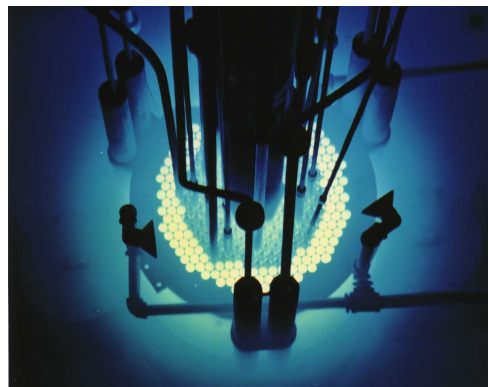


基調講演

ATFの挑戦



更田 豊志

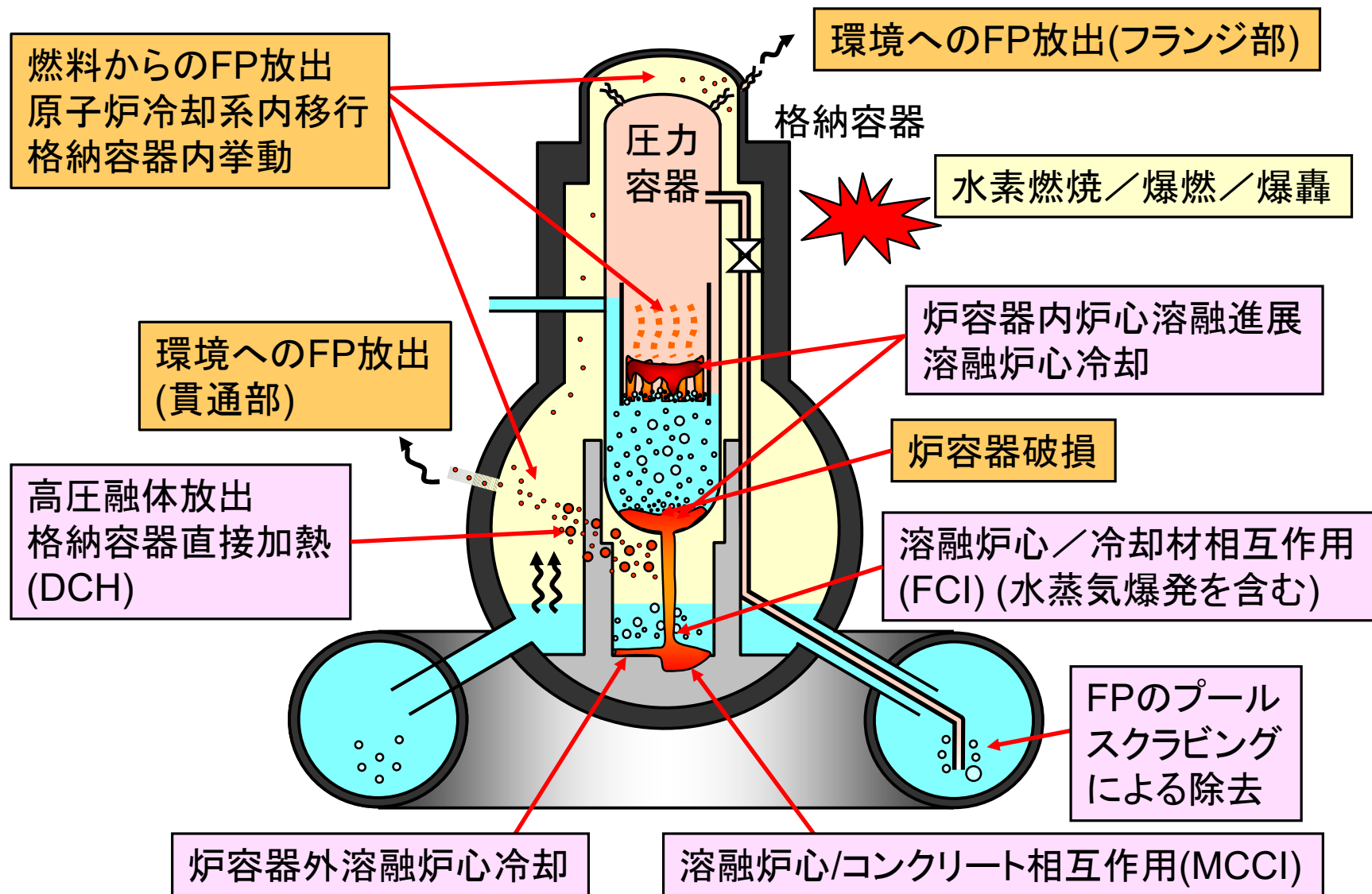
2022年12月21日



事故耐性燃料開発に関するワークショップ
東京大学本郷キャンパス、武田先端知ビル武田ホール

- ✓ ATFの魅力高めよう
- ✓ 視野を広げよう
- ✓ 基礎体力を取り戻そう

シビアアクシデント時に想定される現象



燃料は事故の進展及びソースタームのポイント

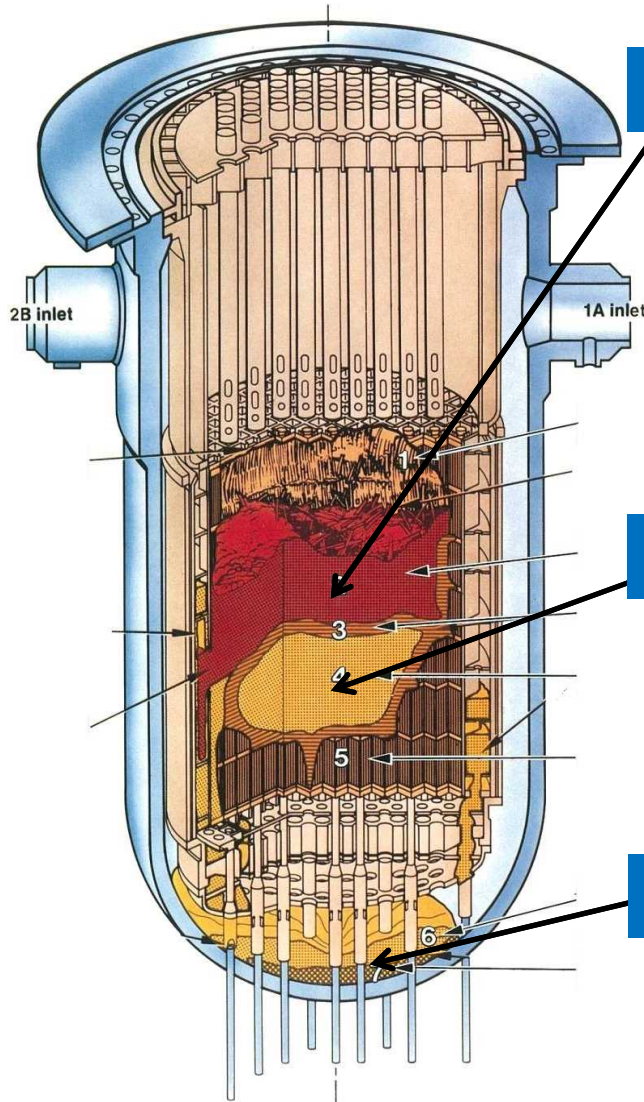
スリーマイル島原発2号機(TMI-2)事故

3

1979.3.28 4:37amEST

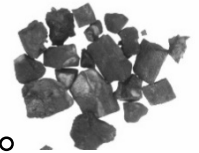
炉心の約45%が損傷、約20tが下部プレナム部へ落下。
下部ヘッドは約30分程度、約1370Kに。

R.K. McCardell, Nucl. Eng. Des. 118(1990) 441



炉心上部

破砕した燃料や再固化した熔融燃料が多い。
制御棒、被覆材、構造材のほとんどは燃料と
反応せずに熔融、移動したとみられる。
推定最高温度は大部分が約2000K



熔融プール(直径約3 m, 中央部分の厚さ1.5 m)

構造材、制御棒、燃料物質の混合物で金属が多い。
推定最高温度は2700~3100K

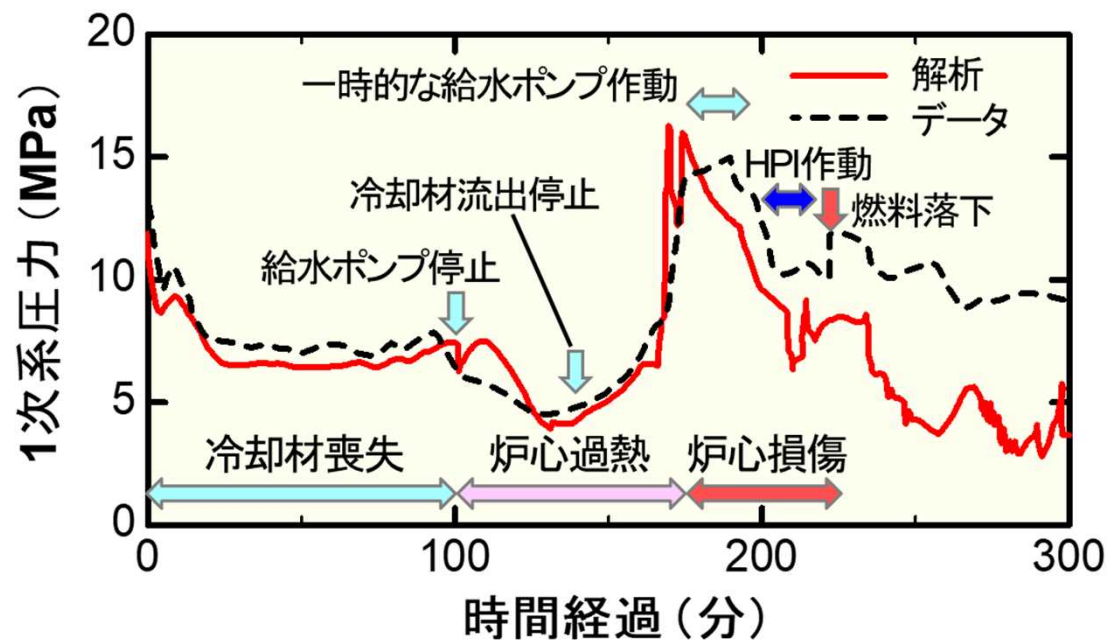


下部プレナム部(約1mの厚さで堆積)

粒径は20cm程度の岩状から0.1mm以下の顆粒状。
再固化した熔融セラミックス((U,Zr)O₂)で多孔質。

TMI-2事故における炉心溶融進展

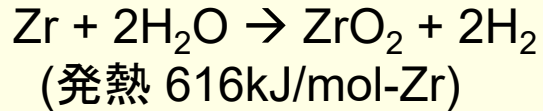
- 0:40 – 2:54 炉心が露出。炉心中央上部で溶融開始。
被覆管、制御棒、構造材が溶融し、集合体下部で固化。
- 2:54 – 3:20 一時的な給水時に急激な酸化と水素発生、
上部炉心の損傷と崩落。溶融プール形成。
- 3:20 – 3:46 注水が行われたが、溶融プールの温度は上昇。
溶融プール外殻が壊れ、下部ヘッドに溶融物が流下。



炉心溶融事故における酸化反応の寄与

事故初期に冷却材を蒸発させ、炉心温度を上昇させるのは崩壊熱。

約1500Kを超える温度からは、被覆管のジルコニウム(Zr)と水との反応(Zrの酸化反応)による発熱が支配的に。



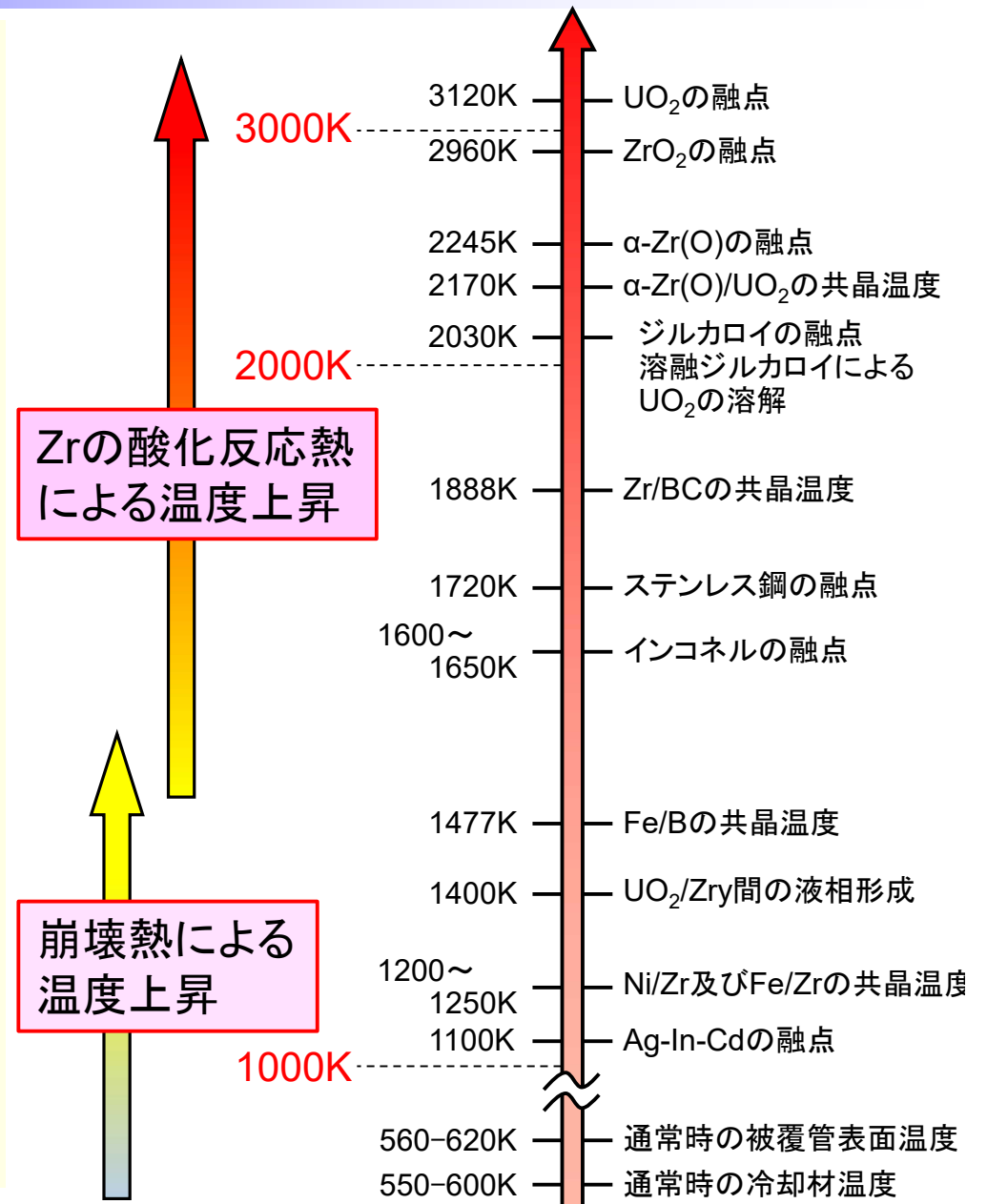
TMI-2炉心には約23tのZrがあり、その全てが反応した場合には炉心全体の温度が2000K程度上昇。

反応速度は温度とともに指数関数的に上昇し、1500K以上では急激な温度上昇をもたらす。

この反応は水素を発生させる点でも極めて重要。

なお、Zrが空気と反応する場合は反応熱が1100kJ/molと大きくなる。

✓ 酸化反応の抑制が第一目標に



動機づけ

*“The purpose of business is to create and keep a customer.”,
Peter F. Drucker*

ATFにとって顧客は原発を運用する電力会社。安全性向上の恩恵は電力会社だけでなく社会全体が受けるが、導入を決めるのはあくまで電力会社。

果たしてATFはその顧客に十分な導入意欲を与えることが出来るだろうか。

通常時の健全性や高燃焼度までの耐久性を犠牲にして導入する電力会社はいない(だろう)。また、規制当局やStakeholderもそれを許さない(だろう)。

10^{-4} イベントでのメリットのために 10^0 イベント(確率1)でのデメリットを受け容れることは出来ない。

低頻度高影響事象

核燃料分野においてATFは、起こる確率は小さいけれども、いったん起きてしまったら大きな影響を及ぼす事象(低頻度高影響事象)に対する備え。

一般に、**低頻度高影響事象対策の導入に向けた動機づけはとても難しい。**

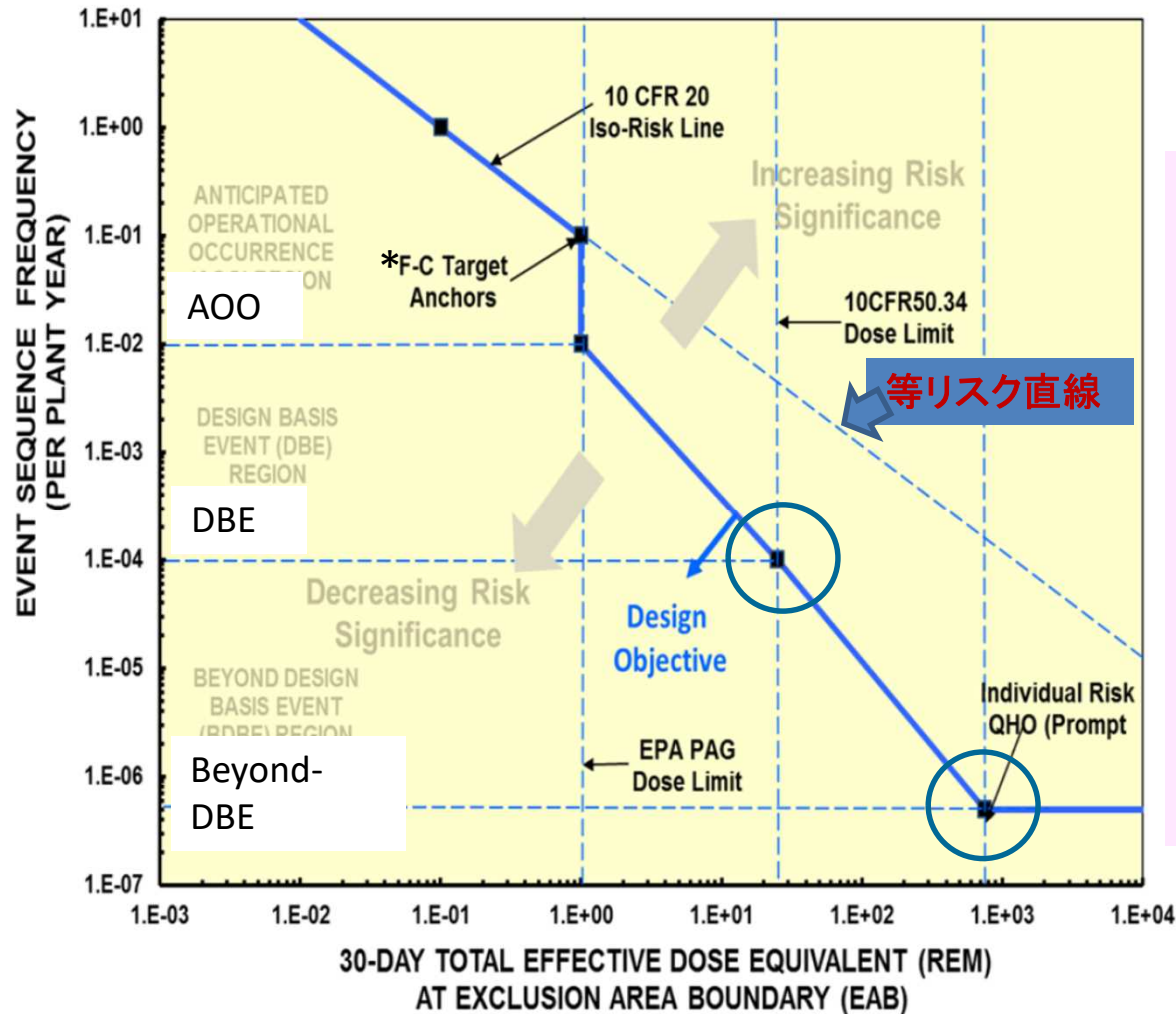
意思決定者にも、楽観幻想、将来の過度な軽視、現状維持欲求といった認知バイアスが働き、大きな不確実さは願望的な考え方を導く。

費用対効果の説明も非常に難しい。

しかし、原子力利用の未来を大きく左右する低頻度高影響事象を特に抑制しようというのは国際的な潮流。

➡ 例えば F-C target

米国のF-C target



頻度に拘わらず一定のリスク以下を目指すのではなく、高影響事象をより低頻度に抑えようとするもの。

ちなみにインベントリの小さなSMRは有利。

例えば、特定重大事故対処施設

発生確率が小さいだけに、そして、与える影響が大きいだけに、低頻度高影響事象には**極めて大きな不確かさ**が伴う。そして、その対策の有効性にも大きな不確かさが伴う。

費用対効果を定量的に示すことは極めて困難であり、事実上不可能。さらにテロなどのように人間行動を起因とするものについては発生確率の定量化が非常に難しい。

一般に、同じ投資であれば前段の対策に行った方が後段の対策に行くよりもリスク上のメリットは大きい。しかし、前段への投資が難しく、後段の対策、低頻度高影響事象対策を強化する必要があるときは、電力会社の判断に代わる規制当局による強制という行政サービスが必要となるケースが多い。

炉心損傷を遅らせるATFの場合

- ✓ 炉心損傷頻度(CDF)は下がることは下がるだろう。しかし、出来なかった何がATFが与える時間的余裕によって出来るようになって炉心損傷を回避できるのかは明確では無い。おそらく、CDFの減少幅は大したことがない。
- ✓ 炉心損傷判断に時間的余裕が生まれ、人的過誤が低減することで、人的過誤の影響が比較的大きい格納容器破損防止対策には有意な寄与が期待できる。
- ✓ 緩和策への寄与はあまり考えにくい。
- ✓ 起因事象から放出開始までの時間が長くなるので防災対策の効果はおそらく増す。

ATF導入による既存施設の省略や運転ルールの変更といったことは考えにくく、シビアアクシデント時の性能向上のみで事業者の導入意欲を喚起することは難しい。

リスク情報化

同じ炉内条件(温度/圧力/雰囲気履歴)でも炉心損傷までの時間的余裕が大きくなるとか、水素発生量が少なくなるとかといったATFのメリットがリスク情報に反映されるためには、事故シーケンスにおける各段階の操作、判断における**成功基準の変化を定量化**する必要がある。 ➡ 難しい課題

例えば、

- ATFが与える時間的余裕によって利用可能となる資源や対策の特定、その有効性の評価。
- 時間的余裕は炉心損傷判断における人的過誤をどれだけ減少させるのか。
- 時間的余裕は、いったん下した誤った判断を修正し、正しい判断に至る可能性を与えるのか。

導入プロセスの合理化

導入対象そのものの魅力だけでなく、導入に向けた道筋の合理化も動機づけの上で極めて重要。

海外での試験炉照射、国内LTA/LUAの推進に政府や学界はどのようなことをどれだけ出来るのか。

海外機関によるLTAの知見を日本の規制当局は活用できるか？

米国がフルコアで利用し始めても日本ではまだLTAすら出来ないということが十分に予想される。

BWR10x10といった新型燃料の導入における型式認証、解析コード認証(トピカルレポート)の成否がATF実用化を大きく左右する(だろう)。

異常過渡、設計基準事故

通常時の健全性や耐久性の確認に加えて、導入時の確認において大きなポイントとなるのが異常過渡(出力急昇)及び設計基準事故(RIA/LOCA)。 (許可 添8、添10)

出力急昇試験は多くのタイプのATFに対して必要であろう。
母材確認済のコーティングZrは不要か？

一方、設計基準事故(RIA/LOCA)については、

コーティングZr ➡ 母材確認済であれば不要か？

鉄系(FeCrAl合金) ➡ 損傷モードが異なるため基準の見直しが必要。分離効果試験のみで立証、NSRR/CABRI実験、LOCA模擬クエンチ試験といった総合試験は省略可能か？

セラミック(SiC/SiC複合材) ➡ 損傷モードが異なるため基準の見直しが必要。分離効果試験、総合試験の双方が必要。

視野を広げよう

発熱や水素発生抑制に焦点が当てられているが、例えば、通常運転時のFPガス放出率を低減する燃料だって立派なATF。事故時に最初に出て来るのはギャップガスであって、希ガス、ヨウ素は緊急時対応を考える際にいつも頭痛のタネ。大粒径ペレットや高密度ペレットなどにも大きな期待。

格納容器破損防止対策などへの寄与を考えると、炉心損傷開始を明確な信号として発出する計装付き燃料のリスク低減効果は大きい。

Accident Tolerant Fuel は **Advanced Technology Fuel** の一側面に過ぎない。ATFをもっと広く捉えてはどうか。

基礎体力の回復を

原子力利用を巡る状況に変化をもたらそうとするならば、**軽水炉**技術分野における“**基礎体力(人材基盤、施設基盤)の回復**”が不可欠。産学官いずれにおいても人材基盤の強化は急務。

出力急昇試験などの試験炉照射は不可欠だが、国内では実施出来ず、海外炉の利用も極めて限定的。

JMTR廃止、Halden炉廃止、JHR供用の大幅遅れ

照射後試験施設(RFEFなど)も極めて厳しい状態。

国際協力 (OECD/NEA FIDES等) は極めて重要だが限界あり。



終わりに

燃料には、通常時、異常過渡時、設計基準事故時、シビアアクシデント時、輸送時、使用後の貯蔵時といったすべての状態における一定以上の性能が要求される。

従来は顧みられていなかったシビアアクシデント時の性能を向上させるだけでATFの導入が進むわけではない。

特定条件での安全性向上だけに特化した技術の進歩は非現実的。

Accident Tolerant FuelはAdvanced Technology Fuelとして経済性向上や高効率化も同時に果たす新技術として期待される。

軽水炉技術分野の“基礎体力(人材基盤、施設基盤)回復”が不可欠。現状、照射試験研究のインフラ喪失は極めて深刻。

TMI-2事故後、米国は出力増強、長サイクル、これらに必要な高燃焼度化で凌いだ。燃料分野の役割は極めて大きい。

Thank you for your attention.

With thanks to

小城 烈

平野 雅司

