある。現状では、実機の現象と試験結果とが一致しない場合があることから、先行照射等の試験結果に基づく評価(現象論的評価)の依存度が大きい。腐食/水素吸収メカニズムに立脚したモデルが開発され、それを包含した機構論的評価手法が確立されれば、水化学高度化や燃料被覆管材料の改良等の変化に対し、実証的な健全性評価手法の全部または一部を省略でき、加えて加速試験による評価も可能となる。このようなアプローチは、現行炉のみならず、次世代炉の燃料開発や燃料健全性評価に係わる時間とコストの削減に繋がる。

また、腐食/水素吸収モデル及び健全性評価手法を標準化することにより、安全審査にも

利用でき、維持管理（検査・取替）の合理化と併せ、プラントの公益性を高めることに寄与できる。このためには、産官の協調の下に標準モデルを構築していくことが不可欠である。メカニズム解明については学の協力も必要不可欠であり、このようなスキームをもってモデルを開発していくことが重要であり、実効性も兼ね備えると考えられる。

実施にあたっての課題全体の問題点としては、原子力安全とも大きく関連することから、課題解決には緊急性を要する。また、研究開発のための資金確保が必要である。

以下に研究方針と課題を示す。

### (1) 被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明

#### 従来知見の整理

クラッド付着・剥離挙動を定量的かつ正確に把握するため、従来の照射後試験等の調査結果、国内外のプラントデータやラボデータを含め、従来知見を整理する。

#### 燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明

燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収挙動は、水化学環境因子と熱水力因子等が複合する事象であり、これを適切に制御するには、燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収挙動に及ぼす水化学因子の効果・影響を定量化した上で、メカニズムを解明する必要がある。

### (2) 被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発

#### 燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収モデルの構築

これまで燃料被覆管・部材の腐食挙動は、水蒸気酸化雰囲気下における被覆管・部材の酸化試験結果を基に、被覆管材料中の不純物や欠陥等に起因する酸化モデルが検討され、水化学等の環境因子の影響はモデルには十分反映されていなかった。このため、試験研究等により、温度、水分解生成物(ラジオリシスにより生成する水素、過酸化水素、酸素等)、炉水添加物、炉水中不純物、酸化物の種類（化学組成、化学形態）と付着量、放射線の直接的影響を定量化しつつ、既存の被覆管酸化モデルの改良・高度化を進める必要がある。

#### 水化学改善による燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発

水質面からの新たな対策を施すには燃料被覆管への影響を考慮する必要がある。このためには、燃料被覆管の耐食性・水素吸収特性と水質因子との相関の明確化が求められる。

### (3) データや評価技術の検証

ATF等の改良型燃料の被覆管・部材の腐食/水素吸収性に対し、通常運転時の水質変化に起因した破損、異常や事故に至ることがないように、データや評価技術を検証する。

燃料被覆管の腐食/水素吸収モデルの開発にあたっては、照射試験炉や実機を活用し、評価結果と実機現象との整合性を確認する必要がある。また、ATF等の改良型燃料を含め、被覆管・部材の健全性維持に対する水化学改良策の有効性と再現性をチェックしながら、モデルや評価手法を検証する必要がある。必要に応じ評価手法を見直すことも重要である。国外を中心に照射試験設備を有効利用するとともに、燃料被覆管・部材の健全性と損傷に関するデータベースを構築・拡充することにより、ラボデータと実機現象との乖離を小さ

くし、構築したモデルや評価技術の検証を合理的に行う必要がある。

また、評価の高速化と精緻化に向け、簡便かつ高精度な燃料被覆管・部材腐食モニタリング技術、水素分析簡便化技術、オンライン酸化物モニタリング技術、ならびに ECP や光電気化学等のモニタリング技術等の開発やラジオリシスモデルの精緻化を図る必要がある。

#### (4) 被覆管・部材の健全性評価に係わる規格基準の策定

ATF 等の改良型燃料の被覆管・部材の腐食/水素吸収モデルを活用していくには、安全審査との適合性を図る必要がある。予防保全としてのモデルの有効性を、各種試験やモニタリング等により検証する。また、燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に対し、通常運転時の水質変化が影響を与え、その結果、被覆管の破損等が生じ、異常状態や事故に至ることを防ぐことを目的とし、標準化に適した水化学管理技術を日本原子力学会の水化学管理指針に取り入れる。さらに、燃料被覆管・部材の健全性に係る最新知見に基づき、必要に応じ水化学管理指針の管理項目等の設定値を見直す。このためには、産官学が連携して、試験方法や評価方法、モデルの検証方法の標準化を図ることも重要となる。

腐食/水素吸収モデルの開発、検証、標準化には、水化学分野と燃料分野が協働で進めることが重要かつ合理的であり、以下に示す情報交換体制の整備が必要と考える。

- ・核燃料分野と水化学分野の連携
- ・情報交換・検討の場の設置

#### (C) 産官学の役割分担の考え方

##### 産業界の役割

- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収評価手法の開発・高度化・標準化
- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発・高度化・標準化
- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収に及ぼす環境因子の影響に関するデータ整備・高精度化

##### 国・官界の役割

- ・データや評価技術の検証
- ・安全規制行政
- ・学協会基準のエンドース・規制基準の整備
- ・基盤の整備(知識、人材、照射試験炉、制度の整備)

##### 学术界の役割

- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズム解明への支援
- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収に関する基盤研究(反応機構、速度定数、表面・隙間における照射、被覆管表面の沸騰・流況の影響等)

##### 学協会の役割

- ・規格基準の作成・精緻化

##### 産官学の連携

- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズム解明(環境因子の効果・影響)
- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収に関する基盤研究
- ・被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明及び対策立案を担う人材の育成
- ・照射試験炉の整備・利用
- ・照射試験炉を用いた各種モニタリング技術の開発

#### (D) 関連分野との連携

##### 燃料高度化

- ・線源強度低減対策としての水化学の高度化(水化学条件の変更)が ATF 等の改良型燃料を含む被覆管・部材の腐食・水素化に及ぼす影響について、メカニズム解明、照射試験を含む試験・評価技術分野、モニタリング技術の開発等の分野で連携を行い、効率的かつ合理的に技術開発を行う必要がある。
- ・軽水炉利用高度化(出力向上、最適運転サイクル)及び燃料高度化(高燃焼度、MOX)が被覆管・部材の腐食・水素化に及ぼす影響について、メカニズム解明、照射試験を含む試験・評価技術分野、モニタリング技術の開発等の分野で連携を行い、効率的かつ合理的に技術開発を行う必要がある。

##### 高経年化対応

- ・SCC 及び配管減肉の環境緩和対策としての水化学の高度化(水化学条件の変更)が被覆管・部材の腐食・水素化に及ぼす影響について、メカニズム解明、照射試験を含む試験・評価技術分野、モニタリング技術の開発等の分野での連携により、効率的かつ合理的に技術開発を行う必要がある。
- ・軽水炉利用高度化(出力向上、最適運転サイクル)及び燃料高度化(高燃焼度、MOX)と SCC 及び配管減肉の環境緩和対策としての水化学の高度化(水化学条件の変更)が重畳する場合、被覆管・部材の腐食・水素化に及ぼす影響について、メカニズム解明、照射試験を含む試験・評価技術分野、モニタリング技術の開発等の分野で連携を行い、効率的かつ合理的に技術開発を行う必要がある。

図 6.2.1-1 に被覆管・部材の腐食/水素吸収対策に係わる導入シナリオ、表 6.2.1-1 に技術マップ、図 6.2.1-2 にロードマップを示す。

#### 参考文献

- [6.2.1-1] 日本原子力学会編, “原子炉水化学ハンドブック”, コロナ社 (2000).
- [6.2.1-2] E. Hillner, “Hydrogen Absorption in Zircaloy during Aqueous Corrosion, Effect of Environment”, WAPD-TM-411 (1964).
- [6.2.1-3] R. L. Cowan, “BWR Water Chemistry...A delicate Balance”, Proc. Int. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactors System 8, p.97-102 (2000).
- [6.2.1-4] B. Cheng et al., Proc. Int. Meeting on LWR Fuel Performance, Paper 1069 (2004).
- [6.2.1-5] Y. Ishii et al., “The Effect of TiO<sub>2</sub> on Corrosion on Behavior of Zircaloy-2 Fuel Cladding”, Proc. 2005 Water Reactor Fuel Performance Meeting, Paper 1100 (2005).

- [6.2.1-6] S. E. Garcia and C. J. Wood, “Recent Advances in BWR Water Chemistry”, Proc. Int. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactors System 2008 (NPC’08), Paper L04-1 (2008).
- [6.2.1-7] Lena Oliver et al., “Westinghouse VVER Fuel Experience and Fuel QUALIFICATION Need for INTRODUCING KOH in PWR”, Proc. 21<sup>st</sup> Int. Conf. on Water Chemistry in Nuclear Reactor Systems (2018).
- [6.2.1-8] E. Hillner, “The Effect of Lithium Hydroxide and Related Solution on the Corrosion Rate of Zircaloy in 680°F Water”, WAPD-TM-307 (1962).
- [6.2.1-9] F. Garzarolli et. al., 1989 IAEA Meeting, Portland (1989).
- [6.2.1-10] H. Stehle et. al., ASTM STP 824, p.483-506 (1984).
- [6.2.1-11] P. Billot et. al., ANS/ENS Meeting, Avignon (1991).
- [6.2.1-12] J. N. Iyer et al., “ZIRLO™ Clad Fuel Performance in Simultaneous Zinc and Elevated Lithium Environment”, Proc. of Int. Conf. on Water Chemistry of Nuclear Reactor Systems, Paper L13-3 (2008).



## 課題調査票

課題名	核燃料被覆管の健全性維持
マイルストーン 及び 目指す姿との関連	<p>短V. 保全・運転の負荷軽減・品質向上</p> <p>自主的安全性向上の効果的・継続的な取り組みにより、保全・運転管理の高度化を図る必要がある。さらに、安全性向上を図りながら、我が国の原子力発電所従事者の被ばく量を低減する取組を行う必要がある。</p> <p>中II. 既設プラントの高稼働運転と長期安定運転の実現</p> <p>電力安定供給性かつコストバランスに優れたエネルギー源としての利用に向け、高稼働運転や適切な高経年化対策を前提とした長期安定運転が必要となる。</p>
概要（内容）	<p>(1) 被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明</p> <p>通常運転時の水質変化が燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に影響を与え、その結果、被覆管の破損等が生じ、異常状態や事故に至ることがないように、燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に及ぼす水質変更の影響を機構面から明らかにする。対象とする被覆管は従来材に加え、事故耐性燃料も含む。</p> <p>(2) 被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発</p> <p>事故耐性燃料を含む燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に対し、通常運転時の水質変化が影響を与え、その結果、被覆管の破損等が生じ、異常状態や事故に至ることがないように、燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収対策を検討する。</p> <p>(3) データや評価技術の検証</p> <p>事故耐性燃料を含む燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に対し、通常運転時の水質変化が影響を与え、その結果、被覆管の破損等が生じ、異常状態や事故に至ることがないように、データや評価技術を検証する。</p> <p>(4) 被覆管・部材の健全性評価に係わる規格基準の策定</p> <p>事故耐性燃料を含む燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に対し、通常運転時の水質変化が影響を与え、その結果、被覆管の破損等が生じ、異常状態や事故に至ることを防ぐことを目的とし、標準化に適した水化学管理技術を学会指針に取り入れる。また、燃料被覆管・部材の健全性に係わる最新知見に基づき、必要に応じ水化学管理指針の管理項目等の管理項目等の設定値を見直す。</p>
導入シナリオとの 関連	水化学による燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発による核燃料の健全性維持
課題とする根拠	水化学 RM と深層防護との関連付けの検討結果を参照

(問題点の所在)	
現状分析	<p>(1) 被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明 事故耐性燃料を含む燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に及ぼす水質変更の影響に関する統一的な機構論は明確になっていない。</p> <p>(2) 被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発 事故耐性燃料を含む燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムに立脚した水化学対策技術は確立されていない。</p> <p>(3) データや評価技術の検証 事故耐性燃料を含む燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収と水化学との相関に係わるデータの整備や評価技術は確立されていない。</p> <p>(4) 被覆管・部材の健全性評価に係わる規格基準の策定 事故耐性燃料を含む燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収性に対し、通常運転時の水質変化が及ぼす影響に関する最新知見に基づいた管理項目等を原子力学会指針に規定している。</p>
期待される効果 (成果の反映先)	<ul style="list-style-type: none"> <li>・原子力発電所の高稼働運転における核燃料の健全性維持及び環境負荷軽減が可能となる。</li> <li>・燃料等の炉心構成要素の高度化や、原子炉の運転条件が見直された場合においても、運転上の制限を遵守し安全余裕を確保した状態で原子炉の運転が可能となる。</li> </ul>
実施にあたっての問題点	<p>課題全体の共通問題として下記がある。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・原子力安全とも大きく関連することから、課題解決には緊急性を要する。</li> <li>・研究開発のための資金確保が必要である。</li> </ul>
必要な人材基盤	<p>(1) 人材育成が求められる分野</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・水化学、状態監視技術</li> </ul> <p>(2) 人材基盤に関する現状分析</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・事業者においては、現在導入している状態監視技術に関する知識・技能を有した人材の育成が行なわれてきた。</li> <li>・メーカーでは原子力設備の海外輸出等を通じて、必要な技術開発にかかる人材の育成を行っている。</li> <li>・大学等では、共同研究やインターンシップ等により、人材育成や人的交流を図ってきた。</li> <li>・水化学技術は、原子力発電所の保全のみならず、リスクの概念を併用すれば、安全の確保の基本となる技術の一つであり、必要な人材基盤を継続して確保していくことが重要である。今後も人材基盤を維持していくためには、大学等の教育段階から優秀な人材を集め、かつ、人材を計画的に育成していくとともに、実際に炉心設計、運用管理の経験を積んでいくことが必要である。</li> <li>・海外の実用化技術の反映にとどまらず、その改良をもって、更な</li> </ul>

	<p>る原子力安全に役立つ運用管理技術を国際的に展開できる人材を育成し、活躍してもらうことが必要。</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・特に海外で豊富な実績を有する解析手法等については、その迅速かつ円滑な導入を促す仕組みの充実（国際共同研究、国際会議、人的交流等の活性化等）。</li> </ul> <p>(3) 課題</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・必要とされる人材規模は、原子力発電に関する国の方針に依存し、これに対応して、計画的かつ継続的な人材確保が必要である。</li> <li>・1F事故後の原子力プラントの長期停止により、実際に経験を積む場が損なわれている。</li> <li>・優秀な人材を惹きつけるという意味において、1F事故とそれに続く原子力プラントの長期停止は、若い世代の原子力離れを招いている。</li> </ul>
他課題との相関	<ul style="list-style-type: none"> <li>・「炉心・熱水力設計評価技術の高度化」(ロードマップ)</li> <li>・S111_d32：状態監視・モニタリング技術(予兆監視・診断、遠隔監視・診断等)の高度化</li> <li>・M107_d38 建屋構造・材料の高度化</li> <li>・S111M107_d36：高経年化評価手法・対策技術の高度化</li> <li>・M107_d25：運転性能の高度化(事象進展抑制、停止機能、L/F等)</li> <li>・S103_b07：廃棄物長期保管に向けた健全性評価技術、管理技術の高度化</li> <li>・M106_c01：計測技術・解析技術の高度化</li> </ul>
実施時期・期間	中期(2030年)
実施機関/資金担当 <考え方>	<p><u>産業界/産業界</u></p> <p>事故耐性燃料を含む被覆管・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等に必要な技術開発を実施</p> <p>&lt;考え方&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・電気事業者は、事業主体としてプラント要件を取り纏めるとともに、プラントへの適用性評価を行う。</li> <li>・メーカーは、プラント設計を熟知していることから、具体的な設計とプラントに合った技術開発を行うとともに、電に事業者が実施するプラントへの適用性評価を支援する。</li> <li>・研究機関は、技術開発に必要な要素技術を開発する。</li> <li>・大学は、技術開発に必要な要素技術を開発する。</li> <li>・実施主体が資金担当となることが適当と考える。</li> </ul> <p>原子力規制委員会/原子力規制委員会</p>

	<p>(必要に応じ、規制の枠組みの整備、技術評価)</p> <p>&lt;考え方&gt;</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・電気事業者は、新規制基準及び軽水炉安全技術・人材ロードマップに則り、事業主体として安全性向上に努める。</li> <li>・電気事業者は、事業主体として保全の信頼性向上に努める。</li> <li>・メーカーは、必要な技術開発に努める。</li> <li>・原子力規制委員会は、電気事業者のニーズを踏まえて規制基準及び導入の枠組みを定め、技術評価を行う。</li> <li>・実施主体が資金担当となることが適当と考える</li> <li>・原子力規制委員会が規制の観点からが主体となる事項について資金担当となることが適切。</li> </ul> <p><u>産業界・学協会 / 産業界</u></p> <p>被覆管・部材の健全性評価に係わる規格基準の策定</p> <ul style="list-style-type: none"> <li>・産業界（電気事業者、メーカー）が主体となって核燃料の健全性維持に必要な水化学技術の高度化を図る。</li> <li>・学協会は、核燃料の健全性維持及び付随して必要となる水化学技術に係わる規格基準等について検討を行う。</li> <li>・原子力規制委員会は、核燃料の健全性維持及び付随して必要となる水化学技術に係わる規格基準を整備し、技術評価及び認可を行う。</li> </ul>
その他	

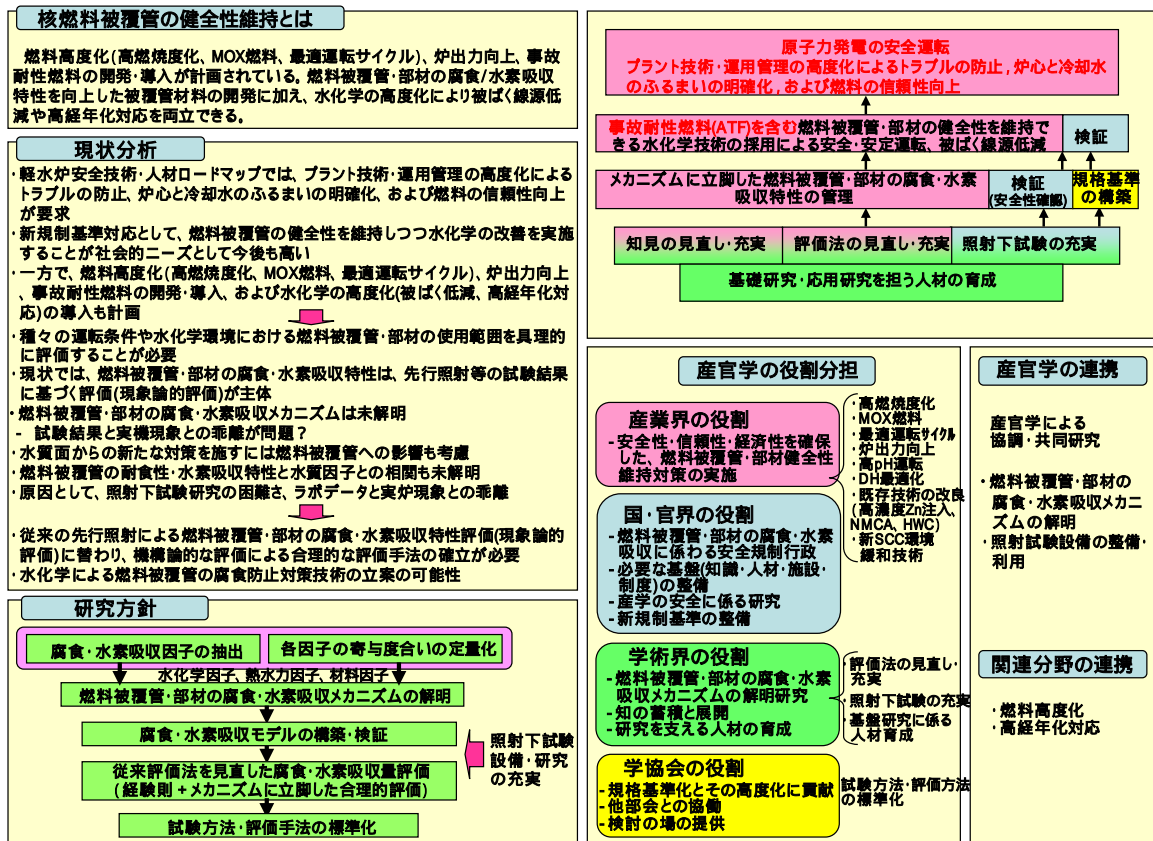


図 6.2.1-1 核燃料被覆管の健全性維持に係わる導入シナリオ

表 6.2.1-1 核燃料被覆管の健全性維持に係わる技術マップ

課題調査票の概要	技術課題	概要	実施時期/期間	役割分担(実施/資金)
被覆管・部材の腐食/水素吸収メカニズムの解明(事故耐性燃料も含む)	被覆管・部材の腐食/水素吸収に及ぼす水化学因子の影響評価	被覆管・部材の腐食/水素吸収に及ぼす炉水のDH等の水化学因子の抽出と寄与度合いの定量化	中期/2030年	産・学/産・官・学
	水化学高度化が被覆管・部材の腐食/水素吸収に及ぼす影響評価	Zn注入技術、高pH運転、DH最適化運転、NMCA、新SCC対策等の水化学の高度化が腐食/水素吸収に及ぼす影響を評価	中期/2030年	産・学/産・学
	被覆管・部材の腐食/水素吸収モデルの構築	各影響因子を考慮したモデルの構築	中期/2030年	産・学/産・学
被覆管・部材の腐食/水素吸収対策技術の開発	被覆管・部材の腐食/水素吸収モデルに基づく燃料挙動・健全性評価手法の開発	被覆管・部材の腐食/水素吸収モデルに基づく燃料挙動・健全性評価手法の確立の開発	中期/2030年	産・学/産・官・学
	プラント運転の変更の影響評価	出力向上等のプラント運転の変更が被覆管・部材の腐食/水素吸収に及ぼす影響を評価	中期/2030年	産/産
	燃料高度化の影響評価	現行水化学での燃料高度化(材料変更・構造変更)が被覆管・部材の腐食/水素吸収に及ぼす影響を評価	中期/2030年	産/産
	水化学を利用した燃料健全性維持・向上策の検討	被覆管・部材の腐食/水素吸収を低減できる、もしくはこれらによる健全性低下を抑制できる水化学改良策を検討	中期/2030年	産/産
データや評価技術の検証	被覆管・部材腐食モニタリング技術の開発	オンサイトモニタリング技術の簡便化、高精度化	中期/2030年 長期/2050年	産・官/産/産・官・学
	水素分析簡便化技術の開発	オンサイトで被覆管、シムプル等の簡便技術	中期/2030年 長期/2050年	産・官/産/産・官・学
	オンラインクラッド付着モニタリング技術の開発	被覆管クラッド採取技術の高度化、付着クラッドのモニタリング技術の開発	中期/2030年 長期/2050年	産・官/産/産・官・学
	照射試験設備の整備・利用	研究炉等の照射試験設備の有効利用法の検討	中期/2030年	産・官・学/産/産・官・学
被覆管・部材の健全性評価に係る規格基準の構築	被覆管・部材の健全性評価に係る規格基準の構築	試験方法・評価方法の標準化	中期/2030年 長期/2050年	産・官・学/産/産・官・学

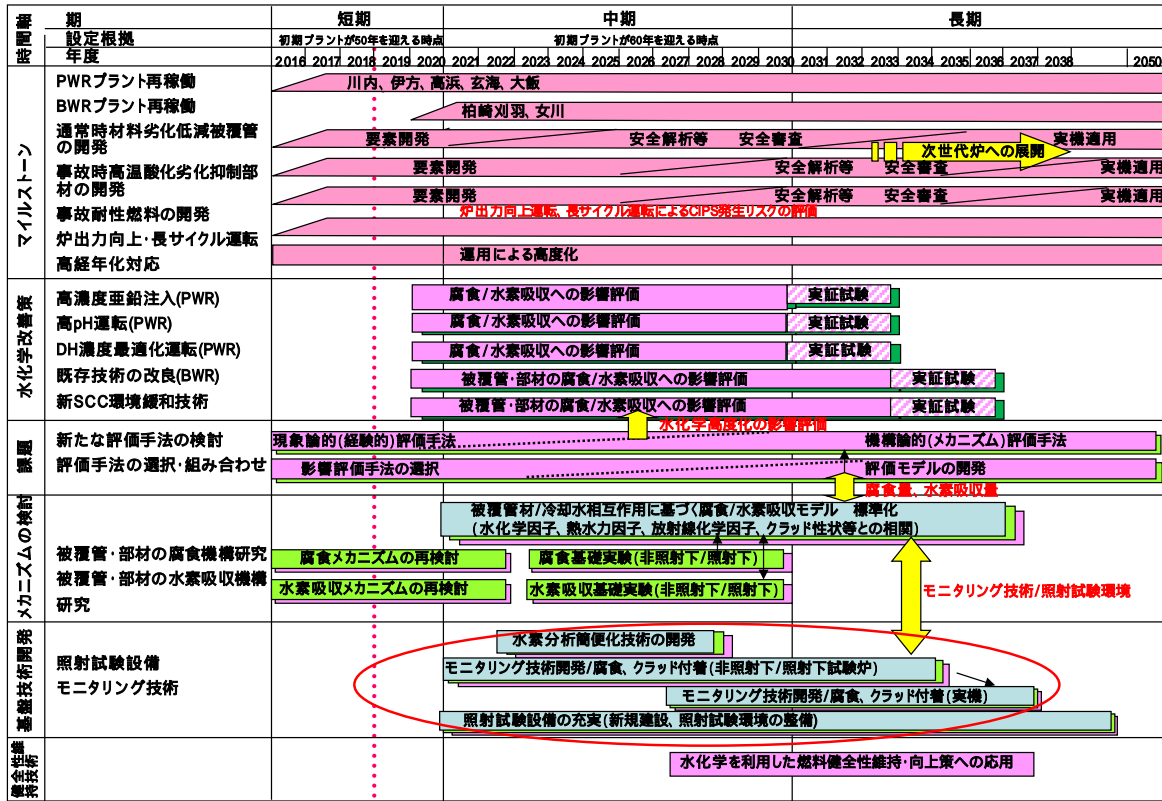


図 6.2.1-2 核燃料被覆管の健全性維持のロードマップ