

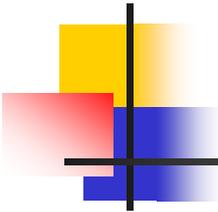
燃料高度化技術戦略マップ2007

平成19年7月

日本原子力学会

「軽水炉燃料の高度化に必要な技術検討」

特別専門委員会



技術戦略マップ策定の位置付け

- 技術戦略マップやその検討の意義は、産官学の専門家が、取り組むべき課題、その課題への対応方法や責任者を明確にし、理解を共有することにある。また、その内容について国民の理解を得つつ、産官学が有機的に連携しながら、合理的かつ効率的な方法で課題解決を図ることを目標としている。
- 安全基盤研究に係る活動は「原子力発電所の安全確保」をめざすものであり、社会的要求や情勢の変化による設備、運用の変化に対して、確実に安全を確保しつつプラントの高度化を図るための施策を達成、実現するものである。この中で軽水炉燃料の高度化はきわめて重要な位置付けにあり、これをどのように図っていくかを産官学で議論し共有するために、「燃料高度化技術」の技術戦略マップを日本原子力学会の場において策定しさらにそのローリングを行っている。

技術戦略マップの策定およびローリングの実施体制

ロードマップおよび民間規格に関する作業会を有する特別専門委員会を設置し、制定した規約に基づき、専門家が個人的な立場として参加し(計53名)、議論を行った。

日本原子力学会「軽水炉燃料の高度化に必要な技術検討」特別専門委員会

委員会主査 関村直人

■ 学术界

東京大学、大阪大学、京都大学、名古屋大学、九州大学、電力中央研究所

■ 官界

原子力安全・保安院、資源エネルギー庁、原子力安全基盤機構、
原子力安全委員会、日本原子力研究開発機構

■ 産業界

日本原子力技術協会、東京電力、関西電力、日本原子力発電、
三菱重工業、グローバル・ニュークリア・フュエル・ジャパン、原子燃料工業、
日本核燃料開発、ニュークリア・デベロップメント、三菱原子燃料、
住友金属、三菱マテリアル、神鋼特殊鋼管(コベルコ科研)、ジルコプロダクツ

■ 学協会

日本原子力学会標準委員会

ロードマップ作業会

技術戦略マップのローリング

民間規格作業会

燃料に関する学協会規格案や
規格策定における課題の検討

技術戦略における産官学の役割分担(理念)

学术界

- ・安全基盤研究への貢献に関する責任
- 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

国・官界

- ・安全規制の確立と整備に関する責任
- 安全規制における適正な行政判断に必要な安全研究
- 必要な基盤(知識・人材・施設・制度的)の整備
- ・安全性と公益性の確保・向上を前提にした原子力政策の推進に対する責任
- 産業界・学术界の安全に関わる研究と基盤整備に対する支援

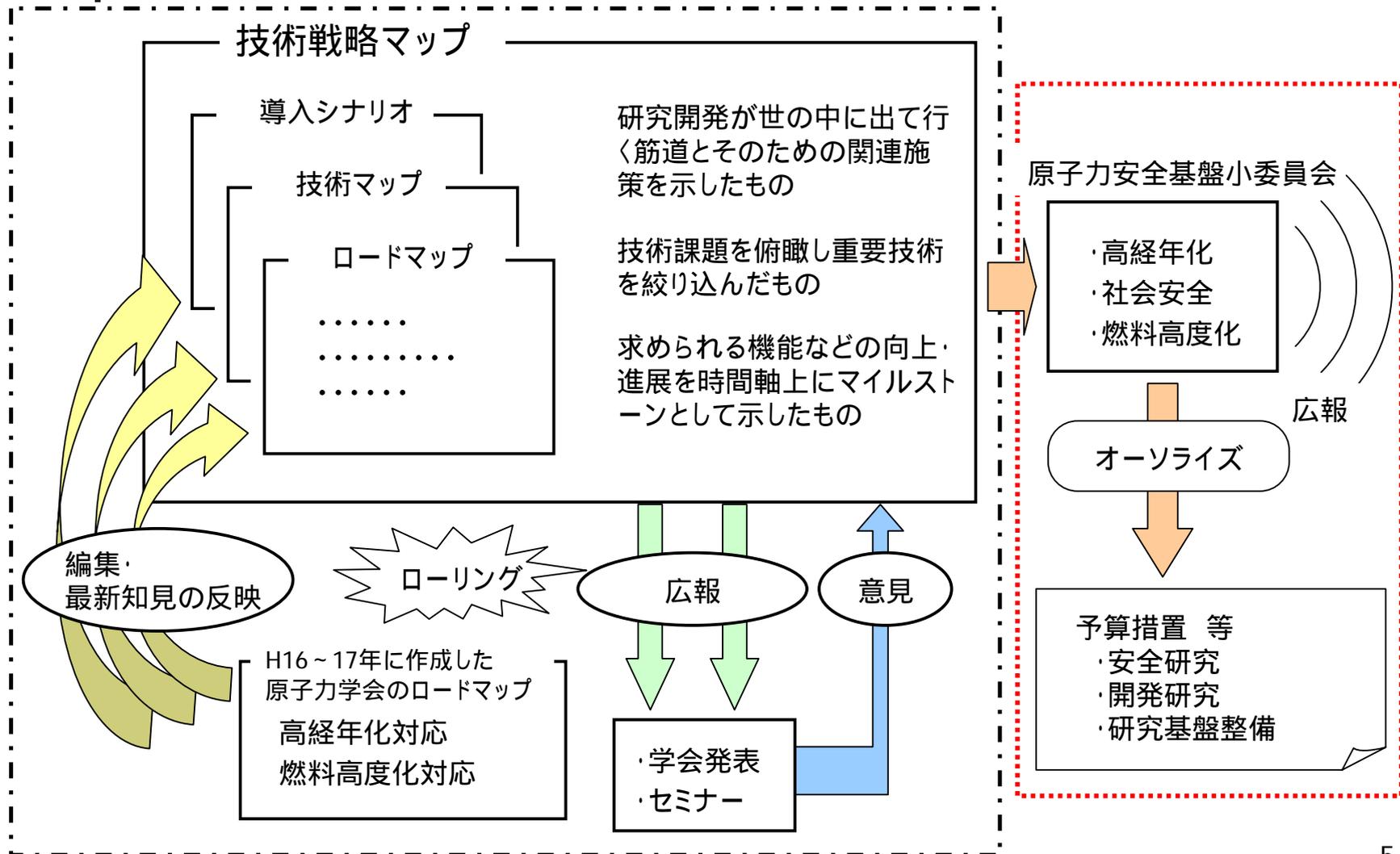
産業界

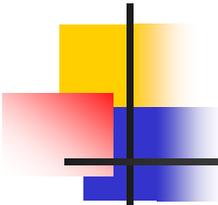
- ・安全の確保に関する責任
- 安全性と公益性の確保・向上を目的とした開発研究および基盤整備

学協会など

- ・産官学の関係者が集合し、以下の観点から技術戦略マップの策定、定期的なローリングを行う。
 - 優先的に取り組む課題の明確化
 - 合理的・効率的実施を考慮した役割分担の検討
 - 検討作業、情報発信を通じたコンセンサスの形成
- ・技術戦略マップに沿った活動の中で、規格基準化を図り、規格基準の高度化に貢献する。

技術戦略マップの作成と展開





技術戦略マップ 策定・ローリングの考え方

原子力発電は国民全体の理解が必要であり、その安全確保には官民が連携した国全体としての取り組みが要求される。

その上で、技術戦略マップの策定・ローリングは、以下の3点を満足するように行う。

国の研究開発および民間も含めた安全関連の研究に関しては、その考え方、内容、成果などについて、国民に説明を行い、理解を求める。

- 国が行う研究の必要性・予算措置と産業界が行う研究との連携
- 安全基盤研究全体の位置づけの明確化

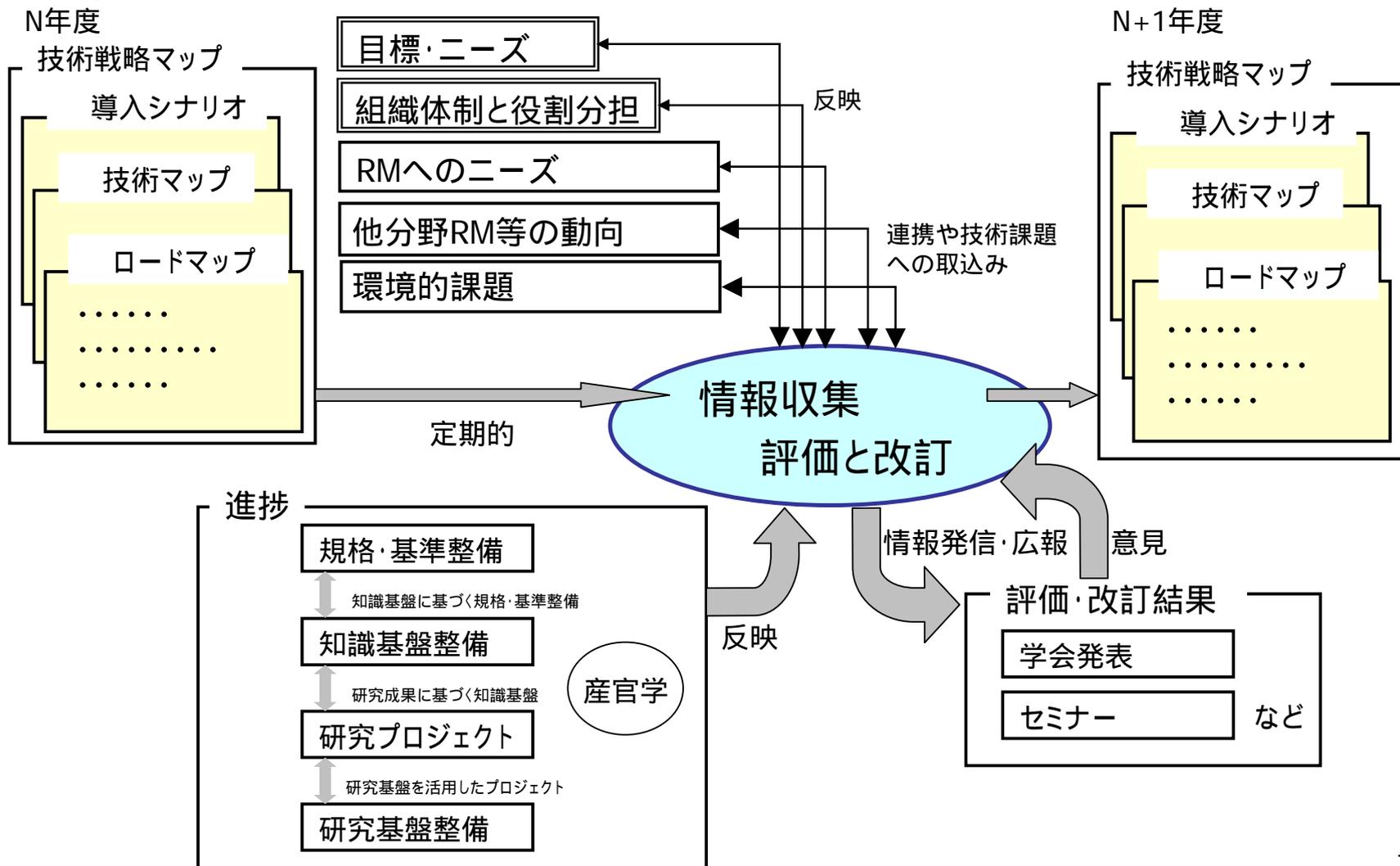
研究開発プロジェクトの企画立案および運営に寄与するインフラを整備する。

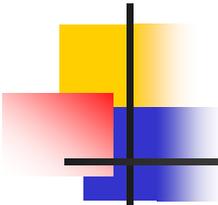
- 産官学の活動情報の統合と効果的活用として、情報基盤の整備

異分野・異業種の連携、技術の融合、関連施策の一体的維持活用と安全確保のための基盤整備等を促進するとともに、産官学の総合力を結集する。

- 関連分野との連携
- 施設基盤、人材基盤の構築（どの分野の施設、人材が必要かを明確にする）
- 産官学が結集して、共通の理解と目標を設定（コンセンサスの形成）

技術戦略マップのローリング





目標の明示とシナリオの共有

- 原子力発電の重要性を確認しつつ、燃料高度化の位置付けを明確化し、産官学の場で共有化された目標を明示した。

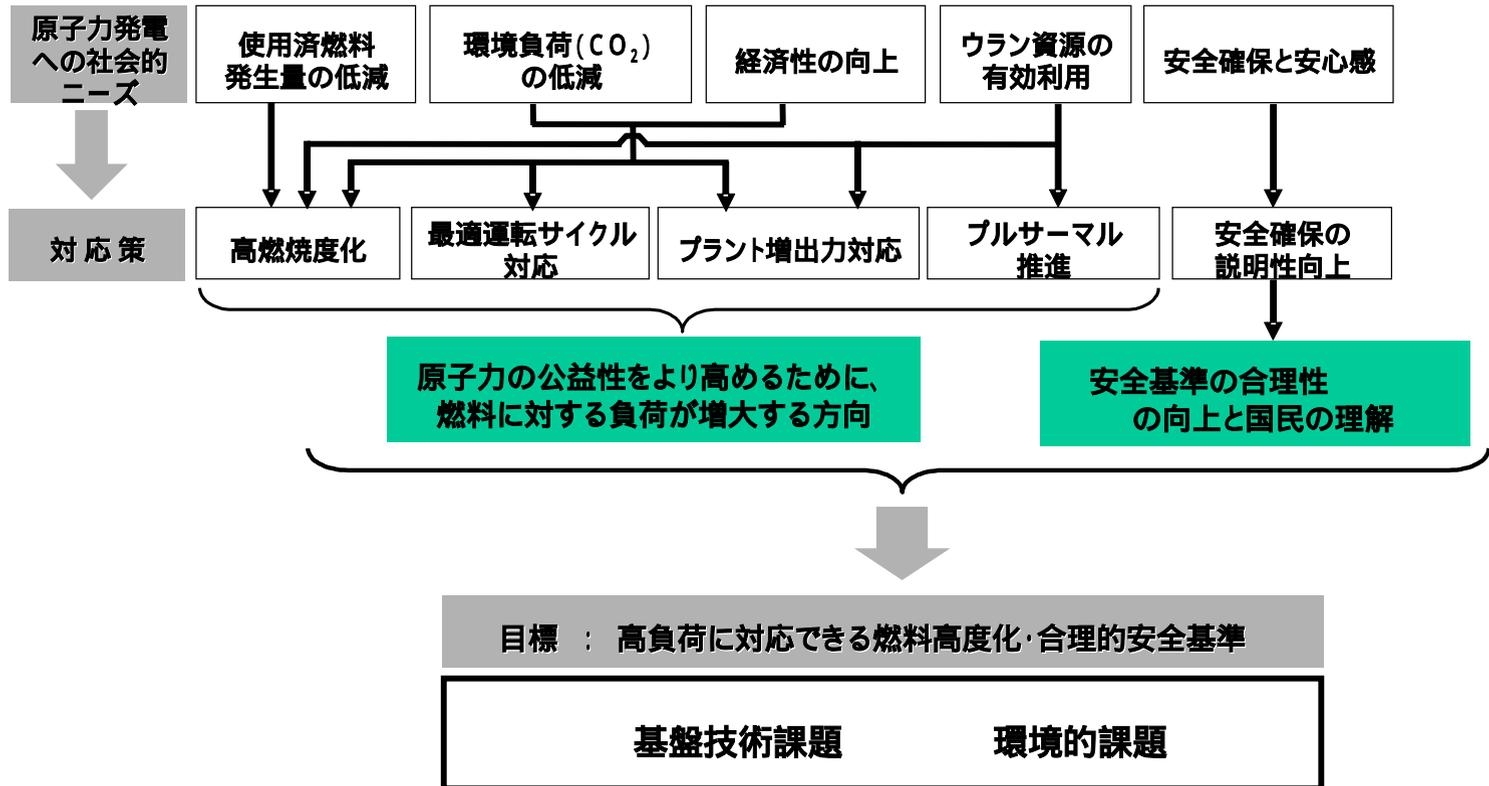
(燃料高度化の位置づけ)

公益性の向上のためには、増大する燃料の負荷に対応できるように燃料の高度化を図る必要がある。燃料は放射性物質を閉じこめるという安全上重要な機能を有している。その安全性を確保するための性能を向上することで今後も信頼性を維持しつつ、さらに安全基準の合理性の向上を図ることが原子力発電への信頼を高めることになる。

- 特別専門委員会に参加する関係者が燃料高度化に関わる見通しを示し、これを互いに議論し集約することによって、産官学が共有する目標を達成するための技術戦略マップを描き出すとともに、常にこれを最新のものとするための議論を行っている。

燃料高度化の位置づけ

燃料高度化関連図



燃料高度化の位置づけ(公益性の向上)

高燃焼度化による使用済燃料発生量低減
燃料性能向上が支えるプラントの高度利用
(炉出力向上、柔軟な運転サイクル)によるCO₂の削減

効果の試算

使用済燃料発生量低減

現行燃料(55GWd/t) 高燃焼度化燃料(例えば ~ 70GWd/t)
約30%の使用済燃料発生量低減

CO₂削減

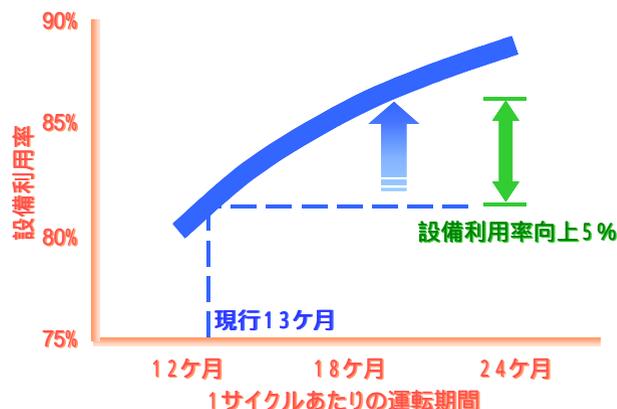
設備利用率10%向上*1

年間約430億kWhの発電量
(110万kWプラント5基)増加に相当

年間約2.5千万トンのCO₂発生の削減に相当*2

1990年度の年間排出量の約2%に相当
(京都議定書における削減目標6%)

2千億円以上の排出権に相当*3



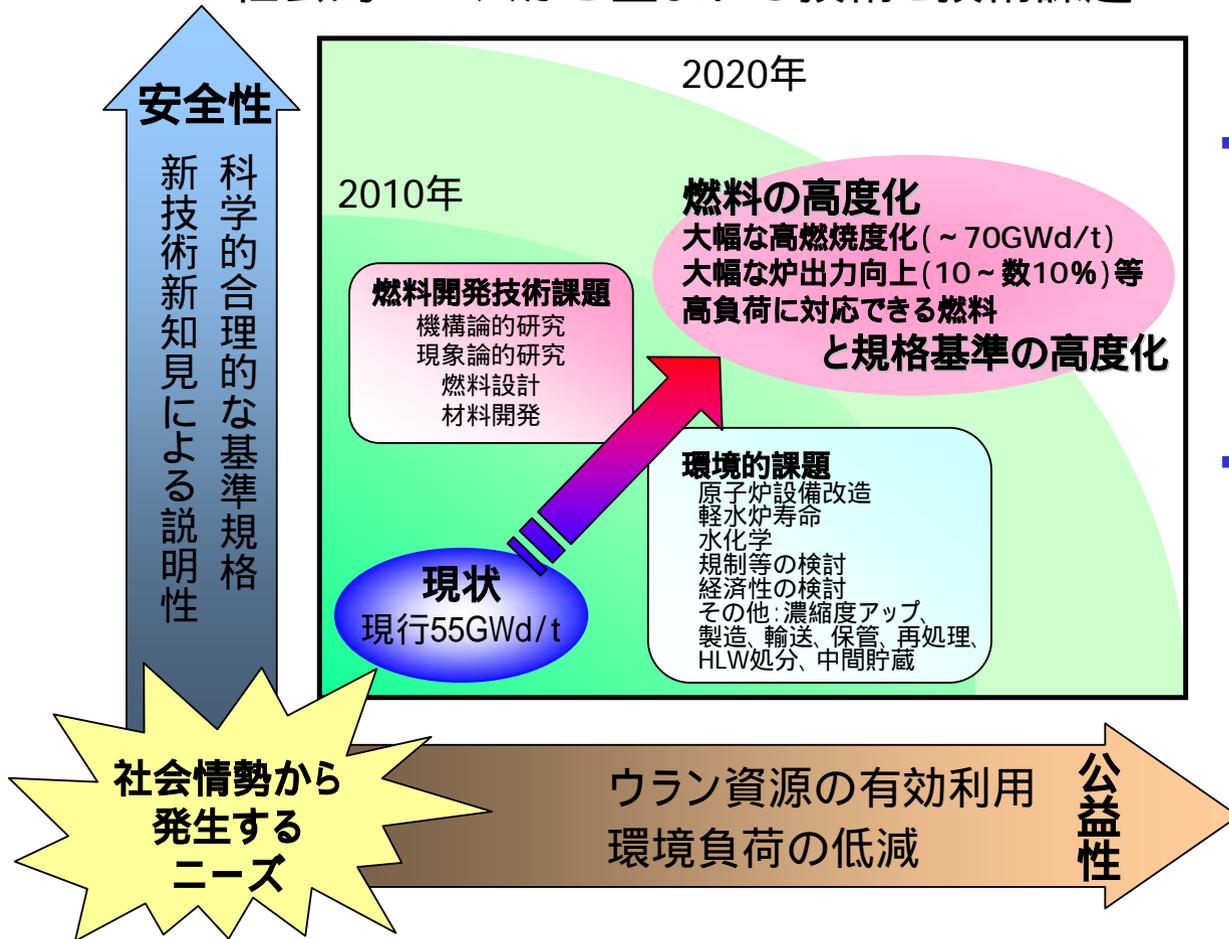
*1 13ヶ月運転(3ヶ月定検)のプラントの場合、例えば、柔軟な運転サイクル(約19ヶ月運転)による約5%および炉出力向上(約6%)による約5%の設備利用率向上。

*2 LNG火力の代替を想定して試算。

*3 IPCC第3作業部会報告(2007.5.4)において、「2100年までに大気中の温室効果ガスを550ppmに抑えるためには2030年までにCO₂の削減費用を最大約80ドル/t-CO₂まで伸ばすことが必要」とされている(2007.5.5毎日新聞)ことから、排出権価格を同程度として試算。

燃料高度化の導入シナリオ 燃料高度化の目標

社会的ニーズから望まれる技術と技術課題



- 高負荷に対応できる燃料の高度化と規格基準の高度化による安全基準の合理性と信頼性の向上を図り、公益性の向上と安全性の向上を、ともに達成していく必要がある。
- そのためには、官民が規制と開発の両輪となり協調を図っていくことが重要であるとともに、緊張感を維持しながら、適切な役割を分担していくことが必要である。

燃料高度化の対応策

- 高燃焼度化
- 炉出力向上
- 柔軟な運転サイクル対応
- プルサーマル対応
- 規格・基準高度化

等

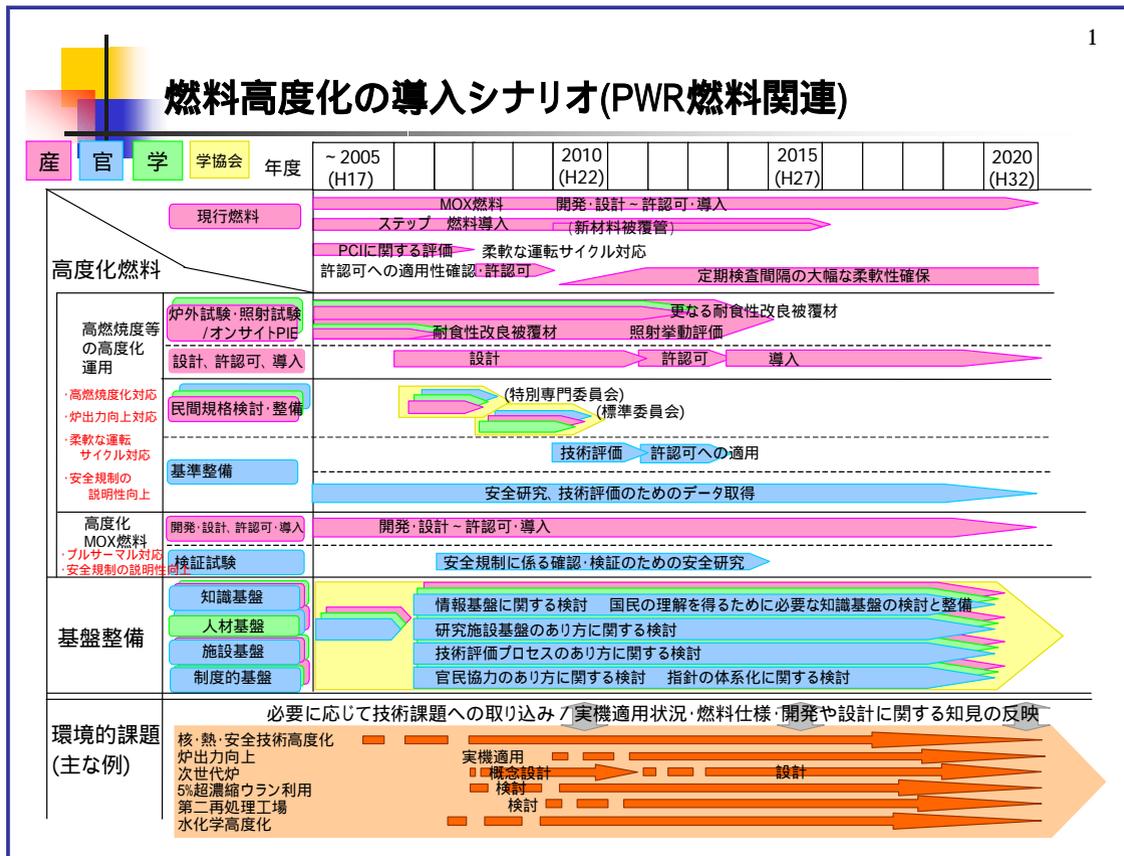
PWR燃料
の高度化

BWR燃料
の高度化

それぞれ具体的に展開

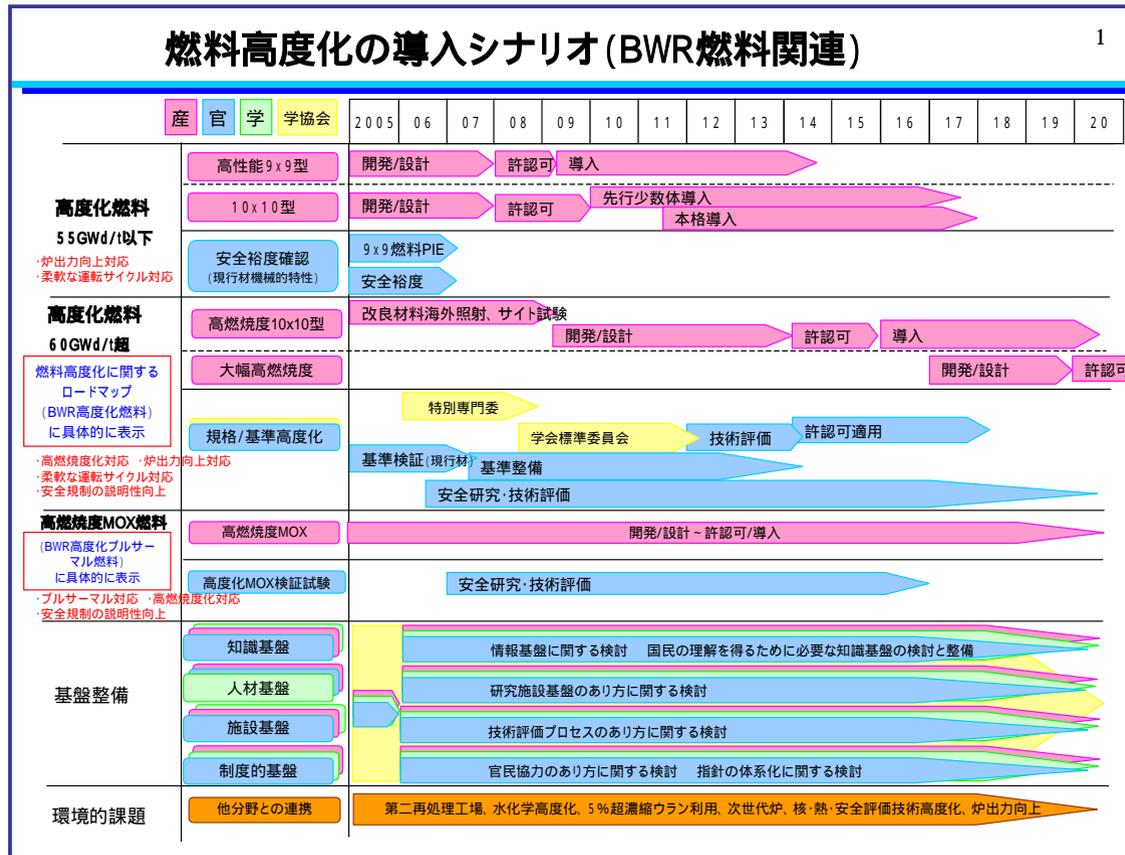
燃料高度化の導入シナリオ(1階層目)(1)

- 導入シナリオ
 - 研究開発が世の中に出て行く筋道とそのための関連施策を示したものの



PWR燃料高度化の導入シナリオ

燃料高度化の導入シナリオ(1階層目)(2)



BWR燃料高度化の導入シナリオ

燃料高度化の技術マップ(2階層目)(1)

- 技術マップ
 - 技術課題を俯瞰し重要技術を絞り込んだもの

2a: 燃料高度化における技術課題を俯瞰し、重要な特性・挙動・損傷モードを抽出したもの。

燃料高度化の技術マップ
(PWR燃料の重要特性・挙動と損傷モード)

2a

PWR燃料高度化の技術マップ		
	重要特性・挙動	関連する損傷モード
被覆管	腐食増大	(減肉)
	水素吸収増大	(延性低下)
	機械特性(延性)劣化	PCMI過歪(延性低下)
	炉内クリープ	クリープ破損・クリープコラプス
	疲労特性	疲労
	LOCA時挙動	LOCA破損(急冷時熱応力)
ペレット	焼きしまり・スエリング	PCMI過歪・クリープコラプス
	FPガス放出(FGR)増大	内圧(=>クリープ破損・燃料中心溶融・RIA)
	ヘリウム生成 放出	内圧(=>クリープ破損・燃料中心溶融・RIA)
	リム組織等組織変化	(FPガス放出(FGR)増大)
	物性変化(熱伝導率低下)	燃料中心溶融(・FPガス放出(FGR)増大)
	ペレットクリープ	PCMI過歪
燃料棒	ボンディング・ガス移動	-
	SCC(被覆管内面)	PCI
	燃料棒伸び増大	-
	RIA時挙動	RIA(PCMI) (燃料エンタルピーしきい値低下)
集合体	集合体伸び	-
	部材腐食、水素吸収	(部材機械特性(耐力、引張強さ、伸び、クリープ))
	部材機械特性(耐力、引張強さ、伸び、クリープ)	フレッティング
	限界出力	DNB

ウラン燃料、MOX燃料共通で特に着眼すべき重要特性・挙動

燃料高度化の技術マップ(2階層目) (2)

2a

燃料高度化の技術マップ (BWR燃料の重要特性・挙動と損傷モード)

BWR燃料高度化の技術マップ		高燃焼度10×10型(60GWd/t超、改良材料) / 高度化プルサーマル燃料
部材	重要特性・挙動	関連する損傷モード
被覆管	腐食増大	腐食 (被覆管減肉)
	水素吸収増大	PCI / DHC (外面水素化物)
	機械特性(強度、延性)劣化	過歪 (延性低下)
	疲労強度低下	疲労
	LOCA時挙動	LOCA破損 (急冷時熱応力)
ペレット	スエリング	PCMI過歪
	FPガス放出(FGR)増大	内圧 (内圧増大 リフトオフ)
	リム組織、高燃焼度効果	内圧 (FGR増大)
	MOX燃料、Puスポットの効果	内圧 (FGR増大, He放出)
	物性変化(熱伝導率低下)	内圧 (燃料温度上昇 FGR増大)
燃料棒	ボンディング	PCI / DHC / SCC (PCMI増大)
	燃料棒伸び増大	燃料棒曲がり
	フレッシング	異物によるフレッシング
	ドライアウト時挙動	ドライアウト (熱的損傷)
	RIA時挙動	PCMI破損 (燃料エンタルピーしきい値低下)
燃料体	燃料体伸び	
	部材腐食、水素吸収	
	限界出力	熱的損傷 (MCPR)

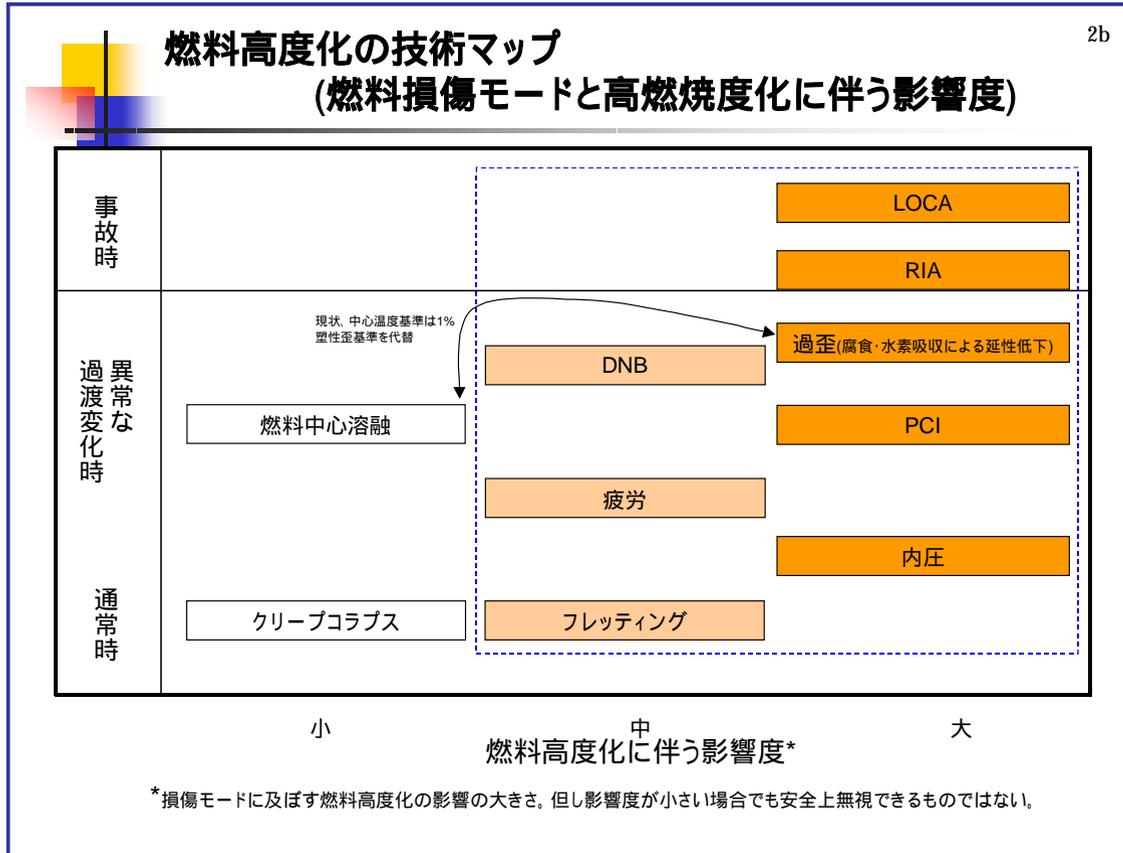
MOX燃料について特にデータ拡充が必要と考えられる項目

DHC: Delayed Hydride Cracking (時間遅れを伴う被覆管外面半径方向水素化物を起点とする初期き裂の被覆管内面側へ進展損傷)

BWR燃料高度化に関する検討結果

燃料高度化の技術マップ(2階層目)(3)

2b: 2aで技術的課題として抽出された項目について、燃料高度化に伴う影響度により整理し分類したもの。

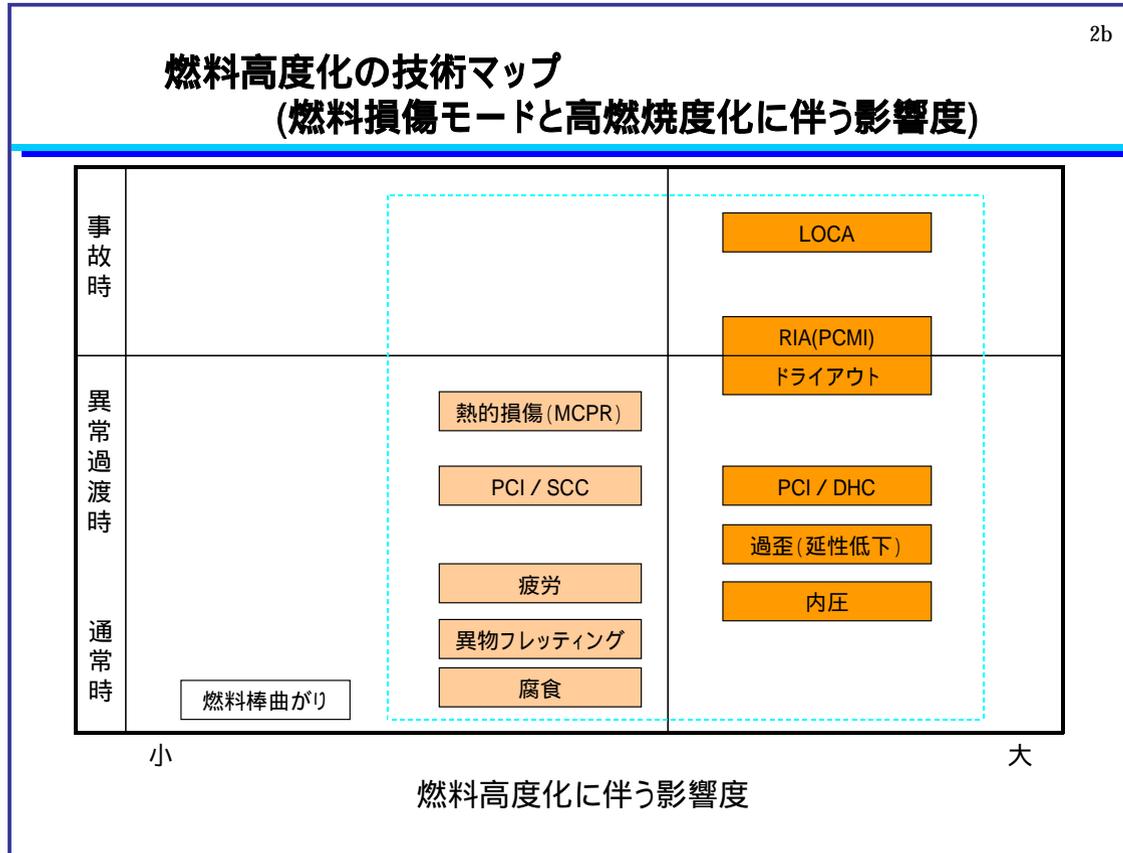


主な燃料損傷モードの説明

- LOCA: 原子炉冷却材が喪失する事故時に被覆管の温度が上昇するなどして破損に至るモード
- RIA: 制御棒が飛び出す又は落下する事故時に燃料棒の出力が上昇して破損に至るモード
- 過歪: 燃料棒の出力が上昇した時に被覆管の塑性変形量が大きくなって破損に至るモード
- PCI: 燃料棒の出力が上昇した時に被覆管の内面腐食環境と応力状態が影響して破損に至るモード
- 内圧: 核分裂生成ガスの蓄積などにより燃料棒の内圧が上昇することによって破損に至るモード

PWR燃料高度化に関する検討結果

燃料高度化の技術マップ(2階層目) (4)



主な燃料損傷モードの説明

ドライアウト: 原子炉出力の上昇又は原子炉冷却材流量の減少により被覆管の温度が上昇することによって損傷に至るモード

PCI/DHC: 制御棒引き抜きなどにより被覆管外面に析出した半径方向水素化物を起点として破損に至るモード

BWR燃料高度化に関する検討結果

燃料高度化の技術マップ(2階層目) (5)

2c: 技術課題について積極的な対応が必要なものを絞り込み、その具体的な対応を示したもの。

燃料高度化の技術マップ (燃料高度化における燃料損傷モードと対応)							2c
損傷モード	燃料高度化への対応						個別の安全規制措置の実施に必要な技術的知見取得、安全規制当局に必要な技術基盤の構築に必要な試験・評価
	開発設計関連の対応		基準・規格関連の対応				
	材料改良	設計改良	現行基準等への適用性確認	基準(規格)高度化			
LOCA	改良合金被覆管	-	改良合金特性試験	官による基準高度化・学協会規格化を学会の場で検討する			LOCA総合試験/要素試験・評価 (高燃焼度材/改良材試験)
RIA(PCMI)	改良合金被覆管	-	照射後試験				RIA総合試験/要素試験・評価 (高燃焼度材/改良材/MOX燃料試験)
過歪(延性低下)	改良合金被覆管	評価手法高度化	炉外試験・照射後試験	学協会規格案検討	学協会規格策定	学協会規格技術評価*	ランプ試験/機械特性試験 (高燃焼度材/改良材試験)
内圧	改良合金被覆管・改良ペレット	仕様最適化 [MOX燃料含む] (寸法、加圧量等)・ 評価手法高度化	炉外試験・照射後試験	学協会規格案検討	学協会規格策定	学協会規格技術評価	過大内圧条件下挙動評価/ 高燃焼度等MOX燃料 (FPガス放出)評価試験
PCI	改良合金被覆管	評価手法高度化・ 運用条件検討	炉外試験・照射後試験	学協会規格案検討	学協会規格策定	学協会規格技術評価	ランプ試験
DNB	-	評価手法高度化・ 運用条件検討	炉外試験	(必要により)学協会規格を検討			
疲労	改良合金被覆管	評価手法高度化・ 運用条件検討	炉外試験・照射後試験	(必要により)学協会規格を検討			
フレッチング	改良合金被覆管	燃料棒保持条件最適化	炉外試験	(必要により)学協会規格を検討			

*「燃料被覆管は機械的に破損しないこと」に対する判断基準としての、1%塑性歪の代替基準である燃料中心温度の妥当性確認を含む。

これらは積極的に学協会規格の適用を試みたケースである。
ただし、破線で囲む範囲は、学協会規格を採用しない場合として、官による基準高度化、現行基準を前提とした対応等が考えられる。

役割分担について

主体: 産 官 学協会

協力:
学協会規格の案検討および策定は産官学の協力のもと行われる。また、学協会規格の技術評価は規制の「公正」さの担保のため産の協力はなく官学の協力のもと行われる。

PWR燃料高度化に関する検討結果

燃料高度化の技術マップ(2階層目) (6)

燃料高度化の技術マップ (燃料高度化における燃料損傷モードと対応)						2c
損傷モード	燃料高度化への対応					(参考) 基準(規格)高度化 に必要な試験
	開発設計関連の対応		基準・規格関連の対応			
	材料・設計改良等	現行基準等への 適用性確認	基準(規格)高度化			
LOCA破損	評価手法検討	改良合金特性試験 (未照射材料)	官による基準高度化・学協会規格化を 学会の場で検討する			LOCA総合試験 (改良材・照射材料)
RIA(PCMI)	改良合金被覆管	照射後試験				LOCA総合試験 (改良材/MOX燃料)
ドライアウト	評価手法検討	炉外試験 照射後試験	学協会規格案 検討	学協会規 格策定	学協会規格 技術評価	ポストBT基準検証 (10X10)
PCI/DHC	改良合金被覆管 線出力低減(10x10)評価手法検討	炉外試験 照射後試験	学協会規格案 検討	学協会規 格策定	学協会規格 技術評価	出力急昇試験 (10X10改良材)
過歪(延性低下)	改良合金被覆管 評価手法検討	照射後試験	学協会規格案 検討	学協会規 格策定	学協会規格 技術評価	材料特性・機械試験 (10X10改良材)
内圧	初期内圧最適化 プレナム体積最適化(主にMOX燃料) 評価手法検討	照射試験 (ウラン燃料, MOX燃料)	学協会規格案 検討	学協会規 格策定	学協会規格 技術評価	限界内圧検証試験 (高フラックス) 高燃焼度MOX燃料 照射試験
PCI/SCC	改良ベレット, 線出力低減(10x10)	炉外/出力急昇試験	(必要により)学協会規格を検討			役割分担について 主体: 産 官 学協会 協力: 学協会規格の案検討およ び策定は産官学の協力の もとで行われる。また、学協 会規格の技術評価は規制 の「公正」さの担保のため 産の協力はなく官学の協 力のもとで行われる。
疲労	改良合金被覆管	炉外/照射後試験	(必要により)学協会規格を検討			
異物フレティング	異物フィルタ性能向上	炉外試験	(必要により)学協会規格を検討			
熱的損傷(MCPR)	スペーサ改良による限界出力特性向 上	限界出力試験 (新設計集合体)	(必要により)学協会規格を検討			
腐食	改良合金被覆管, 評価手法高度化	炉外/照射後試験	(必要により)学協会規格を検討			

これらは積極的に学協会規格の適用を試みたケースである。
ただし、破線で囲む範囲は、学協会規格を採用しない場合として、官による基準高度化、現行基準を前提とした対応等が考えられる。

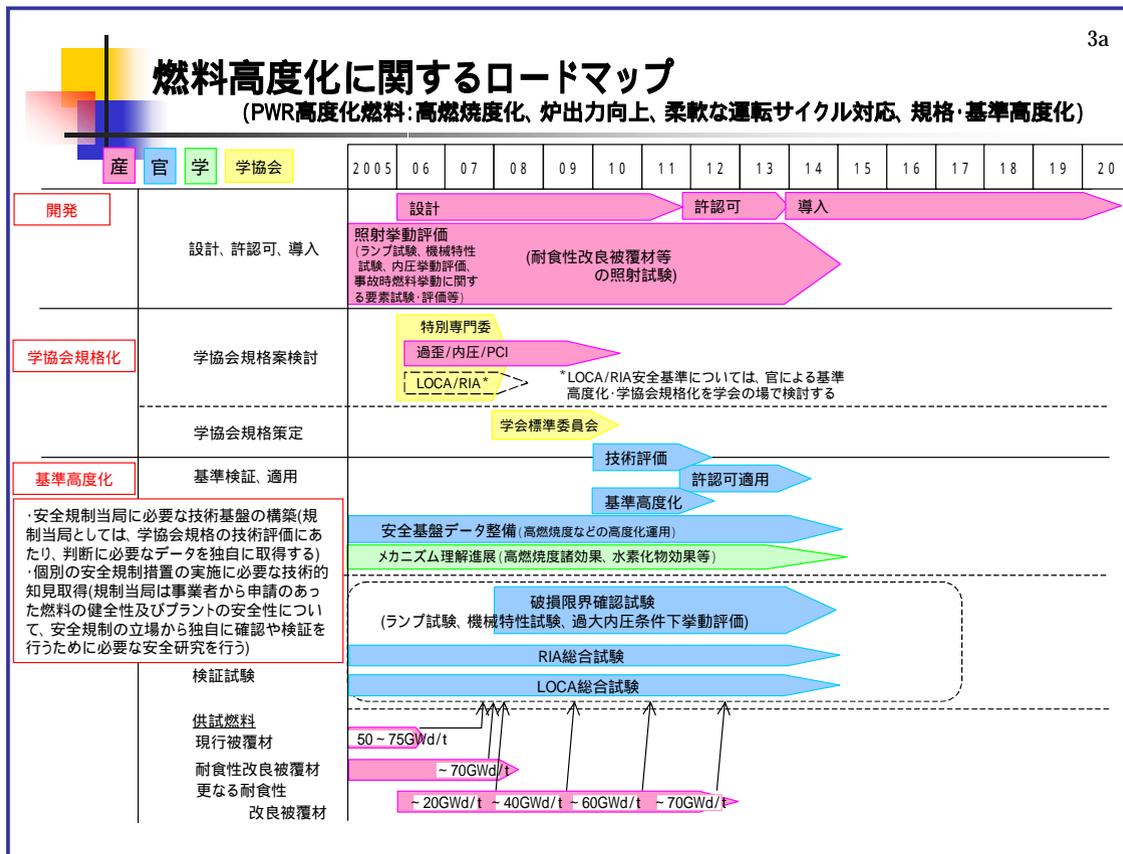
BWR燃料高度化に関する検討結果

燃料高度化のロードマップ(3階層目) (1)

ロードマップ

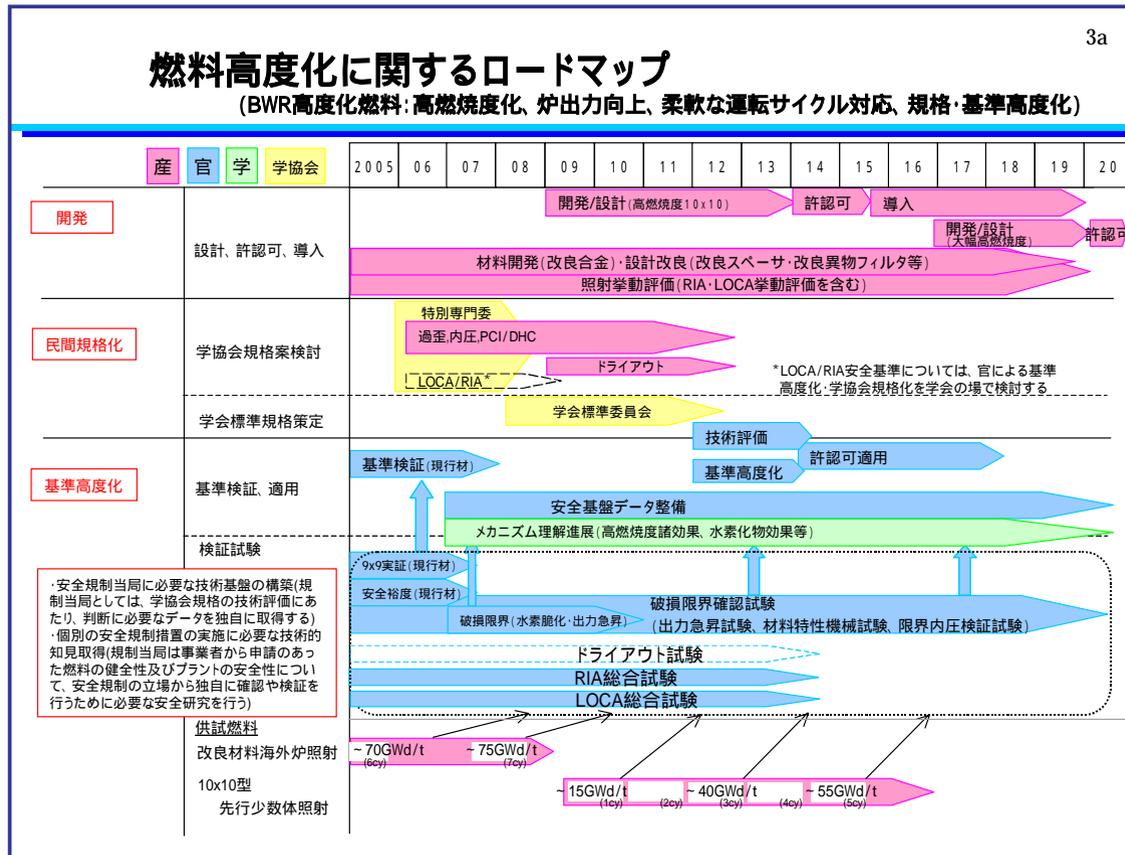
- 求められる機能などの向上・進展を時間軸上にマイルストーンとして示したもの

関連する規格・基準高度化の対応スケジュール



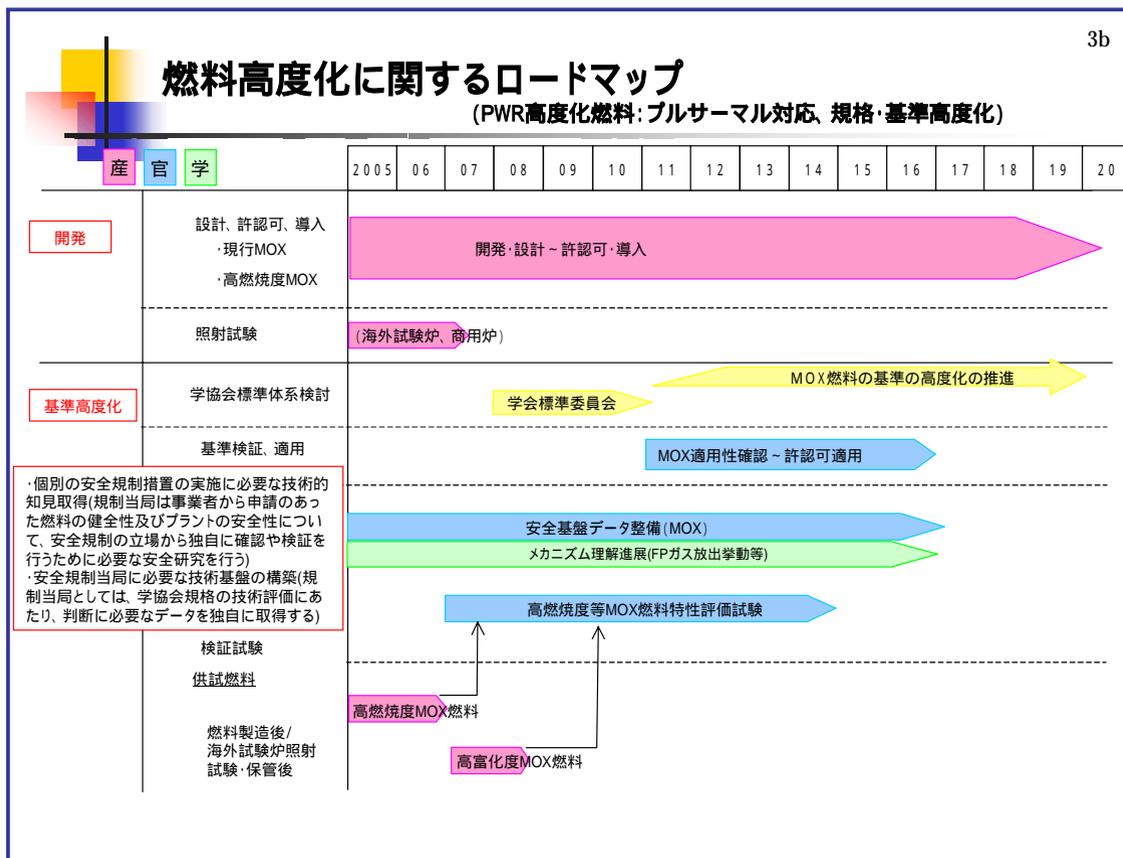
PWR高度化燃料: 高燃焼度化、炉出力向上、柔軟な運転サイクル対応

燃料高度化のロードマップ(3階層目) (2)



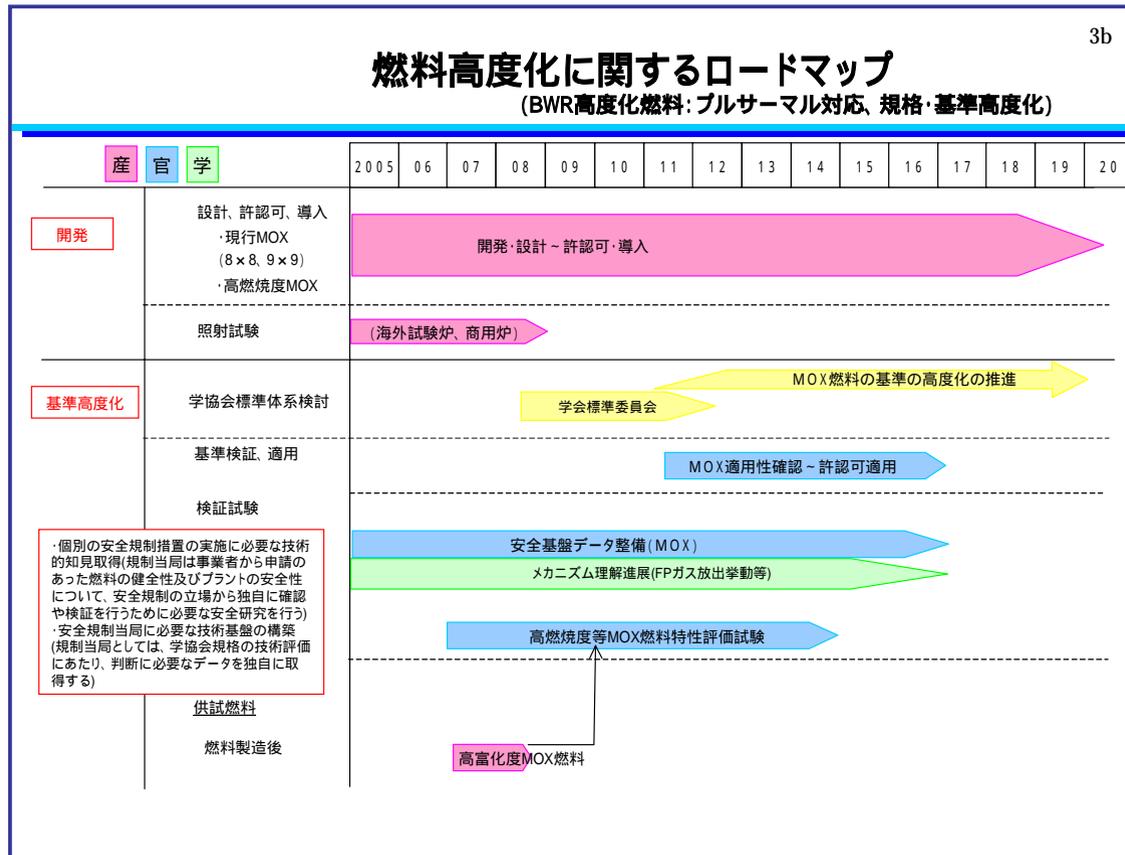
BWR高度化燃料:高燃焼度化、炉出力向上、柔軟な運転サイクル対応

燃料高度化のロードマップ(3階層目) (3)



PWR高度化燃料: プルサーマル対応

燃料高度化のロードマップ(3階層目) (4)



BWR高度化燃料: プルサーマル対応

燃料高度化のための知識基盤について

安全基盤研究における産業界と規制当局の役割(第6回安全基盤小委員会資料より)

産業界は、事業の実施に係る**安全性、信頼性等の確保、向上に必要となる研究、民間規格作成のための研究、個別の安全規制措置に関し機器設備等の健全性、検査・運転管理等の妥当性等を説明するために必要な研究**を実施。

規制当局は、安全規制制度・規制基準の整備・運用及び**個別の安全規制措置の実施及び判断に必要な技術的知見(データ、手法等)の取得、並びに安全規制当局に必要な技術基盤の構築を目的とする研究**を実施。

学協会規格策定・技術評価のためのデータ取得と評価の考え方

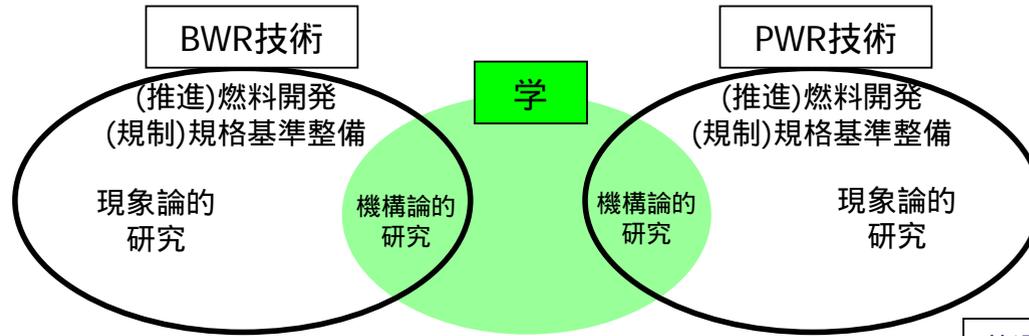
産業界

← 学の貢献 →

規制当局

<p>基本的 考え方 (学協会での 検討対象)</p>	<p>照射等によって特性の変化が進んだ燃料材料や高度利用に向けた燃料材料の特性データの取得と評価をもって合理性、汎用性、適用性のある学協会規格を策定。</p>	<p>学協会規格にて想定する燃料損傷モードの妥当性や損傷モードに対応した基準としての合理性、汎用性、適用性の確認のためのデータ取得と評価をもって学協会規格を技術評価。</p>
<p>上記を踏まえた個々の展開 (各組織で 検討)</p>	<p>規格策定にとらわれず、汎用性のあるデータ取得と評価を戦略的に実施。 規格策定においては、海外含む競合者の動向も踏まえ、原則、必要なものを適切に公開・開示していく。</p>	<p>上記に対する規制の視点(規制としての必要性、十分性、説明性等)を踏まえた官の規制の専門家や専門技術者による十分な検討・ローリングを経てデータ取得と評価を実施。 なお、制約条件(供試材の状況、競札等)下での試験受注者の技術的能力・ノウハウ等にも依存。</p>

技術戦略マップにおける「学」の貢献

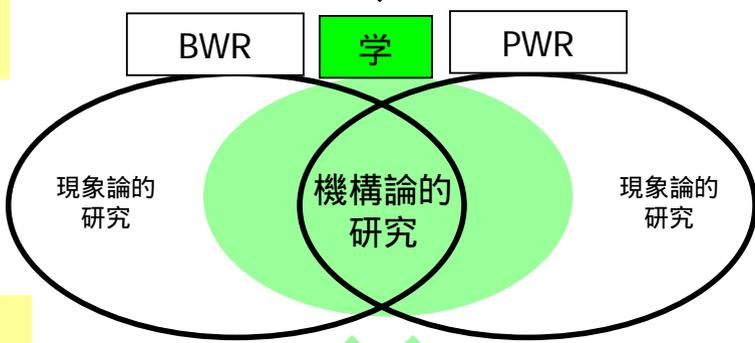


技術戦略マップ →

共通技術課題=>機構論的側面
(燃料はどのようにして破損するのか?)

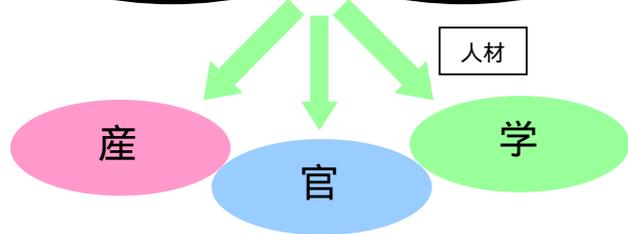
- ・機械的健全性
- ・内圧による破損
- ・熱的破損機構
- ・PCI破損限界

適切な役割分担による
効率・効果的な課題解決

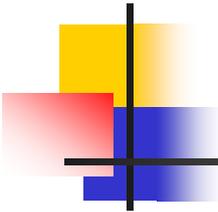


体系的な知の蓄積
次世代軽水炉に
展開可能な技術の整備

機構論に立脚した
燃料開発と規格基準整備
燃料と規格基準の信頼性向上



課題への取り組みを経た人材育成
継続的な人材基盤の整備と
「産」「官」「学」への輩出



成果と今後の課題

- 技術戦略マップは、燃料高度化に必要な各々の計画において、関係者(産官学の各組織や学協会等)が果たす役割、協力関係および遂行の目安が見えるものとなっている。
- 技術戦略マップに関する議論の成果として、規格基準の整備の位置付けの明確化が挙げられる。従来の開発研究や今後の安全研究は、ともに燃料の安全性に関する研究であり、その成果は民間規格策定や技術評価、国の基準整備として結実する。
- 今後も、新たなニーズや知見を取り入れるローリングにより、技術戦略マップを最新のものとしつつ、議論をより深化させていくとともに、これらの議論の成果をより具体化していくことが重要である。研究開発を支える人材基盤や施設基盤、研究成果から規格基準整備を合理的に行うための知識基盤、および制度的基盤の整備に関する検討を行う必要がある。

燃料高度化に関する検討活動のまとめ

- 国産燃料の信頼性は世界でトップクラスであり、これは今までの産官学及び学協会における信頼性向上に向けた活動の成果である。燃料は放射性物質を閉じこめるという安全上重要な機能を有している。その安全性を確保するための性能を向上することで今後も機能の信頼性を維持しつつ、さらに安全基準の合理性の向上を図ることが原子力発電の信頼性をいっそう高めることになる。また、これまで蓄積された技術及びこの高度化の成果は、今後の次世代軽水炉技術にも活用できるものである。
- 以上の背景を踏まえ、産官学の専門家が集まり、燃料の高度化と規格基準の高度化を実現するための技術戦略マップの検討を行っている。
- 燃料の安全性に関する規格基準の高度化においては、透明性、中立性、公平性の観点から、産官学の専門家の議論から検討される学協会規格が重要な役割を担うことから、本委員会に民間規格作業会を設け、学協会規格に関する検討を行っている。
- ここで報告された技術戦略マップは、50人を超える産官学の専門家が計12回の会合の場などで検討しているものであり、専門家や国民の間で広く共有されるとともに、産官学でこれを尊重することを確認した。
- これらの活動を円滑に推進していくために、種々の基盤整備に関する議論が重要であり、安全研究に対する研究連携という官民の協力のあり方についても、制度的基盤の整備との観点からコンセンサス形成を図っている。このような議論を産官学の場で行っていることは、従来にはなく意義深いことである。

- 産官学が公平、公正、公開を前提とした学会の場で協調し、今後も継続して「燃料高度化技術戦略マップ」をローリングしていくことが重要である。今後は、技術戦略マップのローリングの過程で具体的な役割を決め、導入シナリオに沿った燃料高度化の実現に向けた積極的かつ具体的な活動が望まれる。
- 学には、燃料分野においても安全基盤研究への貢献に関する責任があり、産官の協力を得て、安全基盤研究を支える「人材の育成」、安全基盤研究に係わる「知の蓄積と展開」といった役割分担を実現していくことが重要である。
- 燃料分野における安全基盤研究の成果は規制基準、規格の整備に活用されることが重要である。また新しい技術の導入を円滑にする規格・基準の体系が望まれる。
- 学協会規格を策定し技術評価を受けるという一連のプロセスにおいて、原子力安全委員会及び原子力安全・保安院をはじめとする産官学が、燃料高度化に必要な課題を共通に認識し協力して解決していくことが重要である。国には技術戦略マップに応じ技術評価のための積極的な準備が望まれる。
- 知識基盤・施設基盤の整備や人材の育成については、産官学が協力して進めることが重要であるとともに、国のより一層の関与が望まれる。