

7.1.2 核分裂生成物挙動に係わる共通基盤技術

第6章の各項目と本基盤技術との関連は比較的希薄であるが、深層防護レベル4までの評価を行う上では、核分裂生成物（FP）挙動との関わりが生ずるものとする。第8章は「事故時対応及び福島第一原子力発電所廃炉対応」に係わるもので、これらはともに、FP挙動とは深く係わる。汚染水の処理処分、建物の汚染とその除染あるいは環境汚染の修復についても、線源であるFP挙動とは密接に関わり、それぞれの項目で議論されるものとするが、縦割りでは、技術的な見落としを生ずる可能性も懸念される。このため、FP挙動の共通事象とその理解、対応のための、基盤技術として、水化学ロードマップ2009に記載された「水化学・腐食に係わる共通基盤技術」に加えて、「核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術」をまとめておくことが重要と考える。第6章及び第8章に記載された各技術項目と、本章の「核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術」の関連は、第6章の各技術項目と「水化学、腐食に係わる共通基盤技術」との関係と同様である。

本水化学ロードマップでは、水化学ロードマップ2009をベースに組み立てられており、水化学ロードマップ2009にはなかったFP挙動を全て既確立のロードマップの各項目に加えるのみでは、全体のバランスを損なうことも明らかになった。これは、多くの項目では、深層防護のレベル4対応で初めてFP挙動との係わりが顕在化するためである。また、第8章「事故時対応及び福島第一原子力発電所廃炉対応」では、取り扱う課題の過半がFP挙動に係わるものであり、共通基盤との切り分けが難しい。このため、一部は記載が重複するが、FP挙動全般を本共通基盤技術に取り入れた。

ここでは、まず核分裂生成物（FP）の種類と主な特性について記載する。

ウランあるいはプルトニウムの核分裂の結果、ウランあるいはプルトニウムは、2個余の中性子を放出し、2つのFPを生じる。実際には、トリチウムを含む3体に分裂するケース（3体核分裂：確率は、 $0.9\sim 1.2\times 10^{-4}$ /核分裂）もある^[7.1.2-1]。この3体核分裂がトリチウムの主要発生源となる。FPは質量数の等しいものに分裂するよりも、図7.1.2-1に示すように質量数の異なる2つのグループの原子核に分かれる^[7.1.2-2]。例えば、 ^{131}I 、 ^{137}Cs 等に代表される質量数130付近の比較的重い元素と ^{99}Mo 、 ^{90}Sr 、 ^{95}Zr 等に代表される質量数90付近の比較的軽い元素の2つのグループが主なものである。

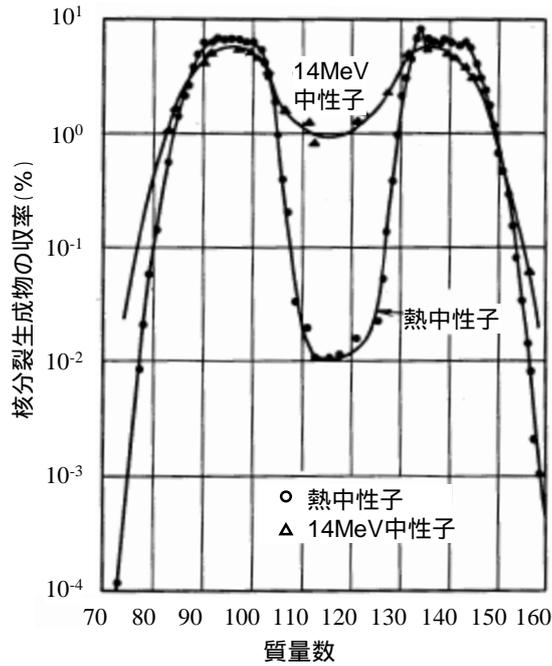


図 7.1.2-1 核分裂生成物の収率

FP は、ベータ壊変を繰り返し、崩壊熱を放出しながら、長寿命もしくは安定核種を生成する。表 7.1.2-1 に示すように、個々の FP 核種は複雑な壊変スキーム内に含まれる^[7.1.2-2]。

表 7.1.2-1 核分裂生成物の壊変チェーン

質量数	₅₀ Sn	₅₁ Sb	₅₂ Te	₅₃ I	₅₄ Xe	₅₅ Cs	₅₆ Ba	₅₇ La	₅₈ C2	質量数
130	2.6m	6.4m	st	[12.5h]	st					130
		[3.6m]								
131	65s	23m	30h	8.06d	[12d]					131
			24.8m		st					
132	50s	45s	77.7h	2.28h	st					132
		3.1m								
133	39s	2.6m	52m	20.8h	[54.2h]					133
			12.4m		5.27d					
134	~20s	<1.5s	43m	52.8m	st	st				134
						中性子照射				
						[(2.90h)]				
						[(2.05y)]				
135		1.9m	29s	6.75h	15.7m	[53m]	[28.7h]			135
					9.16h	2e6y	st			
136				83s	st	[(13.5d)]	st			136
							2.57m			
137				24.2s	3.9m	29.7y	st			137
							st			
138				6.3s	14m	32.2m	st			138
139				2.0m	40s	9.48m	8.29m	st		139
140					13.3m	65s	12.80d	40.23h	st	140

崩壊熱は核分裂終了後、ほぼ指数関数的に減少する。崩壊熱の経時変化を、図 7.1.2-2 に示す。崩壊熱は、燃料の照射時間(運転時間) T_i 、核分裂停止後の時間(原子炉停止後の時間) T_c の関数として、近似的に次式で与えられる (Way-Wigner の式)^[7.1.2-3]。

$$P_d = 0.1 P_o (T_c^{-0.2} - (T_c + T_i)^{-0.2}) \quad (7.1.2-1)$$

ここに、
 P_d : 運転時の熱出力(W)
 P_o : 崩壊熱(W)
 T_c : 停止後の時間(s)
 T_i : 運転時間(s)

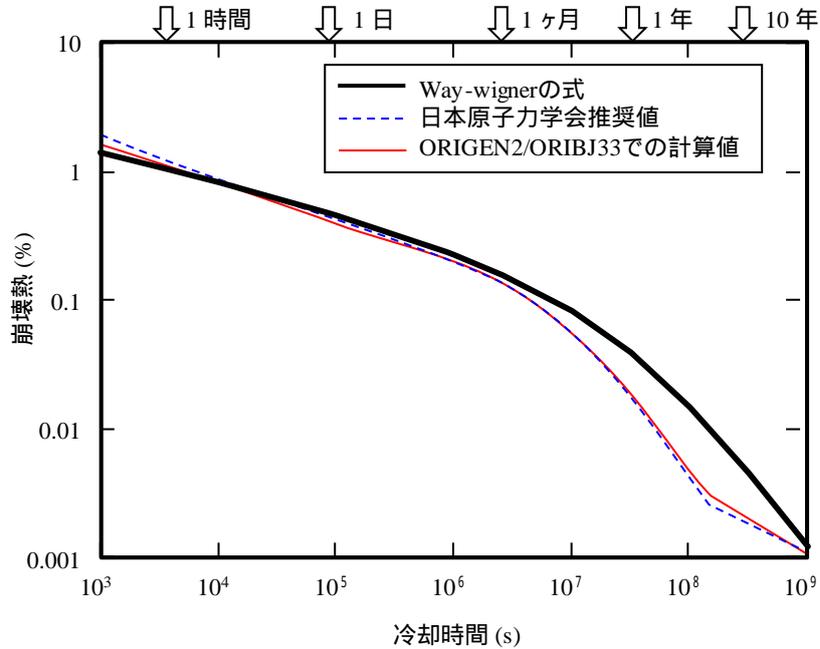


図 7.1.2-2 崩壊熱

これらの FP の生成、壊変、減損について計算を行うコードシステムの代表的なものとして ORIGEN2 (ORNL Isotope Generation and Depletion) コードがある^[7.1.2-4]。生成、壊変の過程を連立一次常微分方程式体系で表し、行列指数法でその数値解を求める。1981 年にリリースされ、1991 年には高燃焼度の PWR と BWR を対象とするデータライブラリを追加した ORIGEN2.1 が、その後 FP 生成量の誤差を小さくした ORIGEN2.2 が 2002 年にリリースされた (原子力百科事典 ATOMIC、2015)。近年、MOX 燃料の場合には核分裂収率が含まれていない同位体の核分裂率の寄与が増大するというバグが ORIGEN2.2 に発見され、JAEA 須山らにより修正された結果、適切な計算結果が得られるようになった^[7.1.2-5]。

表 7.1.2-2 には、短期・中期・長期的な観点で重要となる主な FP を示す^[7.1.2-2]。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しており、事故時における燃料からの放出挙動や化学形に影響を与える。

表 7.1.2-2 短期・中期・長期的な観点で重要となる主な核分裂生成物

短期		中期		長期	
FP	半減期	FP	半減期	FP	半減期
⁸⁸ Kr	2.84h	¹⁰⁵ Rh	35.4h	¹⁴⁴ Ce	285d
¹⁰⁵ Ru	4.44h	⁹⁹ Mo	65.9h	¹⁰⁶ Ru	373d
¹³⁵ Xe	9.14h	¹³² Te	3.20d	¹³⁴ Cs	2.06y
⁹¹ Sr	9.63h	¹²⁷ Sb	3.85d	¹²⁵ Sb	2.76y
⁹⁷ Zr	16.9h	¹³¹ I	8.02d	¹⁵⁴ Eu	8.59y
¹³³ I	20.8h	¹³¹ Xe	11.8d	⁸⁵ Kr	10.7y
¹⁴³ Ce	33.4h	¹⁴⁰ Ba	12.8d	³ H	12.3y
		¹⁴¹ Ce	32.5d	⁹⁰ Sr	28.8y
		⁹⁵ Zr	64d	¹³⁷ Cs	30.1y
				^{110m} Ag	249y
				¹²⁹ I	1.57 × 10 ⁷ y

- ・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
- ・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
- ・金属析出相を形成：Tc、Ru、Rh、Pd、Mo の一部
- ・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、被覆管とのギャップ部で CsI、Cs₂MoO₄、Cs₂Te、セシウムウラネート等として析出等のように変化する。Br、Rb、Te、I、Cs 等
- ・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

各 FP は、事故時ソースターム評価の観点で、揮発性等の特性に応じたカテゴリーに分けられている。代表的なカテゴリー分けとして NUREG1465 では以下のように区分されている^[7.1.2-6]。

希ガス：Xe、Kr

ハロゲン：I、Br

アルカリ金属：Cs、Rb

テルル群：Te、Sb、Se

バリウム、ストロンチウム：Ba、Sr

貴金属：Ru、Rh、Pd、Mo、Tc、Co

希土類：La、Zr、Nd、Eu、Nb、Pm、Pr、Sm、Y、Cm、Am

セリウム群：Ce、Pu、Np

Phébus 試験等最新の知見が反映され、SARNET 等欧州のシビアアクシデント研究ネットワーク活動により、以下のように揮発性に応じた FP のカテゴリー分けがなされている。

- ・FP ガス及び揮発性 FP：FP ガス (Kr、Xe)、揮発性 FP (I、Cs、Br、Rb、Te、Sb、Ag)
- ・中揮発性 FP：Mo、Rh、Ba、Pd、Tc
- ・低揮発性 FP：Sr、Y、Nb、Ru、La、Ce、Eu
- ・非揮発性 FP：Zr、Nd、Pr
- ・アクチノイド：低揮発性と同等の放出率を示す U 及び Np と、非揮発性と同等の放出

率を示す Pu 等がある。

一方で、万が一、事故が発生した場合のプラント内の放射線線量率や環境への影響という観点で FP を見ると、特に重要と考えられるのは次の核種になる。

ヨウ素 (^{131}I): 半減期 (約 8 日) 的には問題は小さいが、甲状腺ガン発症の要因とされるため。

セシウム (^{134}Cs 、 ^{137}Cs): 半減期 (約 2 年、30 年) が長く、揮発性で燃料体から放出されやすく、プラント内外の線量率を決める主因となるため。

ストロンチウム (^{90}Sr): 低揮発性でセシウムに比べて、燃料体から放出される割合は小さいが、半減期 (約 29 年) が長く、 β 線放出核種として、体内被曝への影響は懸念されるため。

トリチウム (^3H): ウランの 3 体核分裂反応により生成される。半減期 (約 12 年) が長く、 β 線放出核種である。特に、水素同位体であるため分離除去が困難である。

ヨウ素は、化学的な挙動が非常に複雑で、特に放射線照射下では、図 7.1.2-3 に示すようなラジオリシス生成種との反応^{7.1.2-7}で、価数を変えやすく、その結果、溶液系からガス系への移行が見られ、環境へ放出される可能性が高い。これまで放射線照射下を含め、ヨウ素化学反応については研究例が多いが、事故時でのヨウ素の挙動を把握するためには、ヨウ素単独ではなく、セシウムその他の FP 元素、あるいはラジオリシス生成種との反応を含む化学反応のデータベースの確保が必須となる。

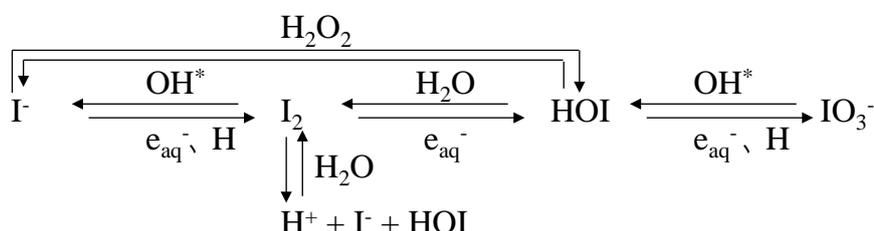


図 7.1.2-3 放射線照射下での水溶液中のヨウ素の反応スキーム

ヨウ素、セシウム、ストロンチウムが、核種フィルタや吸着剤で液中あるいは気中から除去、回収できるのに対して、トリチウムは水素の同位体としての濃縮法により除去、回収が必要で、工学的な規模での回収が難しい。表 7.1.2-3 にこれまで試みられてきた主要なトリチウム分離回収法を示す^[7.1.2-8]。原理的には分離回収は可能であるが、工学的装置の運用という観点では、きわめて分離回収が難しい。これまでのトリチウムの処理法を見ると、海外の再処理工場でのトリチウムの処理は、重水中のトリチウムの回収の除いては、海水中への希釈放流が主である。

表 7.1.2-3 代表的なトリチウム水処理プロセス

方法	原理	長所	短所	汚染水処理に対する特記事項	その他
水蒸留法	蒸気圧(沸点)の同位体差を利用(軽水H ₂ Oの沸点が低い)	良好な耐不純物性 耐トリチウム性 簡単操作 高い安全性 大流量処理	蒸気圧差微小で分離係数小 必要塔高が高	低効率 大規模設備	再処理用水処理指向の 基礎試験(名大) CANDU炉他へ納入実績 (ズルザー社:約30基)
水電解法	電解電位の同位体差を利用(軽水H ₂ Oの電解電位が低く、低い電位でH ₂ Oが集まる)	単段での分離係数高	水電解のためのエネルギー消費量が極めて大 大量処理に不向き	不純物(金属イオンなど)の影響	ふげん劣化重水精製装置 納入実績
気相化学交換・深冷水素蒸留法	水蒸気/水素同位体交換 化学平衡の差(触媒要)を利用(³ Tは液体側に移行し易い)		水素側に移行した ³ T回収に 極低温の深冷水素蒸留利用 極低温技術、冷凍装置が必要	大量の水素の使用 不純物存在下の 触媒被毒	重水からの ³ T除去システム 国外で実績(仏国、カナダ)
水・硫化水素(GS法)+水蒸留法	平衡定数の温度変化を利用、(前段濃縮に利用し、後段の水蒸留法と組合せ)	触媒不要 エネルギー消費量小 重水(素)製造プラントの実績多	H ₂ Sの取り扱い H ₂ Sによる材料腐食 H ₂ Sによる公害問題	大量H ₂ Sの取扱い	重水(素)製造プラント (米国、カナダ)
アンモニア・水素法+水蒸留法	重い水素同位体がNH ₃ に移り易い特性を利用(前段濃縮に利用し、後段の水蒸留法と組合せ)	重水(素)製造プラントの実績が多い	NH ₃ 製造プラントに付設可 触媒要 NH ₃ 分解装置要で 設備・運転費高	大量NH ₃ の取扱い	重水(素)製造プラント (インド、アルゼンチン)
水・水素法+水電解法	重い水素同位体が水に移り易い特性を利用(水電解法と組合せ)	分離性能高	大量の特殊な疎水性触媒要 大量処理に不向き 水電解エネルギー消費量が極めて大 大量処理に不向き	不純物存在下の 触媒被毒 電解槽の不純物影響	ITER水処理システムに適用 ふげん劣化重水精製装置 納入実績

(A) 現状分析

研究開発の必要性は、1F 廃炉対応と運転中の発電プラントの深層防護レベル4(シビアアクシデント)対応の2つに分けられる。

(1) 1F 廃炉対応

事故時のFP挙動の解明

1F 事故時のFP挙動の実態解明

- ・ 汚染水処理
- ・ 体内体外被ばく量評価
- ・ 除染
- ・ 廃棄物の分別保管

(2) 深層防護レベル4(シビアアクシデント)対応

事故時FP挙動解析コードの整備と標準化

- ・ 熱流動過程との一体化

アクシデントマネジメントへの反映

- ・ 事故進展モード対応のサイト内蓄積量、放出量評価

研究開発の現状は、以下の通りである。

事故時のFP挙動の解明

シビアアクシデント時のFP挙動の基礎。実際の燃料体からのFPの放出とその移行についての研究ではPhébus FPプロジェクト実験が知られているが、FPの代表核種であり甲状腺被ばくで知られるヨウ素については、さらに詳細に、照射による影響を含む膨大な研究が行われ、データベースも充実している。一方で、1F事故時に問題となったセシウムについてのデータは必ずしも多くないのが現状である。過去のデータベース及び知見と1F事故の解析評価で指摘された技術的なギャップを埋めるため、新たな研究開発が必要とされ

ている。

1F 事故時の FP 挙動の実態解明

1F 事故時の FP 挙動を Phébus FP プロジェクト実験と対比させ、従来知見で理解可能なものと、新たなデータの必要なものの対比を続けている。現状では、まだ、1F 事故時の FP 挙動を十分に把握できていないため、今後継続的に、実機のデータ収集と分析を続け、既存データ及び知見で理解できるものと、新たなデータベースの必要なものに弁別し、実態解明を進めるとともに、新しい研究開発の提案、計画に資する。

事故時 FP 挙動解析コードの整備と標準化

既存のシビアアクシデント解析コードを 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用い、今後のシビアアクシデント解析の高度化に資する。また、上記、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、シビアアクシデント解析コードを活用して埋める。

アクシデントマネジメントへの対応

原子力発電所に関する新基準の設定、発行に伴い、発電プラントにおいては、アクシデントマネジメントの作成と履行が求められている。深層防護の思想に則り、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成文化し、通常的安全系機器、システムだけでは押さえきれない事象に対して、適切に対処すべき方法を明確化し、広くプラント内で共有することが必然となる。また、その基となる、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求められる。知識の共有に置いては、本章7.2節「人と情報の整備」においても記述されているが、その中でもFP挙動に関する情報の共有について言及されている。

これまで失われていたFP化学をはじめFPに係わる技術、情報を再収集し、技術としてきちんと後進に技術伝承（TT: technical transfer）する組織として、2017年6月に日本原子力学会に「シビアアクシデント時の核分裂生成物挙動」研究専門委員会が設置され、現状の分析、関連データの収集、技術課題の発掘が進められており、共通技術の整備と同時に人と情報の整備への寄与が期待されている。

図 7.1.2-4 に、FP 挙動関連の研究の必要性、現状分析及び研究方針を示す。

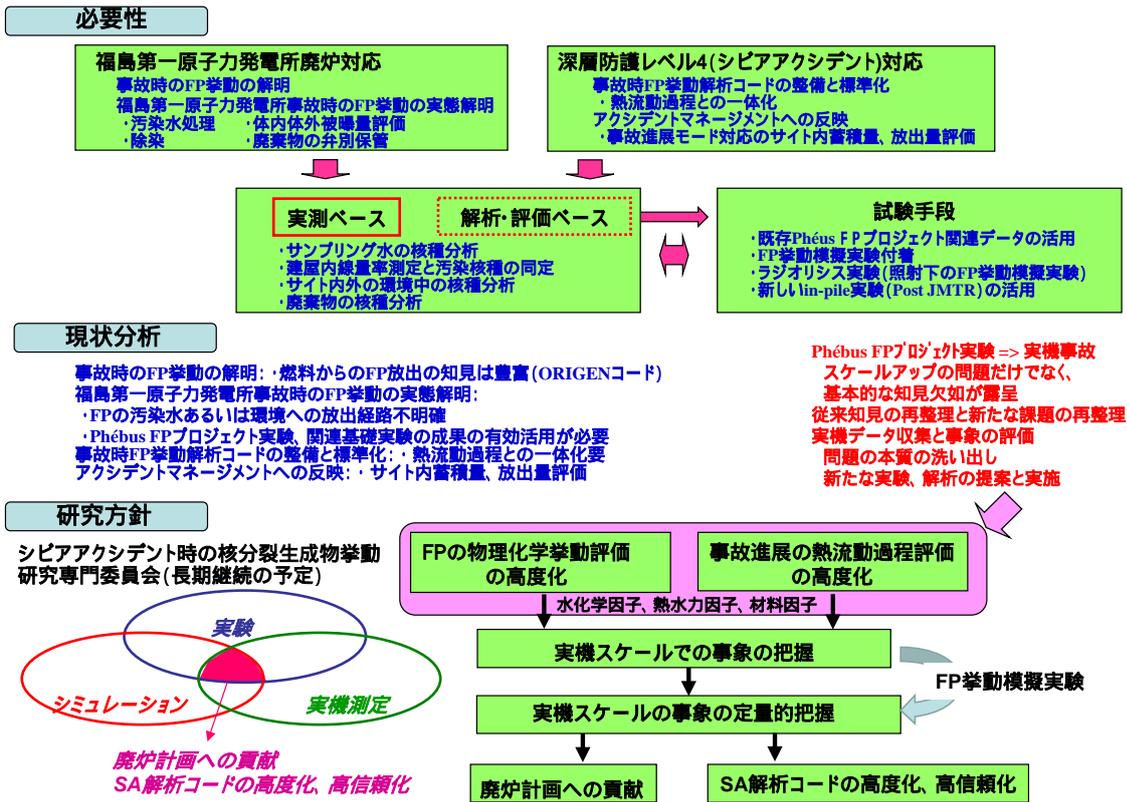


図7.1.2-4 核分裂生成物挙動関連の研究の必要性、現状分析及び研究方針

図 7.1.2-4 FP 挙動関連の研究の必要性、現状分析及び研究方針

(B) 研究方針と実施にあたっての問題点

1F 事故に遭遇して、FP を研究対象とする研究者、FP に携わる技術者が極めて少ないという現実が把握出来た。1990 年代後半までは、チェルノブイリ原子力発電所事故を受けて、シビアアクシデントに関する研究が活発で、格納容器内に蓄積する水素を爆鳴気になる前に燃焼させるイグナイターの開発や、ヨウ素を中心とする FP 挙動及びその除去関連の研究が積極的に進められた。しかし、2000 年代に入ると、急激に SA への関心が薄れ、関係する研究者、技術者が霧散していった。

今後二度と同じ轍を踏まないためにも、40 余年にわたる 1F の廃炉作業を遠隔、完全に遂行するためにも、FP 関連の技術を再整理し、次世代への確に技術伝承していく必要がある。

研究開発の方針として、以下に重点を置いた。

- ・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、1F 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）

具体的な研究の進め方としては、以下の(a)、(b)の 2 本柱を念頭に進める必要がある。

(a) 廃炉作業円滑遂行（特に、プラント内外の被ばく抑制と廃棄物適正管理）

事故時の FP 挙動の解明 [一般的な FP に係わる基礎事象]

1F 事故時の FP 挙動の実態解明 [事故時に見られた事象]

(b) 原子力発電プラントの安全運転（特に確実なレベル 4 対応）

事故時 FP 挙動解析コードの整備と標準化

アクシデントマネジメントへの対応

具体的には、

- (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、測定不可の場合は予測
- (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

ロードマップ推進のための研究開発推進体制としては、学会レベルでの FP 研究の核を作るため、2017 年 6 月、日本原子力学会「シビアアクシデント時の核分裂挙動」研究専門委員会を設立した。同準備会でまとめた Phébus FP プロジェクト実験のデータを中心に、議論し、1F 事故との対比を議論して、必要な技術課題をまとめる。表 7.1.2-4 に主要課題を示す。

表 7.1.2-4 「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

研究専門委員会の活動		
1. Phébus FP プロジェクト (Phébus FPP) 関連論文の調査報告書(本専門委準備会成果)をベースに、新たな技術サーベイを加え、FP 挙動に関する情報の共有化を図り、共通技術基盤上に新たな技術者集団を構築する。 2. 福島第一原発事故(実機事故)で見られた過酷事故時の FP 挙動をサーベイし、FP 挙動評価の視点から、従来技術で予測されたものと、予測できなかった現象を区分し、新たな技術課題を整理する。 3. 上記 1. 2. に FP 挙動に係る新しい技術課題を加えて、技術報告書(応用編)としてまとめ、現場での実務者、若手技術者との協働をも通して、FP 挙動に関する技術伝承に資する。 4. 上記 3. をベースに、40 年超の長期にわたる技術継続、継承に資する。		
WG# 名称	主要検討内容	主要成果目標
WG1 FP 実験	FP 放出・移行・環境動態に係る現象を把握・理解し、把握・理解し、物理現象を適切に表現できるモデルを構築するための実験および解析を提案	新たな実験の提案 FP 挙動についての検討課題リスト
WG2 ベンチマーク(BM)評価	主要 SA 解析コードの FP モデルを Phébus FPP の BM 評価を通して理解し、Cs 解析技術の課題を把握 実機事故の解析結果に基づき、モデル改善の技術課題を抽出	Cs 解析改善点の提案 FP モデル改善の提案
WG3 技術課題抽出	Phébus FPP 実験と実機での FP 挙動を比較検討し、両者の FP 挙動の相違を検討し、新たな技術課題を抽出	実機 FP マスバランス 実機での測定対案 新たな実験の提案
成果をまとめ、技術報告書作成に寄与		

3つのWGを組織して議論を進めているが、3つのWGの相関を図7.1.2-5に示す。

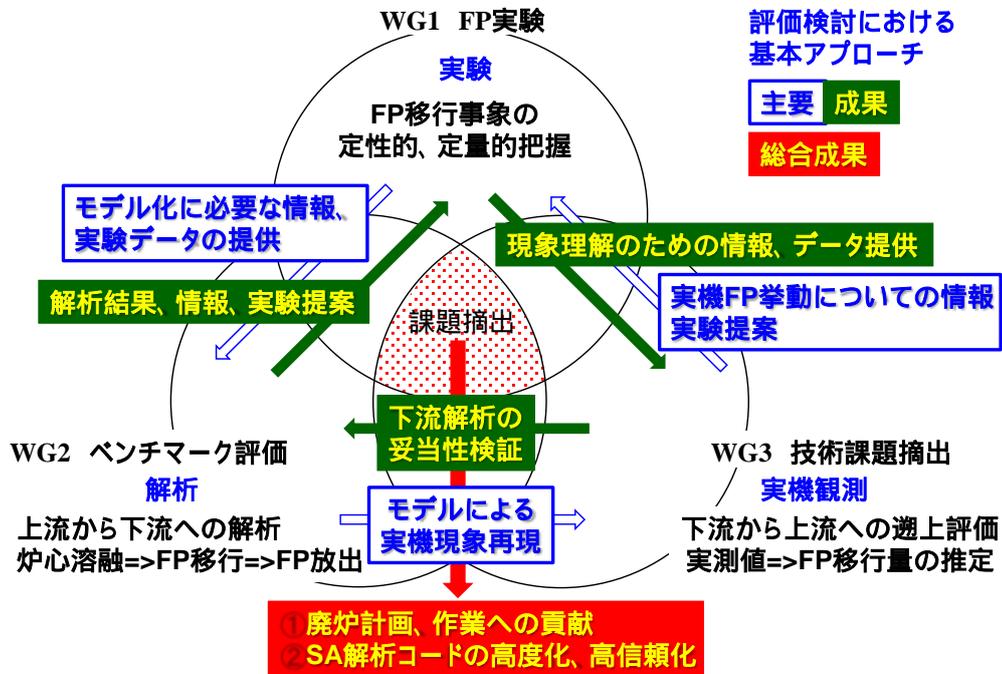


図 7.1.2-5 3つのWGの役割分担と主要成果

(C) 産官学の役割分担の考え方

核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術の確立のための産官学の役割分担を図7.1.2-6に示す。

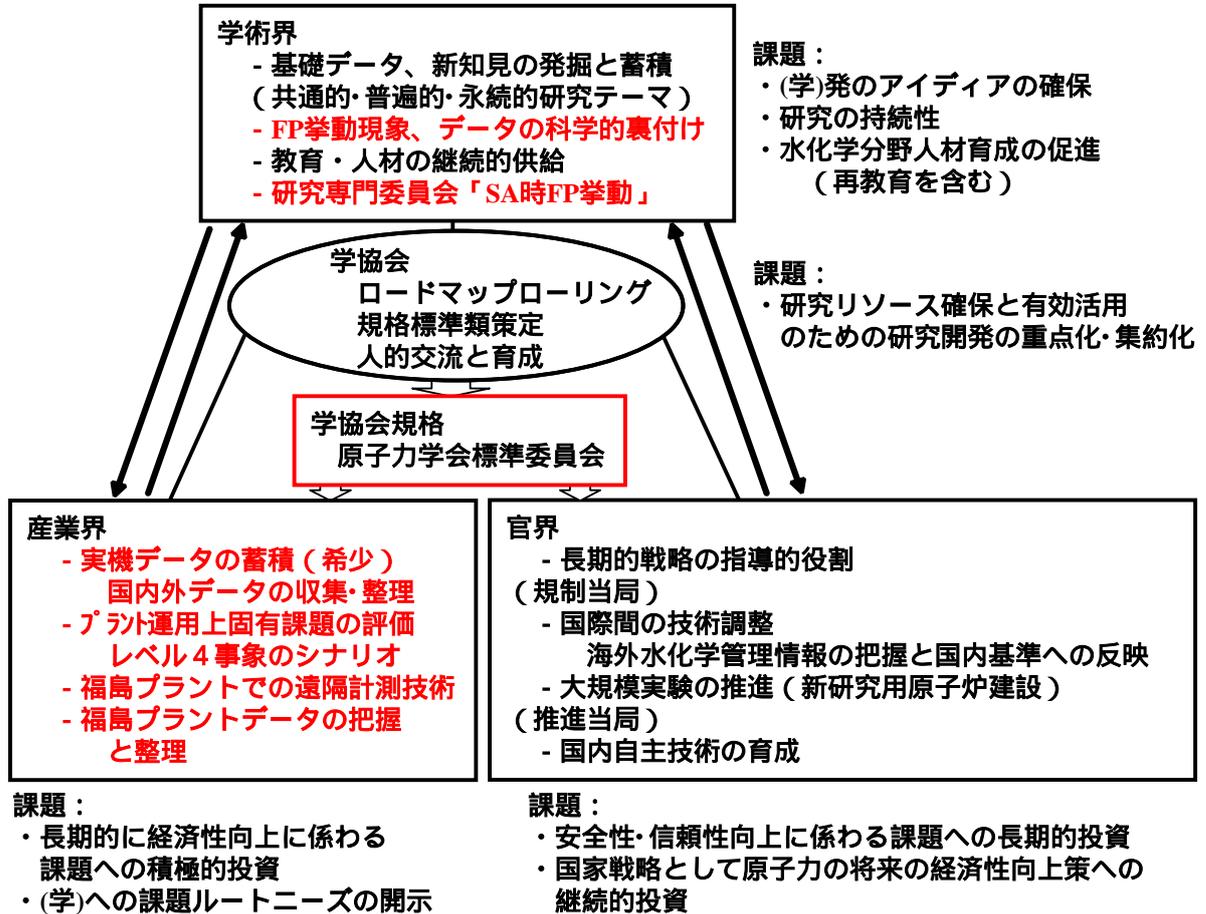


図 7.1.2-6 共通基盤技術 (FP 挙動関連) 確立のための産・官・学の協力体制

産業界の役割

a. 実機データの蓄積とニーズの提示

基礎知見と実機知見の結合。特に学术界を積極的に取り込むためには、関連分野の研究ニーズの明確化とその成果の受け皿を確保することが必須である。現状では、学术界への研究ニーズの提示が研究資金の投入に優先するものとする。学术界に関連研究拠点を確保することで、新たな研究が芽生え、その中から人材供給の可能性も育ってくる。拠点が拡大しつつある段階で、大きな研究資金を確保するという2ステップの対応が有効と考える。科学研究費補助金等の学(学术界)の分野での競争的研究資金を獲得するためには、特定機関を対象とした研究ニーズの開示では十分効果を発揮することはできない。科学研究費補助金の審査に当たる学識経験者群に研究ニーズを公式に開示することが必須となる。あるいは、不特定の学識経験者が読んで理解できる研究ニーズを明確に準備し、提案側がそのニーズドキュメント(提案書)を利用

できるような配慮が必要である。こういったドキュメントの準備も、産業界の役割と考える。研究ニーズドキュメントでは、具体的な研究の必要性に留まらず、研究の難易度、期待されるブレークスルーの大きさ、さらには広く科学技術一般に対して期待される波及効果の記載が必須である。

一方で、水化学・腐食に係わる共通基盤技術と異なり、FP 挙動関連の技術は、ごく一部の通常運転時の FP 挙動という例外を除くと、運転中の発電用原子炉では経験されない事象が中心であるため、プラントの運用実績から得られる知見、データは皆無に近い。にもかかわらず、レベル4 対応では、FP 挙動を想定したマニュアルの作成が必須である。どういうデータが必要か、何が不明確かといった情報を学术界に発信し、事故時の対応シナリオの作成が必要である。

1F 廃炉対応では、プラントの各所にアクセスし、データを収集することが産業界に求められている。こういったデータは、廃炉作業の円滑推進に必須であるとともに、世界的にも貴重なものであり、産官学での情報の共有化と国際的な情報発信が望まれる。また、アクセスの困難な箇所での遠隔計測、遠隔作業に係わる技術、中でも除染と計測技術は共通基盤技術として必須のものである。

b. プラント運用上の固有課題の評価

複合現象のモデル化が必要である。

c. 既存技術の高度化と適用

基本的には、産業界が独自に資金を確保して対応すべきと考える。ただし、国・官界の R&D には積極的に参加することが必須で、この分野では、国・官界からの資金供与が必須となる。

d. 水質管理基準等の整備

国・官界の役割

a. 長期的戦略の指導的役割

b. 国際間の技術調整

海外 FP 挙動関連の情報の把握と国内基準への反映

規制当局が、中心的役割を果たすのが望ましい。

c. 大規模実験の推進（に代わる研究用原子炉の建設）

2016 年に廃炉が決まった JMTR に代わる新しい研究用原子炉の建設、稼働とインパイルループ実験による“FP 挙動の研究”には発電プラントの建設、運用、経年化プラントの維持、管理に当たる産業界とのかい離はあってはならないことで、装置の計画、製作の段階より、官界、学术界、産業界が一体感を持って、世界トップのインパイルループ実験の成功に向けてベクトルをそろえて対応することが必須と考える。

d. 国内自主技術の育成

推進当局が、中心的役割を果たすのが望ましい。

e. 原子力の将来ビジョンの明確化と夢の創生

学术界の役割

a. 基礎データ、新知見の発掘と蓄積

(共通的・普遍的・永続的研究テーマ)

学術界の性格として、研究を強いて、対応できるものではないと考える。産業界の研究ニーズを理解し、能動的に新たな課題に向かうような工夫と仕掛けが必要であり、研究資金の大小よりも、学術界に相応しい規模で、学術界としての活動を妨げることがないような資金提供が本質的と考える。そのためには、研究費の申請と受託が容易となるような、研究環境の構築が重要と考える。

b. FP 拳動の科学的裏付け

c. 教育・人材の継続的供給

学術界の自然な姿として、関連研究が根付くことによって、必然的に関連分野の人材育成が可能となり、その結果として、産業界で希望する分野での人材育成がなされるもと考える。結果を急ぎすぎることは、金の卵を生む鶏を損なうことにつながる。短期的には、産業界の自主努力で必要な人材を育成することが重要と考える。

学協会の役割

a. ロードマップローリング

b. 規格標準類策定

d. 共通基盤技術の研究ニーズの発行

e. 人的交流と育成

産官学の連携

a. 全体としてのベクトルそろえ

国家全体として最大の力を発揮できるようなシナリオを提示し、共通の目標に向かって行くムード作りも重要である。特に、産業界の活力が低下気味であり、学の水化学への寄与が小さい点が問題で、連携を強めることで、問題の本質的解決を急ぐ必要がある。

導入シナリオを図 7.1.2-7 に示す。

技術マップを表 7.1.2-5 に、またロードマップを図 7.1.2-8 に示すとともに、具体的項目については、本項の末尾に、課題調査票としてまとめた。

参考文献

[7.1-1] 日本原子力学会水化学部会ロードマップフォローアップ小委員会, “水化学ロードマップ 2009” (2009).

[7.1.1-1] 日本原子力学会水化学部会ロードマップフォローアップ小委員会, “水化学ロードマップ 2009” (2009).

[7.1.1-2] 水化学部会, “水化学部会の現状と今後の展開—水化学高度化と標準化をめざして”, 日本原子力学会誌「アトモス」, 51, 310-313 (2009).

[7.1.1-3] 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).

[7.1.1-4] 腐食防食学会, “高温水中における応力腐食亀裂進展試験方法” (2015).

[7.1.1-5] 腐食防食学会, “高温高純度水環境における単軸引張定荷重負荷(UCL)を用いた金

属及び合金の応力腐食割れ試験方法” (2015).

- [7.1.2-1] M. J. Fluss, N. D. Dudey and R. L. Malewicki, “Tritium and Alpha-Particle Yields in Fast and Thermal Neutron Fission of ^{235}U ”, Phys. Rev. C, 6, 2252 (1972).
<http://dx.doi.org/10.1103/PhysRevC.6.2252>
- [7.1.2-2] 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及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).
- [7.1.2-3] K. Way and E. P. Wigner, “The Rate of Decay of Fission Products”, Phy. Rev., 73, 1318 (1948).
- [7.1.2-4] A. G. CROFF, “ORIGEN-2: A Revised and Updated Version of Oak Ridge Isotope Generation and Development Code”, ORNL-5621, Oak Ridge National Laboratory (1980).
- [7.1.2-5] 須山賢也, “ORIGEN2.2 コードの核分裂収率を取り扱うルーチンの問題”, 核データニュース, No.83, 63-39 (2006).
- [7.1.2-6] L. E. Herranz and B. Clément, “In-containment source term: Key insights gained from a comparison between the PHÉBUS-FP programme and the US-NRC NUREG-1465 revised source term”, Progress in Nuclear Energy, Vol. 52 (5), July 2010, pp. 481-486 (2010).
- [7.1.2-7] 成富満夫, “原子炉事故時における放射性ヨウ素の物理的、化学的挙動に”, 保険物理, 22, 189-207 (1987).
- [7.1.2-8] S. Uchida, M. Naitoh, H. Suzuki, H. Okada, and S. Konishi, “Evaluation of Accumulated Fission Products in the Contaminated Water at the Fukushima Dai-ichi Nuclear Power Plant”, Nucl. Technol., 188(3), 252-265 (2014).

課題調査票

課題名	核分裂生成物挙動に関する共通基盤技術
マイルストーン 及び 目指す姿との関連	<p>短期 I. 燃料取りだし開始 => 核分裂生成物 (FP) 挙動に関する確実な理解</p> <p>短期 II. デブリ取出し方法確定 => FP 挙動の確実な理解</p> <p>短期 V. プラント再稼働 => アクシママネジメントへの核分裂生成物挙動に関する知見の確実な適用</p> <p>中期 III. デブリ取出し => 核分裂生成物の確実な制御</p> <p>長期 IV. 廃止措置 => 核分裂生成物の除去と長期安定化</p>
概要 (内容)	<p>(1) 研究基盤の確保/技術伝承 産官学の研究機関が参加して、水化学共通基盤技術に係わる研究を長期的、計画的に実施できる仕組みを構築。学に研究ニーズを開示すると同時に、競争的研究資金獲得が容易になるよう、研究ニーズを開示。また、共同研究プロジェクトを構築していく環境を整備、実施を通し、技術向上を図ると同時に、学において技術伝承を促進して、長期的な研究基盤を確保。特に、核分裂生成物挙動については、若年層のみでなく中間層への技術伝承が重要。</p> <p>(2) 技術・情報の整備/新技術への挑戦 国内外の核分裂生成物挙動に係わる技術・情報を再整理し、ドキュメント化。IF 事故の経験と重ね合わせて、技術・情報の整合性、妥当性を評価して、不足な情報を抽出し、計画的に補足するための方策を提示して、実行。 国際的に核分裂生成物挙動解明のためのプロジェクトを企画し、研究開発を主導。このために、Phébus FP プロジェクトに代わる、新しい研究用原子炉の設置を準備し、新たな国際的な核分裂生成物挙動解明研究拠点を確保。</p> <p>(3) 学協会規格等の整備 事故時の発電プラント内外の核分裂生成物の計測において、モニタリングポスト、計測器、その使用法等のレベル差、校正、測定値から核分裂生成物濃度への換算法等、統一すべき課題が散見された。品質保証や社会への説明性に関する要求に対し、体系的・組織的に対応するため、放射線計測を中心に、学協会の場で民間規格化・基準化する。こうした民間規格及びその技術説明書は、これまでに蓄積された知識・経験を次世代に適切に継承し、世界的にも高い水準にある我が</p>

	<p>国の放射線計測のみでなく、水化学管理技術を維持するための技術継承資料として有用。</p> <p>過酷事故の発生及び拡大防止に技術情報に基づいて、関連する防災マニュアル類整備に核分裂生成物挙動の観点からの寄与を強化していく。</p> <p>(4) 国際協力の推進 上記(2)記載の国際協力体制を推進する。 防災マニュアル類整備に核分裂生成物挙動の観点からの寄与を強化していく。</p>
導入シナリオとの関連	<p>(1) 事故時の FP 挙動説明を通して、廃炉作業の円滑遂行（特に体内・外被ばくに抑制）、原子力発電プラントの安全運転に資する。</p> <p>(2) 上記を長期間にわたり維持するため、FP 挙動関連の知見、技術を確実に技術伝承する。</p>
課題とする根拠（問題点の所在）	<ul style="list-style-type: none"> ・プラントの安全・安定な運転を維持するため、技術基盤整備、規格基準類の整備及び人材育成プログラムが必要。 ・プラントのトラブルや異常事態の早期発見及び拡大防止に寄与する技術基盤整備、規格基準類の整備及び人材育成プログラムが必要 ・事故発生への備えに寄与する技術基盤整備、規格基準類の整備及び人材育成プログラムが必要 ・事故拡大防止に寄与するための技術基盤整備、マニュアル類整備及び人材育成プログラムが必要
現状分析	<p>(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</p> <ul style="list-style-type: none"> ・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 <p>(2) 1F 事故時の FP 挙動の実態解明</p> <ul style="list-style-type: none"> ・実機での関連データ収集の困難さ <p>(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</p> <ul style="list-style-type: none"> ・「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 <p>(4) アクシデントマネジメントへの反映：これからの課題</p>
期待される効果（成果の反映先）	<p>(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）：上記(1)及び(2)</p> <p>(b) 原子力発電プラントの安全運転（確実なレベル 4 対応）：上記(3)及び(4)</p> <p>(c) 上記を長期にわたって支える人材の確保</p>
実施にあたっての問題点	<ul style="list-style-type: none"> ・上記(a) 廃炉作業円滑遂行については、緊急性が課題。研究開発資金は獲得可能。 ・上記(b) 原子力発電プラントの安全運転については、長期的に重要

	<p>な課題ではあるが、研究開発資金は獲得が課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ・上記(c) 人材の確保については、産官学後協力し、体制強化が不可欠。なお、FP 挙動は、水化学分野に限定された技術ではない。熱流動、核燃料、保健物理・環境科学、計算科学、再処理、廃棄物処理、核融合、原子力安全等、原子力学会においても多くの部会のサポートで解明されるもので、学内での緊密な協力体制が求められる。
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"> ・ FP 挙動に関する広く深い知見を有する人材 ・ FP 挙動に関する新しい知識を求める研究人材 ・ プラント全般に精通している人材 ・ 事故時のプラント挙動に精通している人材 <p>(2) 人材基盤に関する現状分析</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 ・ 実機での関連データ収集が困難 <p>(3) 課題</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 計画的かつ継続的な人材確保方策 ・ 若手技術者の積極的な参加を勧め、経験を積むことで幅を広げる
他課題との相関	<p>「水化学ロードマップ」の他課題との対応</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 安全基盤研究「構造材料の高信頼化」を支える共通基盤技術の位置付けであるが、その中で環境負荷低減(被ばく線源低減及び環境・一般公衆への影響低減)に関しては、深層防護レベル4 対応の部分は、本共通基盤技術でカバーする。 ・ 事故時対応の水化学については、特に明確な分担は決めず本共通基盤技術と協力して、対応する。
実施時期・期間	短期～長期。ロードマップ記載のステージ毎に実施。
実施機関/資金担当 <考え方>	<p>産官学の役割分担</p> <p>産の役割</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ FP 分布の測定と予測 ・ FP 除去、固定化技術の確立 => 廃炉関連技術高度化：計測/処理 ・ AM の確立 => 最先端の AM：あらゆる可能性包含 <p>官の役割</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 必要な基盤(知識・人材・施設・制度)の整備 => 国家戦略としての人材育成計画 ・ 研究炉建設と in-pile 実験 => 計画的な大型投資

	<ul style="list-style-type: none"> ・ 産学の安全に係わる研究 <p>学の役割</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 事故時 FP 挙動の解明 =>評価手法の標準化 ・ 知の蓄積と展開 ・ 研究を支える人材の育成 =>基盤研究に係わる人材の育成 <p>学協会の役割</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 規格基準化と高度化に貢献 ・ 知識ベースの普及 =>FP 取扱い方法の標準化 <p>産官学の連携</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 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 <p>関連分野との連携</p> <ul style="list-style-type: none"> ・ 総合的な廃炉技術 ・ 多角的な AM 評価
その他	特になし

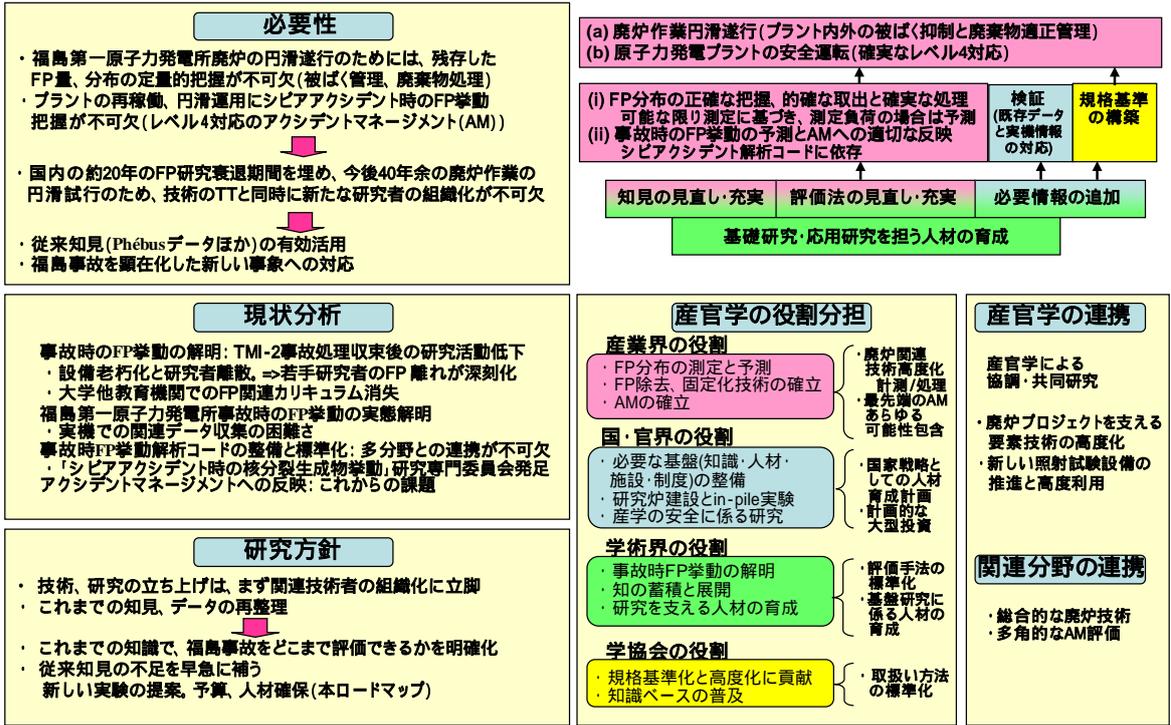


図 7.1.2-7 核分裂生成物挙動関連の研究に係る導入シナリオ

表 7.1.2-5 核分裂生成物挙動に係る共通基盤技術の技術マップ

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	環境放出ルートの解明と放出抑制策	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
アクシデントマネージメントへの反映	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

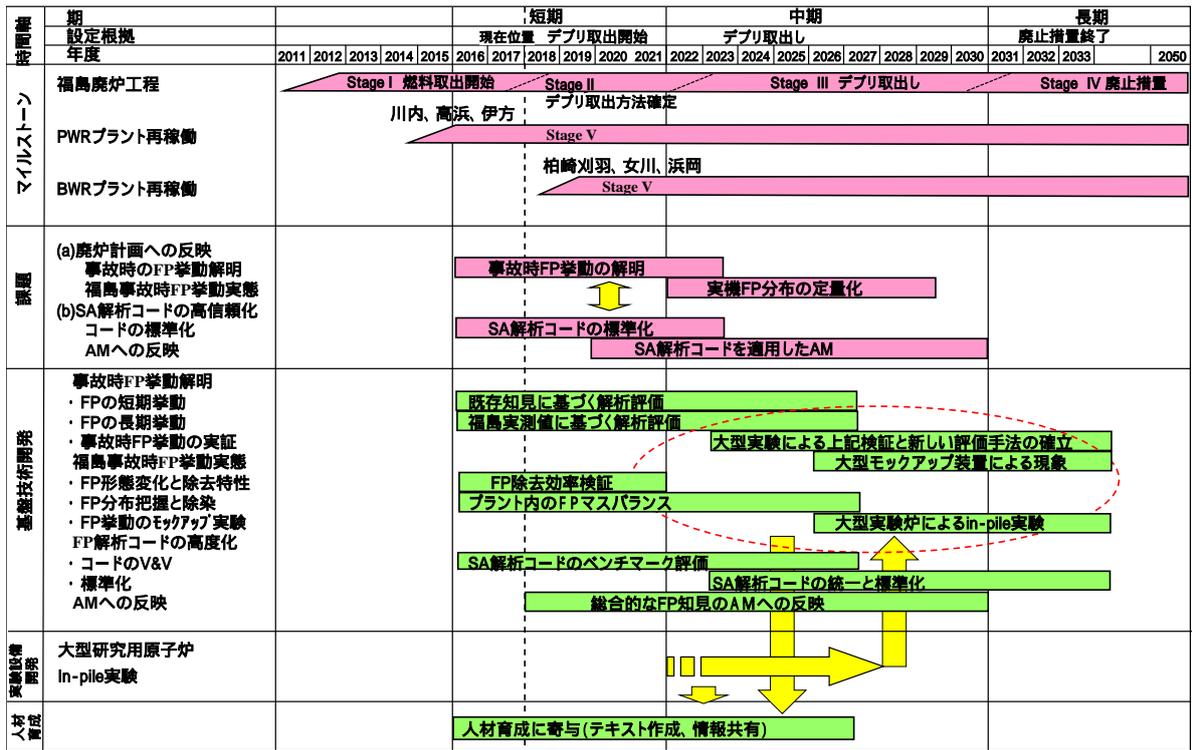


図 7.1.2-8 核分裂生成物挙動に係わる共通基盤技術に関するロードマップ