



特集記事「エネルギー国際情勢」(1)

米国における事故耐性燃料の開発動向

日本エヌ・ユー・エス 株式会社
多原 竜輝 Ryuki TAHARA

1. はじめに(米国原子力発電の状況)

米国では現在 96 基の原子力発電所が稼働し、国内電力の約 20% を賅っている。内訳としては、電力会社 20 社が 64 基の PWR と 32 基の BWR を運転しており、2 基の AP1000 型 PWR が現在建設中である。運転中のほとんどの発電所は、認可更新手続きによって当初の認可期間 40 年を 20 年延長して 60 年間の運転期間が認められているが、他の電源とのコスト競争によって期限未満で運転を停止する発電所も出ている。一方で、2 度目の認可更新 (80 年運転) を目指す発電所も最近ではみられている。

運転中の発電所では、ここ数年の設備利用率が平均 92% という非常に良好な運転パフォーマンスを維持している (図 1)。発電コストは長期運転を目指した大型改造工事などの影響で 2012 年にピーク (MWh あたり 41.35 ドル) を迎えた後は少し低下傾向にあり、2017 年の合計発電コスト (MWh あたり 33.50 ドル) は 2008 年近くのレベル (MWh あたり 32.75 ドル) まで減少している。しかしながら、天然ガスの値段が低下し、他の電源に対して補助金がついているために、必ずしも原子力発電の収益性は高くはない。そのため、後述の産業界団体の NEI が主導して、発電コストを 30% 低下させるための活動 (「原子力の約束の実現に向けて (Delivering the Nuclear Promise: DNP)」と呼ばれる) が 2016 年に開始されている。

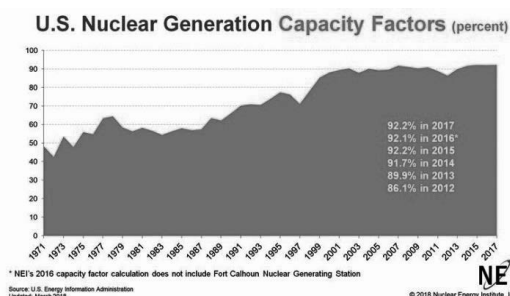


図 1 米国原子力発電所の設備利用率 (NEI web サイトから) [1]

2. NEI による産業界の支援と TIP アワード

米国には原子力エネルギー協会 (Nuclear Energy Institute: NEI) と呼ばれる産業界組織が存在する。NEI は 1994 年に、当時存在していた 5 つの産業界組織が統合して設立された。2019 年 5 月時点で 300 を超える原子力に関係する電力会社、プラントメーカー、研究機関、コンサルティング会社などが所属する巨大な組織である [2]。日本からも電力会社、メーカー、研究機関など様々な団体が NEI のメンバーに名を連ねている。NEI の目的は原子力技術の利用を推進することであり、そのために政策上の重要な問題に関して産業界の統一見解を取りまとめ、原子力規制委員会 (Nuclear Regulatory Commission: NRC)、行政機関、州や地方政府機関への働きかけを行っている。また公衆への啓発を含め、原子力発電の地位向上に向けて様々な活動を行っている。

NEI ではその活動の一環として、原子力発電所をより効率的に、より信頼性を高め、そしてより価格競争力を向上させる斬新なアイデアに対して、例年 Top Innovative Practice Award (TIP Award) と呼ばれる賞を授与している [3]。2019 年 6 月に開催された NEI カンファレンス (Nuclear Energy Assembly) では、2019 年の TIP Award が発表されている。受賞した 10 件のタイトルを表 1 に示す。

2019 年の表彰で注目されたのは、Southern Nuclear 社が燃料関係で 2 つの賞を獲得したことである。同社は燃料の中でも特に事故耐性燃料 (Accident Tolerant Fuel: ATF) に関する米国のワーキング・グループにおいてエグゼクティブ・スポンサーを務めており、今回受賞した 2 例も ATF に関連している。

この受賞例からもわかるように、現在米国の原子力界では ATF が大きく注目されており、燃料ベンダ、電力会社、規制機関がそれぞれ実用化に向けて精力的に活動を行っている。

このATFというコンセプトの概要と、現在の米国のATFの開発状況について以下にまとめた。

表1 2019年TIP Award受賞者リスト [3]

受賞者	受賞事例
Dominion Energy	カーボンファイバー樹脂を用いたサリ原子力発電所のパイプライン補強事例
Southern Nuclear GNF	沸騰水型軽水炉を対象にした、より効率的でかつ事故耐性を持つ新燃料の導入事例
Tennessee Valley Authority	ブラウンズフェリー原子力発電所における遠隔操作型キャタピラクローラーによる輸送事例
PSEG	ホーククリーク原子力発電所における高解像度カメラを備えた Framatome社製のマニピュレーターによる压力容器内の清掃事例
South Texas Project	超音波を用いた循環水系パイプラインの評価技術
Talen Energy	サスケハナ発電所における3Dプリンティングを用いた試作部品の製造事例
Exelon	カーボンフリー社会に向けた原子力発電推進運動
Arizona Public Service	パロベルデ原子力発電所における熱交換器の効率性を向上させた新しい解析方法の事例
Southern Nuclear	ボーグル原子力発電所2号機における Framatome 社製ATFの実装事例
Duke energy	マクガイア原子力発電所2号機のフランジを交換する際に圧縮性のサーマルスリーブを用いることで工期を大幅に短縮させた事例

3. ATFの概要と研究背景

2011年3月11日に発生した福島第一原子力発電所事故では、大地震によって発生した津波が発電所内の施設を襲い、結果的に全電源喪失事故 (Station Blackout: SBO) が引き起こされた。福島第一原子力発電所の各原子炉は制御棒挿入によって核分裂反応の停止には成功したが、一方でSBOにより適切な炉心冷却を行うことが出来ず、崩壊熱の除熱が難しくなり、炉心の温度が上昇を続けた末に燃料が溶融するに至った。また、炉心の温度上昇により発生した高温高圧水蒸気が燃料被覆管材料と反応を起こした結果、大量の水素が発生し、最終的に1、3、4号機の爆発事故につながった。

ATFはこのような過酷事故の発生リスクを低減するために開発された新しい燃料コンセプトである。ATFは主に反応度事故 (Reactivity Initiated Accident: RIA) と冷却材喪失事故 (Loss of Coolant Accident: LOCA) の2種類の事故への対応を想定している [4]。

RIAは制御棒の急速な引き抜き等により燃料に過剰な反応度が加えられたときに発生する。わずかな時間の間に出力が急上昇するため燃料ペレットが熱膨張を起こし被覆管が歪むことが確認されている。代表的な事故としては1986年に発生したチェルノブイリ原子力発電所事故が挙げられる。

このため、ATFは従来の UO_2 燃料と比較して熱膨張率を抑制し、ペレット・被覆管機械的相互作用 (Pellet-cladding Mechanical Interaction: PCMI) が改善するように設計されている。

LOCAはSBOなどの理由により主冷却系が使用困難になり給水ポンプで炉心に冷却材を循環することができなくなる事故を指す。燃料の崩壊熱を除熱できないことから炉内の温度が上昇し続け、被覆管や燃料の溶融を引き起こす。商用軽水炉の燃料被覆管の材料として使用されているジルコニウム金属をベースとした合金は高温高圧水蒸気と反応して水素が発生する。この水素発生により燃料被覆管が膨張、そして破裂し、燃料中の放射性物質が外部の系へと放出される危険性がある。また、この水素生成反応は発熱反応であるため、炉内温度のさらなる上昇につながる。LOCAの代表的な事故としては1979年のスリーマイル島原子力発電所事故、2011年の福島第一原子力発電所事故が挙げられる。

このため、ATFはジルコニウム合金と高温高圧水蒸気の反応性を低減させるように設計されている。また、今まで使用されていたジルコニウム合金とは異なる材料を

燃料被覆管として使用するアイデアも開発されている。

4. 米国における ATF の開発・試験動向

ATF の開発には Westinghouse 社、Framatome 社、GNF 社の 3 社が着手している。表 2 にこれらの有力ベンダの主要ラインナップを示す [4]。特に近年は従来のジルコニウム合金の表面にクロム金属を薄くコーティングした Cr-coated ATF の開発が盛んに行われている。

表 2 ATF 開発における有力ベンダの主要ラインナップ [4]

ベンダ	被覆管材料	燃料
Westinghouse	Cr-coated ZIRLO	U_3Si_2
	SiC	
	Cr-coated ZIRLO	Cr doped UO_2
Framatome	Cr-coated M5®	Cr_2O_3 doped UO_2
	SiC _f /SiC	
	GNF	ARMOR Fe-Cr-Al

4.1 Westinghouse 社の開発動向 [4] [5]

Westinghouse 社は Encore® と ADOPT™ と呼ばれる 2 種類の ATF コンセプトを発表している。

Encore® は 2 つのフェーズに分かれている。フェーズ 1 として Westinghouse 社は燃料被覆管材料に Cr-coated Zr-alloy を使用することを計画している。これは Westinghouse 社の従来の被覆管である ZIRLO® の表面にコールドスプレー法によって厚さ 20 ~ 30 μm の Cr コーティングを行ったものである。この燃料被覆管に対して、Westinghouse 社は UO_2 燃料の代わりに U_3Si_2 燃料の装荷を予定している。 UO_2 燃料と比べて U_3Si_2 燃料は体積当たりのウラン濃度が 17% 大きい。さらに U_3Si_2 燃料は従来の燃料よりも熱伝導率が 550 % も高い。よって U_3Si_2 燃料を用いることでより効率的なエネルギー利用を行うことができる。

フェーズ 2 として Westinghouse 社は燃料被覆管材料に炭化ケイ素 (SiC) を使用することを将来的に想定している。SiC は 2800°C で昇華するまで安定的に存在できることに加えて、従来の Zr-alloy 材料と比較して高温高圧水蒸気との反応性が 1/10000 であることから、SiC 被覆管の実現によってさらなる炉内の安全性を保障できるとしている。また、熱伝導率が従来被覆管材料よりも高いため、効率的なエネルギーの利用が可能になるとされている。こちらの SiC 被覆管にも U_3Si_2 燃料を装荷するこ

とを計画している。

もう 1 つのコンセプトである ADOPT™ は UO_2 燃料の代わりに Cr をドーブさせた UO_2 燃料を使用するというアイデアである。この燃料ペレットを使用することによって、PCMI を改善することができる。PCMI の改善により、仮に燃料棒に亀裂が発生したとしても、燃料ペレット自体の流出や核分裂生成ガスの放出を減らすことができる Westinghouse 社は主張している。

4.2 Framatome 社の開発動向 [4] [6]

Framatome 社は今日使用されている燃料よりもさらに安全な燃料を開発することを目標に掲げた PROtect プロジェクトを開始した。PROtect プロジェクトでは短期と長期の 2 つの計画が現在進行している。

短期計画では Framatome 社は燃料被覆管材料に Cr-coated Zr-alloy を用いることを計画している。これは Framatome 社の従来の被覆管である M5® の表面に PVD 法によって厚さ 8 ~ 22 μm の Cr コーティングを行ったものである。特徴としては Westinghouse 社の Encore® よりも Cr コーティングが薄いことが挙げられる。この燃料被覆管に対して、Framatom 社は UO_2 燃料の代わりに Cr_2O_3 をドーブした UO_2 燃料の装荷を予定している。 Cr_2O_3 をドーブすることにより UO_2 燃料は粒径と粘塑性が大きくなる。燃料の粒径が大きいと、仮に燃料棒が欠損したとしても放射性物質の流出を抑えることができるというメリットがある。また、核分裂生成ガスの放出挙動が改善されるという報告もある。よって Cr_2O_3 をドーブした UO_2 燃料を用いることで更なる安全性の改善が期待できるとしている。

長期計画として Framatome 社は燃料被覆管材料にセラミックス基長繊維強化複合材料 (Ceramics Matrix Composite: CMC)、特に炭化ケイ素強化複合材料 (SiC_f/SiC) の使用を検討している。SiC_f/SiC はセラミックス材料である炭化ケイ素 (SiC) を炭化ケイ素の繊維で強化し、セラミックス特有の脆性破壊挙動の克服を目指したもの

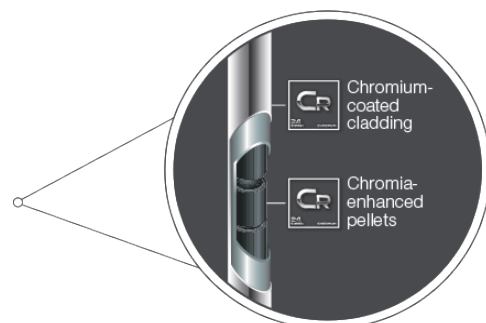


図 2 ATF 概略図(Framatome web サイトから) [6]

である。Framatome社はこちらの燃料被覆管にもCr₂O₃をドーピングしたUO₂燃料の装荷を計画している。

4.3 GNF社の開発動向 [4]

GNF社はATFのコンセプトとしてARMORとFe-Cr-Alの2種類の材料を発表している。

ARMOR(Abrasion Resistant, More Oxidation Resistant)は従来の被覆管材料であるZircaloyに酸化防止のための薄膜をコーティングしたものである。ただしGNF社はARMORの詳細について明らかにしていない。

Fe-Cr-Alは鉄、クロム、アルミニウムの3種類の金属を用いた三元系ステンレス鋼である。従来材料よりも良

4.4 ATFの試験動向 [4]

表3に2019年6月までに行われてきたCr-coated ATFの主要な試験を、表4に今後計画されているCr-coated ATFの試験予定を示す。Cr-coated ATFの試験は2010年代後半から開始され、2018年と2019年には先行照射試験燃料(Lead Test Assembly: LTA)や先行照射燃料棒(Lead Test Rod: LTR)が稼働中の商用炉に装荷されるという、実用条件に近い試験が行われた。今後もLTA、LTR装荷試験は計画されており、米国では燃料に関する技術的パラダイムシフトが巻き起こっている。

表3 2019年6月までに行われた主要なCr-coated ATFの試験 [4]

試験名	参加ベンダ	備考
Halden IFA-796 Test	Westinghouse Framatome	ノルウェーのHalden炉にCr-coated Zr-alloy被覆管を装荷。約55日間の照射試験を行った。
MITR MITR-2 Test	Westinghouse	MITが所有するMITR試験炉に対し、燃料を積載していないCr-coated Zr-alloy被覆管を装荷。157日間の照射実験が行われた。
Gösgen IMAGO Program	Framatome	2016年にスイスのGösgen発電所に対して燃料を積載していないCr-coated Zr-alloy被覆管を装荷。2023年に取り出し予定。
Lead Test Rod Irradiation Programs @Hatch	GNF	2018年に米国のHatch発電所に対してARMOR被覆管にUO ₂ 燃料を装荷した試験燃料体を装荷した。2020年にプールサイド試験(PoolSide Experiment: PSE)を実施予定。
Lead Test Rod Irradiation Programs @Vogtle	Framatome	2019年4月に米国のVogtle発電所2号機に対してCr-coated M5®被覆管にCr ₂ O ₃ doped UO ₂ 燃料を積載した試験燃料集合体を装荷し、運転を再開させた。

表4 今後計画されているCr-coated ATFの試験予定 [4]

試験名	参加ベンダ	備考
Lead Test Rod Irradiation Programs @Byron	Westinghouse	2019年に米国のByron発電所に対してCr-coated ZIRLO®被覆管にU ₃ Si ₂ 燃料を積載した試験燃料集合体と、ADOPT™燃料を積載した試験燃料体を装荷予定。
Lead Test Rod Irradiation Programs @ANO	Framatome	2019年に米国のArkansas Nuclear One発電所に対してCr-coated M5®被覆管にCr ₂ O ₃ doped UO ₂ 燃料を積載した試験燃料体を装荷予定。
ATR ATF-2 Test	Westinghouse Framatome	米国のINLが所有するATR試験炉に対してUO ₂ 燃料を積載したCr-coated ZIRLO®被覆管とCr ₂ O ₃ doaped UO ₂ 燃料を積載したCr-coated M5®被覆管を装荷予定。冷却水ループを稼働させながら中性子を照射させる。
HFIR at ORNL	Framatome GNF	米国のORNLが所有するHFIR炉に対してCr-coated M5®被覆管とARMOR coated Zircaloy-2被覆管を装荷予定。



図3 Hatch 発電所における ATF 試験燃料体の装荷の様子 (NRC web サイトから) [7]



図4 Vogtle 発電所における試験燃料集合体の装荷の様子 (Southern Nuclear web サイトから) [8]

5. ATF に関する米国の法規制

米国における燃料に関する規制要件として、米国連邦規則 (Code of Federal Regulation: CFR) 10 CFR 50.46 「軽水炉の非常用炉心冷却系の許容基準」がある [9]。当然ながら ATF もこの規則に準ずる必要がある。

一方で、10 CFR 50.46 は燃料被覆管の材料を Zircaloy もしくは ZIRLO® のみに、燃料ペレットの材料を UO_2 のみに制限しており、他の材料の使用の一切を認めていない。米国連邦規則 10 CFR 50.12 にて規定されている

免除申請事項を適用すれば例外的に使用することは可能であるが [10]、一般的には現状の規則において ATF を商用炉に適用するのは不可能である。

この 10 CFR 50.46 であるが、現在改定に向けて議論されている。NRC の原子炉安全諮問委員会 (Advisory Committee on Reactor Safeguards: ACRS)、NRC スタッフ、そして産業界は規則改定案について議論を行い、2016 年 3 月 16 日付けの報告書 (SECY-16-0033) にて 10 CFR 50.46c の最終規則案を NRC に提出した [11]。この規則案は、従来規則の「Zircaloy または ZIRLO® 製円筒形被覆管内の酸化ウラン・ペレット」という規定を削除することを提案していて、現在 NRC の承認待ち状態にある。

また、NRC は近年 ATF の開発が活況を呈しているのを考慮し、2017 年 12 月 21 日に ATF の認可、規制のために必要となる活動の計画を示したプロジェクトプラン案を官報 (82FR60633) でコメントを求めて公表した [12]。さらに、2018 年 4 月 12 日に NRC スタッフと産業界が ATF について NRC に説明するためのブリーフィングが開催された [3]。ブリーフィングには NRC スタッフ、連邦エネルギー省 (Department of Energy: DOE)、Southern 社、電力研究所 (Electric Power Research Institute: EPRI)、及び憂慮する科学者同盟 (Union of Concerned Scientists: UCS) が参加し、ATF の実用化に向けて様々な議論が交わされた。

このように、米国では規制機関も含めて ATF の実用化に向けた様々な取り組みが行われている。

6. ATF の課題 [4]

米国では ATF の実用化に向けた開発や試験が進むにつれていくつかの問題が明らかとなった。特に現在精力的に研究開発が進められている Cr-coated ATF に関しては次の技術的な問題が指摘されている。

・ Cr-Zr 合金の溶融挙動

Cr-coated ATF の温度が 1332°C を超えたとき、局所的な溶融が確認された。この溶融による被覆管全体への影響は今のところ確認されていないが、今後も 1332°C 以上における材料の挙動に注意を払うべきである。

・ LOCA 時における ATF の脆化挙動

クエンチ後延性 (Post Quenching Ductility: PQD) 評価の結果、Cr-coated ATF は従来の被覆管と比べて材料が脆化するまでの時間と温度の余裕が確認された。ただし、脆化を完全に防げるわけではなく、むしろ従来の被覆管

材料には見られなかった脆化挙動が報告されている。こちらの原因は依然明らかとなっていない。

・Cr コーティング上に発生するクラック

Cr-coated ATF に対して 4% の歪みを加えると Cr コーティング上にクラックが発生することが確認されている。通常運転時では問題が無いものの、仮に LOCA 時において燃料棒にバルーニングが発生した場合 10 ~ 50 % の歪みが燃料被覆管に加えられることが予想されている。この時の Cr コーティングの状態の検証が必要になる。

・Cr-coated ATF 被覆管の金属疲労挙動

Cr コーティングを行うことによって従来の材料よりも早く疲労効果が表れることが確認された。コーティングにより材料表面の微構造が変化したことが理由であると考えられている。この疲労挙動の変化が原子炉全体にどれぐらい影響を与えるのか検証しなくては行けない。

上記の他にも、ノルウェーの Halden 炉が 2020 年に停止する影響から、ATF の試験施設が少なくなるという問題や、ATF の輸送に関する規則が不明瞭であり LTA や LTR 挿入の際に問題となることが指摘されている。

7. まとめ

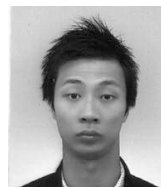
福島第一原子力発電所事故を経て、従来のジルコニウム合金燃料被覆管と UO₂ 燃料に代わる、過酷事故の発生リスクを低減させる ATF のコンセプトが注目を集めている。米国では Westinghouse 社、Framatome 社、GNF 社といった燃料ベンダと Southern Nuclear 社などの電力会社、そして原子力規制機関である NRC が一丸となって ATF の実現に向けて様々な取り組みが行われている。特に 2018 年から 2019 年にかけて LTA や LTR の商用炉への装荷という大規模な試験が開始され、燃料の技術的パラダイムシフトが起きつつある。

参考文献

- [1] U.S. Nuclear Industry Capacity Factors
<https://www.nei.org/resources/statistics/us-nuclear-industry-capacity-factors>
- [2] About NEI
<https://www.nei.org/about-nei>
- [3] Awards
<https://www.nei.org/about-nei/awards>
- [4] PNNL, “Degradation and Failure Phenomena of Accident Tolerant Fuel Concepts, Chromium Coated Zirconium Alloy Cladding,” January 2019.
- [5] Westinghouse EnCore® Fuel
<http://www.westinghousenuclear.com/about/news/features/view/enhancing-safety-the-pursuit-of-accident-tolerant-fuel>
- [6] EATF The Next Evolution of Nuclear Fuel
<https://nextevolutionfuel.com/>
- [7] NRC: Accident Tolerant Fuel
<https://www.nrc.gov/reactors/atf.html>
- [8] Southern Nuclear: Plant Vogtle Unit 2 begins new fuel cycle, installs world’s first complete advanced fuel test assemblies
https://www.southerncompany.com/our-companies/southern-nuclear/southern-nuclear-news-stories/vogtle_atf-190405.html/
- [9] U.S. NRC, 10 CFR 50.46 Definitions
- [10] U.S. NRC, 10 CFR 50.12 Definitions
- [11] SECY-16-0033, “Draft Final Rule – Performance-Based Emergency Core Cooling System Requirements and Related Fuel Cladding Acceptance Criteria,” March 16, 2016
- [12] 82FR60633, “Preparing to License Accident Tolerant Fuel,” December 21, 2017

(2019 年 8 月 1 日)

著者紹介



著者：多原 竜輝
 所属：日本エヌ・ユー・エス株式会社
 エネルギー事業本部
 エネルギー技術ユニット
 専門分野：原子力安全