

核燃料部会企画セッション／標準委員会共催

Advanced Technology Fuels (ATFs) の 最近の展開について

（1）ATFに関する最新の国内検討状況

東京大学 阿部 弘亨

ATFsとは



提案

ATFは、Accident Tolerant Fuel（事故耐性燃料）の略ですが、これを含めて、Advanced Technology Fuelと読みましょう。

そして、ATFは、燃料被覆管に限定されない、新しい高性能燃料の開発であることを意識していきましょう。

この企画セッションは、2つのATFについて、国内の現状と課題を整理し、わくわくする未来につなげていきたい。

ちなみに、Advanced Technology Fuelの日本語名は決まっています。
単に「新型燃料」としたらちょっと陳腐かな。。

燃料

燃料は**原子力の（原子力安全の）一丁目一番地**

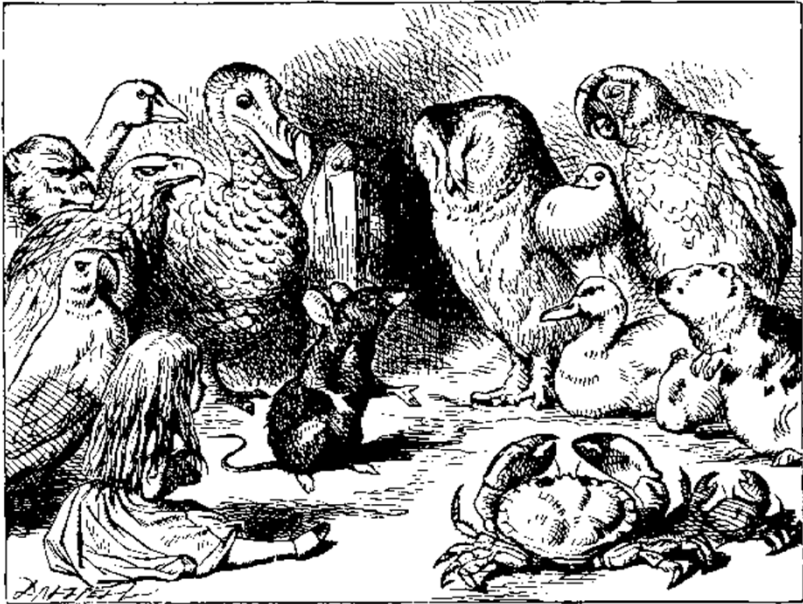
それ故に既存技術の矜持が高い、秘密も多い

= **新しいアイデアが出てきにくい**

もちろん、科学的合理性、工学的成立性をきちんと考えるべき、
ということはよくわかっているが、一生懸命勉強をしても、
規制や安全以外の観点で自己実現を見出すことが難しい

これが若い世代の**閉塞感**へつながっている ⇔ 人材の**流出** ⇔ **先細り**業界

それは、こんな世界？



不思議の国のアリス

涙の池でずぶぬれになったアリスとみんなが体を乾かしている間に
ネズミがおしゃべりをしながらそのまま寝てしまう

We lived, beneath the mat,
Warm and snug and fat,
But one worry that
Was the cat!
To our joys
A clog, in
Our eyes a
fog, on our
hearts a log
Was the dog!
When the
cat's away,
Then
the mice
will
play,
But, alas!
one day, (So they say)
Came the dog and
cat, hunting
for a
rat,
Crushed
the mice
all flat,
Each
one
as
he
sat
Underneath the mat,
Warm and snug and fat,
Think of that!

わたしたちはマットの下に住んでいた

暖く気持ちよく厚ほつたい

でも悩みのタネが一つ

それはネコ

わたしたちの

喜びのじゃま

目には涙

心のつかえ

それはイヌ

ネコがどこかへ

行くと

ネズミたちは

遊ぶ

でも、

ああ、

ある日

(なんだそうだ)

イヌとネコが

ネズミを

とりに

来た

一匹

残らず

ベシヤンコに

暖く

気持ち

よく

厚ほつ

たい

マットの下のネズミたちを

思いつくままに寝てしまう

それではダメ！

我々の世代がすべきこと

- 培ってきた知見、智慧、技術、ノウハウ全てを余すことなく次世代に伝えること
- そのために不文律や暗黙知を明文化すること
- 今の技術の成り立ちの科学的根拠を明らかにすること、課題を示すこと
- 新技術へのアンテナを常に張り、自らの科学的、技術的知見を元に評価して、新しい未来の可能性を示すこと
- 新しい発想を応援し、自らの知見を建設的な助力として提供すること

この考え方をベースに行っていること

我々の世代がすべきこと

- ・ 培ってきた知見、智慧、技術、ノウハウ全てを余すことなく次世代に伝えること
- ・ そのために不文律や暗黙知を明文化すること
- ・ 今の技術の成り立ちの科学的根拠を明らかにすること



1. 潜在的知見の具現化と明文化

- ・ 原子力学会標準 燃料技術レポート、ATFレポート
- ・ 原子力学会標準 先行少数体照射試験標準
- ・ 電気協会規格 燃料管理規定 等

- ・ 新技術へのアンテナを常に張り、自らの科学的、技術的知見を元に評価して、新しい未来の可能性を示すこと
- ・ 課題を示すこと



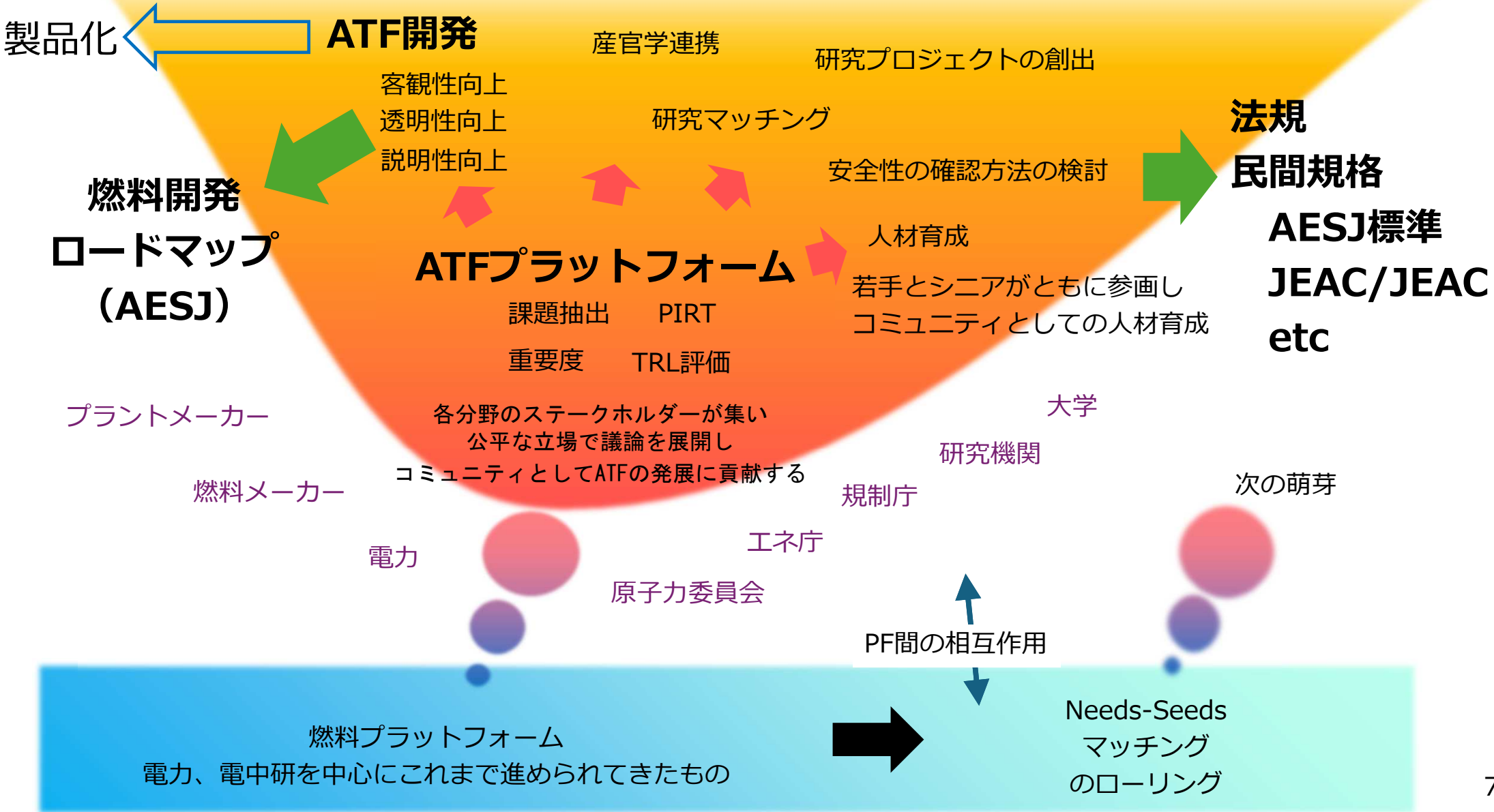
2. 新技術の探索、課題の探索

- ・ 燃料ロードマップ
- ・ ATFプラットフォーム

- ・ 新しい発想を応援し、自らの知見を建設的な助力として提供すること



**次世代の新たな発想を
コミュニティとして応援する場
を創る**



若い方々に

自分もその一人と
自覚（=思い込む。錯覚？）
することも、とても大事です

新しいアイデアは、着実な基礎の積み上げの上にあります

カーボンナノチューブのようなセレンディピティもあるかもしれない
これもしっかりとした基礎があるからこそ

なので、ここで紹介する活動にぜひ参加して基礎を積んでください
そして一緒に新しいアイデアを創り出していきましょう

昔話ですが、阿部も当初は燃料のことを何も知らなかったのですが、ロードマップやJ合金開発に携わるうちに基礎ができてきて新しい発想につながった経験があります。そして、色んな人と話をすることで自身の血肉になることを実感しました。このわくわく感を経験していただきたいと思います。

総じて、

わくわくするような魅力ある技術として
Advanced Technology Fuels (ATFs) を位置づけ、
All Japanで建設的に協力して研究開発と実現を
進めましょう！そして人材を育てましょう！

というご提案になります



意見交換の論点

意見交換の論点

燃料分野の一層の発展を目指し、ボランティアベースではあるが、複数の枠組みを構築し、順調に活動しているところ。

コミュニティとして技術の創出と人材の育成にかかわると宣言したことになる。

- (1) この組織で十分だろうか？（人材育成機能）
- (2) この組織で十分だろうか？（技術創出としての機能）
- (3) その先に何かがあるか？何をすべきか、したいか、してほしいか。
- (4) 総じて、今回の提案は次世代に魅力的だろうか？

以下、参考資料

ATFワークショップ（2024年12月）の提案

事故耐性燃料の早期実現、さらなる技術創出、漏れなき安全の確認を図るため、多くのステークホルダで知見を共有し、智慧を蓄積し、技術開発に接続する場、さらに利用者の導入インセンティブを高め、規制者の安全確認の視座を高める場の創成を提案する。

ATFワークショップ（2024年12月）の提案

そのために、

- ・ 現在、原子力委員会にて実施の燃料プラットフォームの思想を参考に、
Advanced Technology Fuelに関するプラットフォーム（ATF-PF）
の創設を提案する。
- ・ 原子力委員会、METI、規制庁、電力、研究所、大学といったステークホルダー
が集い、全てのTRLの視点で技術の創成に寄与するプラットフォームを作る。
- ・ さらに、安全研究と基礎基盤研究の双方を担うJAEAが、プラットフォームの
実施母体となり、国内の研究開発を主導することが適する。

ATF-PFのねらい

- 幅広い専門分野より、多くの専門家が参加し、
- 全員が同じ立場で
- それぞれの専門性を生かし
- 新技術の可能性を追求する

- 客観的、包括的、かつ漏れ欠けの無い、技術課題を抽出し
- その影響度を評価する

- 製品の開発に貢献する
- 新しいプロジェクトの創成につながる
- 参加者の相互コミュニケーションの向上と知見の深化をはかる
- すべての参加機関の人材育成に貢献する

ATF-PFで期待される技術的成果とその波及

- 腐食および水素脆化の低減が達成できれば、被覆管の長寿命化が可能となる
- 第一義的に安全を守り抜くという前提は崩さずに
新設計、新材料の基準を視野に
- 燃料の高燃焼度化が達成可能となる
- 炉水温度を高くする（アップレート）も可能となる
 - 例えば、Crの延性脆性遷移温度とその照射影響を考慮するとよい方向に働く可能性もある
- これに伴い、U-235の濃縮度調整（5%超燃料）も視野に
 - 次世代材料（FeCrAl-ODS、SiC）を狙う上でも必要

規制

安全性向上

経済性向上

次世代技術への展開

ATF-PFへの参加モチベーション

- <メーカー> ATFの実現可能性について、技術的、科学的、安全の観点から具体的かつ包括的な検討を進める。材料製造の規模と実現時期を明確にする。
 - <規制庁、メーカー、電力> 現在のジルカロイを対象とした基準の、ATFへの適合性について検討し、必要に応じ改定を視野に入れた検討を進める。
 - <電力> 燃料コストの効率化等のベネフィットを明確にし、導入インセンティブの向上を図る。
 - <研究機関> この実現にとって必要な研究課題を抽出する。研究所や大学が担うべき基礎研究課題を抽出する。
 - <規制庁> 規制安全研究としての課題を抽出する。
- ※ 留意事項として、知財等については別途取り決め要

ATF-PFの波及効果

事故耐性燃料は、数ある原子力革新技術の中で、最も早期実現性の高い新技術であり、この取り組みが革新炉、SMR等の開発にとって良き手本となることが期待される。

総じて、

わくわくするような魅力ある技術として
Advanced Technology Fuels (ATFs) を位置づけ、
All Japanで建設的に協力して研究開発と実現を
進めましょう！

という提案になります

熱く、
研究を、
技術を、
語りましょう！

シナリオの整理

- 研究開発のシナリオ
 - 重要技術課題解決に向けた効果的な研究開発の枠組み
 - 例として、革新炉の先行事例
 - ステークホルダが集い智慧を創成する場の創出
- 早期導入のシナリオ こちらにも機能
 - 照射試験、LUAを含めた国内での試験の体制
 - 安全研究
- 人材育成の重要性
 - 長期的視点に基づく人材育成（研究人材、開発人材等々）
 - 継続的人材育成（電力の技術者、運転員、規制人材等々）
 - 幅広く原子力を支える人材の育成

研究ハブ
としての
JAEA

メーカー

事業者の期待

プラットフォーム

民間規格
規制

やはり、
国内試験炉は
必要！

規制が考える課題と
技術的意見交換

大学
研究所

電力
メーカー
規制庁

検討の原則

- 公開の原則 ホームページを設置

- Additive Manufacturingの原則

- 第一ステップは課題と影響度の意見集約
- 第二ステップで影響度を客観評価
- 他者の意見（可能性）を否定しない
- 整理しつつ全て積み上げていく
- 意見集約後に個別に検討し影響度を客観評価する
- 設計の未確定性は前提とし、ただし条件付けを 例：SiC燃料のグリッドとか
- 検討範囲は広い。まずはできるところから検討を始める
- ただし未検討あるいは検討不十分性は必ず記録しておく
- 端的に全て書く。口頭で追加説明が必要な表現はしない
- 矢印など記号の意味は明確に

原子力学会の燃料技術レポートのイメージ

標準委員会出版物「発電用軽水型原子炉の炉心及び燃料の安全設計に関する報告書」

検討のステップについて（原則）

- ワーキンググループ（サブWG）を作る
 - Crコートジルカロイ、FeCrAl(-ODS)、SiC、技術基盤
 - サブWG内での議論を踏まえて、全体会合をもつ

手順

- PIRTの作成
 - 第一ステップは課題と影響度の意見集約
 - 第二ステップで影響度を客観評価

その後

- TRLへの落とし込み（ステークホルダーの明確化）
- 時間軸への落とし込み（ロードマップ）

検討の方向性について（たたかれ台）

ただし、PIRT（Phenomena Identification and Ranking Table）は多軸性が高い

- 製造から再処理まで
 - 素材、製造、輸送、装荷、保管、起動、通常運転、停止、過渡事象、DBA、BDBA・DEC、SA、中間貯蔵、再処理、廃棄物、等
- 燃料設計
 - 各部位、燃料棒、燃料集合体、シュラウド、等
- 工学分野
 - 材料、材料加工、熱流動、構造工学、炉物理、水化学、等
- 導入戦略
 - 材料試験炉、濃縮度、燃焼度制限、使用制限、先行照射試験、等
- 材料の技術成熟度

まずはできるところから検討を始める。できそうなものをハイライト。

結言

このATFプラットフォームの趣旨に賛同し、

参加を表明された皆様に感謝申し上げます

新燃料の実現に向けて検討にご協力よろしく申し上げます

この検討を通して、あらたなプロジェクトの創成、ステークホルダ間の関係の構築、等、得るものがたくさんあることを期待しています

あくまでも自由参加です

また、恐縮ですが、予算はあまりないので旅費の支弁なしを甘受ください

商業上の秘密に関わる情報に触れる可能性を排除しきれませんので、若干の制限がかかることはご容赦ください

参考資料

前回のワークショップの資料

技術成熟度 (TRL)

TRL			燃料設計及び製造・品質管理に関する各TRLレベルの一般定義	
			燃料設計 (核設計、熱水力設計、安全性評価含む)	製造・品質管理
実用 開発 段階	実用システムの運転	9	商用炉で使用されている状態	商用製品として生産されている状態
	実用システムの検証	8	製品の設計が認可された状態 (詳細設計)	採算性を伴って量産が可能な状態
		7	商用炉での安全性が認められた状態	工場規模での生産が可能な状態
工学 実証 段階	工学技術の証明	6	商用炉において燃料集合体として使用可能と判断できる状態	燃料集合体の製造が可能であり、かつ製品検査技術が確立された状態
	工学技術としての開発	5	商用炉において燃料棒として使用可能と判断できる状態	商用炉で使用可能な燃料棒の製造が可能な状態 (フルスケール燃料棒)
		4	商用炉のためのプロトタイプ燃料棒の設計に必要な材料特性が把握されている状態	燃料棒としての性能試験 (炉外試験及び照射試験) で使用可能なプロトタイプ燃料棒の製造が可能な状態
原理 実証 段階	フィージビリティの証明	3	原子炉環境での材料特性が把握されており、燃料棒の設計成立性が評価されている状態	原子炉環境での材料特性試験 (炉外試験及び照射試験) で使用可能な管状試験片の製造が可能な状態
	要素技術の提案と調査	2	概ねの材料特性が把握されており、それに基づいた概略評価により実用化された場合の影響 (利得) 評価がなされている状態	材料特性を把握するために必要な試験片が製造できている状態
		1	原理的に実現可能性のある候補技術が立案され、主な開発課題が抽出されている状態	原理的に製造可能な状態

•【出典】 山下真一郎、“解説 事故耐性燃料 (ATF) の開発状況 (1) 原子力の安全性向上に資する技術開発事業での事故耐性燃料の開発の概要”、日本原子力学会誌 65 (2023) 33-37

参考資料

日本の開発体制

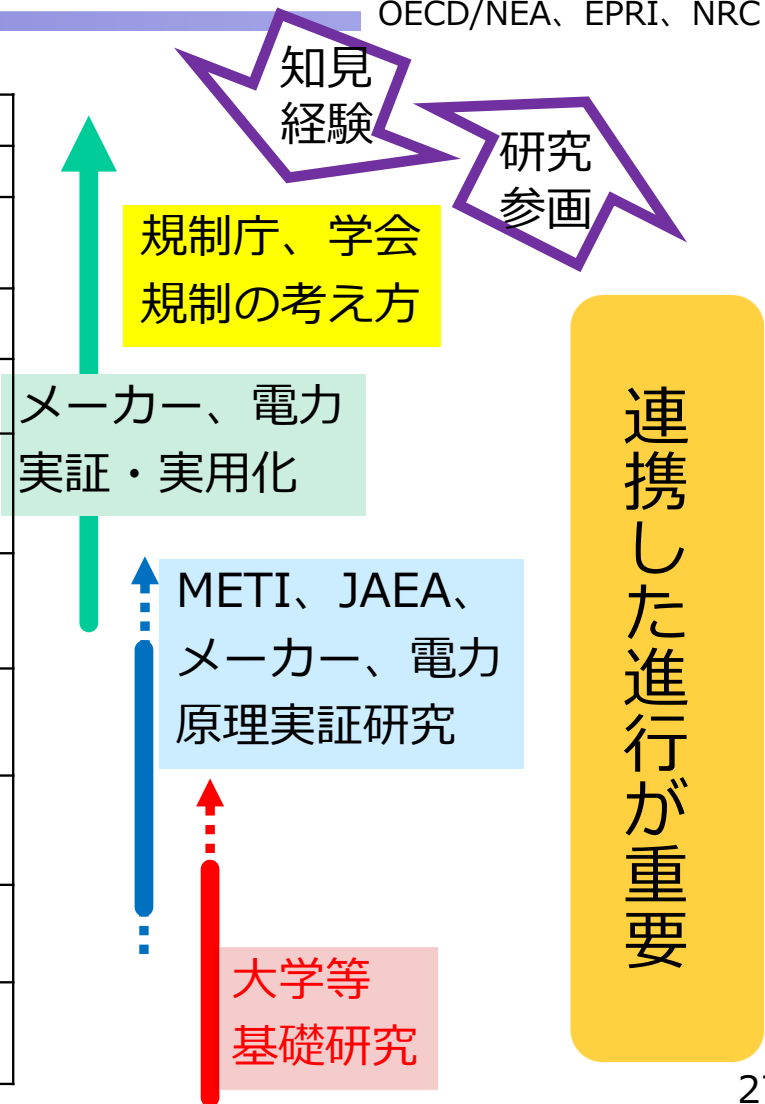
海外機関

OECD/NEA、EPRI、NRC

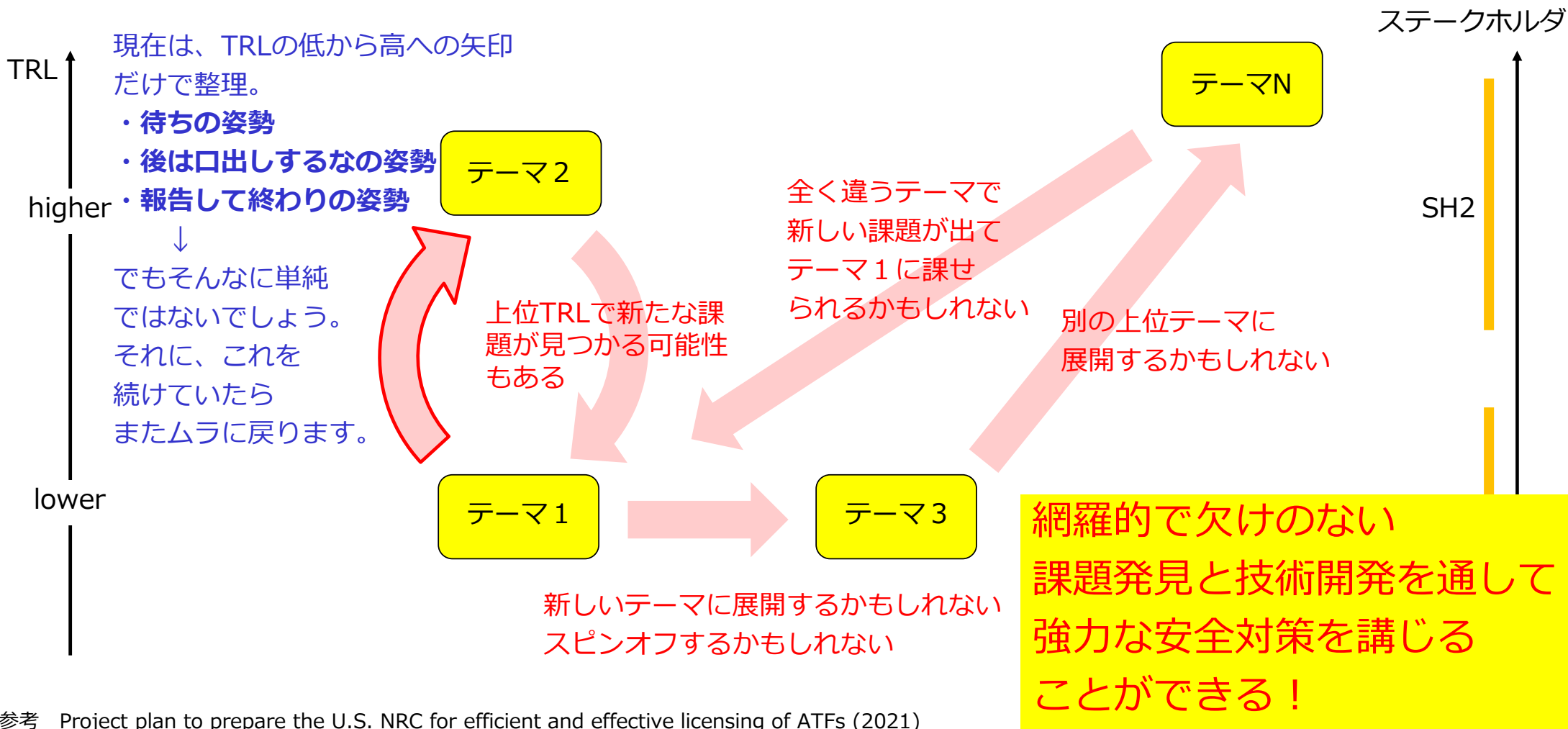
技術成熟度

TRL			燃料設計及び製造・品質管理に関する定義	
			燃料設計	製造・品質管理
実用開発段階	実用システムの運転	9	商用炉で使用されている状態	商用製品として生産
	実用システムの検証	8	製品の設計が認可	採算性を伴って量産が可能
		7	商用炉での安全性が確認	工場規模での生産が可能
工学実証段階	工学技術の証明	6	商用炉燃料集合体として使用可能	燃料集合体の製造が可能であり、かつ製品検査技術が確立
	工学技術の検証	5	商用炉において燃料棒として使用可能	商用炉で使用可能な燃料棒の製造が可能
原理実証段階	要素技術の提案と調査	4	燃料棒の製造が可能な状態	験片が製造
		1	原理的に実現、主な開発課題抽出	原理的に製造可能

技術成熟度（TRL）の大半の階層が同時進行し、実装に向けた知見のフィードバックが適切に行われる体制の構築に成功している。

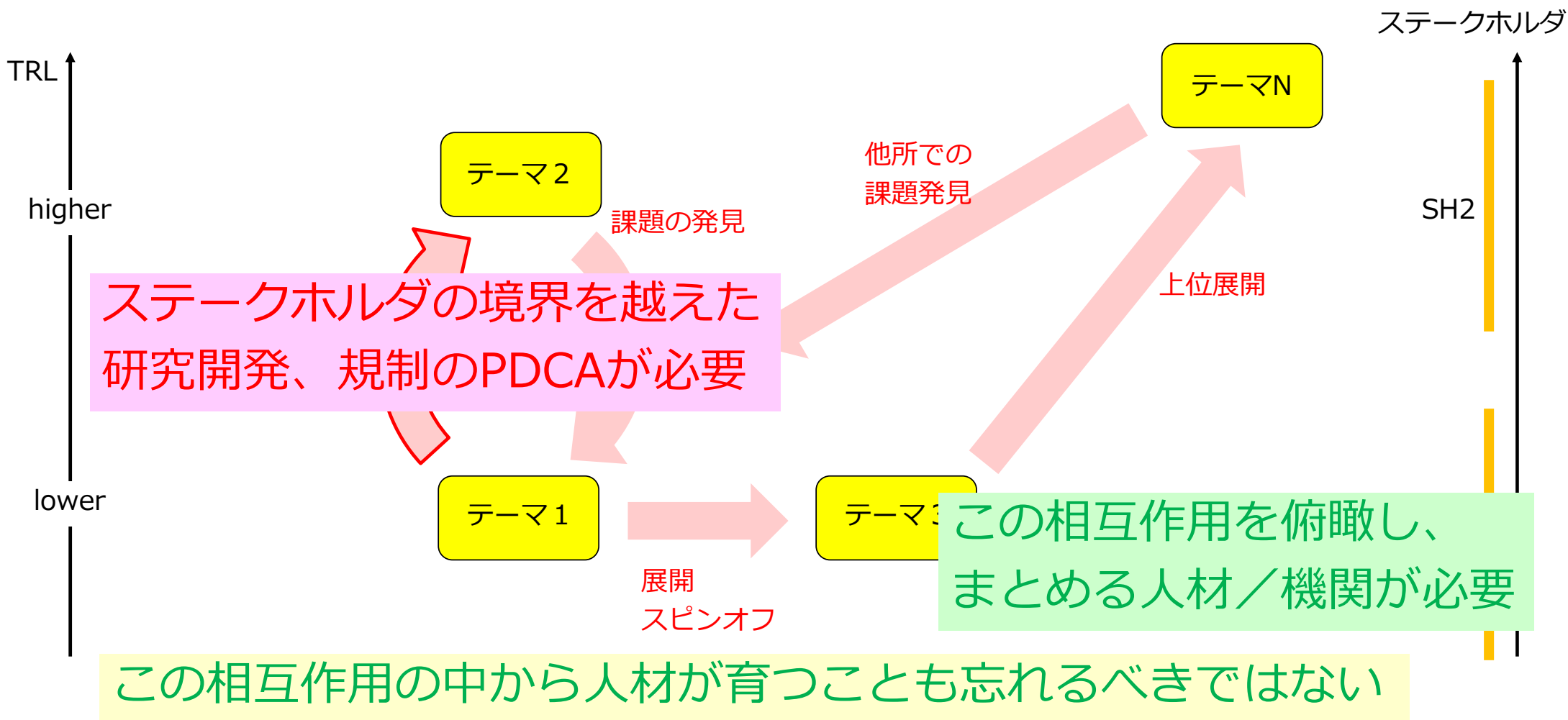


TRLの考え方

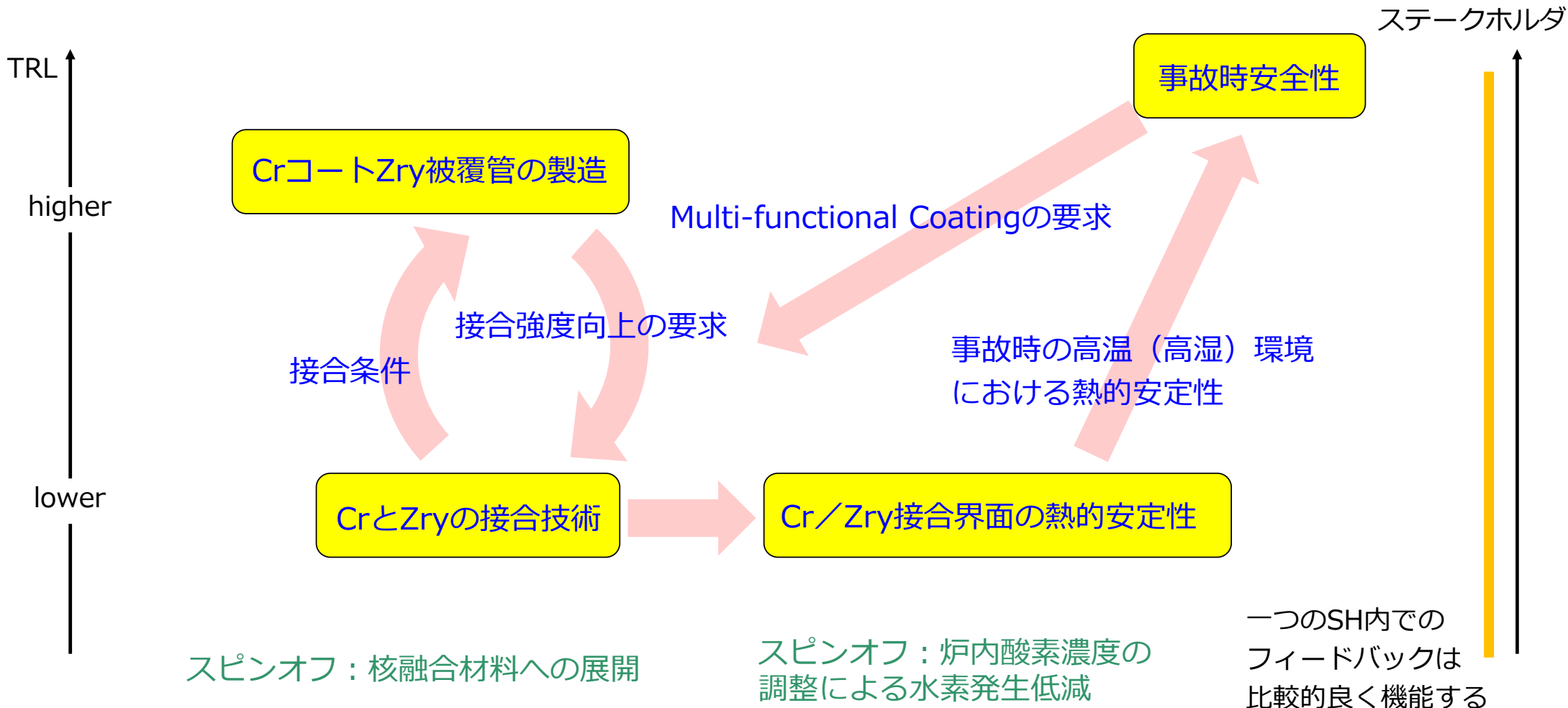


参考 Project plan to prepare the U.S. NRC for efficient and effective licensing of ATFs (2021)
原子力学会標準委員会 燃料技術レポート、ATF技術レポート 他

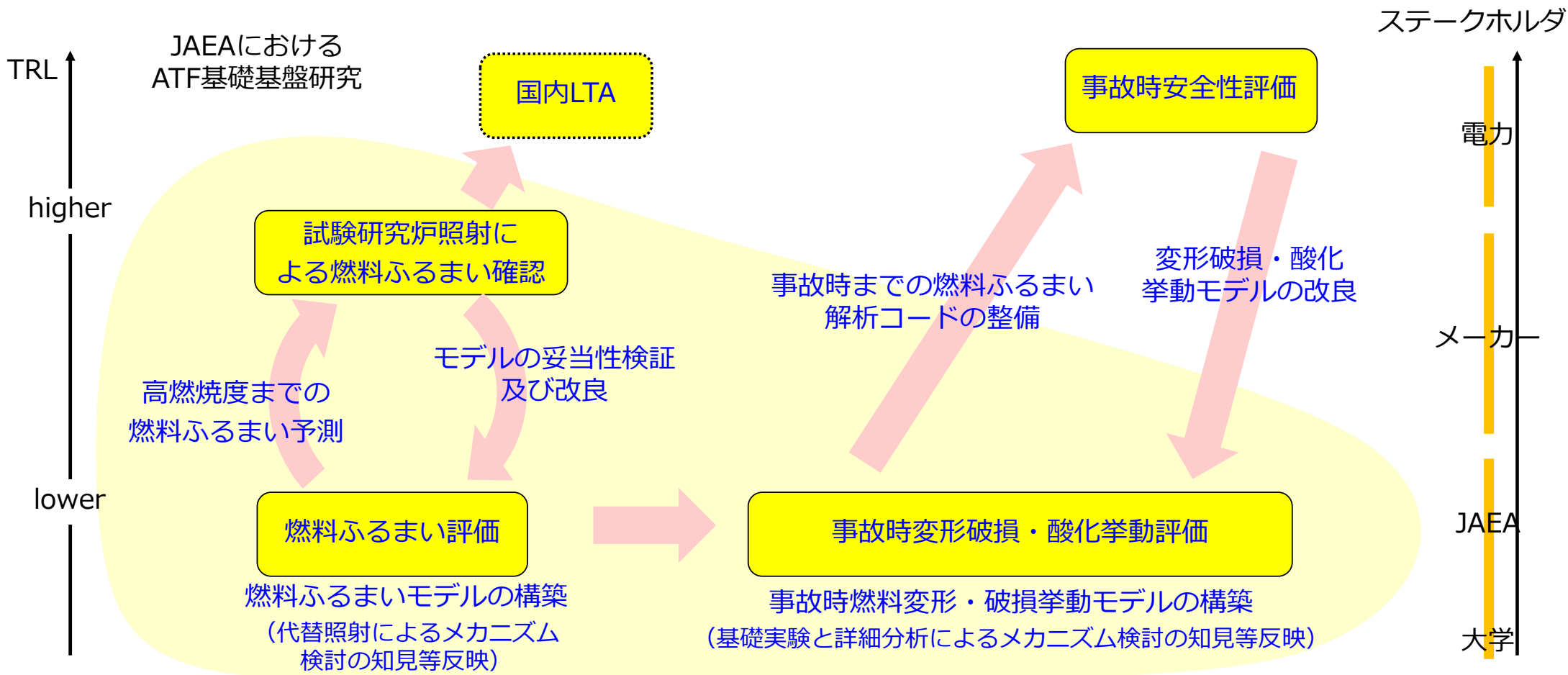
パラダイムシフトが必要である！



東大のプロジェクトの事例



経産省JAEAのプロジェクトの事例

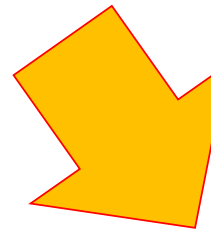


今回ワークショップでの議論

その後の情勢変化

- ワークショップは成功裏に終了
 - 課題：今後の国内の研究開発体制をいかに作り上げるか
- 米国実験炉ATRにて燃料棒の照射試験開始
- 米国商用炉でのLUAも進みつつある
- 規制庁による安全研究も開始

革新炉等ではSHの集いの場が
作られつつある



以下のような検討をする場が必要

- 開発と規制の技術対話の場
- 許認可に向けた技術的検討の場
- 技術課題の重要性の客観的評価の場
- 新たな技術の開発要請の意見づくり

今後の発展に重要な視点

- 小さな積み重ねが事故前の日本の体制を作っていた。良いこともあったが、良くないこともあった。
- ステークホルダー（SH）が強く独立していて、相互の知見、経験、問題意識の共有がうまくいっていなかったこともその一つ。
- 事故とその後の外的刺激が日本のパラダイムシフトにつながり、より良い方向へ舵を切ることができた、と評価するのであれば、我々はこれを劣化させることなく維持発展させる必要がある。
- 技術成熟度（TRL）に基づく各ステークホルダーの役割の明確化と、TRLの進展は、技術の実用化に向けて重要であるが、
- あるTRLにおける気づきや問題が、上位だけでなく下位のTRLにも共有されることにより新しい知見、知識、発見、技術の改善と創出に至り、
- そこから新たな技術が生まれ、知見が共有され、人材が育っていく



今回提案へ