

6.1.1 応力腐食割れ（SCC）の抑制

ステンレス鋼やニッケル基合金等軽水炉構造材料の応力腐食割れ（SCC）は、圧力バウンダリーや炉内構造材の健全性を損なうことでLOCA等のプラントの安全性につながる可能性がある安全上重要な経年劣化事象の一つであり、プラントの安全運転を阻害するトラブルの一つの原因となってきた。SCCは、材料・応力・環境の各因子が重畳した場合に発生・進展すると言われており、プラントを安全に長期間使うためには、設計・建設段階における材料選択、製作・施工方法と、運転開始後における検査・補修・取替を適切に行うとともに、長期にわたる運転期間中のSCC環境（SCCの発生と亀裂が進展する水質環境）を緩和し、構造材料の健全性を維持する期間を延伸することが重要である。すなわち、SCCの発生と亀裂の進展を抑制するための水質管理は、プラントの安全性を維持するための深層防護におけるレベル1に該当し、水質環境がSCC抑制に有効な範囲を逸脱した場合の対応はレベル2に該当する。一方、設計基準事故やシビアアクシデントが発生した場合の機器や構造材の健全性に関しては比較的短期間の課題であり、SCCの抑制がほとんど寄与しないと考えられるため、SCCの抑制対策はレベル3やレベル4の対象とはならない。

また、SCC環境の緩和は、プラント維持管理（検査・補修・取替）のさらなる適切化に貢献できる可能性があり、これらを通じて原子力発電の安全性と公益性を同時に高めていくことが重要である。

さらに、今後、我が国においても適用が予想される燃料高度化（高燃焼度化、長期運転サイクル）や出力向上等により、構造材料のSCC環境が受ける変化を先取り（予測・評価）し、悪影響の可能性が予測される場合には、それを回避・低減することも、SCC環境緩和の重要な役割である。

一方、軽水炉は、同じ水が様々な温度条件、照射条件、沸騰・流動条件下で、構造材料や燃料被覆管等の金属材料と接しながら循環しているシステムであり、特定の部位や構造材料のSCC環境緩和を行う際には、その有効性評価とともに、プラントに及ぼす影響を予測・評価することが重要である。

このSCC環境緩和に関する現状、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

< 沸騰水型軽水炉（BWR） >

原子炉で発生させた蒸気で直接タービンを駆動するBWRでは、主に炉心で生成した放射線分解生成物の大部分が、酸素及び水素ガスとして主蒸気に移行する。この結果、BWR原子炉水中には、数百ppb前後の酸化種が残存する。ステンレス鋼やニッケル基合金のSCC環境はこの酸化種によって支配されている。

この他のSCCの主要環境因子として、系外から持ち込まれるイオン不純物（特にアニオン）がある。イオン不純物のうち、SCCへの影響の大きいとされる塩化物イオンと硫酸イオンを中心として、近年、管理の強化が図られており現状は問題のあるレベルにはないと考えられる。従って、ここでは酸化種抑制の取り組みを中心に現状を分析する。

(1) 炉内SCC環境評価手法の開発、高度化・標準化

従来の試料採取系を用いた分析では、酸化種として酸素のみしか検出されなかったため、主要 SCC 環境因子は酸素と考えられていたが、実際には、高温で分解しやすい過酸化水素の影響が大きいことがわかってきた。放射線分解生成物の蒸気相への移行、これら相互の反応による生成消滅、材料表面への拡散速度等により、炉内におけるこれら酸化種の濃度分布、すなわち、SCC 環境は一様ではない。

一方、酸化種の SCC への影響度合いを示す指標として、現在広く用いられているのが、電気化学的腐食電位（Electrochemical Corrosion Potential : ECP）である。ECP は酸化種によって金属から奪われる電子の流れと電位の関係（カソード分極曲線）と、金属から腐食によって放出される金属イオンの流れと電位の関係（アノード分極曲線）の交点として定義され、まさに、腐食が生じている時点で金属が示す電位であり、SCC の発生や進展と密接に関係している。また、高温でのその場測定が可能なセンサーも開発・実用化されているが、その耐久性や精度の検証法は確立されていない。また、実機では ECP を直接計測できる場所は限られている。このため、直接計測が困難な部位については、放射線分解をシミュレートするラジオリシスモデルと、それによって算出された酸化種の濃度と流動による拡散並びに金属材料との相互作用から ECP を算出する ECP モデルを併用して、SCC 環境を推定する評価技術も開発・実用化されている。今後の燃料高度化や出力向上においては、水の放射線分解挙動、すなわち、SCC 環境は、必然的に変化すると考えられるので、その影響を予め評価しておくためにも、これらのモデル評価技術は重要である。

(2) SCC 環境緩和技術の開発・高度化

国内 BWR では 1990 年代半ば以降、高経年プラントを中心に、SCC 環境緩和策として、通常運転時に給水からの水素注入を行っている。水素注入は、給水から原子炉内に注入した水素を酸素や過酸化水素と反応させ水に戻すことで、SCC 環境を緩和する技術であるが、その効果は部位によって異なる。特に、原子炉上部では、水素がボイドに移行してしまうため、水素注入の効果が期待できない。また、水素を一定濃度（炉心入口濃度 0.4ppm）以上注入すると、注入量に応じて、水分子中にある酸素 ^{16}O が中性子と反応して生じる ^{16}N の主蒸気系への移行量が増加し、主蒸気配管の線量率が上昇してしまう。これが水素注入の SCC 環境緩和効果とトレードオフになる。

従来は、通常運転時のみを対象として水素注入を行ってきたが、プラント起動時には、放射線分解生成物の主蒸気への移行が少なく、温度も低いため、冷却材中の酸化種濃度が通常運転中より高くなる。また、プラント停止中の開放点検・補修等により持ち込まれる不純物イオンも通常運転時より高いレベルになりやすい。さらに、熱応力等により構造材料に動的なひずみが加わる等、SCC 発生抑制の観点から環境改善の余地がある。

上記の諸問題を改善するため、1990 年代後半には、主蒸気系線量率が上昇しない範囲の水素注入量で SCC 環境緩和効果を高める貴金属処理（NMCA）が開発され、2000 年代後半には運転中貴金属注入技術（OLNC）へと進化し、現在では米国を中心に幅広く実機に適用されている。また、国内ではプラント起動時の SCC 発生抑制を目的とした起動時水素注入、水素を必要としない新たな SCC 緩和を目指す TiO_2 処理等の技術開発が進められ、一部実機に適用されている。

(3) 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

亀裂進展を十分な精度で予測するために必要な SCC の進展に関するデータが不足している。また、特定の HWC 環境でニッケル基合金の SCC 発生が加速する可能性が示唆される試験データが得られており、追加データの取得が進められている。

(4) データや評価技術の検証、規制基準の整備

BWR の維持規格には HWC 環境下での亀裂進展線図があるが、HWC の効果の判断クライテリアが基準化されていない。

(5) SCC メカニズム解明

SCC 発生・進展の詳細メカニズムは解明されていない。亀裂内水質が SCC に及ぼす影響、長時間環境暴露による組織変化、材料環境界面の酸化物特性、結晶粒界での特異な酸化、酸化の局在化や加速現象、粒界でのキャビティ生成、水素の影響機構等、様々な SCC (IGSCC、IASCC 等) に対する現象についての知見拡充が必要である。

<加圧水型軽水炉 (PWR) >

PWR 一次系は放射線分解による酸化種の抑制を目的として、25～35cc-STP/kg・H₂O の溶存水素を添加することで低電位条件に維持されている。そのため、BWR で報告されているような高電位条件での SCC は、過去に一部の酸素滞留部で報告例が有るものの、現在は対策が講じられ発生の可能性は低いと考えられている。一方、600 合金については低電位条件でも一次冷却材応力腐食割れ (PWSCC) を生じさせることが知られており、690 合金への材料変更が進められた。しかし、一部のプラントには蒸気発生器や下部計装筒に 600 合金が使用されているため、環境緩和の可能性が模索されている。

また、一次冷却材の pH 調整剤としてリチウム (Li) の同位体を濃縮した高価な ⁷Li を使用しているが、近年 ⁷Li の調達性が不安定になっているとともに、その価格高騰に伴って発電コストが増加している。このため国外においては、EPRI が中心となり ⁷Li の代替剤として同位体を濃縮する必要のない天然カリウム (K) の適用について 2016 年から本格的に検討が開始され、2021 年頃に実プラントでの試運用が計画されている。K は ⁷Li より安価だけでなく、Li よりも材料の腐食性が低いといわれており、PWSCC 発生環境の緩和や、従来のホウ酸リチウムバンド管理幅よりもさらに pH を高める運用を行うことで被ばく線源強度の低減にも繋がる可能性が指摘されていることから、国内においてもその適用に向けた機運が高まりつつある。

(1) SCC 環境緩和技術の開発・高度化

PWSCC 環境緩和のための溶存水素濃度最適化

一次系模擬環境下における 600 合金の PWSCC 進展速度は、国内の溶存水素濃度管理幅近傍で極大値を示すことが報告されている。そのため、溶存水素濃度を最適化することが議論されており、米国では高溶存水素に移行するプラントが増加している。一方、亀裂発生の観点で行われた試験では、低溶存水素濃度の方が PWSCC 発生を抑制することを示す知見が報告されている。

溶存水素濃度の低減に際しては、一次冷却材の放射線分解により生成する酸化種の増大及びその影響が懸念されるが、現在の溶存水素濃度管理幅（25～35cc-STP/kg・H₂O）は、50年以上も前の常温の実験に基づいて、一次冷却材の放射線分解を抑制する観点から設定されたもので、最新のラジオリシスモデル解析及び照射試験炉を用いた高温ループ試験の結果から、高温下ではかなり過剰（1桁程度）となっており、数 cc-STP/kg・H₂O 程度までの低減では問題ないとの結果が得られている。仏では実プラントで溶存水素を 3cc-STP/kg 程度まで低下させ、酸化種の増加がなかったことが報告されている。また、国内でも炉心近傍に ECP センサーを設置し、15cc-STP/kg・H₂O 程度まで溶存水素を低下させ、放射線分解による酸化種生成が見られなかったことが報告されている。

一次冷却材の溶存水素濃度の最適化は PWSCC 環境緩和技術として大きな可能性を秘めているが、PWSCC 緩和のみならず、燃料被覆管の腐食・水素化挙動、腐食生成物の移行・放射化挙動にも影響する可能性があり、その適用に際しては、材料・燃料・水化学の分野横断的な協力の下、広範囲かつ詳細な調査・研究とフォローが必要と考えられる。

高濃度亜鉛注入

米国では、ニッケル基合金の表面酸化皮膜の改良により、PWSCC 発生を抑制するため、高濃度（一次冷却材中濃度 30ppb 以上）での亜鉛注入が既に数プラントで実施されており、SG 伝熱管 ECT 結果の統計解析からその有効性が示されたとする報告が出ている。一方、燃料高度化や出力向上において、注入した亜鉛が燃料表面に付着し、燃料被覆管・部材の腐食・水素化や、CIPS(crud induced power shift)を加速するのではないかと懸念も表明されており、十分な検討が必要と考えられる。

天然カリウムの適用性検討

K はロシア型 PWR である VVER での実績があり、また材料の腐食性は一般に Li よりも低いと言われているため、PWSCC に対してはより安全側に働くものと考えられる。一方で、VVER と国内 PWR の基本構成は同じであるものの、材料の完全な互換性がなく、また亜鉛注入の有無や温度条件も異なることから、国内 PWR への導入にあたっては十分な検討が必要である。

(2) 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

亜鉛注入やホウ酸リチウムバンド管理、分散剤等、SCC 発生・進展への影響因子についてのデータ拡充が必要と考えられるとともに、690 合金等対策材の SCC 発生挙動についても知見が不足している。さらに、K と Zn との相互作用やニッケル基合金の PWSCC への影響に関する知見も十分ではない。

(3) SCC メカニズム解明

SCC 発生・進展の詳細メカニズムは解明されていない。亀裂内水質が SCC に及ぼす影響、長時間環境暴露による組織変化、材料環境界面の酸化物特性、結晶粒界での特異な酸化、酸化の局在化や加速現象、粒界でのキャビティ生成、水素の影響機構等、様々な SCC（PWSCC、ODSCC、IASCC 等）に対する現象についての知見拡充が必要である。

(B) 研究方針と実施にあたっての問題点

前述のように、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。しかし、現状は、その有効性が広く認知されるに至っておらず、また、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。

日本機械学会の「発電用原子力設備規格 維持規格」には、既に、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行く必要がある。

このためには、以下に示す水化学技術の開発や高度化、ならびに、検証と標準化が必要と考えられる。

(1) 炉内 SCC 環境評価手法の開発、高度化・標準化

軽水炉内で SCC 環境は均一ではないため、着目する部位の SCC 環境を直接計測する技術を耐久性・精度の観点から高度化する。また、実機では SCC 環境を計測できる場所は限られているので、これを補う SCC 環境を評価する技術を高度化する。さらに、SCC 環境緩和効果をプラントの維持管理に取り入れるため、照射試験炉や実機においてこれら技術を検証し、標準化を行う。

(2) SCC 環境緩和技術の開発・高度化

BWR では、より SCC 抑制効果が高く、抑制範囲の広い SCC 環境緩和技術（BWR）の開発と開発技術の標準化を進める。また、現在適用されている SCC 環境緩和技術、及び今後開発される SCC 環境緩和技術の有効性や副作用について、各種試験や実機における関連データの採取・蓄積とその解析評価を行い、予防保全対策としての適用性・有効性を検証し、プラント維持管理への反映を念頭に適用方法を標準化する。

PWR では PWSCC 環境緩和技術（一次系溶存水素濃度の最適化・高濃度亜鉛注入の検討・天然カリウムの適用性検討）の開発・実証を推進する。この際、燃料の健全性・性能の維持、及び被ばく・廃棄物低減の観点から、より副作用の少ない、調和のとれた SCC 環境緩和技術を志向する。特に、PWSCC 抑制のための溶存水素濃度最適値が、現在の保安規定記載の範囲を下回る場合には、有効性のみならず副作用を含む十分な検証を行う必要がある。

(3) 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

プラントの安全性を確保するために必要な検査部位及び検査頻度の最適化を行うため、様々な材料、応力、水質条件での SCC 発生・進展データの充実を図る必要がある。

(4) データや評価技術の検証、規制基準の整備

維持規格で示されている SCC 進展線図の適用を可能とするため、評価対象部位ごとに異なる水質環境を考慮した環境緩和技術の効果の判断クライテリアを基準化して実機への適用を可能とする必要がある。また、廃炉材活用研究等により、これまで適用してきた水化学条件の妥当性を検証することや、高経年化リスクと水化学の関係についても評価を進めることが重要である。

(5) SCC メカニズム解明

SCC は、水化学環境因子と材料因子、応力因子等が複合する事象であり、これを適切に制御するためには、SCC のメカニズムを解明すること、また、メカニズムに基づいて水化学因子の効果・影響を定量化することが重要である。

(C) 産官学の役割分担の考え方

産業界の役割

- ・ 炉内 SCC 環境評価手法（ラジオリシスモデル・ECP モデル・計測技術）の開発・高度化・標準化
- ・ SCC 環境緩和技術の開発・高度化・標準化
- ・ 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
- ・ 予防保全工法ガイドライン（SCC 環境緩和）案の作成

国・官界の役割

- ・ データや評価技術の検証
- ・ 学協会基準の endorse・規制基準の整備
- ・ 施設基盤の整備（照射試験炉）

学術界の役割

- ・ SCC メカニズム解明への支援
- ・ 炉内 SCC 環境に関する基盤研究（G 値、反応機構、速度定数、表面・隙間における照射影響等）
- ・ 環境モニタリングの基盤技術（参照電極等）
- ・ 人材育成

学協会の役割

- ・ ロードマップ策定、ロードマップ間の連携・調整
- ・ 規格基準の作成・精緻化
- ・ 分野横断的取り組みの標準化における学協会間の連携
- ・ 人的交流と育成

産官学の連携

- ・ SCC メカニズム解明（環境因子の効果・影響）
- ・ 炉内 SCC 環境に関する基盤研究

- ・ SCC 環境緩和に対応できる人材の育成・交流

(D) 関連分野との連携

燃料高度化

- ・ 燃料の高度化（被覆管材料、放射線の線源強度や分布の変更）が、ラジオリシスや不純物に及ぼす影響について、燃料開発、被覆管開発等の分野と連携をとり、効率的かつ合理的に評価を行う必要がある。

材料の高度化

- ・ 新しい構造材料、炉内機器の開発と適用に際しては、SCC の発生と亀裂の進展に関して材料、応力、環境の観点から SCC のリスクを評価する必要があり、各分野で連携し情報を共有して、効率的かつ合理的に技術開発、評価を行う必要がある。

図 6.1.1-1 に導入シナリオ、表 6.1.1-1 に技術マップ、図 6.1.1-2 にロードマップを示す。

参考文献

- [6.1-1] S. Uchida, “Corrosion of Structural Materials and Electrochemistry in High Temperature Water of Nuclear Power Systems”, Power Plant Chemistry, 10 (11), 630-649 (2008).

課題調査票

課題名	応力腐食割れ（SCC）の抑制
マイルストーン 及び 目指す姿との関連	短Ⅳ. 信頼性向上へ向けたプラント技術・運用管理の高度化 通常運転、異常事象終息の信頼性向上に係わる活動が不断に進められ、かつ活性化がなされることによって、事故の引き金となる事象の把握と詳細な知見が深まり、事故リスク低減のための諸対策の整備が進むことが期待される。 中Ⅱ. 既設プラントの高稼働運転と長期安定運転の実現 安定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。 長Ⅱ. 革新的技術開発等による原子力のメリット最大化・デメリット極小化 機器及び構造物の劣化を防止・抑制するためには、劣化メカニズムを解明し、それに基づき対策・改善技術を開発する必要がある。
概要（内容）	(1) 炉内 SCC 環境評価手法の開発、高度化・標準化 炉内腐食環境を評価するためのラジオリシスモデル、腐食電位モデルの高精度化を図る。また、試験炉(可能ならば実機)における腐食環境モニタリングならびに SCC 挙動評価を行い、オンラインモニタリングによるシュラウドや原子炉底部等を含めた原子炉一次系の多様な部位における腐食環境(腐食電位)評価ならびに SCC 発生寿命・SCC 進展評価技術を開発し、環境評価手法の検証を行う。 (2) SCC 環境緩和技術の開発・高度化 BWR の水素注入、貴金属注入、起動時水素注入や PWR の溶存水素濃度最適化、亜鉛注入等の高度化を図るとともに、新たな酸化チタンや分散剤等の対策技術を開発し適用していくことで、SCC の発生・進展を抑制する。 (3) 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 プラントの安全性を確保するために必要な検査部位及び検査頻度の最適化を行うため、様々な材料、応力、水質条件での SCC 発生・進展データの充実を図る。 (4) データや評価技術の検証、規制基準の整備 維持規格の適用を可能とするための環境緩和技術の効果の判断クライテリアを基準化して実機への適用を可能とする。 (5) SCC メカニズム解明

	効果的な SCC 対策の確立には機構論的な理解が不可欠であるため、材料と環境の相互作用や亀裂内水質の影響等への理解を進め、SCC 発生・進展の詳細メカニズムを明らかにする。
導入シナリオとの関連	水化学による SCC の抑制による構造材料の健全性維持
課題とする根拠 (問題点の所在)	水化学 RM と深層防護との関連付けの検討結果を参照
現状分析	(1) 炉内 SCC 環境評価手法の開発、高度化・標準化 腐食環境緩和効果を確認するため腐食電位 (ECP) の測定や貴金属付着量等のモニタリングが実施されているが、炉内の部位ごとに環境緩和効果が異なる。またモニタリングできる部位は限定されている。そこで、測定によるモニタリングとモデル解析評価を含めた評価技術の確立が必要である。 (2) SCC 環境緩和技術の開発・高度化 BWR の貴金属注入を伴う HWC や PWR の溶存水素濃度最適化等既存の環境緩和技術は存在するが、その最適化や高度化は必要である。また、酸化チタン等の新しい対策も開発されつつある。 (3) 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 亀裂進展を十分な精度で予測するために必要な SCC の進展に関するデータが不足している。また、特定の HWC 環境でニッケル基合金の SCC 発生が加速する可能性が示唆される試験データが得られており、追加データの取得が進められている。また、PWR に関しては亜鉛注入やホウ酸リチウムバンド管理、天然カリウム、分散剤等、SCC 発生・進展への影響因子についてのデータ拡充が必要と考えられるとともに、690 合金等対策材の SCC 発生挙動についても知見が不足している。 (4) データや評価技術の検証、規制基準の整備 BWR の維持規格には HWC 環境下での亀裂進展線図があるが、HWC の効果の判断クライテリアが基準化されていない。 (5) SCC メカニズム解明 SCC 発生・進展の詳細メカニズムは解明されていない。亀裂内水質が SCC に及ぼす影響、長時間環境暴露による組織変化、材料環境界面の酸化物特性、結晶粒界での特異な酸化、酸化の局在化や加速現象、粒界でのキャビティ生成、水素の影響機構等、様々な SCC (IGSCC、PWSCC、IASCC、ODSCC 等) に対する現象についての知見拡充が必要である。
期待される効果 (成果の反映先)	・一次冷却系バウンダリーを構成する材料の SCC 発生・進展による冷却水の漏えいや LOCA のリスクが低減され、原子力プラン

	トの安全性が向上する。 ・ SCC の発生・進展に伴う補修工事及び、保全の最適化による点検頻度の低減が可能となり、原子力プラントの稼働率向上並びに作業従事者の被ばく低減に寄与する。
実施にあたっての問題点	課題全体の共通問題として下記がある。 ・ 原子力安全との関連の明確化 ・ 緊急性・重要性・経済性に対する適切な評価 ・ 研究開発のための資金・人材の確保 ・ 機構論に関する基礎知見の拡充
必要な人材基盤	(1) 人材育成が求められる分野 ・ 水化学、腐食電位測定、ラジオリシス解析技術、金属材料の腐食 (2) 人材基盤に関する現状分析 ・ 事業者においては、SCC 環境緩和技術に関する知識・技能を有した人材の育成が行なわれるとともに、過去に生じたトラブルの技術伝承が進められてきた。 ・ メーカーでは海外メーカーからの技術導入や自主技術開発を通じて、必要な技術開発にかかる人材の育成を行っている。 ・ 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。 ・ 水化学技術は、原子力プラントの保全のみならず、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、実際に水化学の運用管理の経験を積んでいくことが必要である。 ・ 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。 ・ 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）も必要。 (3) 課題 ・ 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。 ・ 1F 事故後の原子力プラントの長期停止により、実際に水化学管理の経験を積む場が損なわれている。 ・ 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。

他課題との相関	ロードマップ対象項目の課題別区分の 既設の軽水炉等の事故発生リスクの低減のうち、経年劣化対策及び運転トラブルの防止に該当する。具体的な項目は以下のとおり。 ・ S111_d37 構造材料の高信頼化 ・ S111_d30 SA 対策機器の保安全管理の確立 ・ S111M107_d24 プラント運用技術、炉心設計管理の高度化 ・ S111M107_d36：高経年化評価手法・対策技術の高度化 ・ M107_d25：運転性能の高度化 ・ S111_d32 状態監視・モニタリング技術の高度化 ・ M107_d38 建屋構造・材料の高度化 ・ S111M107_d34 保守・運転管理の合理化・省力化による保守・運転員負荷低減 ・ S111_d33-1 被ばく低減技術の高度化 ・ L104_d41 高経年プラントの安全運転に向けた革新的技術の開発 ・ L104_d35-1 保守の効果を高め運転をサポートする革新的技術の適用
実施時期・期間	中長期（～2050年）
実施機関／資金担当 <考え方>	<u>産業界／産業界</u> SCCの発生・亀裂進展メカニズムの解明、SCCへの水質影響評価、既存技術の高度化と新たな水化学の開発、モニタリング技術の開発等を実施 <考え方> ・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。 ・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。 ・研究機関は、技術開発に必要な要素技術を開発する。 ・大学は、技術開発に必要な要素技術を開発する。 ・実施主体が資金担当となることが適当と考える。 <u>原子力規制委員会／原子力規制委員会</u> （必要に応じ、規制の枠組みの整備、技術評価） <考え方> ・電気事業者は、新規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。 ・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。 ・メーカーは、必要な技術開発に努める。 ・原子力規制委員会は、安全性を担保するために必要となる検証デ

	ータを拡充させ、機構論的な技術検証を踏まえて規制基準に反映させる。 ・実施主体が資金担当となることが適当と考える ・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。 <u>産業界・学協会 / 産業界</u> 水化学管理による SCC 抑制に係わる規格基準の策定 ・産業界（電気事業者、メーカー）が主体となって構造材料の健全性維持に必要な水化学技術の情報を蓄積する。 ・学協会は、構造材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。 ・原子力規制委員会は、構造材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。
その他	

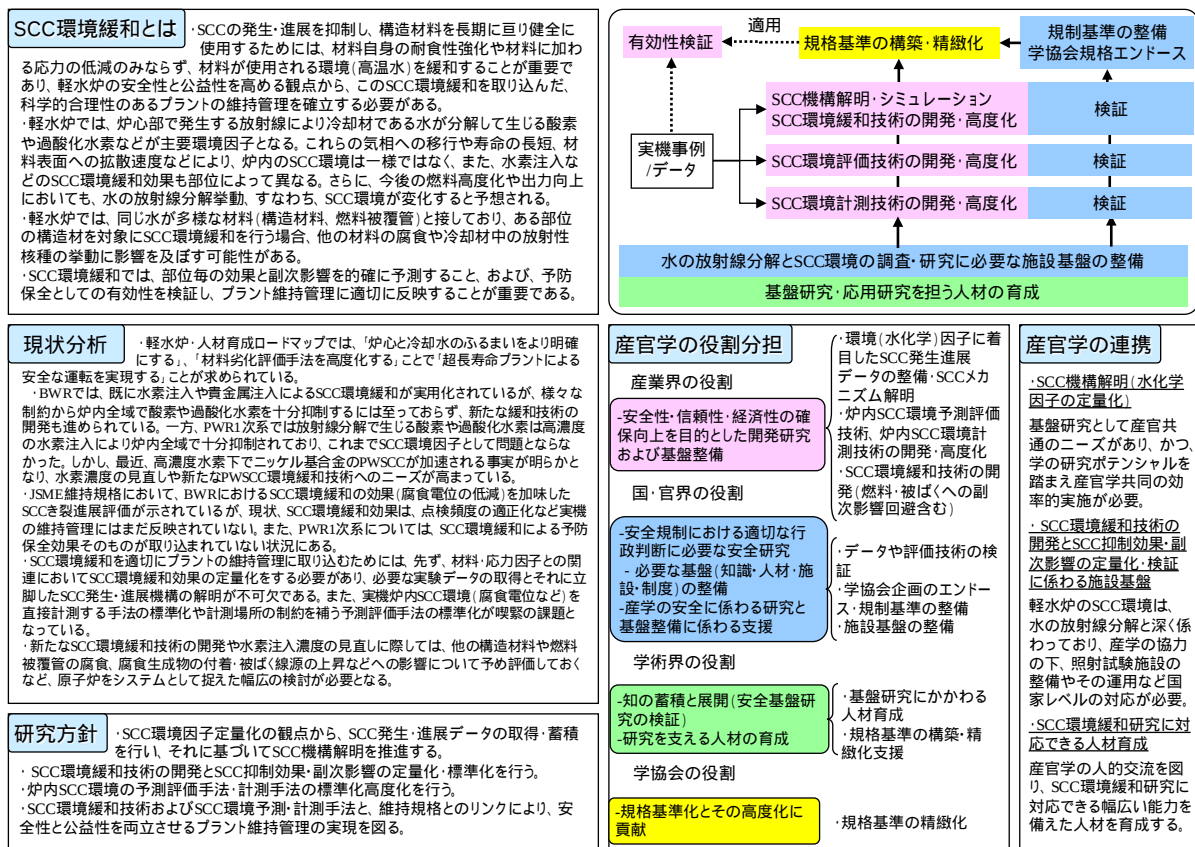


図 6.1.1-1 応力腐食割れ (SCC) 環境緩和に係わる導入シナリオ

表 6.1.1-1 応力腐食割れ (SCC) 環境緩和に係わる技術マップ (その1)

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)
炉内SCC環境評価手法の開発・高度化・標準化	ラジオリシスモデル・腐食電位(ECP)モデルの標準化・高度化	炉水の放射線分解生成物と構造材料との相互作用のモデル化。実測が困難な炉内SCC環境の分布や、SCC環境緩和技術の有効性を予測・評価する手法の標準化・高度化	短期/2020年 ～ 中期/2030年	産/産
	実機環境モニタリング技術およびSCCモニタリング評価技術の標準化・高度化・開発	SCC環境緩和技術の有効性検証とモデルによる予測・評価を裏付けるための実機炉内のSCC環境の直接モニタリング技術の標準化・高度化、及び新たな技術の開発	短期/2020年 ～ 中期/2030年	産/産
SCC環境緩和技術の開発・高度化	水素注入技術の改良/BWR	水素注入量(SCC環境緩和効果)の増加に伴う主蒸気系統流量率上昇の抑制、停止時被ばく線量の上昇抑制	中期/2030年	産/産
	NMCA適用技術の改良/BWR	・燃料健全性への影響抑制・停止時被ばく線量の上昇抑制 ・貴金属注入方法の改良・高度化	中期/2030年	
	一次系溶存水素濃度の最適化/PWR	IASCC・PWSCC抑制のための溶存水素濃度の最適化放射線分解抑制・燃料健全性維持・被ばく線源上昇の抑制	中期/2030年	
	ほう素—リチウムバンドおよびZn注入条件の最適化/PWR	ほう素—リチウムバンドと亜鉛注入の最適化によりPWSCCを抑制する燃料健全性・性能(AOA)への影響回避	中期/2030年	
	新しいSCC環境緩和技術の開発(酸化的チタン等水素注入代替技術)	・炉心上部におけるSCC環境緩和効果の拡大 ・SCC抑制効果が高く、副次影響が少ない環境緩和技術の開発	短期/2020年 ～ 中期/2030年	
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	実機SCC環境評価および環境緩和効果の実証	実機一次系の各部位におけるSCC環境(腐食電位など)の計測によるSCC環境緩和技術の有効性・範囲の明確化、及びラジオリシスモデル・腐食電位モデルの検証高度化	短期/2020年 ～ 中期/2030年	産/産
	SCC発生・進展への水質の影響評価	SCCの発生・進展挙動に及ぼす水化学因子の影響に係わるデータの拡充と高精度化(HAZ、応力拡大係数、運転モード、荷重モード、照射影響との重畳効果を含む)	短期/2020年 ～ 中期/2030年	

表 6.1.1-1 応力腐食割れ（SCC）環境緩和に係わる技術マップ（その２）

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)
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	累積照射量とSCC環境緩和効果の評価 (IASCC)	炉内構造物や制御棒などにおいて、中性子フルエンスの増加がSCC環境緩和技術の効果に及ぼす影響に関するデータの拡充・高精度化	短期/2020年 ～ 中期/2030年	産/産
	中性子照射下や局所水質環境下でのIASCC特性評価	照射下での材料表面近傍、隙間内部、クラック先端などの局所水質がSCC挙動に及ぼすデータの整備	短期/2020年 ～ 中期/2030年	
	軽水炉高度利用・燃料高度化の影響評価	・出力向上、燃料の高燃焼度化が及ぼすSCC環境の過酷化の程度の把握 ・SCC挙動への影響に関するデータ整備	中期/2030年 ～ 長期/2050年	
データや評価技術の検証、規制基準の整備	SCC環境評価技術、SCC環境計測技術、およびSCC環境緩和技術の検証	・学協会規格のデータや評価技術の検証、規制基準としてのエンドースを通じた規制の高度化 ・照射試験施設などの研究基盤整備	短期/2020年 ～ 中期/2030年	官/官
SCCメカニズム解明	SCC発生進展メカニズム解明とモデル構築 (IGSCC, PWSCC, IASCC, ODSCC)	・SCC加速因子の抽出 (照射量、照射速度、起動・停止、K変化率、表面加工、水の放射線分解、長時間時効など) 下線は水化学に直接関連する因子 ・水化学因子がSCC発生・進展に及ぼす影響機構の解明 ・SCC発生・進展モデルと予測技術の確立	短期/2020年 ～ 長期/2050年	産・官・学/産・官・学
	炉内SCC環境に関する基盤研究	・高温水の放射線分解に係わる放射線化学的基盤 (G値、反応速度定数など) の整備 ・材料表面・隙間内部・き裂先端など局所におけるSCC環境形成メカニズムと腐食反応の解明・精緻化、水化学環境が酸化皮膜物性を通じてSCC挙動に及ぼす影響の解明	短期/2020年 ～ 長期/2050年	産・官・学/産・官・学

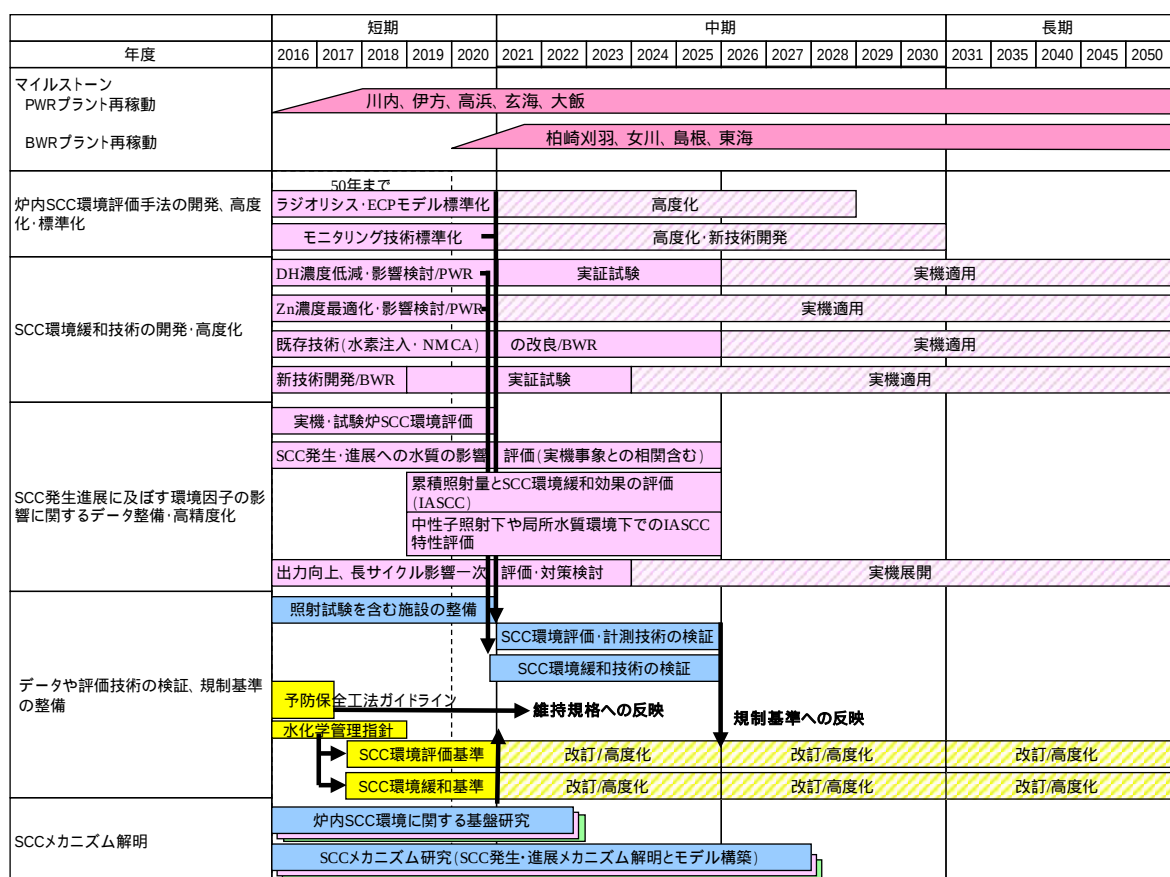


図 6.1.1-2 応力腐食割れ（SCC）環境緩和に係わるロードマップ