

日本原子力学会2019年秋の大会 水化学部会 企画セッション

水化学ロードマップフォローアップの状況と概要 (3) 共通基盤技術 (FP挙動関連)

TOSHIBA

東芝エネルギーシステムズ株式会社

高木 純一

2019年9月12日

CDC4-2019-900230 Rev.0
PSNN-2019-0560

Contents

- 1 はじめに
- 2 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術
- 3 まとめ

1. はじめに

- u 水化学ロードマップ2020 –改訂の背景–
 - ∅ 福島第一原子力発電所（1F）事故の教訓
 - ∅ 核分裂生成物（FP）挙動の記載が必須
 - ∅ 水化学ロードマップフォローアップ検討WG内で合意

- u FPの基礎事象の体系化
 - ∅ 生成、蓄積、燃料からの放出、移行挙動
 - n 放射性ヨウ素：これまで体系的な研究あり
 - n 放射性セシウム、ストロンチウムなど：
比較的データが少なくデータ整備が必要

1. はじめに

u 「水化学共通基盤技術」とは

Ø 水化学ロードマップ2009での取り組み

⇒「水化学、腐食に関わる共通基盤技術」

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

n 燃料・構造材の健全性の確保

n 線量率の低減・廃棄物発生量の抑制

Ø 水化学ロードマップ2020での改訂

⇒「核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術」

FPの基礎事象を体系化

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

構造材料の高信頼化		燃料の高信頼化		被ばく線源低減	環境負荷低減	
応力腐食割れ (SCC)の抑制	配管減肉環境緩和	核燃料被覆管の健全性維持	CIPS による核燃料の性能維持	被ばく線源低減	廃棄物低減	化学物質の影響低減
・SCC環境評価手法・技術の標準化・検証 ・炉内SCCに関する基盤研究の推進 ・SCC環境評価手法の高度化 ・新たなSCC環境緩和技術の開発・検証・標準化	・配管減肉環境緩和技術の開発・標準化・検証 ・配管減肉メカニズムにおける水化学因子の定量化（配管減肉予測評価への寄与）	・腐食/水素吸収メカニズムの解明 ・腐食/水素吸収対策技術の開発 ・データや評価技術の検証 ・腐食/水素化予測法の確立	・CIPS発生メカニズムの解明 ・CIPS抑制策の開発 ・データや評価技術の検証	・既存線源低減技術の高度化 ・革新的線源技術の開発 ・水質変更の影響評価 ・既設炉の廃止措置（保管時の水化学を含む）	・廃棄物生成量低減（廃止措置時を含む）	・水化学制御薬品無添加、系外放出抑制（ヒドラジン代替剤、暴露・水質汚濁）
SG長期信頼性確保	状態基準保全への支援	事故時対応の水化学				
・クレビス腐食環境監視技術の開発・適用 ・スケール・スラッジの付着防止技術・除去技術の高度化 ・不純物管理の高度化・標準化（PWR保管時の水化学、PbSCCを含む）	・水化学管理システム・オンラインモニターの高度化 ・腐食環境評価手法・腐食環境緩和技術の実証 ・ヘルスマネジメント技術の開発	放出抑制	水素漏洩対策	福島廃炉推進対応の水化学		
		・SA時の放射性核分裂生成物挙動および放出抑制（格納容器内pH管理、フィルターバントを含む）	・海水を含む水の放射線分解に係る基盤研究（再結合器の触媒開発等）	・汚染水処理対策 ・二次廃棄物処理対策 ・デブリ取り出し時水処理対策 ・水素発生防止対策（ラジオリシス） ・材料腐食対策（液膜腐食、気化性防錆剤等）		

基盤整備

水化学共通基盤技術	人・情報の整備
・腐食環境評価技術 ・腐食メカニズム（主として水化学側からの寄与） ・酸化物およびイオン種の付着/脱離メカニズム	・人材育成 ・管理技術、分析技術、腐食緩和技術の標準化 ・関連分野および産官学の協力 ・国際協力および国際貢献

ロードマップ2020の目次

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	久宗、杉野
5. 水化学ロードマップ2020	稲垣
6. 安全基盤研究	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	莊田
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	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	稲垣、中野、杉野、赤峰
6.4 環境負荷低減	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	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	内田、高木、長瀬、箭内
8.1 水化学が関与する事故時対策	渡邊、高木、長瀬、箭内、佐藤
8.2 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)	
9. まとめ	渡邊
略語表	河村

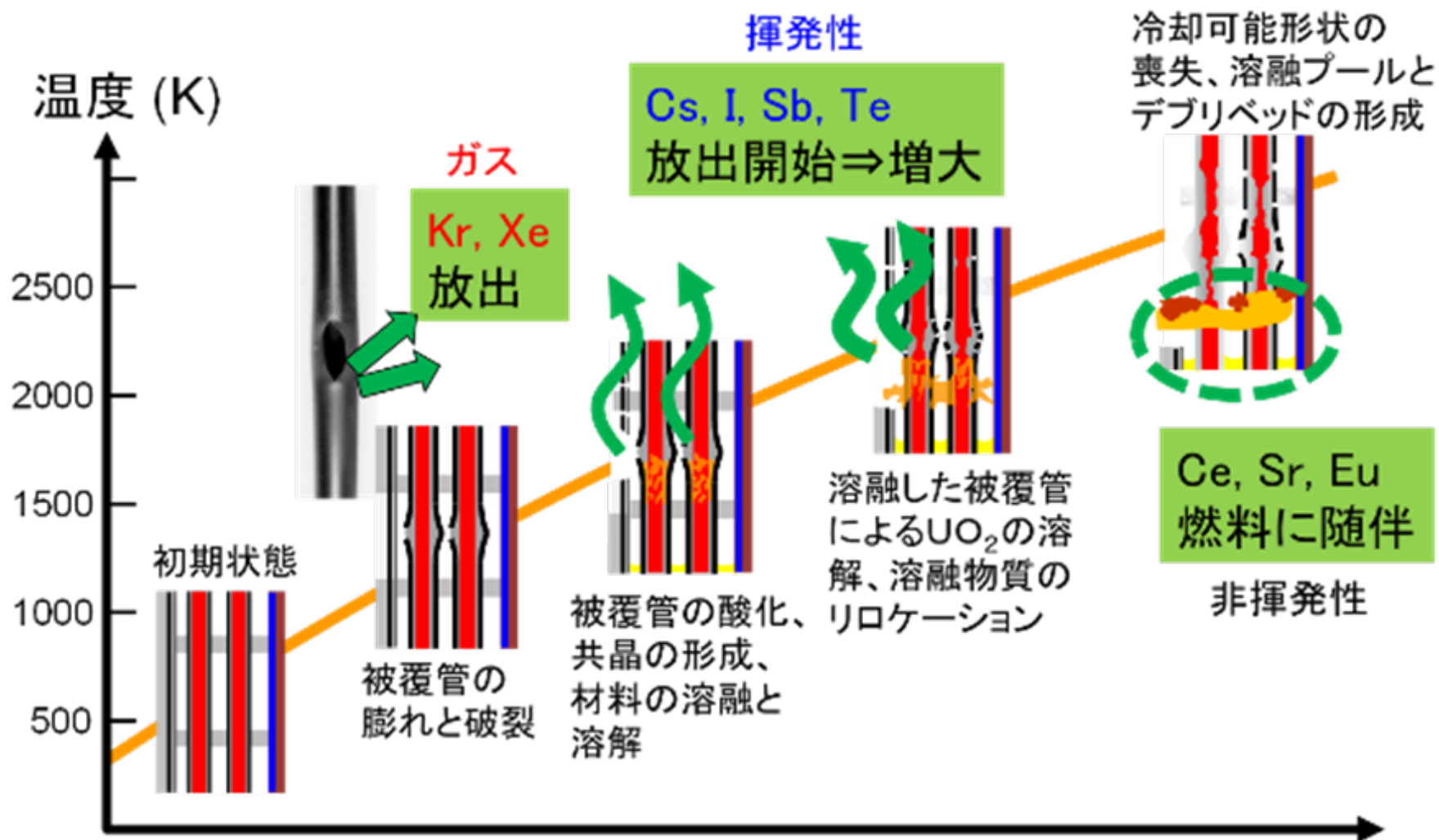
1. はじめに

- u 水化学ロードマップのローリングの主眼
 - Ø 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し
 - n すべての項目につき深層防護レベルとの対応を明確化
 - n 「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化

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

- u 深層防護レベル4までの評価を行う上でのFP挙動との関わり
 - ∅ 事故時対応の水化学とFP挙動との関わり
 - n 汚染水の処理処分
 - n 建物の汚染とその除染
 - n 環境汚染の修復
- u FP挙動の共通事象を理解して対応するための基盤技術を追加
 - ∅ 水化学ロードマップ2009：「水化学、腐食に係わる共通基盤技術」を記載
 - ∅ 水化学ロードマップ2020：「核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術」を追加

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術



SA時の燃料ふるまいの概念図

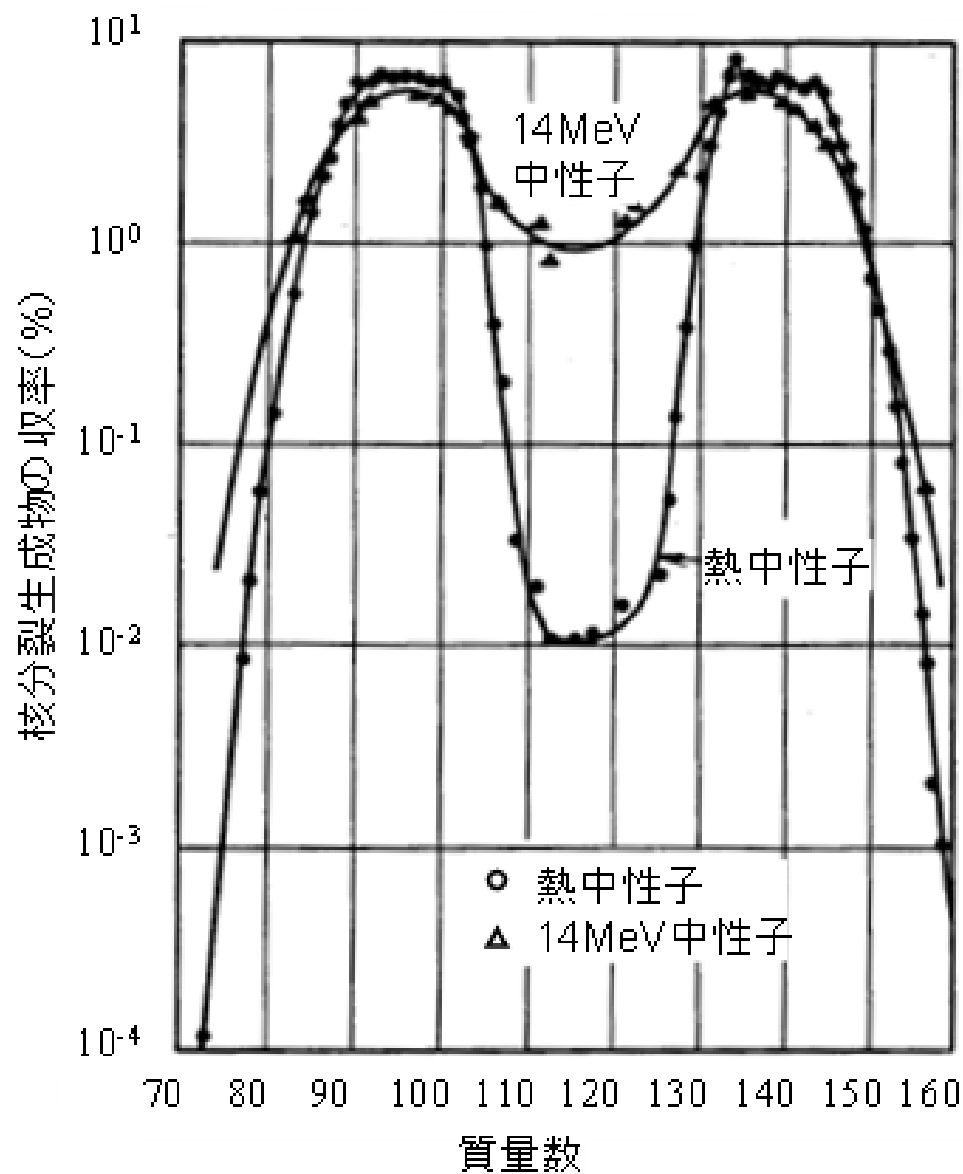
2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

2.1 核分裂生成物の種類と主な特性(1/2)

- u ウランあるいはプルトニウムの核分裂
 - Ø 2個余の中性子を放出し、2つのFPを生成
 - Ø トリチウムを含む3体に分裂するケースもあり

- u 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裂
 - Ø 質量数130付近の比較的重い元素：
 ^{131}I 、 ^{137}Cs など
 - Ø 質量数90付近の比較的軽い元素：
 ^{99}Mo 、 ^{90}Sr 、 ^{95}Zr など

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術



核分裂生成物の収率

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

2.1 核分裂生成物の種類と主な特性(2/2)

u 短期・中期・長期的な観点で重要となる主なFP

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		

u 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

⊘ 事故時における燃料からの放出挙動や化学形態に影響

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

- n 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
- n 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
- n 金属析出相を形成：Tc, Ru, Rh, Pd, Moの一部
- n 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
- n 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

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

2.2 開発項目と現状分析(1/4)

① 事故時のFP挙動の解明

U シビアアクシデント（SA）時のFP挙動の基礎の解明が重要

Ø 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プロジェクト実験の知見あり

Ø 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

U 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

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

2.2 開発項目と現状分析(2/4)

② 1F事故時のFP挙動の実態解明

- U 1F事故時のFP挙動とPhébus FPプロジェクト実験との対比を実施
 - Ø 現状、まだ1F事故時のFP挙動の把握は不十分
- U 今後の対応
 - Ø 実機のデータ収集と分析の継続
 - Ø 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て実態を解明

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

2.2 開発項目と現状分析(3/4)

③ 事故時FP挙動解析コードの整備と標準化

- U 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適用
- Ø 今後のSA解析の高度化に貢献
- U 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認識
- Ø SA解析コードを活用して解決

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

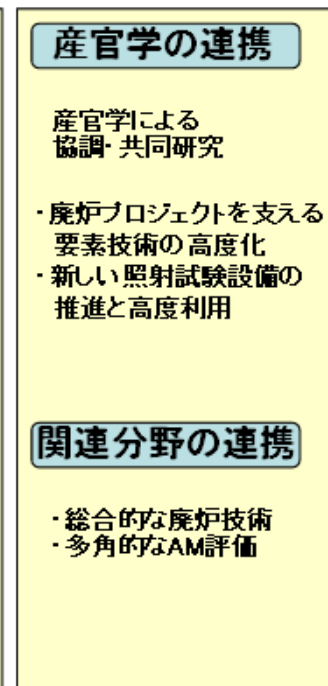
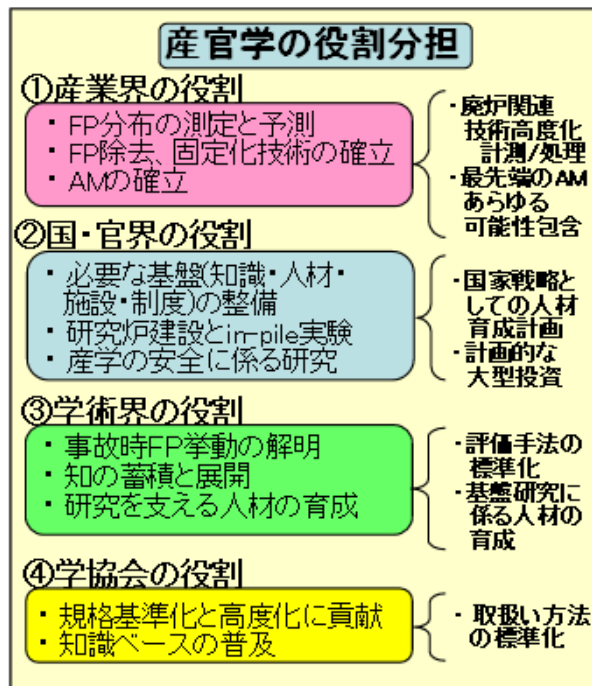
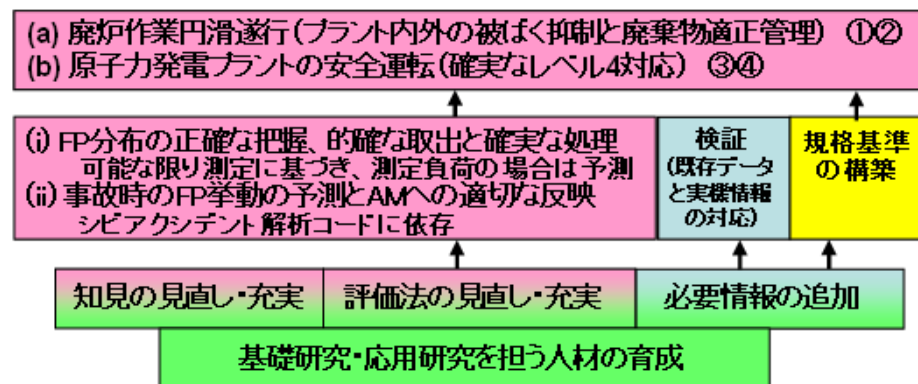
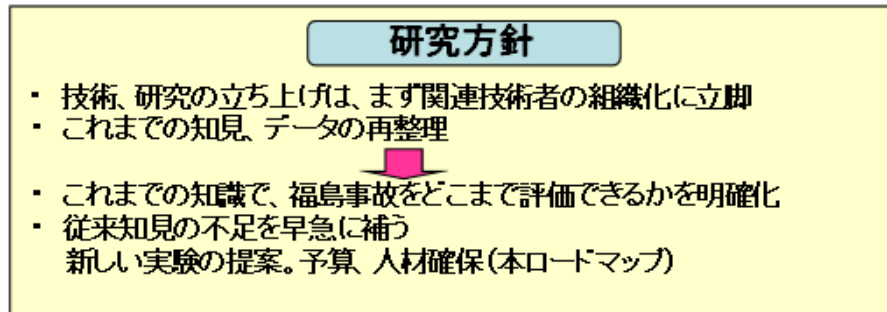
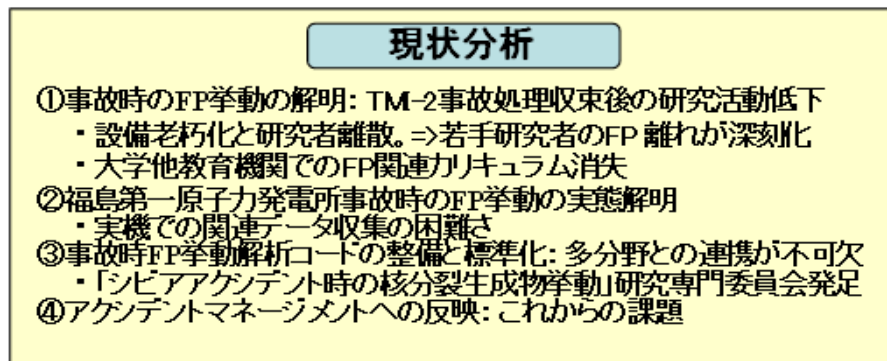
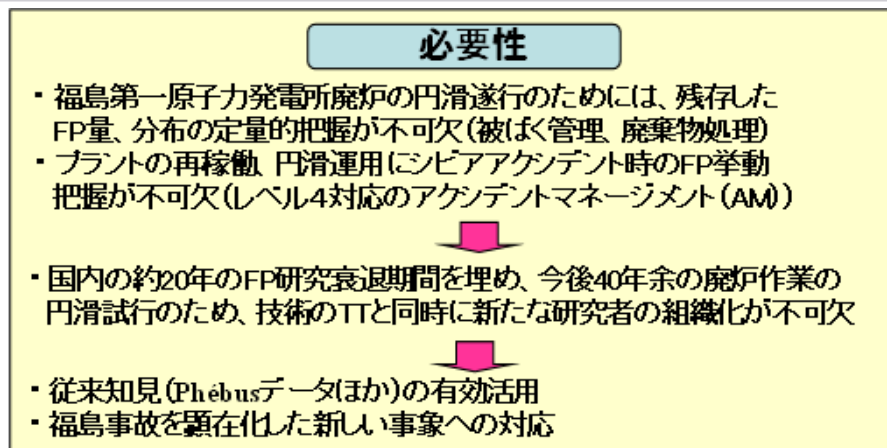
2.2 開発項目と現状分析(4/4)

④ アクシデントマネジメントへの対応

U 原子力発電所に関する新規制基準の制定

- Ø 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、アクシデントマネジメントとして明確化していくことが必要
- Ø 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

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術



核分裂生成物挙動関連の研究に係る導入シナリオ

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

2.3 研究方針および研究開発推進体制

U 1990年代後半まで

- Ø チェルノブイリ事故を受けてSAに関する研究が活発
- Ø ヨウ素を中心とするFP挙動関連の研究が進展

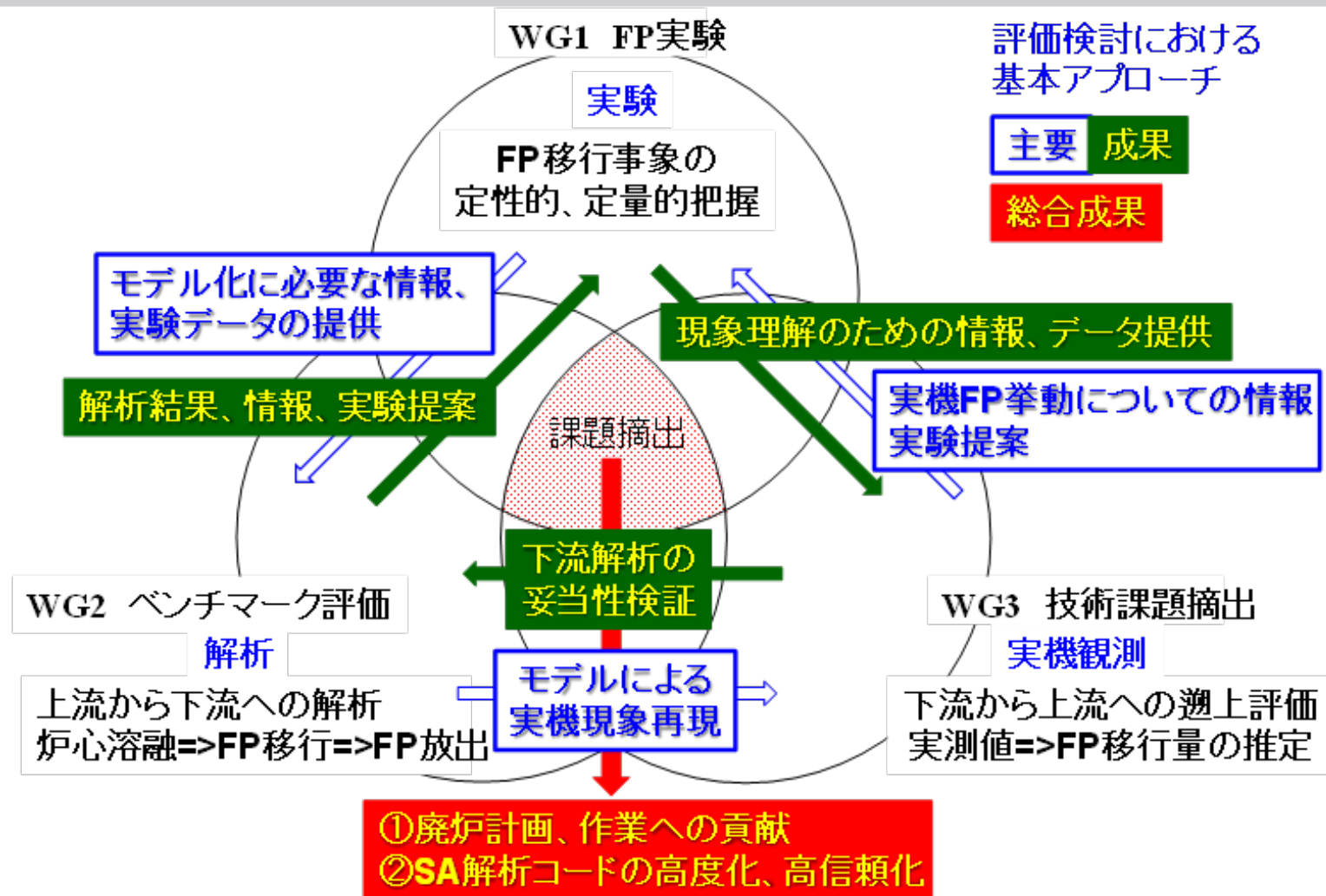
U 2000年代

- Ø FPを研究対象とする研究者、技術者が減少
- Ø 今後、FP関連の技術を再整理し、次世代への的確に技術伝承して行くことが不可欠

U 「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会の設置（2017 年6 月）

- Ø 現状分析、関連データ収集、技術課題発掘を推進
- Ø 共通基盤技術の整備と同時に人と情報の整備への寄与を期待

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術



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
－ 3つのWGの役割分担と主要成果－

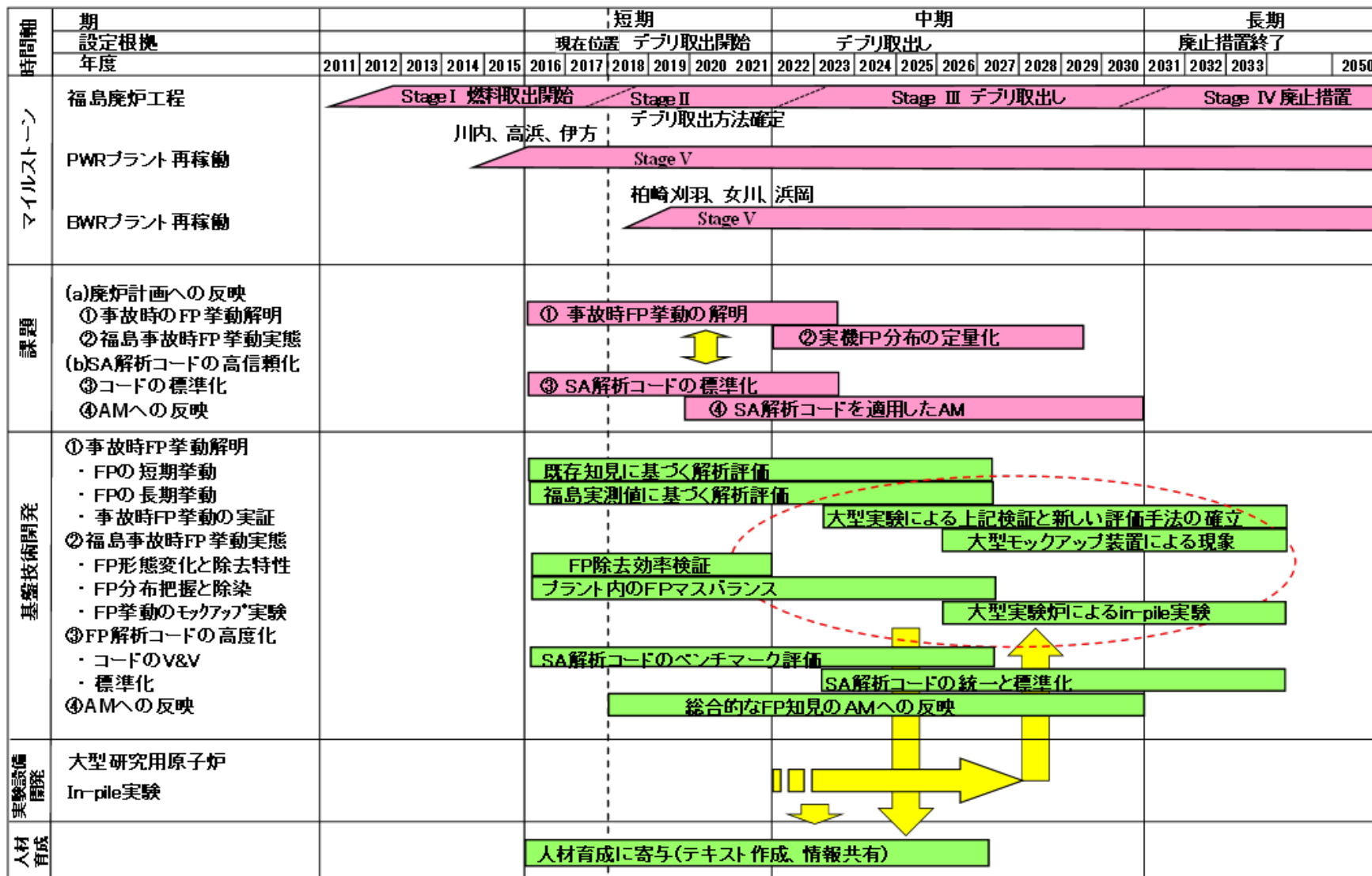
2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術に係る技術マップ

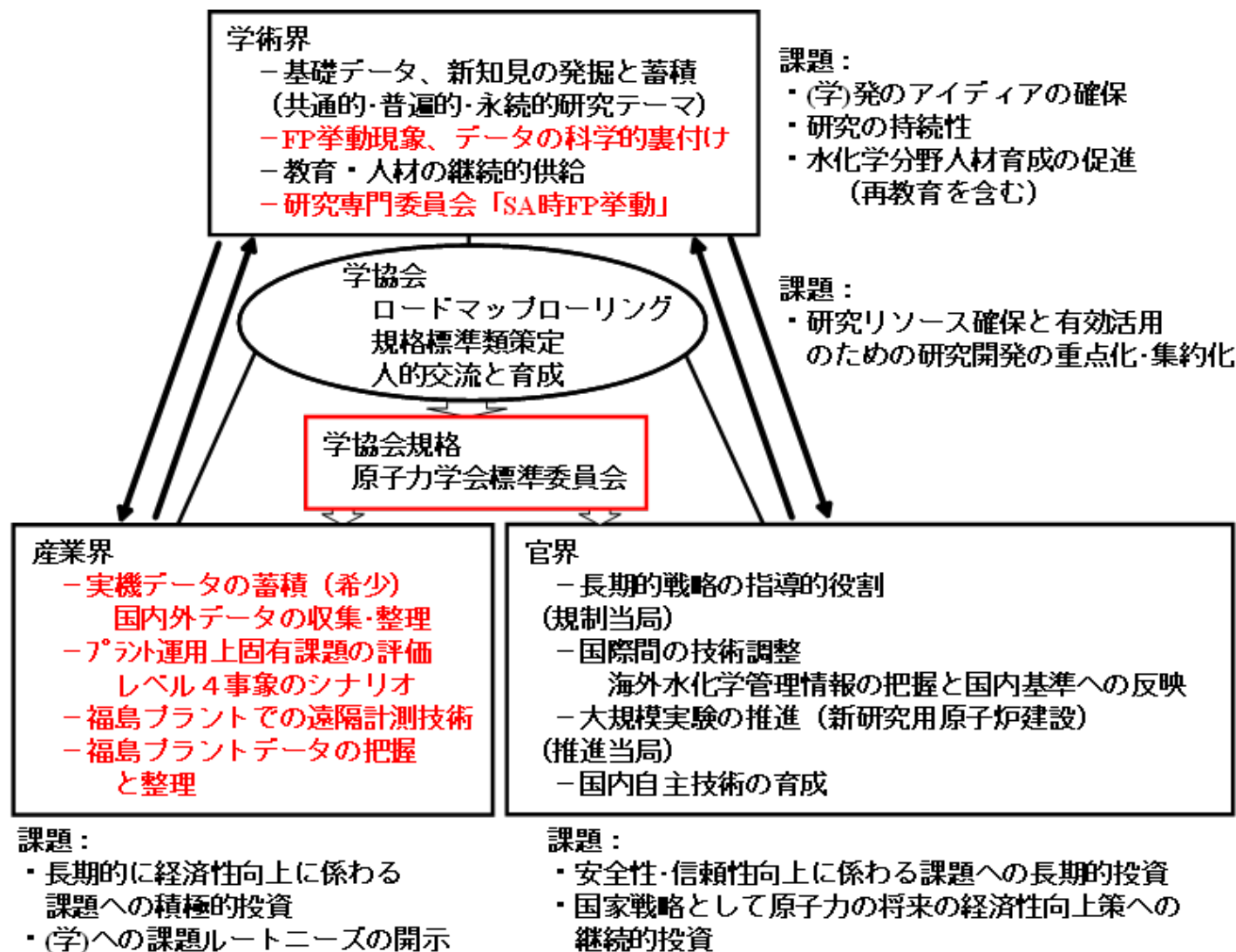
技術課題	課題番号	技術項目	概要	役割分担(実施/資金)
事故時のFP挙動の解明	8-1-2-1	燃料放出後のFP(主としてヨウ素、セシウム)の短期挙動	高温水/蒸気中のFPの燃料材料、構造材料との相互作用(化学形態の変化と構造材への沈着、放出挙動)	産・学/産・官・学
	8-1-2-2	燃料放出後のFP(主としてヨウ素、セシウム)の長期挙動	長期的な化学形態変化に伴うFP移行現象の解明と系統外への放出および除去特性	産・学/産・学
	8-1-2-3	FP(主としてヨウ素、セシウム)の除去特性	フィルタベントをはじめとする各種除去性能に及ぼす化学形態、水化学放射線照射の影響	産・学/産・学
	8-1-2-4	事故時のFP挙動の実証	研究炉等の照射試験設備の有効利用法の検討(Phébusに代わる新しいモックアップ実験)	産・官・学/産・官・学
福島第一原子力発電所事故時のFP挙動の実態解明(実態解明と廃炉プロジェクトサポート)	8-1-2-5	汚染水中核種の化学形態とその変遷および除去性能	汚染水として処理された、されるFPの量、化学形態の把握(マスバランス評価)	産/産
	8-1-2-6	プラント内のFP分布の把握	プラントに残存するFPの場所と量の測定と評価(マスバランス評価、廃炉作業時の被ばく量評価)	産/産
	8-1-2-7	機器、壁面に付着したFP化学形態とその除去	蓄積FP量評価と除染効果の評価(廃炉作業時の被ばく量評価)	産/産
	8-1-2-8	環境放出ルート of 解明と放出抑制策	主要放出ルーチ別放出量の評価(環境除染、線量低減効果評価)	産・官・学/産・官・学
事故時FP挙動解析コードの整備と標準化	8-1-2-9	ベンチマーク計算とV&V評価	各種SA解析コードのベンチマークおよびV&V評価(8-1-2-4結果を加えたベンチマーク実験結果利用)	産・官・学/産・官・学
	8-1-2-10	解析コードの標準化	上記コードの標準化	産・官・学/産・官・学
	8-1-2-11	事故時のFP挙動評価	FP挙動を予測し、建屋内線量率を予測して、放出量を最小にするAM立案	産・学/産・学
アクシデントマネジメントへの反映	8-1-2-12	事故進展を予想した、AMの作成	従事者の被ばく最小を図りつつ、効果的な事故収束を図るAM	産/産

2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術

核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術に係るロードマップ



2. 核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術



核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術確立のための産官学の役割分担

3. まとめ

- U 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こととした。
- U そのため、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」研究専門委員会を設置し、技術継承を図りつつ活動を継続していく。

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と解析への適用」、水化学部会報告 #2017-0001 (2017).

TOSHIBA

END