

水化学部会定例研究会

# 水化学ロードマップフォローアップ状況

一般財団法人 電力中央研究所

材料科学研究所

河村浩孝

オルガノ(株)東京本社

2019年3月8日(金)

# 本講演の論点

- 作成中の水化学ロードマップ2019(水化学ロードマップ2009のフォローアップ)の概況紹介
- 2019年度上期内策定に向けたロードマップ原案に対する意見聴取
  - ✓ 抽出した課題は適切か？過不足はないか？
  - ✓ 深層防護との関連は適切か？
  - ✓ 改訂点に過不足はないか？

# 本日の紹介内容

水化学管理の目的

水化学ロードマップ  
2007&2009

フォローアップ検討WG  
の概要

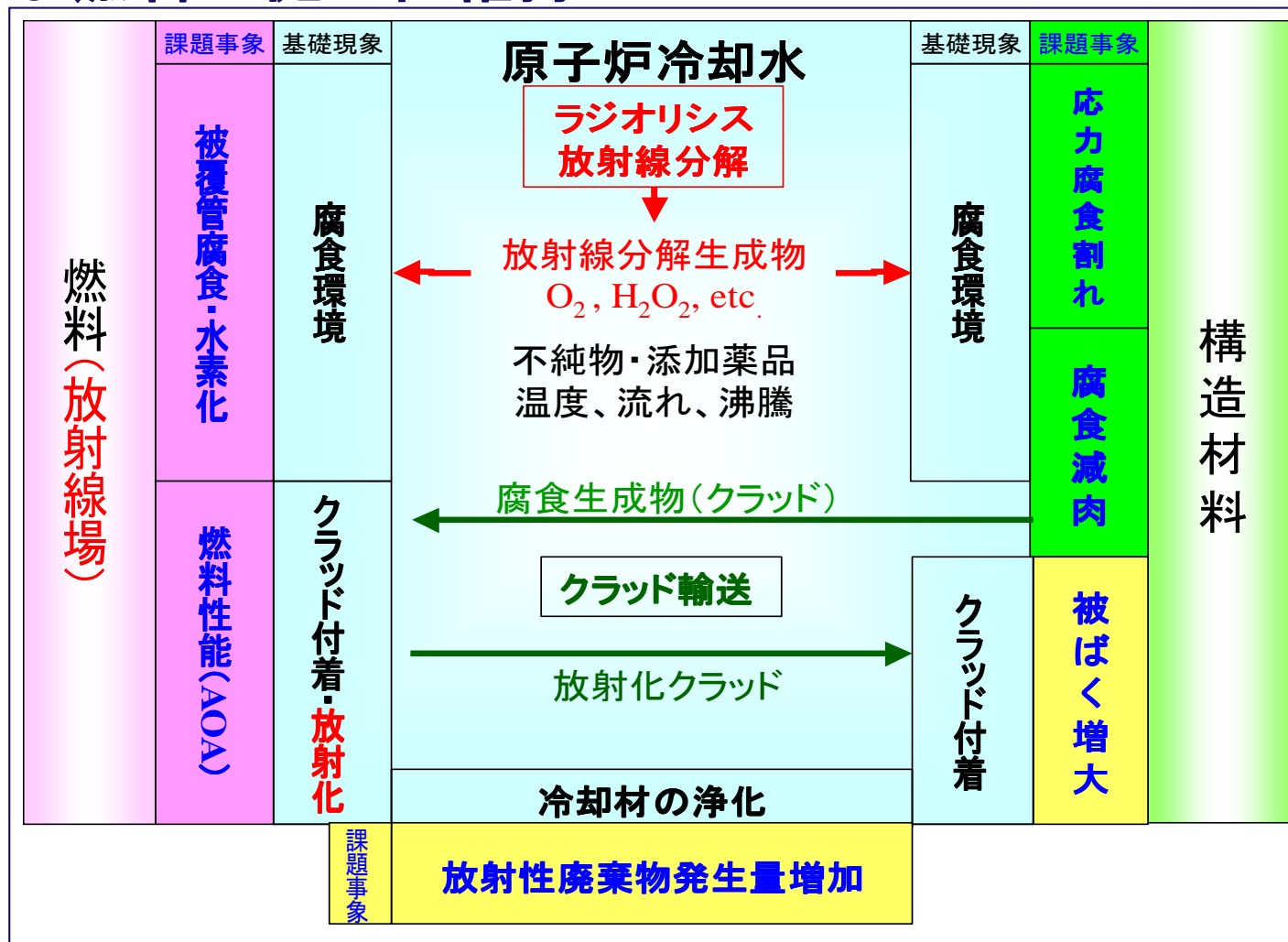
検討WG活動実績

個別ロードマップ  
の概要

意見聴取

# 水化学管理の目的 (水化学の諸課題とそれらの相互関係)

- 被ばく線源強度低減
- 構造材料および燃料の健全性維持
- 廃棄物低減



# 水化学ロードマップ2007

- **構造材料の高信頼化**
  - 応力腐食割れ環境緩和
  - 配管減肉環境緩和
  - SG長期信頼性確保
  - 状態基準保全への支援
- **燃料の高信頼化**
  - 被覆管・部材の腐食／水素化の抑制
  - 性能維持(AOA:CIPS抑制)
- **環境負荷軽減**
  - 被ばく線源低減
  - 環境・一般公衆への影響低減
- **諸課題への取組みを支える基盤**
  - 水化学共通基盤技術
  - 人・情報の整備

# 水化学ロードマップ2009

- ◆水化学ロードマップ2007に対し、産官学の役割分担の明確化，優先順位の検討を踏まえ，水化学ロードマップ2009を発行。
- ◆通常時の軽水炉保全にかかわる水化学の高度化に加え，経済性向上に向けた研究・技術開発の選択と達成時期の明確化を目的に策定

2011年、原子力発電を取り巻く環境が大きく変化

# フォローアップの背景

- 日本原子力学会は、原子力発電システムの安全性向上に対するこれまでの取り組みの問題点を根本的に見直し、原子力安全文化の醸成、自主的安全性向上の観点から、経産省資源エネルギー庁の「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」を策定し、2017年3月にローリングを実施
- 水化学部会においても、福島事故を反省し、社会・一般公衆・環境に多大な影響を与えるような事故を二度と繰り返さないよう、原子力安全に係る深層防護の考え方に立脚した研究・技術開発および人材育成を行っていくとの共通認識が醸成
- 原子力発電の再稼働が進む中、深層防護の考え方に立脚した研究開発ロードマップを策定し、原子力安全に寄与する必要

# 水化学ロードマップ2009のフォローアップ基本方針

フォローアップ活動は停滞していたが、「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」の発行を受け、**最新の深層防護に立脚し、自主的安全性向上に向けた研究・技術課題を抽出する。**(2019年度完成予定)



# 水化学ロードマップフォローアップ検討WG(2019年3月現在)

## ◆水化学部会内に設置

✓ 主査: 渡邊豊部会長(東北大学)

✓ 幹事: 河村浩孝(電中研)

✓ 委員:

・大学: 内田俊介(JAEA)、阿部博志(東北大学)、室屋裕佐(大阪大学)

・電力: 箭内健司(東京電力)、赤峰浩司(関西電力)、稲垣博光(中部電力)、  
小野昇一(元東京電力)、杉野亘(日本原電)

・メーカー: 高木純一、山本誠二(東芝)、長瀬誠(日立GE)、荘田泰彦(三菱重工)

・研究機関: 寺地巧(INSS)、佐藤智徳(JAEA)、藤原和俊(電中研)

✓ 元委員: 宮澤晃(東京電力)、久宗健志(元原電)

# フォローアップ検討WGの活動概要と新規検討項目例

## ■ 深層防護ポイント

- 従前の水化学管理(事故の未然防止のための水化学)に加え、「軽水炉安全技術・人材ロードマップ」と整合し、深層防護に立脚した水化学管理の確立 <基本方針>
- このため、自主的安全性向上に向けた新たな研究・技術課題を抽出
- 課題の必要性、背景、目的と達成時期、実施概要、実施体制を検討
- 構成は、課題整理票、導入シナリオ、技術マップ、ロードマップ

## ◆ 新たな検討項目の例

- 被ばく線源低減(既設炉の廃止措置等、保管時の水化学を含む)
- 核燃料被覆管の健全性維持(ATF等の腐食対策を含む)
- 環境負荷低減、化学物質の影響低減(ヒドラジン代替剤—暴露・水質汚濁)
- 事故時対応の水化学(SA時の核分裂生成物挙動を含む)
- 福島廃炉推進対応の水化学

# 深層防護の検討にあたってのポイント

- 逸脱・異常・事故・過酷事故と事態が進んでいく各過程において、水化学技術がどのように貢献できるのかを改めて位置付けてみよう、という趣旨で種々検討
- 深層防護各層の本来の定義と合致しない部分については、今後修正していく

# 深層防護に立脚したロードマップの検討

レベル5に1Fの廃止措置は、防災(サイト外の緊急時対応)の定義とは異なるので不適切。事故炉の廃止措置については、別途深層防護を定義すべきであるが、一般の発電所の廃止措置とも異なり、考え方も確立していないので表に取り込まない方がよい

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		設計基準を越す事故への施設内対策		防災(核燃料RMでは地震時)
	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	Non LOCA	LOCA	SA前	SA後	1Fの廃止措置
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	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		—
	出挙動の把握	レットのFP放出挙動の把握	動把握	炉心損傷防止	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

一般的には、レベル4全体がSAの領域を示すため、「SA前」と「SA後」の記載は不適切。また、SA前、SA後の各安全目標の対応も不明確。IAEAのレベル4では長期SBO、ATWS等の多重故障領域であるDEC(設計拡張事象)も含み、Beyond DBA領域(炉心損傷に至らない場合も含む)として定義。因みに、WENRAではレベル3(3b)でDECを定義。したがって、IAEA流でレベル4をDECと著しい炉心損傷を伴うSAの各領域に分ける考え方はあるが、あえて分割するのであれば各領域の定義を明確にすべきと考える。

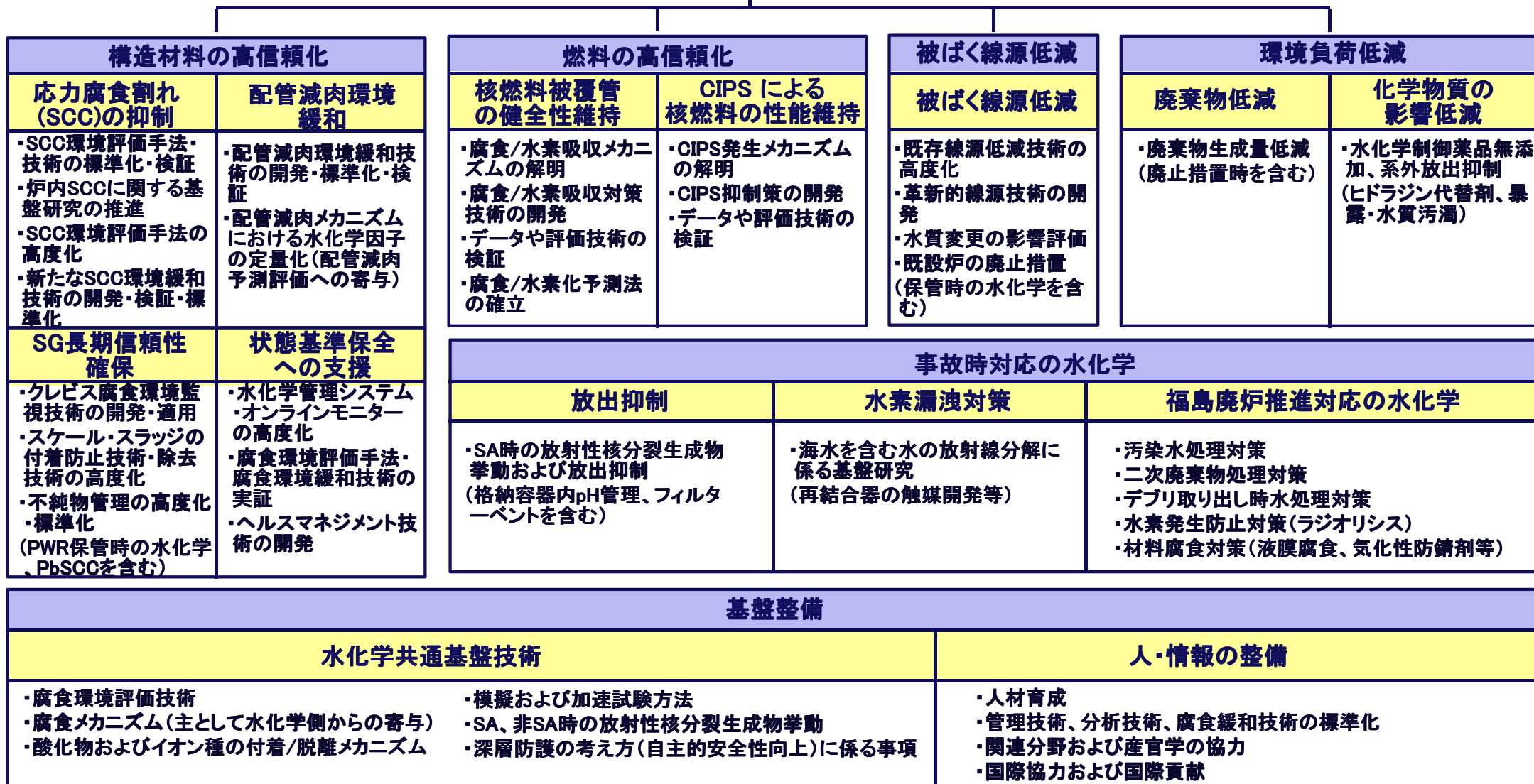
レベル4の定義(4段目)に“SAを防止するための対策”とあるが、一般的にはSA発生後を対象とする領域であるため“SAの事象進展を緩和するための対策”とすべきと考えます。但し、上記のDECを含めて記載するのであれば、“著しい炉心損傷の防止とSAの事象進展の緩和のための対策”との記載も可能かと考える。

# 深層防護に立脚したロードマップの検討(改訂案)

深層防護	目的	レベル1	レベル2	レベル3	レベル4
IAEA における定義 (INS AG- 10,SS R- 2/1)	定義	異常運転や故障の防止	異常運転の制御及び故障の検知	設計基準内への事故の制御	事故の進展防止及びSAの影響緩和を含む過酷なプラント状態の制御
	目的	保守的設計及び建設・運転における高い品質	制御、制限及び防護系、並びにその他のサーベランス特性	工学的安全施設及び事故時手順	補完的手段及び格納容器の防護を含めたアクシデントマネジメント
	対策	プラントが健全かつ保守的に立地され、設計、建設、保守また運転されること。内的危険事象の可能性を低減すること。(中略)プラントの運転と保守についての要件と運転と保守の品質マネジメントについての要件を決定する詳細な分析により裏付けること	通常運転状態からの逸脱を検知し制御すること。設計により特定の系統と設備を備えること、それらの有効性を安全解析により確認すること、さら起因事象の影響を防止するか、最少に留め、又はプラントを安全な状態に戻す運転を手順の確立すること	炉心の損傷や重大な敷地外への放出を防止し、プラントを安全な状態に復帰すること、固有の及び(又は)工学的安全機能、安全系、手順の準備。	閉じ込め機能を確実にすること。それにより放射性物質の放出が合理的に達成可能な限り低く維持されることを確実にすること。シビアアクシデント(SA)の事象進展を緩和するための対策
水化学分野における定義	安全目標	異常・事故の未然防止	異常・事故の早期検知	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心損傷防止</li> <li>冷却性能維持</li> <li>ペレットの被覆管内溶解前後のFP放出挙動把握</li> <li>FP放出抑制</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>炉心損傷拡大防止</li> <li>冷却性能維持(再臨界防止)</li> <li>事故後のFP挙動の把握</li> <li>ペレット、燃料デブリからのFP放出抑制</li> <li>公衆の被ばく低減</li> </ul>
	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	復水器海水漏えいの早期検知と原子炉への不純物持ち込み抑制、燃料被覆管損傷の早期検知による燃料損傷防止など、環境への放射性物質放出を抑制し、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 (例：放射性物質等の放出低減のためのサブプレッションプールのpH制御等)

# 水化学の諸課題とそれらの相互関係

## 水化学による原子力発電プラントの安定性・信頼性維持への貢献



# ロードマップ2019の目次(案)

目次	執筆者
1. はじめに	渡邊
2. 水化学ロードマップの意義	渡邊
3. 水化学を取巻く環境の変化	高木
4. 自主的安全性向上に向けての水化学ロードマップ改訂の基本方針および実施体制 (深層防護への対応)	久宗、杉野
5. 水化学ロードマップ2018	稲垣
6. 安全基盤研究 (安全系, 海水系, 補機冷却系の水化学管理技術(BWR防錆剤)等の水化学管理技術については、技術が完成している旨、本文に記載)	内田
6.1 構造材料の高信頼化	内田
6.1.1 応力腐食割れ(SCC)の抑制	BWR:長瀬、山本、PWR:寺地
6.1.2 配管減肉環境緩和	阿部、藤原
6.1.3 SG長期信頼性確保 (PWR保管時の水化学、PbSCCを含む)	荘田
6.1.4 状態基準保全への支援	小野
6.2 燃料の高信頼化	河村
6.2.1 核燃料被覆管の健全性維持 (ATFの腐食対策を含む)	河村
6.2.2 CIPS対策による核燃料の性能維持	河村
6.3 被ばく線源低減 (既設炉の廃止措置等、保管時の水化学を含む)	稲垣、中野、杉野、赤峰
6.4 環境負荷低減 (廃棄物低減、化学物質の影響低減を含む)	BWR:稲垣、PWR:赤峰
7. 基盤整備	佐藤、内田
7.1 水化学共通基盤技術 (核分裂生成物挙動に関する共通基礎技術を含む)	佐藤、内田
7.2 人・情報の整備	小野、阿部、室屋
8. 事故時対応の水化学(仮)	内田、高木、長瀬、箭内
8.1 事故時対応の水化学主要課題の変遷(仮)	
8.2 水化学が関与する事故時対策(仮)	
8.3 福島廃炉推進対応の水化学 (汚染水処理対策、デブリ取出し時水処理対策、水素発生対策、材料腐食対策)	渡邊、高木、長瀬、箭内、佐藤
9. まとめ	渡邊
略語表	河村

# “応力腐食割れ(SCC)の抑制”

## 主な改訂点:

- ◆ **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、耐SCC材を含む高経年化リスクと水化学の関係評価など、信頼性向上にさらに踏み込んだ内容に改訂**

## 深層防護との関連:

- ◆ **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「異常・故障の発生防止」に該当**
- ◆ **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「異常・故障の拡大防止」に該当**
- ◆ **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の抑制が事故収束に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「事故の影響緩和」やレベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」には非該当**



# “応力腐食割れ(SCC)”の導入シナリオ

## SCC環境緩和とは

・SCCの発生・進展を抑制し、構造材料を長期に亘り健全に使用するためには、材料自身の耐食性強化や材料に加わる応力の低減のみならず、材料が使用される環境(高温水)を緩和することが重要であり、軽水炉の安全性と公益性を高める観点から、このSCC環境緩和を取り込んだ、科学的合理性のあるプラントの維持管理を確立する必要がある。

・軽水炉では、炉心部で発生する放射線により冷却材である水が分解して生じる酸素や過酸化水素などが主要環境因子となる。これらの気相への移行や寿命の長短、材料表面への拡散速度などにより、炉内のSCC環境は一律ではなく、また、水素注入などのSCC環境緩和効果も部位によって異なる。さらに、今後の燃料高度化や出力向上においても、水の放射線分解挙動、すなわち、SCC環境が変化すると予想される。

・軽水炉では、同じ水が多様な材料(構造材料、燃料被覆管)と接しており、ある部位の構造材を対象にSCC環境緩和を行う場合、他の材料の腐食や冷却材中の放射性核種の挙動に影響を及ぼす可能性がある。

・SCC環境緩和では、部位毎の効果と副次影響を的確に予測すること、および、予防保全としての有効性を検証し、プラント維持管理に適切に反映することが重要である。

## 現状分析

・軽水炉・人材育成ロードマップでは、「炉心と冷却水のふるまいをより明確にする」、「材料劣化評価手法を高度化する」ことで「超長寿命プラントによる安全な運転を実現する」ことが求められている。

・BWRでは、既に水素注入や貴金属注入によるSCC環境緩和が実用化されているが、様々な制約から炉内全域で酸素や過酸化水素を十分抑制するには至っておらず、新たな緩和技術の開発も進められている。一方、PWR1次系では放射線分解で生じる酸素や過酸化水素は高濃度の水素注入により炉内全域で十分抑制されており、これまでSCC環境因子として問題とならなかった。しかし、最近、高濃度水素下でニッケル合金のPWSCCが加速される事実が明らかとなり、水素濃度の見直しや新たなPWSCC環境緩和技術へのニーズが高まっている。

・JSME維持規格において、BWRにおけるSCC環境緩和の効果(腐食電位の低減)を加味したSCCき裂進展評価が示されているが、現状、SCC環境緩和効果は、点検頻度の適正化など実機の維持管理にはまだ反映されていない。また、PWR1次系については、SCC環境緩和による予防保全効果そのものが取り込まれていない状況にある。

・SCC環境緩和を適切にプラントの維持管理に取り込むためには、先ず、材料・応力因子との関連においてSCC環境緩和効果の定量化をすることが必要であり、必要な実験データの取得とそれに対応したSCC発生・進展機構の解明が不可欠である。また、実機炉内SCC環境(腐食電位など)を直接計測する手法の標準化や計測場所の制約を補う予測評価手法の標準化が喫緊の課題となっている。

・新たなSCC環境緩和技術の開発や水素注入濃度の見直しに際しては、他の構造材料や燃料被覆管の腐食、腐食生成物の付着・被ばく線源の上昇などへの影響について予め評価しておくなど、原子炉をシステムとして捉えた幅広い検討が必要となる。

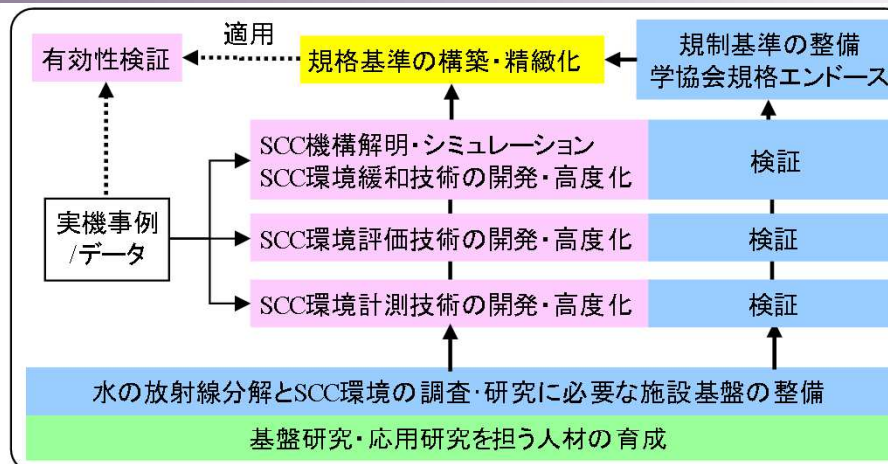
## 研究方針

・SCC環境因子定量化の観点から、SCC発生・進展データの取得・蓄積を行い、それに基づいてSCC機構解明を推進する。

・SCC環境緩和技術の開発とSCC抑制効果・副次影響の定量化・標準化を行う。

・炉内SCC環境の予測評価手法・計測手法の標準化高度化を行う。

・SCC環境緩和技術およびSCC環境予測・計測手法と、維持規格とのリンクにより、安全性と公益性を両立させるプラント維持管理の実現を図る。



## 産官学の役割分担

### ①産業界の役割

-安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備

### ②国・官界の役割

-安全規制における適切な行政判断に必要な安全研究  
-必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備  
-産学の安全に係わる研究と基盤整備に係わる支援

### ③学術界の役割

-知の蓄積と展開(安全基盤研究の検証)  
-研究を支える人材の育成

### ④学協会の役割

-規格標準化とその高度化に貢献

・環境(水化学)因子に着目したSCC発生進展データの整備・SCCメカニズム解明  
・炉内SCC環境予測評価技術、炉内SCC環境計測技術の開発・高度化  
・SCC環境緩和技術の開発(燃料・被ばくへの副次影響回避含む)

・データや評価技術の検証  
・学協会企画のエンドース・規制基準の整備  
・施設基盤の整備

・基盤研究にかかわる人材育成  
・規格基準の構築・精緻化支援

・規格基準の精緻化

## 産官学の連携

・SCC機構解明(水化学因子の定量化)  
基盤研究として産官共通のニーズがあり、かつ、学の研究ポテンシャルを踏まえ産官学共同の効率的実施が必要。

・SCC環境緩和技術の開発とSCC抑制効果・副次影響の定量化・検証に係る施設基盤  
軽水炉のSCC環境は、水の放射線分解と深く関わっており、産学の協力の下、照射試験施設の整備やその運用など国家レベルの対応が必要。

・SCC環境緩和研究に対応できる人材育成  
産官学の人的交流を図り、SCC環境緩和研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

# “配管減肉環境緩和”

## 主な改訂点：

- ◆ FACのみを対象として配管減肉環境緩和に関する課題を整理(LDIを対象外)
- ◆ 深層防護の観点から、海水リーク等による課題を追加
- ◆ 最新の動向を反映(代替ヒドラジン適用時の減肉抑制対策など)

## 深層防護との関連：

- ◆ 水化学の改良による減肉環境緩和は、深層防護のレベル1「異常・故障の発生防止」に該当
- ◆ 通常運転時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
- ◆ FACによる配管減肉の進行は経年的な事象であり、その予防のための配管減肉緩和技術の適用が、非常用系機器・配管の機能に悪影響を及ぼす可能性は低いいため、レベル3「事故の影響緩和」、レベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」には非該当

# “配管減肉環境緩和”の導入シナリオ

## 配管減肉とは

- ・配管減肉は、内包する流体の漏洩・噴出といった安全上のリスクと共に、これを防止するための維持管理(点検・補修・取替)コストの増大を招いている。さらに、発生した腐食生成物に起因する熱伝達の阻害や被ばく線源の上昇などの原因にもなっている。
- ・原子力発電所における配管減肉の主な原因である流れ加速型腐食(FAC)は、材料・流況(流速、偏流有無等)・水化学環境(温度、pH、酸素)の各因子により複合的な影響を受ける。
- ・原子力発電所では、その対策として、耐食材料への配管取替(材料因子の改善)、配管レイアウトの変更(流況因子の改善)の他に、pH制御や酸素注入といった水化学の改良(環境緩和技術の適用)を行っている。
- ・配管減肉管理をより安全に、且つ、合理的に遂行するためには、減肉環境緩和技術の開発・適用を進めるとともに、その効果に応じて肉厚測定箇所および頻度を設定するなど、肉厚測定計画の策定にも反映させることが有効である。

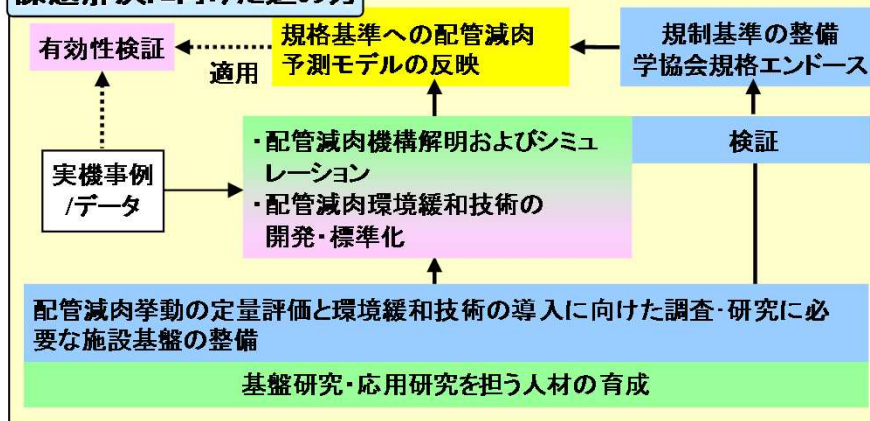
## 現状分析

- ・水化学の改良による配管減肉の抑制は、その技術の適用開始が比較的容易な場合もあり、効果は広範囲で得られるメリットがある。このため、水化学の改良による減肉環境緩和技術の導入は積極的に適用されるべきである。
- ・偏流発生部位などの一部の部位では予想外の配管減肉の進行が認められている。このような事象の発生を未然に防ぎ、配管減肉の進行による漏えいの危険性を低減させるには、減肉予測評価手法の活用が有効であり、その構築のためには、配管減肉メカニズムの解明が不可欠である。
- ・各発電所では、日本機械学会「配管減肉に関する技術規格2006年版」(平成18年11月)に基づいて配管減肉管理を行っている。現在の減肉管理は、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。
- ・配管減肉環境緩和技術を減肉予測評価手法と共に規格化・標準化し、減肉管理へ反映させることによって、FAC減肉事象の予知保全の最適化ができると共に、プラントの安全性を損なうことなく、減肉管理の合理化が実現できる。
- ・異常・故障の事故への拡大防止の点から、海水リーク等による水質悪化時の配管減肉挙動に及ぼす影響を把握する必要がある。

## 研究方針

- ・環境因子と他因子が重畳して変化した場合における配管減肉挙動の定量的なデータの蓄積
- ・蓄積したデータに基づき、環境因子による配管減肉メカニズムの解明と環境改善による減肉抑制効果の評価
- ・環境緩和(PWR:2次系高pH、2次系酸素注入術等)技術の開発・標準化
- ・環境緩和技術による減肉抑制効果の実績の蓄積に基づく、環境改善が減肉挙動に及ぼす影響評価の検証

## 課題解決に向けた進め方



## 産官学の役割分担

- ①産業界の役割
  - 安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備
  - 環境因子による減肉挙動への影響(定量評価)に関する検討
  - 環境緩和技術の導入に関する検討
  - 実機情報による環境改善による減肉挙動への有効性検証
- ②国・官界の役割
  - 安全規制における適切な行政判断に必要な安全研究
  - 必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備
  - 産学の安全に係わる研究と基盤整備に係わる支援
  - データや評価技術の検証
  - 学協会規格のエンドースおよび規制基準の整備
  - 施設基盤の整備
- ③学術界の役割
  - 配管減肉メカニズムの構築
  - 基盤研究にかかわる人材育成
  - 規格基準の構築・精緻化支援
- ④学協会の役割
  - 規格基準化とその高度化に貢献
  - 規格基準の精緻化

## 産官学の連携

- ①環境因子による配管減肉メカニズムへの影響
  - ・基盤研究として産官共通のニーズがあり、かつ、学の研究ポテンシャルを踏まえ産官学共同の効率的実施が必要。
  - ・安全性かつ合理的な配管減肉管理の遂行のためには、減肉メカニズムに基づく管理が有効であることから、産が構築した減肉予測評価モデルの有効性の国による検証が必要。
- ②配管減肉和研究に対応できる人材育成
  - ・産官学の人的交流を図り、本研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を長期的に育成する。

# “SG長期信頼性確保”

## 主な改訂点:

- ◆ 通常時SG長期信頼性確保を目的とした、損傷メカニズム解明、環境緩和技術開発、スケール付着抑制水処理技術の適用評価に加え、**代替ヒドラジン技術、スケール付着抑制技術の適用効果、適用時影響評価を追加**

## 深層防護との関連:

- ◆ 蒸気発生器(以下SG)長期健全性確保のための水質管理は、**SG伝熱管腐食損傷の発生による、一次系から二次系統への冷却材漏洩および環境への放射能放出を防止することを目的としており、プラント安全性維持に必要な深層防護レベル1「異常・故障の発生防止」に該当**
- ◆ **一次系冷却材の漏洩による放射能の環境放出拡大防止対策は、一&二次系の水質管理の範囲外であり、また、復水器漏えい等の水質劣化に対しては、水質監視設備、水質浄化系設備の増強等、設備側の保全対策が確立しているため、レベル2「異常・故障の拡大防止」、レベル3「事故の影響緩和」、レベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」には非該当**

# “SG長期信頼性確保”の導入シナリオ

## SG長期信頼性確保とは

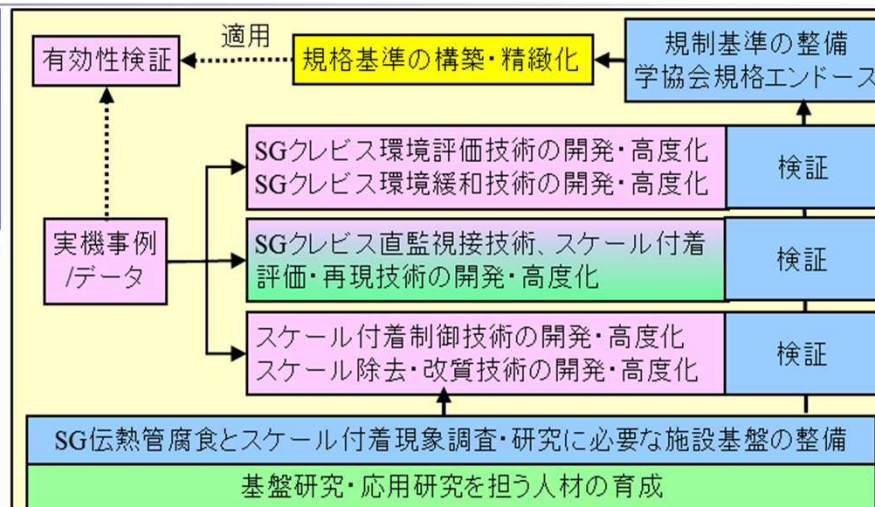
- SGはPWRプラントの最重要機器であり、その長期信頼性確保は、プラントの安定運用、信頼性向上に貢献する。
- 信頼性確保のためには、SG伝熱管腐食、損傷防止による一次系冷却材漏えい防止と冷却性能維持、スケール付着に起因する性能低下抑制、運用制限の回避が重要である。

## 現状分析

- 軽水炉・人材ロードマップでは、「プラント技術・運用管理の高度化」、「炉心と冷却水のふるまいをより明確にする」、「材料劣化・環境評価技術を高度化することで長期信頼性を向上させ、「60年超プラントでの安全な運転を実現する」ことが求められている。
- SG伝熱管の2次側損傷(IGA)は、経年劣化事象に関わるトラブルの主原因となってきた。SGは管外蒸発型の熱交換器であり、SG伝熱管と管支持板間に物理的に形成される狭あい部(クレビス)、あるいは給水から持ち込まれた鉄が管板上に堆積、固着したスケール下部に形成されるクレビスで、乾湿交番(Dry & Wet)環境が生じ、微量不純物の高濃度濃縮により、当該部が強アルカリ/強酸性環境となることが発生原因となる。
- 不純物管理、還元性雰囲気確保等腐食防止対策の適用・高度化により、SG伝熱管損傷リスクは大幅に低減したが、クレビス環境の酸性化抑制対策、海外で報告されている鉛が関与する損傷影響解明のため、クレビス環境監視技術、評価技術の高度化が望まれる。
- 一方、SG二次側スケール付着に起因する伝熱抵抗、流動抵抗増加によるプラント性能、運用への影響増加抑制については、給水処理改善(高pH化等)による二次系機器のFAC抑制、付着スケール除去・改質技術(ASCA洗浄等)の適用により改善が図られている。
- FAC抑制対策については、SG、二次系機器各部への効果・影響を考慮したベストミックス検討が課題である。
- スケール除去・改質技術の高度化にあたっては、スケール付着メカニズム解明、及びスケール付着再現・評価技術の高度化が望まれる。

## 研究方針

- SG伝熱管損傷メカニズム、クレビス濃縮メカニズムの解明を推進する。
- SGクレビス酸性環境緩和技術の開発・高度化を推進する。
- 鉛に起因する伝熱管損傷メカニズムを解明し、管理方法、管理指針を策定する。
- SGクレビス環境確認、クレビス環境緩和対策の研究・検証に際し、クレビス直接監視技術・評価技術の開発・高度化を推進する。
- スケール付着抑制技術の適正化(二次系給水処理条件の適正化)を推進する。
- スケール除去・改質技術の開発・高度化を推進する。



## 産官学の役割分担

- 産業界の役割**  
-安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備
- 国・管界の役割**  
-安全規制における適切な行政判断に必要な安全研究  
-必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備  
-産学の安全に係わる研究と基盤整備に係わる支援
- 学界の役割**  
-腐食・スケール付着メカニズムの解明  
-計測・評価技術の高度化  
-知の蓄積と展開  
-研究を支える人材の育成
- 学協会の役割**  
-規格基準化とその高度化に貢献  
-他部会との協働  
-検討の場の提供

- 伝熱管損傷、クレビス濃縮メカニズム解明
- クレビス環境緩和技術の開発・高度化
- クレビス直接監視・評価技術の開発・高度化
- スケール付着抑制・除去技術の開発・高度化
- データや評価技術の検証
- 学協会企画のエンドース・規制基準の整備
- 施設基盤の整備

## 産官学の連携

- SG伝熱管損傷・クレビス濃縮メカニズム解明と環境緩和技術の開発及びスケール付着抑制技術の開発と高度化
- 基盤研究として産官共通のニーズがあり、かつ、学の研究ポテンシャルを踏まえ産官学共同の効率的実施が必要。
- SG伝熱管環境緩和、スケール付着抑制研究に対応できる人材育成
- 産官学の人的交流を図り、SG伝熱管環境緩和、スケール付着抑制研究に対応できる幅広い能力を備えた人材を育成する。

# “状態基準保全への支援”

## 主な改訂点：

- ◆ 2009年度版以降の技術進展を踏まえて見直し
- ◆ 福島第一原子力発電所の事故を踏まえて、事故発生防止・拡大防止に係る課題を検討

## 深層防護との関連：

- ◆ プラント構成材料の**損傷リスク**に応じた**適切な保全**を行うことは、深層防護の**レベル1「異常・故障の発生防止」**に**該当**
- ◆ 一次冷却材の水質異常兆候を早期に検出し、**プラントの運転管理への適切な判断材料を提供**することは、**レベル2「異常・故障の拡大防止」**に**該当**
- ◆ 冷却水中核種濃度や格納容器雰囲気の監視技術の一層の高度は、**レベル3「事故の影響緩和」**は**該当**
- ◆ **炉内モニタリング技術の性能強化**は、**レベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」**に**該当**

# “状態基準保全への支援”の導入シナリオ

## 状態基準保全の支援とは

経年劣化対策の充実のためには、状態基準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とされ、新検査制度では、回転機器の劣化進展把握のため、振動分析など運転中の状態監視が導入された。震災以後、軽水炉プラントの事故発生リスク低減が、より一層求められているが、状態基準保全の支援技術は、運転トラブルの防止、経年劣化対策の確かな実施および作業環境の改善の観点から、重要度を増している。しかしながら、原子炉構成材料の経年劣化に関する状態基準保全技術の開発・適用は進んでおらず、現行は健全性評価等に基づいた時間計画保全(TBM)を中心とした保全となっている。状態基準保全が実現すれば、損傷リスクに応じた適切な保全方法の展開と合理的な点検が可能となる。同時に、適切な情報発信の組み合わせによって見える化に資することができ、安心・安全意識の醸成も期待される。

## 現状分析

水質モニタリングや診断技術はこれまでに多くの研究開発が行われ、プラントの水質維持に貢献してきた。一方、保全支援としては、SCCやFACに関する水質の影響評価及び実機水質モニタリング／評価技術の開発を推進する必要があるが、水化学技術単独では状態基準保全を実現することは難しい。材料の状態基準保全技術の開発にあたっては、これら他の劣化要因を含めた精度の高い経年劣化評価技術の開発が不可欠であり、今後、高経年化対応等の関連研究と水化学研究を状態基準保全技術開発の観点においてより一層リンクさせてゆく必要がある。

震災以後、軽水炉プラントの事故発生リスク低減が、より一層求められている。状態基準保全の支援技術は、運転トラブルの防止、経年劣化対策の確かな実施及び作業環境の改善の観点から、重要度を増している。

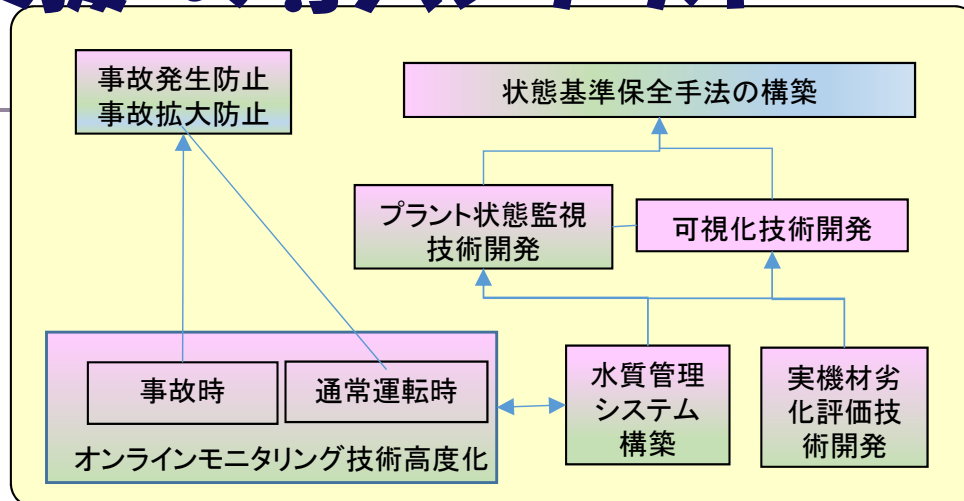
福島事故では、格納容器雰囲気モニタが十分機能せず、また、原子炉水位計からも信頼できる情報が得られなかったため、事故の発生・拡大防止のため、機能強化が望まれており、化学の立場からの支援が必要である。

材料劣化の進行において水質環境は重要な要因であるが、状態監視は材料要因、応力要因ならびに環境要因等劣化因子のすべての要素に立脚したモニタリングモデルや評価モデルが確立しなければ、効率的かつ効果的な実用性のある技術となりにくい。現状、開発に必要な基盤技術や要素技術は十分ではなく、個別分野での研究や技術開発において状態基準保全に貢献する技術を育ててゆく必要がある。

水素注入などのSCC環境緩和技術を適用した効果を反映した保全を行うことについてのニーズは大きく、実機環境でのデータ取得が望まれている。

## 研究方針

水質モニタリングと評価技術を高度化し、水化学管理によりプラントの状態監視を行う。炉内や配管の健全性モニタリングが可能になることで、長期にわたる経年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。SCCや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。あわせて、保全技術に展開していくためのスキームを検討する。事故時の格納容器雰囲気や原子炉水位などのモニタリング高度化を化学の立場で支援を行い、事故の発生・拡大防止に寄与する。



## 産官学の役割分担

### ①産業界の役割

-安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備

・実機腐食環境の詳細評価  
・モニタリング技術の高度化  
・実機材劣化評価手法の開発と既存技術の高度化  
・状態基準保全手法の開発

### ②官界の役割

-安全規制につながる安全研究(NRA)  
-安全基盤研究の推進(METI,MEXT)

・規制の高度化, 合理化  
・安全基盤研究の推進

### ③学術界の役割

-知の蓄積と展開(安全基盤研究の推進・検証)  
-研究を支える人材の育成

・基礎データの蓄積、基盤技術の開発  
・腐食環境シミュレーション技術の高度化  
・実機材料劣化モデリング/シミュレーション

### ④学協会の役割

-規格基準化とその高度化に貢献

・規格基準・民間標準策定  
・国内外への情報発信  
・人的交流

## 産官学の連携

・状態基準保全技術開発の効率的推進  
・保全プログラム高度化への反映  
・産官学間の人材交流

# “核燃料被覆管の健全性維持”

## 主な改訂点:

- ◆ 通常時材料劣化低減被覆管、事故時(LOCA、Post-DNB)高温酸化劣化抑制部材(被覆管/集合体)や事故耐性燃料(Accident Tolerant Fuel、以下ATF)に対する水化学影響の事前評価を追加

## 深層防護との関連:

- ◆ 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、深層防護のレベル1「異常・故障の発生防止」に該当
- ◆ 通常運転時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
- ◆ SA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、および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
- ◆ 設計基準事故やSA発生時のサンプスクリーン、およ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」には非該当



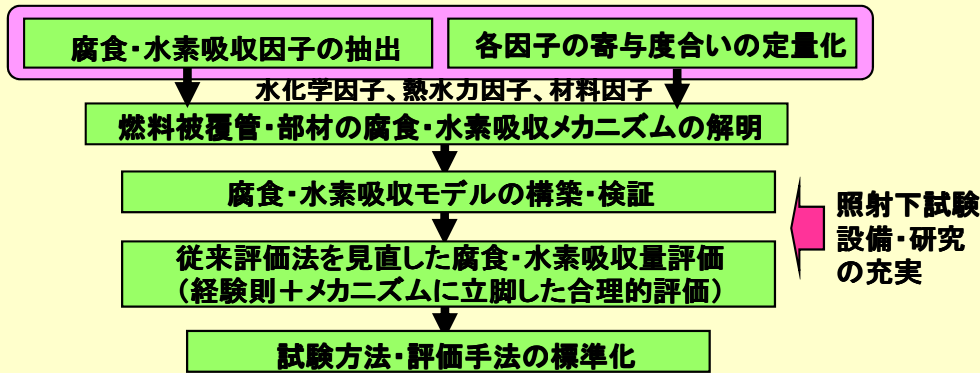
## 核燃料被覆管の健全性維持とは

燃料高度化(高燃焼度化、MOX燃料、最適運転サイクル)、炉出力向上、**事故耐性燃料**の開発・導入が計画されている。燃料被覆管・部材の腐食/水素吸収特性を向上した被覆管材料の開発に加え、水化学の高度化により被ばく線源低減や高経年化対応を両立できる。

## 現状分析

- ・軽水炉安全技術・人材ロードマップでは、プラント技術・運用管理の高度化によるトラブルの防止、炉心と冷却水のふるまいの明確化、および燃料の信頼性向上が要求
- ・新規制基準対応として、燃料被覆管の健全性を維持しつつ水化学の改善を実施することが社会的ニーズとして今後も高い
- ・一方で、燃料高度化(高燃焼度化、MOX燃料、最適運転サイクル)、炉出力向上、事故耐性燃料の開発・導入、および水化学の高度化(被ばく低減、高経年化対応)の導入も計画
- ・種々の運転条件や水化学環境における燃料被覆管・部材の使用範囲を具理的に評価することが必要
- ・現状では、燃料被覆管・部材の腐食・水素吸収特性は、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
- ・燃料被覆管・部材の腐食・水素吸収メカニズムは未解明
  - 試験結果と実機現象との乖離が問題?
- ・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も考慮
- ・燃料被覆管の耐食性・水素吸収特性と水質因子との関連も未解明
- ・原因として、照射下試験研究の困難さ、ラボデータと実炉現象との乖離
- ・従来からの先行照射による燃料被覆管・部材の腐食・水素吸収特性評価(現象論的評価)に替わり、機構論的な評価による合理的な評価手法の確立が必要
- ・水化学による燃料被覆管の腐食防止対策技術の立案の可能性

## 研究方針



原子力発電の安全運転  
プラント技術・運用管理の高度化によるトラブルの防止、炉心と冷却水のふるまいの明確化、および燃料の信頼性向上

事故耐性燃料(ATF)を含む燃料被覆管・部材の健全性を維持できる水化学技術の採用による安全・安定運転、被ばく線源低減 **検証**

メカニズムに立脚した燃料被覆管・部材の腐食・水素吸収特性の管理 **検証(安全性確認)** **規格基準の構築**

知見の見直し・充実 評価法の見直し・充実 照射下試験の充実

基礎研究・応用研究を担う人材の育成

## 産官学の役割分担

**①産業界の役割**  
-安全性・信頼性・経済性を確保した、燃料被覆管・部材健全性維持対策の実施

- ・高燃焼度化
- ・MOX燃料
- ・最適運転サイクル
- ・炉出力向上
- ・高pH運転
- ・DH最適化
- ・既存技術の改良(高濃度Zn注入、NMCA、HWG)
- ・新SCC環境緩和技術

**②国・官界の役割**  
-燃料被覆管・部材の腐食・水素吸収に係わる安全規制行政  
-必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備  
-産学の安全に係る研究  
-新規制基準の整備

**③学術界の役割**  
-燃料被覆管・部材の腐食・水素吸収メカニズムの解明研究  
-知の蓄積と展開  
-研究を支える人材の育成

- ・評価法の見直し・充実
- ・照射下試験の充実
- ・基盤研究に係る人材育成

**④学協会の役割**  
-規格基準化とその高度化に貢献  
-他部会との協働  
-検討の場の提供

試験方法・評価方法の標準化

## 産官学の連携

- 産官学による協調・共同研究
- 燃料被覆管・部材の腐食・水素吸収メカニズムの解明
- 照射試験設備の整備・利用

## 関連分野の連携

- 燃料高度化
- 高経年化対応

図6.2.1-1 核燃料被覆管の健全性維持に係る導入シナリオ

水化学定例研究会(2019年3月8日)

# “CIPS対策による核燃料の性能維持”

## 主な改訂点:

- ◆ 通常時材料劣化低減被覆管、事故時(LOCA、Post-DNB)高温酸化劣化抑制部材(被覆管/集合体)や事故耐性燃料(Accident Tolerant Fuel、以下ATF)用の被覆管表面へのクラッド付着に起因するCIPS(Crud Induced Power Shift)あるいはAOA(Axial Offset Anomalies)に対する水化学の影響評価を追加

## 深層防護との関連:

- ◆ CIPS抑制のための通常運転時の水質管理は、深層防護のレベル1「異常・故障の発生防止」に該当
- ◆ 通常運転時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
- ◆ 設計基準事故やSA発生時のサンプスクリーン、および事故時の燃料プール内の燃料のCIPS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」には非該当
- ◆ SA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・移行挙動に対するCIPSの関与は非常に小さいことから、レベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」にも非該当

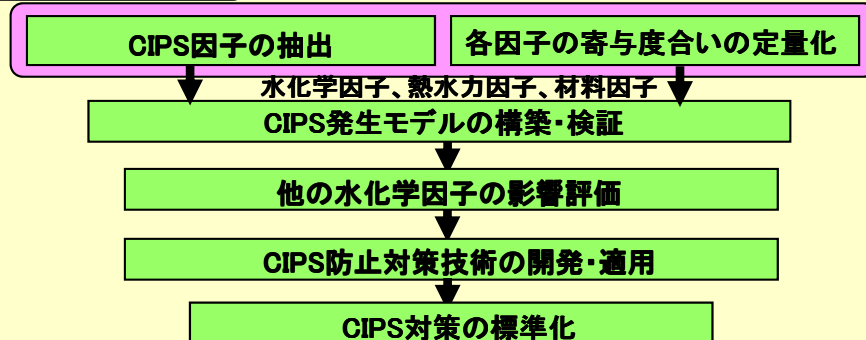
## CIPSとは

クラッド付着誘起型プラント出力変動(Crud Induced Power Shift)のこと。サブクール沸騰下において、燃料被覆管上部に付着したクラッド中に硼素化合物が蓄積することにより、中性子束が減少し燃料棒軸方向に熱出力異常が起きる現象。燃料軸方向出力異常(Axial Offset Anomaly, AOA)とも呼ぶ。適切な水質管理、炉心管理によりCIPSを抑制できる。

## 現状分析

- ・軽水炉安全技術・人材ロードマップでは、プラント技術・運用管理の高度化によるトラブルの防止、および炉心と冷却水のふるまいの明確化が要求
- ・新規規制基準対応として、検査項目や高経年化に伴う作業量の増加等が予想されることから、被ばく線源強度の増加に繋がるCIPSに対する対策の立案が社会的ニーズとして今後も高い
- ・一方で、運用管理による合理化・最適化、炉出力向上、長サイクル運転の導入が計画
- ・環境放射能の維持・低減努力は必須
- ・クラッド付着誘起型プラント出力変動(CIPS)の発生が懸念
  - 米国では、5000MWd/MtU級で、かつ600合金製SG伝熱管を有するPWRで発生
- ・しかし、CIPS発生メカニズムは未解明
  - CIPS発生メカニズムは水化学因子、熱水力因子(沸騰、流況等)が複雑に関与する。クラッド付着・剥離に及ぼす水化学因子、熱水力因子の影響、線出力及び沸騰状況の影響、ならびにほう素取り込み機構は明確になっていない
- ・原因として、照射下試験研究の困難さ、ラボデータと実炉現象との乖離
- ・コストの制約、廃棄物量低減等の観点から、水化学面からの対策が必要
- ・水質面からの新たな対策を施すにはCIPSへの影響も考慮

## 研究方針



## 原子力発電の安全運転

プラント技術・運用管理の高度化によるトラブルの防止、および炉心と冷却水のふるまいの明確化

定期検査時の燃料洗浄頻度の低減・合理化、被ばく線源低減

検証

メカニズムに立脚したCIPS防止対策の立案と実施

検証  
(安全性確認)

規格基準  
の構築

知見の見直し・充実

評価法の見直し・充実

照射下試験の充実

基礎研究・応用研究を担う人材の育成

## 産官学の役割分担

### ①産業界の役割

-安全性・信頼性・経済性を確保した、CIPS防止対策の実施

- ・高濃度Zn注入
- ・高pH運転
- ・DH最適化
- ・新水処理

### ②国・官界の役割

-CIPS防止に係わる安全規制行政  
-必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備  
-産学の安全に係る研究  
-新規規制基準の整備

### ③学術界の役割

-CIPSメカニズムの解明研究  
-知の蓄積と展開  
-研究を支える人材の育成

- ・評価法の見直し・充実
- ・照射下試験の充実
- ・基盤研究に係る人材育成

### ④学協会の役割

-規格基準化とその高度化に貢献  
-他部会との協働  
-検討の場の提供

試験方法・評価方法の標準化

## 産官学の連携

産官学による  
協調・共同研究

- ・CIPS発生メカニズムの解明
- ・照射試験設備の整備・利用

## 関連分野の連携

- ・燃料高度化
- ・高経年化対応

図6.2.2-1 CIPS対策による核燃料の性能維持の導入シナリオ

# “被ばく線源低減”

## 主な改訂点：

- ◆ 既存線源強度低減技術の高度化として、「亜鉛注入によるSCC抑制効果の検証」、「亜鉛注入プラントの材料表面観察による線源低減機構の検討」を追加。また、革新的線源低減技術として、日本発の「分散剤添加による線源除去技術の開発」を追加

## 深層防護との関連：

- ◆ 既存線源強度低減技術の高度化、革新的線源低減技術の開発および線源蓄積メカニズムの解明により従事者の線量低減を目指すものであり、深層防護のレベル1「水化学による信頼性の確保」に該当
- ◆ 異常な過渡変化時の水質変化が燃料健全性や配管等への付着挙動に影響を与え、その結果線源強度上昇に至ることを防止若しくは最小限にとどめる必要があることから、レベル2「異常・故障の拡大防止」に該当
- ◆ 炉心内外の放射能インベントリを評価しLOCA時の移行挙動を評価することは、レベル3「事故の影響緩和」に該当
- ◆ 事故後の従事者の被ばく低減は物理的な対策（遮蔽，換気，防護装備）が主体であることから、レベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」に非該当

# “被ばく線源低減”の導入シナリオ

## 被ばく線源低減とは

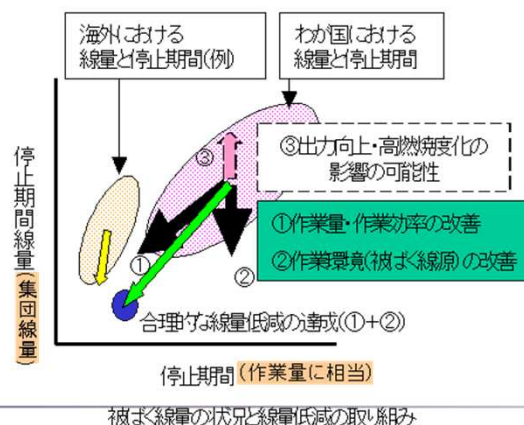
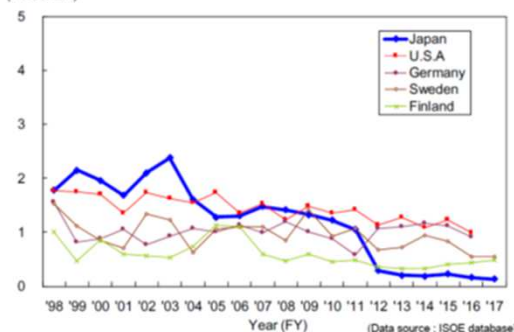
プラントの運転年数が増すに従って、冷却系配管表面線量率が增大する傾向にある。配管線量率の増大によって、間接的に作業雰囲気線量率の増加を招き作業者の被ばく線量の増大につながる。これは、プラント構成材からの腐食生成物が炉心で放射化され、配管内表面などに再付着すること起因する。プラント状態にみあった適切な水化学管理により、腐食生成物の発生を抑制するとともに、除去を行うことによって被ばく線量を低減することができる。

## 現状分析

- 原子力発電所の放射線業務従事者の被ばく線量は、法令に定める線量限度を満足していることはもとより、ALARAの精神に則りきめ細かな作業管理を行うことで「集団線量」の低減を実現してきた。水化学面からは高pH管理、給水鉄制御など種々の対策により作業環境の改善に貢献してきた。また2011年以降は長期停止による線源の減衰により、わが国の線量は大幅に低減している(1F廃炉作業を除く)が、再稼働後にこのレベルを維持するためには、線源の再付着防止技術など種々の水化学対策が必要である。
- 軽水炉安全技術・人材ロードマップにおいては、被ばく低減技術の高度化を達成することにより、作業員の安全性を向上させることのみならず、社会的受容性の向上させること、作業人員確保を容易にすること、被ばく低減に対する国際貢献に資すること並びに被ばく低減技術を盛り込んだプラント設計・運用計画を行うことでプラント輸出における競争力を高めることを目的として課題が設定されており、業界全体で被ばく低減技術の高度化に取り組むことが求められている。
- 新規規制基準に対応するための設備の追設や高経年化に伴う作業量増、ならびに熟練者技術者が(高齢化による)減少するなかでの現状同等の設備保全品質の維持等を考慮すると、被ばく線量低減に対する社会的ニーズは今後も依然として高い。このため、現状の世界トップレベルの平均(集団)線量を維持するために、継続的な水化学技術の開発が必要である。
- 現在、既存技術の高度化と被ばく線源生成メカニズムの解明という視点から、PDCAサイクルを廻し「集団線量」低減のための技術開発を進めており、当面、溶存水素最適化や亜鉛注入の高度化および供用中除染の適用により、現在の世界トップレベルの「平均(集団)線量」の維持を目指す。また中長期的には線源生成メカニズム解明による革新的な技術開発を目指して取り組んでおり、世界トップレベルを維持継続することを目指す。これらの技術の中には溶存水素最適化等被ばく線量低減のみならず系統材料の健全性確保にも有効な技術があり、これらは次世代炉の水化学技術としても非常に有望である。
- 水化学面からの被ばく線源低減技術の開発には、燃料、系統材料への影響評価も必要となる。このため、産官学が共通認識をもって燃料、材料分野から専門的な知識・知見を集約し合理的な技術開発を進める必要があるため、より一層の分野横断的な取り組みが必要である。

<参考>

Average Annual Collective Dose (person.Sv/reactor) (1998-2017), BWR  
(Person.Sv)



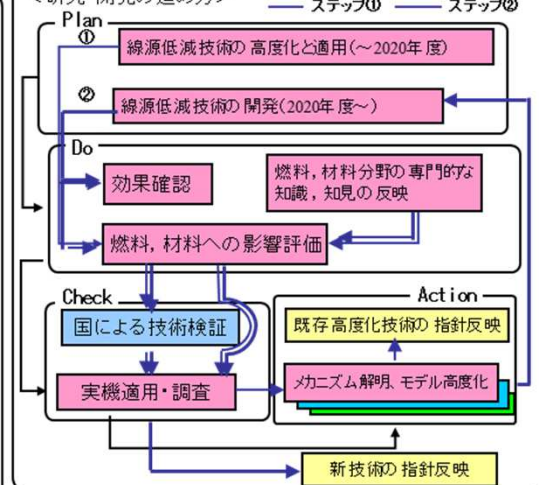
## 研究方針

<短期の目標>  
① 既存線源低減技術の高度化を進め、現状の世界トップレベルの平均(集団)線量の維持を目指す。

<中長期目標>

② 被ばく線源生成メカニズム解明等により、線源低減技術の開発を進める。(世界トップレベルの平均(集団)線量維持)

<研究・開発の進め方>



## 産官学の役割分担

- ① 産業界の役割
  - ・被ばく線量の制御と実績評価: 有効性検証と副次影響確認
  - ・プラント運用上の影響評価
  - ・被ばく低減技術の開発
  - ・管理指針等の整備
- ② 国・官界の役割
  - ・データ及び評価手法の検証
  - ・海外規制動向等の把握と国内への反映
  - ・国際展開・国際協力支援
  - ・長期的な施設基盤の整備(照射試験炉)

## 産官学の連携

- ① 技術検証及び施設整備  
当該水化学技術の開発には冷却材系統の燃料・材料への影響評価が必要で、技術検証及び照射試験施設の整備など国家レベルの対応が必要。
- ② 人材育成  
当該水化学技術の開発に向け、幅広い知識能力を備えた人材育成が必要。

## ③ 学術界の役割

- ・基礎研究(基礎データ、新知見の蓄積)
- ・腐食生成物メカニズム解明への支援(放射能蓄積 挙動等の科学的裏付け)及び研究

## ④ 学協会の役割

- ・人的交流と育成
- ・ロードマップの策定・改定
- ・水化学評価技術、管理技術等の規格・基準化、標準化

# “環境負荷低減”

## 主な改訂点：

- ◆ 浄化系統運用の合理化・最適化や水化学に係る新技術の導入等、水化学面からの廃棄物発生低減方策を追加

## 深層防護との関連：

- ◆ 廃棄物量軽減による、発電所内の廃棄物保管量縮小と安全性、信頼性向上および環境への漏えいリスク低減を図ると共に、水処理薬剤変更や運用方法の最適化による環境への放出量を低減、環境の安全性への貢献は、深層防護のレベル1「水化学による信頼性の確保」に該当
- ◆ 一次冷却材の漏洩による環境放出等の拡大防止対策は、水化学管理技術では対応出来ないため、レベル2「異常・故障の拡大防止」には非該当
- ◆ 事故の影響緩和策の一つとして、安全系統内のほう素濃度を適切に管理しており、新規の技術要素はないため、レベル3「事故の影響緩和」には非該当
- ◆ SA時にCV内に溜まった汚染水の浄化方策を確立済みであり、新たな課題は存在しないため、レベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」には非該当

## 環境負荷低減とは

水化学制御を運用するうえで、副次的に放射性廃棄物(廃樹脂、フィルターなど)や制御用薬品を含む排水などが発生する。既存技術を用いて適切な処置・処理を実施しているが、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。

## 現状分析

廃棄物量軽減により、発電所での保管量縮小による安全性、信頼性向上および環境への漏えいリスク低減を図るとともに、水処理薬剤変更や運用方法の最適化により、環境への放出量を低減し、環境の安全性に貢献する必要がある。現在の年間廃棄物発生量に比べて1割低減を目標とし、原子力安心の獲得と廃棄物処理費用の低減による発電コストの低減を目指す。

### ①廃棄物発生抑制(PWR, BWR)

1次系においては、被ばく線源の低減や放射性廃棄物の環境放出低減のために、イオン交換樹脂やフィルタを使用して1次冷却材中の放射性腐食生成物や核分裂生成物を除去している。イオン交換樹脂はDFの低下、酸化劣化等により新樹脂と取り替えることによって放射性廃棄物となる。また、フィルタは差圧や経年劣化などにより取り替えられて放射性廃棄物となる。これらの取替えは、プラントの運転管理の一環で各原子力発電事業者の経験により運用されている。

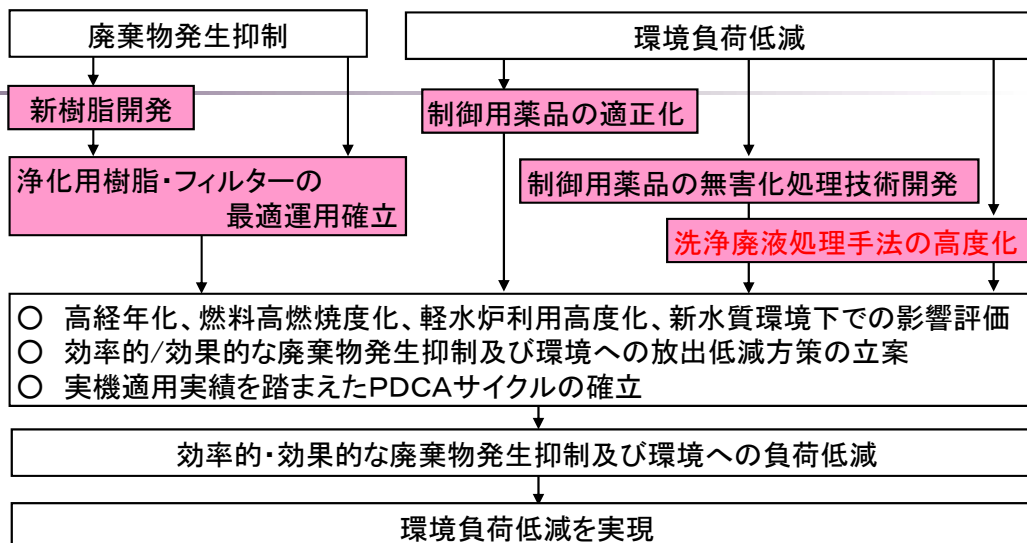
### ②環境への放出低減(PWR)

PWRプラント2次系においては、設備・機器の腐食防食などの観点から、制御用薬品としてアミン(アンモニアやエタノールアミン)、脱酸素剤としてヒドラジンといった窒素含有の化学薬品などを使用している。また、蒸気発生器伝熱管などへ付着したスケールを改質/除去する技術として、キレート剤(例としてEDTA:エチレンジアミン四酢酸)などを用いた化学洗浄の適用が考えられる。このようなプラント保全活動の中で発生する化学薬品などを含む排水は、既存の技術により適切に無害化処理などを行い、問題ないことを確認したのちに放出している。

## 研究方針

- ・浄化システム運用の合理化・最適化や新技術の導入(樹脂やフィルター開発など)による発生量抑制(1割低減目標)
- ・アミンの使用量低減手法並びに脱窒手法の高度化
- ・ヒドラジン代替剤の実機適用性評価
- ・効率的且つ合理的な洗浄廃液処理手法の高度化

## 研究方針



## 産官学の役割分担

### ①産業界の役割

- ・プラント運用上の影響評価
- ・既存技術の高度化と適用  
1次系浄化脱塩塔、フィルタの更なる最適化  
効率的且つ合理的な洗浄廃液処理手法の高度化
- ・新技術の開発促進  
イオン交換樹脂の高交換容量化、および耐酸性イオン交換樹脂の開発とその適用性評価
- ・環境リスク低減  
ヒドラジン使用量低減のためのラボ試験と実機適用性評価  
ヒドラジン代替剤の定常運転環境におけるラボ試験と実機適用性評価
- ・地域との共生・共益 ・積極的な情報公開・情報提供

### ②国・官界の役割

- ・基盤整備 ・環境リスク低減のための制度構築・運用
- ・海外規制動向等の把握と国内への反映

### ③学術界の役割

- ・知の蓄積と展開 ・研究を支える人材育成

### ④学協会の役割

- ・ロードマップ策定 ・人的交流と育成

## 産官学の連携

- ・産・官・学の新たな共同研究体制の確立メリット
- ・資金の効率的且つ効果的な運用と成果の共有
- ・実用化までの期間短縮、開発資金の重複の削減
- ・成果の透明性と客観性、規制への迅速な対応

# “水化学共通基盤技術”

## 主な改訂点：

- ◆ 共通基礎基盤に**核分裂生成物挙動**に関する共通基盤を追加

## 深層防護との関連：

- ◆ 従来の水化学・腐食に関わる共通基盤技術に関しては、6章の各課題に共通する基盤技術の位置づけであり、**深層防護との関連も6章の各課題に準ずる**
- ◆ 核分裂生成物挙動については、**レベル1～4が該当**
- ◆ **燃料損傷時のFP放出とモニタリング**はレベル1「水化学による信頼性の確保」とレベル2「異常・故障の拡大防止」、**FPモニタリングによる燃料損傷状況の把握**はレベル3「事故の影響緩和」、**SA時のFP挙動評価の基礎知見の提供**はレベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」に**該当**



## 水化学共通基盤技術とは

水化学の研究、実機での水化学管理・制御、を支える基盤技術で、被ばく線源低減、構造材健全性、燃料健全性などの技術に共通すると考えられるもの。以下に大別される。

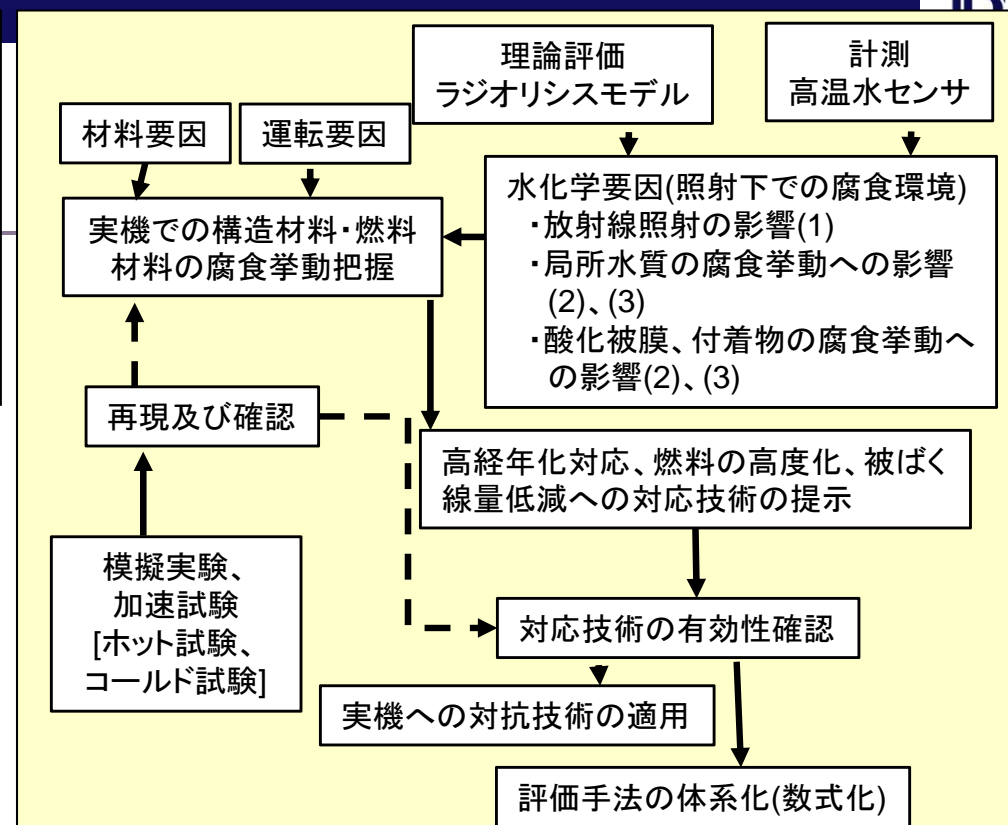
- ①環境評価技術
- ②腐食メカニズム
- ③酸化物/イオン種の付着脱離メカニズム
- ④模擬試験および加速試験方法

## 現状分析

- ①環境評価技術：理論評価ではラジオリシスモデル、計測では高温水センサなど、基礎技術は確保されているが、前者では予測精度の立証、後者では実機で使用可能な信頼性確保が課題として残されている。
- ②腐食メカニズム：経験的なアプローチが主流で、照射ほか新たな因子が加わると外挿が難しくなる。
- ③酸化物/イオン種の付着脱離メカニズム：今後期待される課題
- ④模擬試験および加速試験方法：上記3項目をベースに固めるべき課題。実機と実験室とのデータの乖離が課題となっている。試験研究炉が老朽化し、数も減少してきている。

## 研究方針

- ①水化学の具体的な課題の研究方針から逸脱することなく、タイムリーな成果を取得
- ②お互いが相補の位置づけにあり、理論と実験の両面から、技術の妥当性を確認
- ③実験室系と同時に、実機への適用、評価手法の体系化(数式化)も視野に開発を進める。



## 産官学の役割分担

- ①産業界の役割  
基礎知見と実機知見の結合、プラント運用上固有課題評価、複合現象のモデル化、既存技術の高度化と適用
- ②国・官界の役割  
長期的戦略の指導的役割、基礎研究・大規模実験支援
- ③学術界の役割  
基礎データ、メカニズム解明、新知見の発掘、人材育成、
- ④学協会の役割  
体系化(数式化)の指導的役割

## 産官学の連携

産官学による連携・共同研究  
大規模プロジェクトにおけるニーズ、シーズの提供、提案と支援

## 関連分野の連携

腐食、コロイド化学、放射線化学分野の学協会との連携  
海外研究との連携

# “水化学共通基盤技術”の導入シナリオ

## 必要性

- ・ 福島第一原子力発電所廃炉の円滑遂行のためには、残存したFP量、分布の定量的把握が不可欠(被ばく管理、廃棄物処理)
- ・ プラントの再稼働、円滑運用にシビアアクシデント時のFP挙動把握が不可欠(レベル4対応のアクシデントマネージメント(AM))
- ・ 国内の約20年のFP研究衰退期間を埋め、今後40年余の廃炉作業の円滑試行のため、技術のTTと同時に新たな研究者の組織化が不可欠
- ・ 従来知見(Phébusデータほか)の有効活用
- ・ 福島事故を顕在化した新しい事象への対応

- (a) 廃炉作業円滑遂行(プラント内外の被ばく抑制と廃棄物適正管理) ①②
- (b) 原子力発電プラントの安全運転(確実なレベル4対応) ③④

- (i) FP分布の正確な把握、的確な取出と確実な処理  
可能な限り測定に基づき、測定負荷の場合は予測
- (ii) 事故時のFP挙動の予測とAMへの適切な反映  
シビアアクシデント解析コードに依存

検証  
(既存データ  
と実機情報  
の対応)

規格基準  
の構築

知見の見直し・充実

評価法の見直し・充実

必要情報の追加

基礎研究・応用研究を担う人材の育成

## 現状分析

- ①事故時のFP挙動の解明: TMI-2事故処理収束後の研究活動低下
  - ・ 設備老朽化と研究者離散。=>若手研究者のFP 離れが深刻化
  - ・ 大学他教育機関でのFP関連カリキュラム消失
- ②福島第一原子力発電所事故時のFP挙動の実態解明
  - ・ 実機での関連データ収集の困難さ
- ③事故時FP挙動解析コードの整備と標準化: 多分野との連携が不可欠
  - ・ 「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会発足
- ④アクシデントマネージメントへの反映: これからの課題

## 産官学の役割分担

### ①産業界の役割

- ・ FP分布の測定と予測
- ・ FP除去、固定化技術の確立
- ・ AMの確立

- ・ 廃炉関連技術高度化計測/処理
- ・ 最先端のAMあらゆる可能性包含

### ②国・官界の役割

- ・ 必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備
- ・ 研究炉建設とin-pile実験
- ・ 産学の安全に係る研究

- ・ 国家戦略としての人材育成計画
- ・ 計画的な大型投資

### ③学術界の役割

- ・ 事故時FP挙動の解明
- ・ 知の蓄積と展開
- ・ 研究を支える人材の育成

- ・ 評価手法の標準化
- ・ 基盤研究に係る人材の育成

### ④学協会の役割

- ・ 規格基準化と高度化に貢献
- ・ 知識ベースの普及

- ・ 取扱い方法の標準化

## 産官学の連携

産官学による  
協調・共同研究

- ・ 廃炉プロジェクトを支える要素技術の高度化
- ・ 新しい照射試験設備の推進と高度利用

## 関連分野の連携

- ・ 総合的な廃炉技術
- ・ 多角的なAM評価

## 研究方針

- ・ 技術、研究の立ち上げは、まず関連技術者の組織化に立脚
- ・ これまでの知見、データの再整理
- ・ これまでの知識で、福島事故をどこまで評価できるかを明確化
- ・ 従来知見の不足を早急に補う  
新しい実験の提案。予算、人材確保(本ロードマップ)

# “人・情報の整備”

## 主な改訂点：

- ◆ 人・情報の整備に係わるロードマップは、2007年版で策定されたが、2009年版でのフォローアップは限定的であったため、**福島第一発電所事故以降の状況変化を踏まえ、水化学分野として果たすべき役割を明確にすべく、本格的に改訂**

## 深層防護との関連：

- ◆ **技術基盤整備、規格基準類の整備および人材育成プログラムに関する課題は、深層防護のレベル1～4が該当**

### 人・情報の整備とは

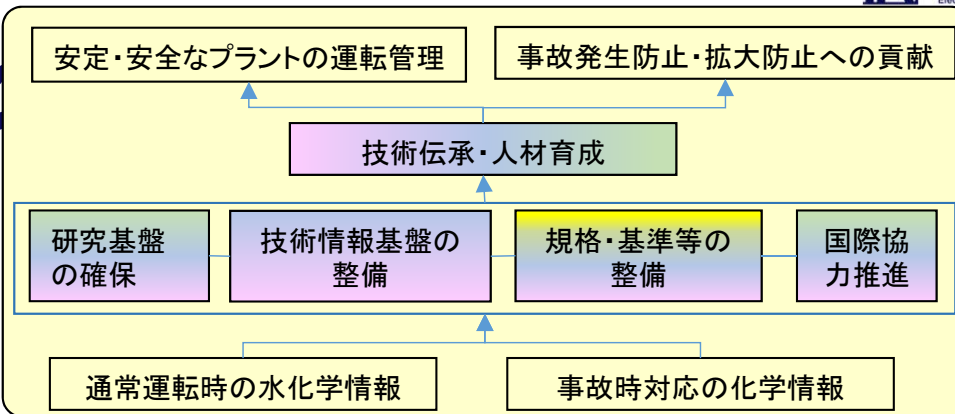
原子力プラントの安定的運転のためには、材料、燃料の健全性、それに被ばく線量に直接係わる水化学分野からの貢献が不可欠である。このような役割を担う水化学技術の維持、発展のためには、これまでの技術基盤の体系化・基準化に加え、核となる人材と技術情報基盤の確保が必要である。このためには、「技術情報基盤の整備/技術伝承」、「学協会規格等の整備」および「国際協力」を推進することが必要である。

### 現状分析

- 水化学の研究開発及び管理を担う人材の高齢化が進行している。研究の場も狭まっており、コミュニティの維持も危ぶまれる。今後、原子力発電プラントの安全・安定な運転を継続していくため一層の貢献が求められており、人材確保と技術伝承は緊急の課題である。
- 人材確保のためには、学术界をはじめとして水化学関連研究の基盤確保が必須で、研究を通して有能な人材の教育と、その結果として、人材の確保が可能となる。
- 水化学関連技術の整備・体系化を通じ、それを規格・基準、標準の形にまとめていくことは、技術の透明性確保や技術伝承の観点で重要である。すでに水化学管理標準、分析標準等の作成に着手、一部は発行されている。これらの活動を更に加速していく必要がある。
- 廃炉に係わる汚染水処理、腐食、過酷事故時のFP挙動などの化学分野での寄与が期待されており、挙動解明や設備設計・運用等において、技術情報収集や人材の供給等で貢献している。
- 水化学技術の高度化や廃炉、事故時対応の水化学情報整備の観点から、国際的な情報交換を継続的に進めると同時に、わが国が培った技術を海外に発信していくことは、原子力全体の発展にも有用と考えられる。

### 研究方針

- 通常運転時および事故時対応時における人・情報の整備として、下記の研究を実施する。
  - (1)研究基盤(場)の確保
  - (2)技術情報基盤の整備と技術伝承
  - (3)規格・基準等の整備
  - (4)国際協力の推進
- これらを通じて、水化学技術情報を整備するとともに、確実な技術伝承と必要な人材の育成を行い、プラントの安全・安定な運転を維持および事故の拡大防止に貢献する。



### 産官学の役割分担

#### ①産業界の役割

-安全性・信頼性・経済性の確保向上を目的とした開発研究および基盤整備

- 実機データ/情報の整理と蓄積
- プラント運用に係わる人的資源の確保
- 水質管理基準等の整備

#### ②官界の役割

-安全規制につながる安全研究(NRA)  
-安全基盤研究の推進(METI,MEXT)

- 長期的戦略への指導的役割
- 規格・基準化の指針
- 国際間の情報交換体制の整備と海外情報の国内準への反映

#### ③学术界の役割

-知の蓄積と展開(安全基盤研究の推進・検証)  
-研究を支える人材の育成

- 基礎・基盤データの整理と蓄積
- 先進知見の提供
- 教育、人材の継続的供給

#### ④学協会の役割

-規格基準化とその高度化に貢献

- 規格基準・民間標準策定
- 国内外への情報発信
- 人的交流と育成

### 産官学の連携

- 状態基準保全技術開発の効率的推進
- 保全プログラム高度化への反映
- 産官学間の人材交流

### 関連分野との連携

軽水炉安全技術・人材RM

# “事故時対応の水化学主要課題の変遷”

## 主な改訂点：

- ◆ **新規記載**
- ◆ 事故時対応の水化学として、**放射性核分裂生成物挙動**に係わる研究は、初期には**燃料損傷**とそれに伴う**環境放出**に関連し活発に実施
- ◆ しかし、**燃料破損対策の確立**、**SA研究の収束**の2段階で縮小し、現在に到る
- ◆ 福島事故以降、原子力安全の自主的な向上努力が必要とされ、水化学分野においても深層防護の観点を踏まえつつ、**新しい視点で取り組むこととなった**

## 深層防護との関連：

- ◆ 水化学が関与する**事故時対策**のうち、設計基準事故の対策は**レベル3**「事故の影響緩和」に**該当**
- ◆ SA対策としての**放射性核分裂生成物挙動**に係わる対応は、**レベル4**「設計基準を越す事故への施設内対策」に**該当**
- ◆ さらに、事故炉の**廃炉推進対応の水化学**は、広義の意味で、**レベル4**「設計基準を越す事故への施設内対策」に**該当**

# “水化学が関与する事故時対策”

## 主な改訂点：

- ◆ 起回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における水化学が関与する対策として、**水素発生、漏洩と爆発防止および核分裂生成物の環境への放出抑制を新規に記載**

## 深層防護との関連：

- ◆ **事故発生後の対策**となるため、深層防護のレベル1「水化学による信頼性の確保」およびレベル2「異常・故障の拡大防止」には**非該当**
- ◆ **LOCA時などの設計基準事故で水素が格納容器内に漏えいした場合の爆発抑制対策**(可燃性ガス制御系等)はレベル3「事故の影響緩和」に**該当**
- ◆ **SA後のジルコニウム-水反応に起因する水素の爆発抑制**についてはレベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」に**該当**
- ◆ **核分裂生成物の環境への放出抑制**となるサプレッションプールのpH制御やフィルタベントの対策は、燃料溶融後の事象で水化学的制御が効果に大きく影響するためレベル4「設計基準を越す事故への施設内対策」に**該当**

# “事故炉の廃炉推進対応の水化学”

## 主な改訂点：

- ◆ 福島事故後の廃炉推進に向けて取り組むべき水化学の課題として、新たに、**汚染水処理対策と二次廃棄物処理、デブリ取り出し時水処理対策、水素発生量評価、材料健全性評価**について、**新規に記載**

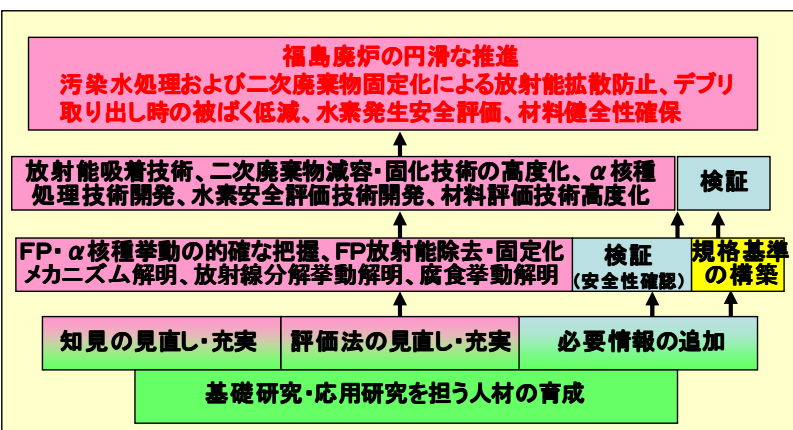
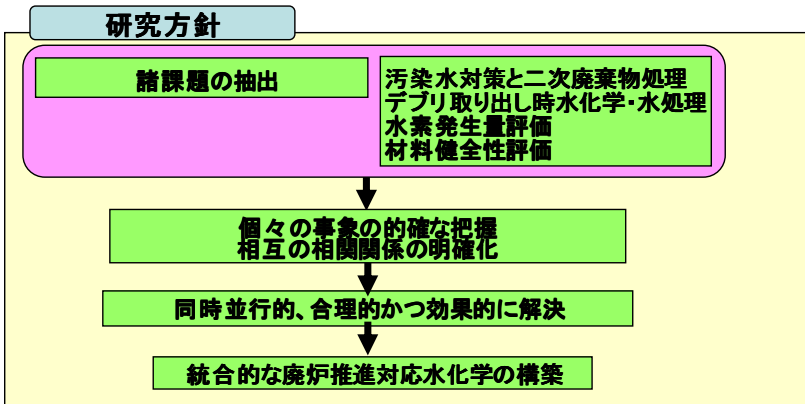
## 深層防護との関連：

- ◆ これらは事故後の対応であり、深層防護の**レベル1**「水化学による信頼性の確保」、**レベル2**「異常運転や故障の防止」には**非該当**
- ◆ **設計基準を超える事故を想定**しており、**レベル3**「事故の影響緩和」に**非該当**
- ◆ 事故炉の廃止措置開始後に実施される**廃炉推進対応**の水化学対策は、直接的にSAの影響緩和につながらないものも含まれるが、広義の意味で、**レベル4**「設計基準を越す事故への施設内対策」に**該当**
- ◆ 具体的には、放射能の閉じ込め、除去、処理、処分を適切に行う必要があり、**汚染水、二次廃棄物、燃料デブリの適切な処理**を行う必要あり
- ◆ **水素発生防止、材料健全性維持**のため、**適切な対策**を行う必要あり

# “事故炉の廃炉推進対応の水化学”の導入シナリオ

**福島廃炉推進対応の水化学とは**  
福島事故以降、原子力に関わる全ての分野において、**原子力安全の自主的な向上**努力が必要とされ、水化学分野においても深層防護の観点を踏まえつつ、新しい視点で取り組む必要が生じるに到った。福島事故後の廃炉推進に向けて取り組むべき水化学の課題を明確にする必要がある。

- 現状分析**
- 喫緊の課題としては**汚染滞留水処理**が挙げられる。これまで対処することのなかったFP核種を中心とした水処理施策の確立は新しい課題である。
  - それに伴い、多量の**二次廃棄物**が発生しており、その**処理・処分技術**の開発に向けては長期的な取り組みが必要である。
  - さらに、デブリ取り出しの段階になると、**デブリ性状**に基いたFPおよびα核種挙動の**把握**、**水処理**が必要になる。
  - これらの対応と並行して、高放射能濃度での汚染水、廃棄物中での水の放射線分解による**水素発生量評価**は、今後のシステム検討の安全評価項目として重要であり、モデル化を含めて取り組むべき課題である。
  - また、長期間にわたるシステム健全性の確保に向けて、**材料健全性評価**は必須の要件である。
  - 多角的な側面を持つこれら廃炉推進における水化学の諸課題を、**同時並行的**に解決して行く必要がある。そのためには、個々の事象を的確に把握するとともにその相関関係を明確にし、**合理的かつ効率的**な解決を目指す。



- 産官学の役割分担**
- 産業界の役割**
    - 廃炉推進のための放射能処理システムの構築・運用
    - デブリ取り出しシステムにおける水処理システムの構築・運用
    - 水素除去システムの構築・運用
  - 国・官界の役割**
    - 国プロによる要素技術開発の推進
    - 必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備
    - 新規規制基準整備
  - 学術界の役割**
    - SA時FP挙動の解明
    - 放射能吸着メカニズムの解明
    - α核種挙動の解明
    - 放射線分解メカニズムの解明
  - 学協会の役割**
    - 規格基準化とその高度化に貢献
    - 他部会との協働を実現(バックエンド部会、核燃料部会、他)

- 産官学の連携**
- 産官学による協調・共同研究
  - 廃炉廃棄物処理・処分研究の推進
  - 安全評価研究の推進
  - 照射試験設備の整備・利用
- 関連分野の連携**
- 燃料高度化
  - 高経年化対応



# 今後の策定スケジュール

---

- HP上でも意見聴取を検討
- 検討WG等におけるさらなる検討
- 2019年度上期内の策定を目指す

**ご静聴ありがとうございました。  
検討中のロードマップについて、ご意見・ご要望を  
お聞かせください。**