

新型炉部会セッション

原子カインノベーションを支える最新の新型炉開発の状況

Latest trends of advanced reactor development supporting nuclear innovation

(5) 固有安全性を活用した革新的金属燃料小型ナトリウム冷却高速炉

(5) Innovative Metal Fuel Small Sodium-cooled Fast Reactor with Inherent Safety

*中原 宏尊¹¹日立GEニュークリア・エナジー株式会社

1. はじめに

将来の我が国における高速炉サイクルの実現を目指し、特に革新技術として、金属燃料の固有安全、受動的安全系の採用、乾式再処理と組合わせた高い核不拡散性に注目し、第4世代原子力システムの中でも技術的成熟度が高く、安全性・信頼性を有し、モジュール化による経済性向上、初期投資の抑制を可能とする革新的金属燃料小型ナトリウム冷却高速炉の技術開発を進めている。その開発状況について報告する。

2. 背景と目的

我が国における高速炉開発では、より高い安全性と経済性、資源有効利用、放射性廃棄物対策、核不拡散性に加えて、国際協力による最新知見、開発コスト抑制などが重要となっている。さらに2050年カーボンニュートラルの実現に向けて、原子力は最大限導入される再生可能エネルギーとの共存、熱利用といった多様な社会的要請に応えることが期待されている。一方、米国では、静的安全系を採用して高い安全性・信頼性を有し、モジュール化による経済性向上、初期投資の抑制を可能とする、金属燃料小型高速炉の開発[1][2]が進められており、2020年代後半に高速中性子照射施設の建設を目的とした多目的試験炉（VTR: Versatile Test Reactor）プログラムや、商用を目指した先進的原子炉実証プログラム（ARDP: Advanced Reactor Demonstration Program）における高速炉 NatriumTMの開発が推進されている。

これらの米国プログラムによる高速炉の開発、実機実証を通じて、ナトリウム冷却材によるタンク型炉、金属燃料の採用、受動的安全系の採用、小型モジュール化を特長とした革新技術について技術成熟度（TRL: Technology Readiness Level）のさらなる向上が期待される。日立GEでは、これら革新技術を2040年代に日本に導入することを目的として、高速炉開発ロードマップにおいて示された今世紀後半の高速炉導入に資する効率的な開発を目指している。

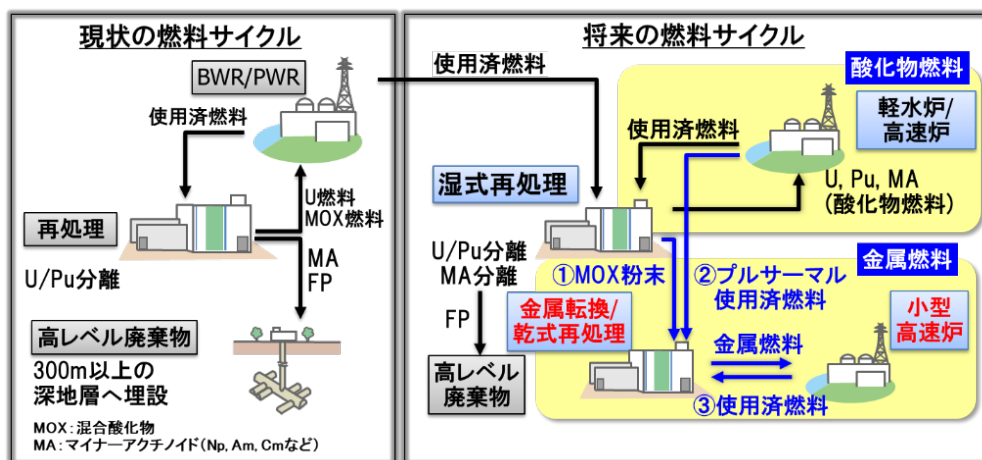


図1 金属燃料高速炉サイクル導入の構想

*Hiroataka Nakahara¹

Hitachi-GE Nuclear Energy, Ltd.

3. 開発技術の概要と国内導入のねらい

金属燃料小型高速炉で開発する技術の特長を示す。冷却材とするナトリウムは、水と比べて沸点が高いため、すべての運転状態において沸騰に対する余裕があり、大気圧に近い圧力での運転を可能とする。また、タンク型原子炉容器中の1次系冷却材ナトリウムは、その大きな熱容量により出力変動に対する冷却材温度変動が比較的小さいという利点がある。

金属燃料（U-Pu-Zr 三元系合金燃料等）の物理的・化学的特性上の特長は、高燃料密度、高熱伝導度、低比熱、高熱膨張率、冷却材であるナトリウムとの良好な共存性である。このため、高い増殖性、高次アクチノイド生成抑制・燃焼特性、冷却材・燃料温度上昇に伴う負の反応度特性を有するほか、燃料ピン内の温度分布が平坦、酸化燃料と比較して定常及び異常時の温度が低い、炉心に蓄えられている熱エネルギーが少ないなど、安全性・経済性上の利点がある。

さらに、事故時に長期間の炉心冷却能力が必要な崩壊熱除去系に採用されている重要な技術である受動的な安全系設備 RVACS（Reactor Vessel Auxiliary Cooling System：原子炉容器補助冷却システム）は、静的な機器のみで構成され、空気の自然循環により電源及び運転操作を必要とせず、高い信頼性を有し、初期投資・運転及び保守費用の抑制を実現している。

図1に我が国における将来の高速炉サイクルへの金属燃料導入の構想を示す。使用済燃料の再処理には電解精製をキー技術とする核不拡散性の高い乾式再処理技術を適用する。高速炉は、高速中性子の利用で燃料となる核分裂性物質を消費しつつ、高い増殖比を達成できるポテンシャルを有し、燃料組成に対して高い柔軟性を有している。将来の燃料サイクルに向けて、金属燃料によるマルチサイクルの他、今後のプルサーマル利用で発生する使用済 MOX 燃料を原料に、金属転換、乾式再処理を経て金属燃料として使用することにより、使用済燃料の蓄積量を削減することが狙える。また、乾式再処理では Pu と MA が同時に回収されるため、金属燃料高速炉と乾式再処理を組み合わせることで高レベル放射性廃棄物の有害度低減が可能となる。

また、NatriumTMでは、ナトリウム冷却高速炉の高温と太陽熱発電利用で知られている熔融塩を使用した蓄熱技術との組み合わせにより、原子炉出力は定格出力を維持したままに、再生可能エネルギーの出力変動を補完する柔軟な出力応答を実現することが提案されており、実用化によって我が国でも機動性の観点から再生可能エネルギーとの共存の実現が期待される。

4. 開発項目

2018年の高速炉開発会議における戦略ロードマップに示された、「高速炉の本格的利用が期待されるタイミングは21世紀後半のいずれかのタイミングとなる可能性」、期待される運転開始は「21世紀半ば頃」、を踏まえて、革新技術の国内実証に向けた初号機を2040年代に導入し、その後に商用炉を段階的に導入することを想定としている。

そこで、建設開始までに詳細設計、許認可の準備を効率的に進めるために、米国最新設計を活用した基本設計、実証試験の実施に向けて、現在、国内導入の概念設計、実証計画の具体化を計画している。国内導入に向けた開発においては日米の知見を活かし、必要とする技術の実現性の把握が重要となる。

表1に、必要と考えられる主要な要素技術の技術成熟度レベル（TRL）評価の概要を示す。総じて評価結果はTRL4(技術の実証段階)以上となっている。システム、機器について、多くは、既設実験炉の実績、実証炉開発の技術を活用できTRL6(技術の実証段階)にあり、TRL6未満には米国で先行する実機建設の実績を開発に活かすなどでTRL6以上への向上に取り組むものとしている。

開発計画の立案に際して、金属燃料に関する高性能化(被覆管の照射・高温耐性向上、MA含有燃料)やシビアアクシデントの安全評価、RVACSの除熱性能、金属燃料サイクル等がTRL6未満となっていることが確認されている。これらから、今後優先して取り組む課題項目として以下と整理している。

- (1) 国内核燃料サイクル政策に整合した再処理、金属燃料及び炉心の成立性、安全性評価と評価手法の開発
- (2) 安全系の崩壊熱除去系となるRVACSの信頼性、安全性評価と評価手法の開発(外部事象を含む)

表 1 主要な要素技術の技術成熟度レベル (TRL) 評価概要(注 1)

項目	要素技術	TRL	備考
安全関連設備	・制御棒駆動機構 CRD 等 CRD、ロッドストップ、USS:Ultimate Shutdown System ・受動的炉停止系 自己作動型炉停止機構 SASS、ガス膨張機構 GEM、固有反応度フィードバック等 ・自然循環崩壊熱除去系 RVACS、蒸気発生器補助冷却系 SG-ACS	5	・反応度制御/能動的安全系は米で TRL6 ・固有/受動的安全性は米で TRL6、但し国内で耐震の炉心拘束は要検討 TRL5 ・崩壊熱除去系は米で TRL5
	・液位保持機能を持たせた格納容器 ・シビアアクシデント対策 (安全解析ツール)	5	・格納機能は米で TRL5 ・安全解析ツールは米で TRL5、但し国内要検証
	・安全関連設備の外部ハザード等対策 ・耐震 (水平免震)	5	・日米で TRL6 だが、サイト条件で設計対応要 ・免震は実証対応要で TRL 5
運転保守	・炉内の検査技術、運転、保守技術	5	・米で TRL5
	・ナトリウム漏えい検知技術	5	・日米で TRL5
炉心燃料	・金属燃料・被覆管・集合体 ・将来の性能向上 (高燃焼度・高被覆管温度、MA 含有燃料)	6~*	・設計技術は TRL6 以上 * 高性能化は国内で TRL5
	・金属燃料炉心設計 ・金属燃料構造設計・評価手法	6~	・国内外知見の蓄積 ・国内燃料挙動解析コード
原子炉構造、冷却材系	・原子炉容器 ・燃料交換機 (炉内燃料移送装置 IVTM)	4	・炉容器は米で TRL5 ・燃料取扱等は米で TRL4
	・ナトリウム冷却材系配管、弁、ポンプ等 ・中間熱交換器 ・蒸気発生器	4	・ポンプは米で TRL4 ・中間熱交換器は米で TRL6 ・蒸気発生器は米で TRL7
原子炉補助施設	・燃料出入機、燃料検査設備、燃料処理設備 ・冷却材純化系	6	・日米で TRL6
計装制御	・炉内計装 ・破損燃料検出設備	5	・炉内計装は米で TRL5
その他 (原子炉本体外)	・原子炉に蓄熱システムを備えた中間熱輸送系を導入したシステム	5	・原子炉との組み合わせの実証なく TRL5
	・乾式再処理および金属燃料製造 ・周辺技術 (前処理、後処理等)	4*	* キー技術は TRL6 ・周辺技術は TRL4~5

TRL 1-2 : 基礎技術の研究段階

TRL 2-3 : 実現可能性を示すための研究段階

TRL 4-5 : 技術の開発段階

TRL 6 : 技術の実証段階

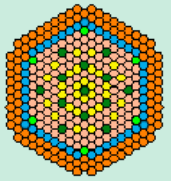
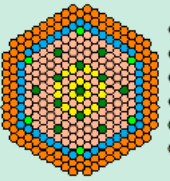
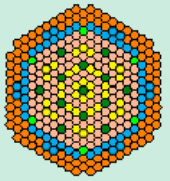
TRL 7-8 : システムの試運転段階

TRL 9 : システムの運転段階

(注 1) 国内評価は文献[3]の金属燃料高速炉特有技術部分、
米国評価は文献[4]の Appendix B Table B-1 を参考とした。

課題項目(1)については、軽水炉から高速炉への段階的な移行を想定し、酸化物燃料サイクルに整合性をもって金属燃料高速炉を導入するシナリオを検討している[5][6]。表2に、国内軽水炉のUO₂使用済燃料を原料とする炉心A、プルサーマルの使用済MOX燃料を原料とする炉心B、マルチリサイクルを想定して使用済金属燃料を原料とする炉心Cのそれぞれについて、炉心特性の評価例を示す。いずれのケースもPuの残存比(燃焼前後のPu量の比率)が1以上となることから、Puの増殖による資源の有効利用が持続可能な見通しを得ている。なお、サイクルの諸量評価によって、すべての軽水炉が高速炉に移行する平衡期までに必要なPu量が使用済燃料から確保できる見通しを得ており、Puバランスの観点で国内導入の成立性を見通しを得た。また、金属燃料の乾式再処理ではPuとMAを同時に回収できる利点があり、さらにPuが単独分離の形で回収されない点で核不拡散性も高い手法である。今後、MA燃焼も含め、高レベル放射性廃棄物の有害度低減及び廃棄物減容の効果についても評価することを検討していく。

表2 国内燃料組成に基づく炉心解析評価例

	炉心A	炉心B	炉心C
炉心構成	 <ul style="list-style-type: none"> ● 炉心燃料 120体 ● 内部ブランケット 30体 ● 径方向ブランケット 46体 ● 制御棒等 13体 ● GEM※ 6体 ● 反射体+遮蔽体 177体 <p>※GEM: ガス隔壁モジュール</p>	 <ul style="list-style-type: none"> ● 炉心燃料 132体 ● 内部ブランケット 18体 ● 径方向ブランケット 45体 ● 制御棒等 13体 ● GEM※ 6体 ● 反射体+遮蔽体 177体 	 <ul style="list-style-type: none"> ● 炉心燃料 114体 ● 内部ブランケット 36体 ● 径方向ブランケット 54体 ● 制御棒等 13体 ● GEM※ 6体 ● 反射体+遮蔽体 168体
導入時期	導入初期(2040年)～	移行期前期(2060年)～	移行期後期(2090年)～ 平衡期～
燃料体数	炉心燃料:120体 内部ブランケット:30体 径方向ブランケット:45体	炉心燃料:132体 内部ブランケット:18体 径方向ブランケット:45体	炉心燃料:114体 内部ブランケット:36体 径方向ブランケット:54体
装荷燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・MOX粉末※由来 (※UO₂-SFの再処理回収物) ・Pu中のPuf含有率:62% 	<ul style="list-style-type: none"> ・プルサーマルMOX-SF由来 ・Pu中のPuf含有率:49% 	<ul style="list-style-type: none"> ・金属使用済燃料由来 (マルチリサイクルを想定) ・Pu中のPuf含有率:66～74%
使用済燃料	<ul style="list-style-type: none"> ・Pu残存比:1.06 ・燃焼後のPuf含有率:65.9% 	<ul style="list-style-type: none"> ・Pu残存比:1.01 ・燃焼後のPuf含有率:52.7% 	<ul style="list-style-type: none"> ・Pu残存比:1.13 ・燃焼後のPuf含有率:パラメータ

課題項目(2)については、事故時の想定においても炉心冷却能力を担う崩壊熱除去系に採用されたRVACSの除熱性能に対する信頼性検証のため、適切な裕度を有した設計となることを最新のCFD(数値流体力学)による伝熱流動解析を用いて確認することを進めている[7]。これまでに原子炉容器外側の空気系流路と内側の一次冷却材(ナトリウム)流路を組合せた3次元解析モデルを構築し、空気とナトリウムの自然循環を同時に計算できることを確認している。これにより、RVACSの熱流動定常解析による除熱性能を確認し、感度解析により除熱性能への影響因子の抽出を可能とする見通しを得ている。今後、過渡解析や外部事象を含めた影響因子の緩和検討を進めることにより、実証試験の合理化を含め、固有安全性に係る設計裕度評価を検討していく。

5. まとめ

固有安全性を活用する革新技術を採用した金属燃料小型高速炉は米国での開発、実機計画が進んでおり、2020年代後半には建設、運開が期待され、高い実機実証のポテンシャルを持つ革新的原子炉の一つである。国内の核燃料サイクル政策に整合した金属燃料高速炉サイクルの成立性、受動的安全系の信頼性について国内導入へ適合できる見通しを得たことにより、これら革新技術に基づき、高速炉開発ロードマップにおいて

示された今世紀後半の高速炉導入に資する開発を進めていく。

本報告は、経済産業省からの補助事業である「令和2年度 社会的要請に応える革新的な原子力技術開発支援事業」の一環として実施した成果を含む。

参考文献

- [1] B. Triplett, et al., Nuclear Technology, 175, 5, (2012).
- [2] A. Dubberley, et al., Proceedings of ICONE 8, 8002, (2000/4).
- [3] 「高速炉開発会議 戦略ワーキンググループ（第10回）」資料4, (2018/6).
- [4] “Advanced Demonstration and Test Reactor Options Study”, (ANL, INL, ORNL, January 2017) Appendix B Table B-1 Technology readiness levels for each system and subsystem for reactor deployment.
- [5] 渡邊他, 原子力学会 2020年秋の大会, 2I09 (2020).
- [6] 藤村他, 原子力学会 2020年秋の大会, 2I11 (2020).
- [7] 阿部他, 原子力学会 2020年秋の大会, 2I12 (2020).