

我が国におけるATF開発の これまでの経緯と現状

令和4年 8月9日

(国研)日本原子力研究開発機構

1. はじめに	
ジルコニウム合金の特性	3
燃料棒に生じる現象	4
燃料棒の高性能化	5-6
米国での取組	7
新型燃料部材の必要条件	8
新型燃料部材の導入に向けて	9
2. ATFの開発経緯	
開発初期	10
現在の開発状況と今後の展開	11
2.1 Cr-coated Zry被覆管の開発状況と今後の展開	12-13
2.2 FeCrAl-ODS被覆管の開発状況と今後の展開	14
2.3 SiC/SiC複合材料被覆管等の今後の展開	15-16
参考情報	
米国ATRの概要	18-19

- ジルコニウム-スズ合金に添加元素を加えたジルカロイをはじめとする**ジルコニウム基合金**は、基本的には軽水炉条件における腐食や照射損傷に対する耐性が強く、十分な強度と延性を維持し、ウラン-235の核分裂に必要な熱中性子に対する断面積が小さいなどの特性を持つ。
- ジルコニウム基合金は高温では酸化しやすく、**水や水蒸気と反応して酸化物を形成するとともに水素を発生する**。また、**酸化反応に伴う発熱が大きく、1200～1500℃を超えると急激に酸化反応が進行する**。
- 地震に伴う津波により冷却機能が失われた福島第一原子力発電所(1F)においても、過熱した炉心においてジルコニウム基合金製の燃料被覆管が酸化し、炉心温度が非常に高くなったために炉心が溶融した。さらに、ジルコニウム基合金の酸化により発生した水素が格納容器から建屋内に漏れ出し爆発したと考えられる。

軽水炉内で長期間使用され燃焼が進んだ場合には、燃料棒では様々な変化が生じる (図1^[1])。

- 高エネルギーの中性子が照射されることにより、燃料ペレットの急峻な温度勾配によるクラックの形成や核分裂生成物(FP: Fission Product)や照射損傷が蓄積することで熱伝導度低下が生じる。
- 燃料被覆管においては、外面側で冷却材との相互作用により徐々に腐食が進み金属肉厚が減少するとともに、腐食に伴い発生した水素が被覆管に吸収され延性が低下する。
- これらの燃料棒内の変化は燃料棒の性能を低下させ、事故時の破損限界の低下等につながる。

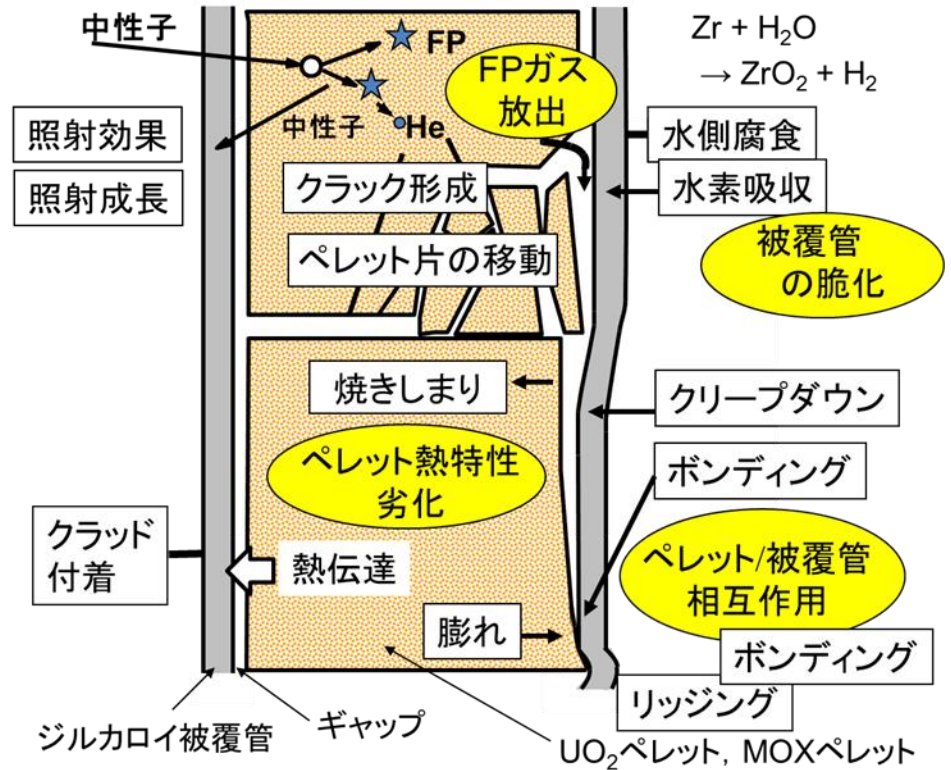


図1 原子炉運転中に燃料棒内で生じる様々な現象^[1]

[1] 永瀬ら、軽水型動力炉の非常用炉心冷却系の性能評価指針の技術的根拠と高燃焼度燃料への適用性、JAEA-Review 2020-076、March 2021

- 燃料棒の高性能化は、**安全性向上**だけではなく、**効率的運用による使用済燃料の発生量低減**や**経済性向上**にも役立つ。
- このような燃料棒構成材料の改良は、1F事故以前は通常の運転条件や想定される事故(設計基準事故：原子炉の安全設備により大規模な炉心損傷に至らず収束する)条件での性能向上を考えたものである。
- 1F事故を契機に、**設計基準事故(DBA)を超えた場合にもシビアアクシデント(SA)に至りにくくする燃料棒構成材料**や**SAの影響を緩和する燃料棒構成材料**や**制御棒**、すなわち**事故耐性を高めた新型燃料部材**(図2に示したSiC被覆管はその一例)への関心が高まっている。

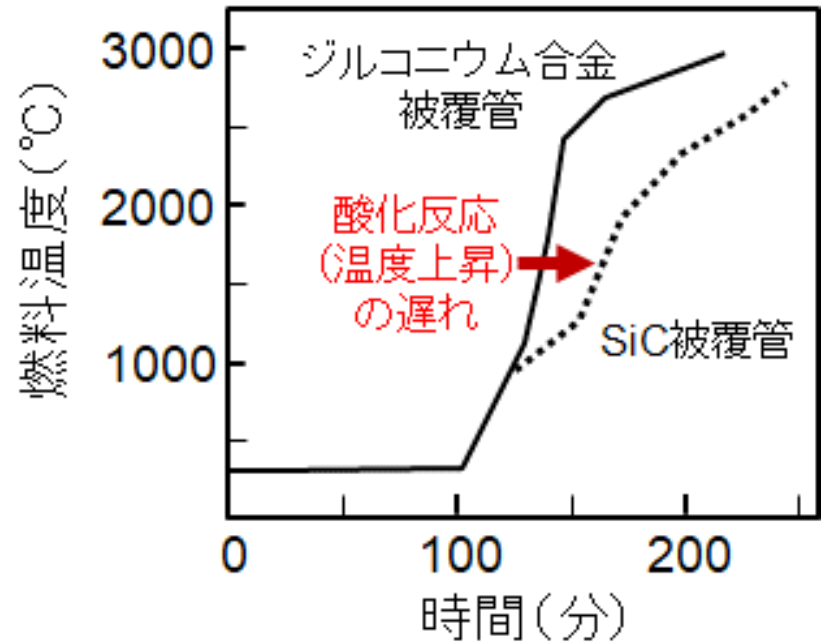


図2 冷却水喪失事故時に置いて酸化反応が進行した時の燃料温度の上昇と時間との関係を示した模式図

(*) SiC被覆管は、ジルコニウム基合金被覆管に比べて酸化反応が遅いため、燃料の温度上昇が抑制されることに伴って「事故耐性」が向上する可能性があると考えられている。

事故耐性を高めた新型燃料被覆管採用により図3に示したような**集合体規模でのメリット**（例えば、**溶融・破損に至るまでの時間延伸など**）が期待されている。

我が国においては、大学及び燃料・プラントメーカーが事故耐性を高めた新型燃料部材の開発を開始し、経済産業省や文部科学省においてもこれを支援してきている。

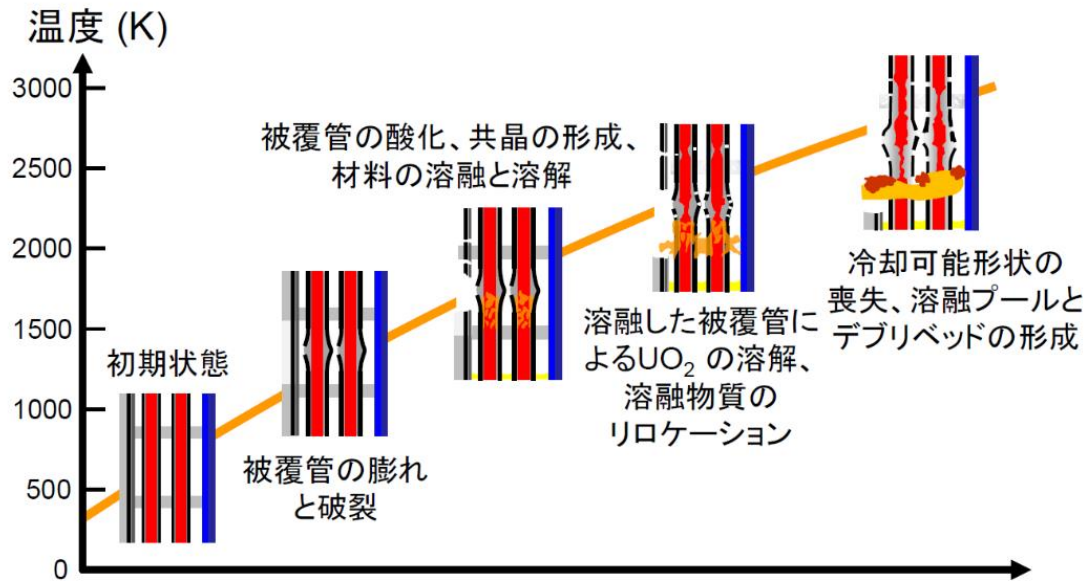


図3 軽水炉炉心の温度上昇に伴って生じる燃料損傷の模式的イメージ[2]

(*) 燃料集合体内において個々の燃料棒で温度上昇が生じた場合の温度と集合体破損の程度を模式的に示している。

- 米国においては議会の決定に基づき**エネルギー省（DOE）**が**スポンサー**となり事故耐性を高めた燃料の実用化のための技術開発を産学官が一体となり進める一方で、連携協力が強化される過程で**米国原子力エネルギー協会（NEI）**が中心となる**事故耐性燃料（ATF）**開発に係る新たな米国内機関の横断的枠組みが構築されている。
- NEIは、ATF開発に関わる米国内の電力会社、燃料メーカ、プラント総合メーカ等で構成されるATFワーキンググループ（ATF-WG）を立ち上げ、①ファンディングやコミュニケーション、②ライセンスや安全メリットに係る議論を推し進め、それらを取り纏める形でATFの実用化に向けた取り組みにおいて主導的な役割を果たしてきている。
- この横断的枠組みにおいては、**米国原子力規制委員会（NRC）**も新型燃料の開発推進を担う各機関等との技術情報の交換に積極的に関わる一方、ATFの早期社会実装に必要となる、社会的受容性を高めるための活動（具体的には、2018/4/12を皮切りに2021/7/22までに計40回の政府機関、ベンダー等の専門家を対象にした個別もしくは合同でのワークショップの開催、及び**一般公衆向けの公聴会の開催**^(*1)）や**各種ガイダンスの整備**（例えば、Crコーティング被覆管の暫定的なスタッフガイダンス^(*2)）等にも取り組んできている。

(*1)<https://www.nrc.gov/reactors/atf/public-interact.html>

(*2)<https://www.nrc.gov/docs/ML1934/ML19343A089.pdf>

1.はじめに -新型燃料部材の必要条件-

- 国際機関のIAEAやOECD/NEAでも参加国の軽水炉ATFの専門家会合が開催され、開発状況の調査や開発の方向性に関する情報交換、ベンチマーク活動等が行われ、幾つかの活動報告書が発刊されてきている^[3, 4]。
- 新型燃料部材の開発においては、ジルコニウム基合金と比較して事故耐性を向上させるだけでなく、同等あるいはそれ以上の通常時性能を持たせる必要がある。
- 軽水炉用の燃料被覆管は、外径が10mm程度、肉厚は1mm以下、長さは4000mm程度という特異な形状を有し、極めて厳しい規格に基づき製造されている。さらに、軽水炉内の放射線照射環境の高温高圧水中で、発熱しつつ変形し化学的にも変化する燃料ペレット及び燃料ペレットから放出される放射性物質の密封を担保する性能を維持しなければならない。
- 我が国における燃料棒の破損割合は、 $10^{-6} \sim 10^{-5}$ 以下のオーダーであることから、ジルコニウム基合金製の燃料被覆管については求められるスペックを十分に満たす性能を有しており、新型燃料被覆管等の部材についても同様のスペックを有さなければならず、相応の厳しい規格・基準が適用されるはずである。

[3] STATE-OF-THE-ART REPORT ON LIGHT WATER REACTOR ACCIDENT-TOLERANT FUELS, NEA No. 7317, @OECD 2018, <https://oe.cd/nea-ATFs-2018>

[4] ANALYSIS OF OPTIONS AND EXPERIMENTAL EXAMINATION OF FUELS FOR WATER COOLED REACTORS WITH INCREASED ACCIDENT TOLERANCE (ACTOF), IAEA-TECDOC-1921, INTERNATIONAL ATOMIC ENERGY AGENCY, VIENNA, 2020, <https://www.iaea.org/publications/14691/analysis-of-options-and-experimental-examination-of-fuels-for-water-cooled-reactors-with-increased-accident-tolerance-actof>

- 米国においては軽水炉開発の初期にステンレス鋼が燃料被覆管として使用されたことがあるものの、我が国をはじめ多くの国々においては、ジルコニウム基合金製の燃料被覆管が、軽水炉の実用化が開始された1970年代から40年以上にわたり使用されてきた。
- より安全で効率的な利用のために水素吸収特性改善のための材料組成の変更やペレット-被覆管相互作用（PCI）特性改善のためのライナ被覆管の採用等による性能向上が進められてきたが、全く異なる材料や概念を持つ燃料の軽水炉への導入については本質的に検討されたことはない。
- 上に述べた軽水炉燃料の設計、製造から使用後の貯蔵、処理処分までジルコニウム基合金を前提に、開発、品質、性能、安全性等に関する技術、管理や評価システムが構築されており、新型燃料部材を軽水炉に導入するための技術開発項目や技術成熟度評価手法については、2015年頃に開始された経済産業省資源エネルギー庁の委託事業において整理、検討がなされるようになった。
- 2015年以降、開発メーカーを中心に事故耐性が高い燃料部材の要素技術開発が精力的に進められてきている中、現状における国内開発メーカーの最大の関心事は、新型燃料の照射試験、並びに照射データ取得・拡充をいかに戦略的に行っていくかであり、国内外情勢を的確に見極めつつ、照射試験の機会を効率・効果的に得ていくかが直近の重要課題と考えられる。

- 1F事故を踏まえた国内の動向に目を向ければ、2014年4月に閣議決定された**エネルギー基本計画**では、過酷事故対策を含めた軽水炉の安全性向上に資する技術や信頼性・効率性を高める技術等の開発、高いレベルの原子力技術・人材の維持・発展等が必要であるとされた。
- 2014年8月には、総合資源エネルギー調査会電力・ガス事業分科会原子力小委員会の下に「**自主的安全性向上・技術・人材**ワーキンググループ」が設置され、2015年6月16日、国、事業者、メーカ、研究機関、学会等関係者間の役割が明確化された軽水炉安全技術・人材ロードマップが取りまとめられた。同**ロードマップ**においては、燃料の信頼性向上に係る取り組みの重要性が指摘されている。
- 2012年4月の日米首脳会談で両国首脳の主導により設置された民生用原子力協力に関する**日米二国間委員会**の下の**民生用原子力研究開発ワーキンググループ**においては、軽水炉に係る日米の研究開発協力が進められている。この中で、燃料の信頼性向上に係る取組は、同ワーキンググループにおける日米の研究開発協力の観点からも重要であるとされ、関連する情報の交換及び技術協力について積極的に話が進められてきている。

- 2021年度現在、我が国では3つのATF被覆管候補材料の開発が進行中である。
 - ① 基材であるジルコニウム基合金の表面に、CrあるいはCr化合物をコーティングした**Crコーティングジルコニウム基合金 (Cr-coated Zry) 被覆管**
 - ② 耐熱鋼として知られるFeCrAl合金の内部に酸化物粒子を微細分散させて強化を図った**FeCrAl-ODS被覆管**
 - ③ 耐熱性や照射特性に秀でた炭化ケイ素 (SiC) の繊維を編み込みかつSiC繊維表面を化学気相成膜することで気密性を高めた**SiC/SiC複合材料**
- ①三菱コンソーシアム (MHI及びMNF)、②日立コンソーシアム (日立GE、GNF-J及びNFD)、③東芝コンソーシアム (東芝ESS及びNFI等)、日立コンソーシアム (日立GE及びGNF-J) 等の開発メーカーによってそれぞれの開発が進められている。

2.1 Cr-coated Zry被覆管の開発状況

- 1F事故での教訓を踏まえて、冷却材喪失時に想定されるジルコニウム基合金被覆管と高温水蒸気との酸化反応の遅延、及び水素発生抑制を目指したATFとして、ジルコニウム基合金被覆管表面にCr等のコーティング層を施すことで事故耐性を高める概念が提案されている。
- これまでのSA解析事例からは、このコーティング層が存在することでSA時の被覆管と高温水蒸気との酸化反応は抑制可能となり、アクシデントマネジメント（AM）との適切に組み合わせにより、事故対応の猶予時間（Grace time）の延伸が期待されている。
- 現行軽水炉での使用実績が豊富なジルコニウム基合金をベースにしている材料であることから、他のATF被覆管候補材料に比べて、開発課題はあまり多くは残されていないが、運転中並びに事故時のCrコーティング層の性能や挙動の把握が重要な課題と考えられている。
- PWR用に開発が進められているCr-coated Zry被覆管の開発ロードマップの概要は、次ページに示すとおりである。

2.1 Cr-coated Zry被覆管の今後の展開

- 事故時の安全性向上、及び通常運転時の信頼性向上を目標としている。
- 2030年代の実機導入適用を目標に、大きく3フェーズに分けて開発を推進している。

目的	成果目標
事故時安全性の向上	➤ 事故時（大破断LOCA等）酸化反応による水素発生量が従来被覆管より低減すること
通常運転時信頼性の向上	➤ 通常運転時の表面摩耗量低減や耐食性向上といった被覆管性能の向上により、耐漏えい性等の信頼性が向上すること

年代	～2023 【基盤技術研究】	2024～ 【実用化研究】	2030～ 【実用化】
実施内容	製造試験	量産試験	
	基礎物性/事故耐性確認試験	基本設計/安全評価	許認可
	導入効果・影響評価		バッチ導入
	研究炉照射試験	商業炉先行照射	

Ref. : 村上他、「早期実用化に向けたPWR向け事故耐性燃料被覆管（コーティング被覆管）の開発（1）コーティング被覆管の事故時性能」、日本原子力学会2021年秋の大会、2D07(2021)

- SA初期段階での被覆管酸化反応による水素と熱の発生を抑制することでSA事象進展を遅延させるとともに、炉心の制御や冷却が困難となる温度領域を高めることにより事故対応のための猶予時間を稼ぐことが期待できる。
- 事故時の安全性裕度を向上させつつ、燃料としての基本的な性能を高め、高燃焼度化等を達成し使用済燃料体数を抑制できる可能性が高い。ジルカロイに比べて反応度ペナルティが大きいこと、高温強度や耐食性のデータが十分でないこと、被覆管融点以上での燃料溶融挙動が十分にモデル化されていないこと、等が、主要な課題として挙げられている。
- 反応度ペナルティの観点からは、比較的肉厚な材料を用いるBWR用燃料被覆管としての開発が最も適している。また、肉厚の薄いPWR燃料被覆管では、燃料製造や燃料・炉心設計に関する課題が、BWR燃料被覆管に比べ相対的に増大することが懸念材料であり、PWRでの実用化検討には至らなかった。
- BWR用に開発を進めているFeCrAl-ODS被覆管の開発は、2010年代に原理実証段階の要素技術開発を完了し、2020年からは技術実証段階の開発を進めている。Cr-coated Zry被覆管と同様、2022年時点では、燃料ペレットを装荷した照射試験による照射挙動評価を行うための海外炉との調整を行っており、規格・基準の策定に関しては、2026年頃に着手し2020年代中に完了することを目指している。

2.3 SiC/SiC複合材料被覆管等の開発状況

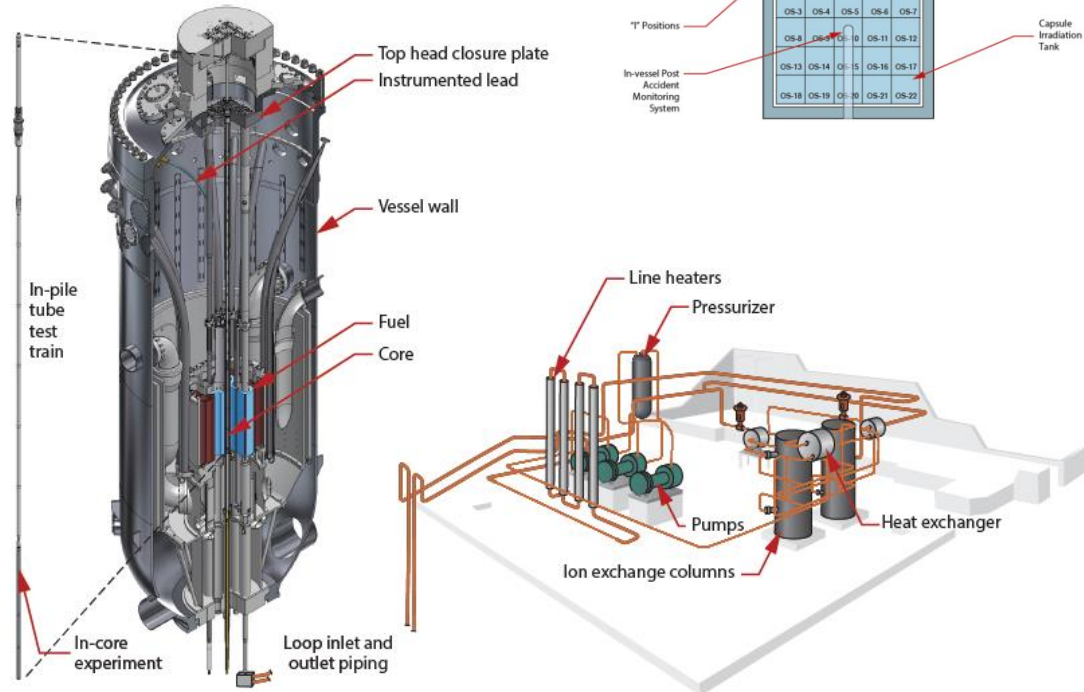
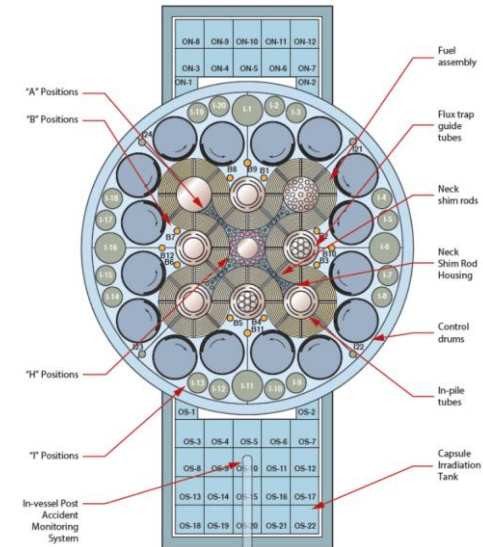
- 事故時の被覆管酸化反応による水素と熱の発生を大きく抑制することで、設計基準事故を超えた場合でも事故シナリオによっては炉心溶融には至らない、あるいは、炉心溶融に至る可能性のあるシナリオにおいても事象進展を遅延させて、他のATF被覆管候補材料よりも長い猶予時間を稼ぐことが期待できる概念として期待されている。
- Cr-coated ZryやFeCrAl-ODSに比べて、原理的な安全性向上範囲が広く、実用化された場合には、軽水炉の安全性向上に大きく寄与することが期待されている。
- 従来、セラミック系材料が燃料部材として実用化された経験がないため、製造技術、照射特性、燃料との化学的、機械的相互作用、気密性、水化学への影響、DBAへの影響、燃料取扱、コスト等の多くの分野で、実用化阻害因子が存在する可能性が残されているため、炉型を限定せずに着実にデータを積み上げ、重要課題を一つ一つ解決していく必要がある。
- チャンネルボックスや新型制御棒被覆材などの燃料部材においては、被覆管材に比べて開発課題の困難度が大幅に低減するため、実用化開発を先行的に進めうる可能性がある。特に、BWR炉心ではチャンネルボックスが燃料被覆管に匹敵する重量を占めており、これをSiC/SiC複合材料に交換するだけでも軽量化による安全性向上の効果は大きい。

- 国内の開発メーカー2社（東芝ESS、日立GE）のSiC燃料被覆管と東芝ESSに関しては、SiCチャンネルボックスも含めたSiC/SiC複合材料の開発ロードマップが策定されており、概略は次のとおりである。2030年代後半（日立GEのロードマップでは2040年代中期頃）の実用化を目指して研究開発が進められており、規格・基準の策定は2024年～2025年頃（東芝ESS）、2023年～2024年頃（日立GE）から着手する予定となっている。

なお、上記の各候補材料の開発ロードマップに関しては、照射試験の遅れや各組織での取組体制変更等により今後見直す可能性がある。

本資料の内容(開発状況と今後の展開)は、経済産業省資源エネルギー庁の令和2年度原子力の安全性向上に資する技術開発事業（安全性向上に資する新型燃料の既存軽水炉への導入に向けた技術基盤整備）の成果の一部である。

原子炉名	ATR (INL(米国))
熱出力(MWt)	最大250 (通常110)
熱中性子束 (n/cm ² s)	最大1.0×10 ¹⁵ (通常4.0×10 ¹⁴)
高速中性子束 (n/cm ² s)	最大5.0×10 ¹⁴ (通常2.0×10 ¹⁴)
フラクストラップ数	9
実験ポジション数	70
燃料集合体数	40
燃料実効長	1.2m
集合体当たりの板状燃料数	19
冷却水圧力	2.5MPa
設計冷却水温度	115℃
運転時冷却水温度	<52℃(入り口)、71℃(出口)
運転日数	通常60日
付帯設備	PWR模擬水ループ6ループ (1ループ：原子力エネルギー研究用)



Ref.: Advanced Test Reactor User Guide, http://inl.gov/wp-content/uploads/2021/10/20-50097_ATR_UserGuide_R24.pdf

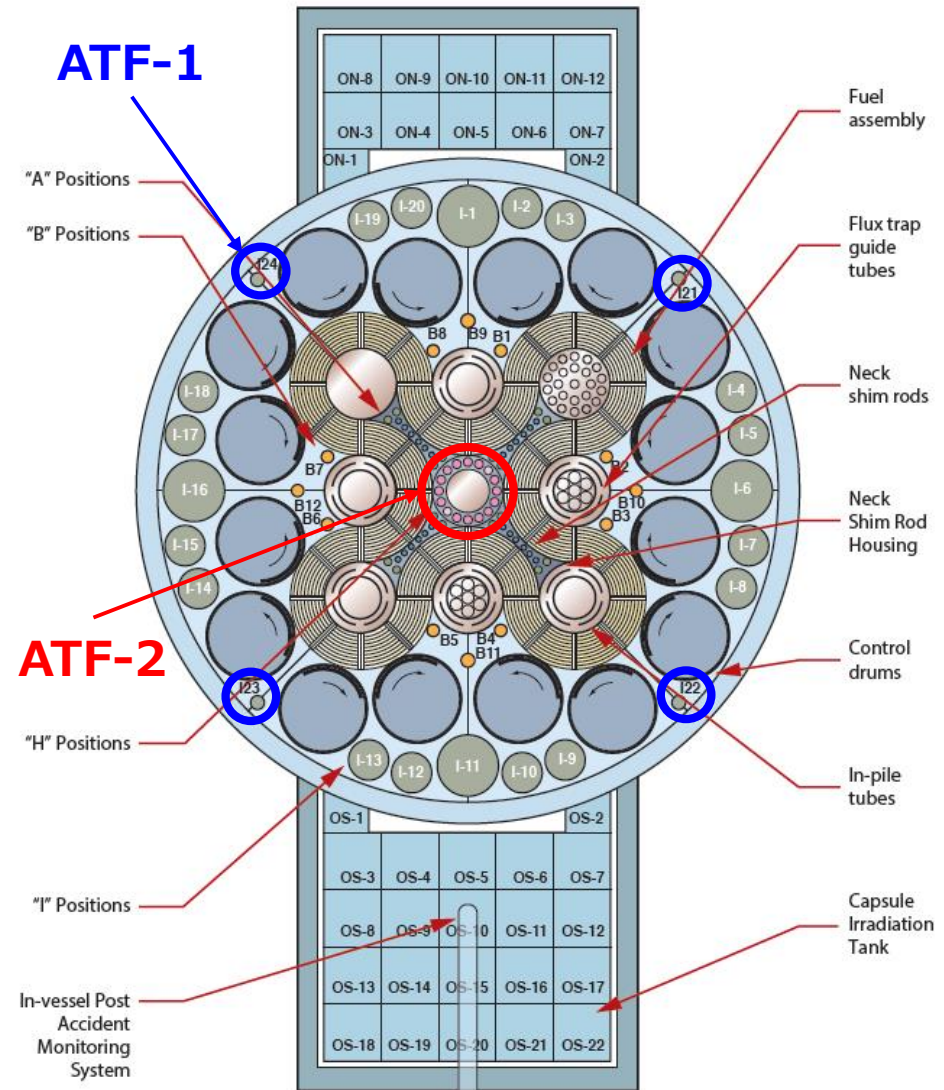
ATF用照射キャプセル(*)

➤ ATF-1 : キャプセル照射

- Drop-in型キャプセル (I21-I24)
- 照射環境 : キャプセル外側 : 原子炉の1次系冷却水 (2.5MPa、約52℃)、キャプセル内側 : 不活性ガス
- 無計装

➤ ATF-2 : ループ照射(Loop-2A)

- 燃料ピンを商用PWR模擬水質条件で照射



(*)Ref.: <https://www.energy.gov/sites/prod/files/2015/11/f27/7.%20Advanced%20Fuels%20Program%20In-Reactor%20Instrumentation%20Overview.pdf>

Ref.: Advanced Test Reactor User Guide, http://inl.gov/wp-content/uploads/2021/10/20-50097_ATR_UserGuide_R24.pdf