

環境負荷低減型軽水炉を使った核燃料サイクル概念の構築

(受託者) 東芝エネルギーシステムズ株式会社

(研究代表者) 平岩宏司 原子力安全システム設計部

(再委託先) 国立大学法人大阪大学、国立大学法人東京工業大学

(研究期間) 平成28年度～31年度

1. 研究の背景とねらい

我が国では軽水炉が数十年運転されてきた結果、使用済み燃料が蓄積されつつある。これらの再処理により発生する高レベル放射性廃棄物(ガラス固化体)の物量抑制、高レベル放射性廃棄物に含まれる核分裂生成物とマイナーアクチニドによる潜在的な放射性有害度低減、プルトニウム蓄積抑制の必要性が認識されるようになっており、

これらを背景に分離変換技術の開発が進められている。一方、軽水炉でのこれらの問題に対する検討は低減速型軽水炉を除くとほとんど検討されてきていなかった。実用化が停滞している高速炉や実用化までに多くの技術開発が必要な加速器や低減速軽水炉では有害度低減実現までには相当長い期間を要し、分離変換システムの建設で莫大なコストが想定されることも大きな問題である。そこで本研究では上記課題を解決するために図1に示すように軽水炉技術を発展させた環境負荷低減型軽水炉の検討を進めその炉を中心に用いた核燃料サイクルを想定し、高レベル放射性廃棄物や潜在的有害度の生成を抑制できる軽水炉の研究開発を進めることとしている。

そのため本プロジェクトでは以下を具体的な目標として研究開発を進めている。

- ① 軽水炉から生成する廃棄物量、有害度のもとになる超ウラン元素とプルトニウムの蓄積を低減できる軽水炉のあるべき仕様と特性を明らかにすること
- ② 使用済み燃料に含まれる燃料核分裂生成物の生成評価精度を向上できる理論的な手法を開発すること、
- ③ 燃料へ添加することで超ウラン元素の生成を阻害し、使用済み燃料中の有害度が低減できる物質を明らかにし、燃料仕様に取り込んで燃料仕様へ影響を検討すること
- ④ 超ウラン元素やプルトニウムを減らすことのできる環境負荷低減型軽水炉を用いた場合のプルトニウム蓄積量、有害度、高レベル放射性廃棄物量等のサイクル諸量を環境負荷低減型軽水炉導入シナリオに沿って評価しサイクル全体のコストへの影響も明らかにする

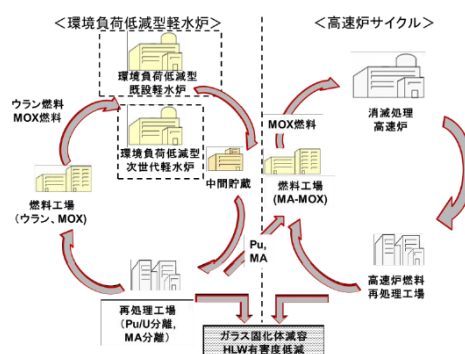


図1 環境負荷低減型軽水炉を適用した核燃料サイクル

2. これまでの研究成果

2.1 評価対象とする軽水炉と実用化想定時期

ここでは環境負荷低減型軽水炉とは表1に示す既設軽水炉と実用化時期の異なる次世代軽水炉において環境負荷低減に資するために導入する炉とし、それぞれウラン炉、MOX炉を想定する。

2.2 軽水炉仕様の検討

ウラン燃料、MOX 燃料を用いた場合の初期ウラン濃縮度（ウラン燃料の場合）、初期プルトニウム富化度（MOX 燃料の場合）、それぞれの燃料を燃焼後に炉から取り出した使用

済み燃料中のウラン濃度、プルトニウム濃度、マイナーアクチニド濃度などを主としてモンテカルロ燃焼コードによる解析で評価した。

表 1 環境負荷低減型軽水炉の定義と想定導入時期

軽水炉の種類	既設軽水炉	次世代軽水炉（第一世代）	次世代軽水炉（第二世代）
実用化時期	稼働中	2030 年	2050 年
ウラン燃料燃焼度	45GWd/t	70GWd/t	70GWd/t 以上
MOX 燃料燃焼度	45GWd/t	70GWd/t	70GWd/t 以上
大型燃料使用	なし	効果あれば採用	効果あれば採用
MA 添加 MOX 使用	なし	なし	あり

(1) 既設軽水炉

既設軽水炉として燃焼度が 45GWd/t で 9x9 燃料とした場合について、ウラン燃料および MOX 燃料の炉心を対象に燃料集合体の水素対重金属比を増加するケース（燃料棒細径化、ウォーターロッド置換、低密度ペレットなど）、燃料棒の仕様を変えて共鳴吸収を減らすケース（水素対重金属比一定で燃料棒を太径化）、濃縮度 5wt%未満の範囲でウラン濃縮度を増加して意図的に残留させて TRU 高次化を抑制するケース、炉の運転条件を変えるケース（炉心流量は最大に維持）について評価した。

またウラン炉心の検討結果から、有望概念と考えられた FORSETI 型（後述）軽水炉のウラン炉心について詳細な結果をまとめた。

(a) ウラン炉心全般

効果の顕著な代表的な結果を基準ケースと比較した結果を図 2 に示す。

燃料集合体の水素対重金属比を増加するケースはいずれも環境負荷低減に関する指標の減少効果が基準ケースよりも大きく、そのうち燃料棒細径化方式が ^{241}Am （発熱が長期に持続するためガラス固化体容積指標）、TRU、MA、有害度ともに低減効果が大きいことが示され、環境負荷低減型軽水炉の燃料仕様として望ましい方向と言える。

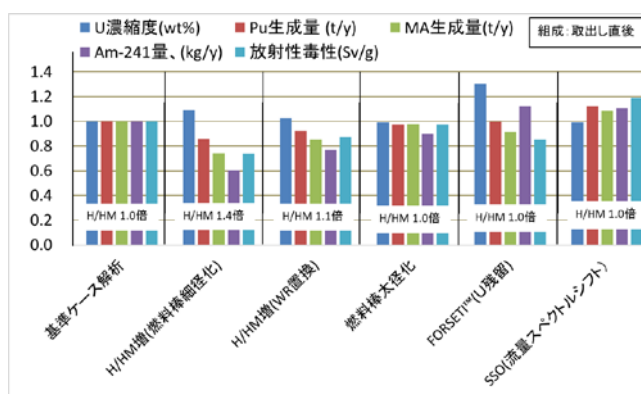


図 2 環境負荷低減型軽水炉（既設炉ウラン燃料）の各指標に関する基準ケースに対する変化

ウラン濃縮度を残留させる方式ではマイナーアクチニドを低減させる効果があり特に有害度の大きい ^{244}Cm が減るため有害度全体を低下させる効果大きい。

燃料経済性向上の観点で省ウラン効果を目的に適用されるスペクトルシフト運転は TRU 生成や有害度が増加する結果となりガラス固化体減容や有害度低減の点では望ましくない仕様である。

燃料棒直径増加と温度低減で燃料ペレットの共鳴中性子吸収を低減するケース（水素対重金属比は固定）では、その減少効果は有意ではあるものの数%減程度であり水素対重金属比を増加するケースよりも効果は小さく強いて採用すべき燃料仕様では無いことがわかった。

プラント側の運転条件を変更するケース（流量増加ではボイド率を基準の 40%から 35%に減少さ

せた評価) では水素対重金属比の増加効果が小さく TRU と有害度低減の効果は燃料の水素対重金属比を増加するケースと比べて効果がいずれも小さく、プラント運転条件変更による改善は強い採用すべき仕様ではないことがわかった。

(b) MOX 炉心全般

効果の顕著な代表的な結果を基準ケースと比較した結果を図 3 に示す。

燃料集合体の水素対重金属比を増加するケースではウラン燃料と同様に燃料棒細径化方式が TRU と有害度低減の感度が大きい結果である。MOX 燃料では水素対重金属比を増加することで投入した全 Pu に対する全 Pu 消費割合が大きくなり、²⁴¹Am、TRU 消費量、有害度も改善されることから MOX 燃料で水素対重金属比を増加 (高減速化) することは燃料仕様として望ましい方向と考えられた。

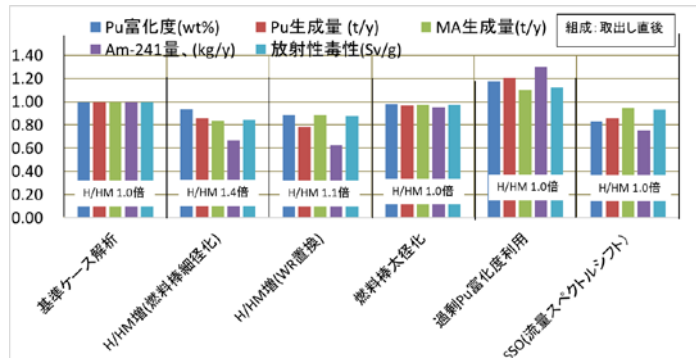


図 3 環境負荷低減型軽水炉 (既設炉 MOX 燃料) の各指標に関する基準ケースに対する変化

スペクトルシフト運転はプルトニウムの生成を抑制できるためウラン炉と逆に ²⁴¹Am、TRU 生成や有害度が低減できる。MOX 炉ではスペクトルシフト運転は望ましい燃料仕様と考えられた。

(c) FORSETI™型ウラン軽水炉

FORSETI™ は Fuel cycle Of light-water-Reactor with Surplus Enriched uranium for TRU-production_Inhibition の略で TRU 生成抑制の為の過剰濃度の濃縮ウランを用いた軽水炉の意味である。表 2 に燃焼度を基準(45GWd/t)から変えずにウラン濃縮度を 10wt%とした結果を示す。

表 2 FORSETI™型軽水炉の結果まとめ

燃料形式: 9x9 BWR UO₂ (ABWR, H/HM=4.6, 平均取出燃焼度45GWd/t)

カテゴリ	核種	新燃料 FORSETI vs 基準 (wt%)	使用済み燃料 FORSETI vs 基準 (wt%) or (Sv/g)	備考
U	²³⁵ U	FORSETI-基準 =10.0-3.8=6.2	FORSETI-基準 =5.18-0.57=4.61	初期と取出し時のウラン ²³⁵ 濃度増加
Pu	total Pu	-	FORSETI/基準 =0.87/0.90=0.97	プルトニウム生成量の低減
MA	全 MA核種	-	FORSETI/基準 =6.5e-2/8.5e-2 =0.76	MA生成量の低減
残留核分裂性核種	²³⁵ U+ ^{fi} ssilePu	-	FORSETI-基準 =5.87-1.12=4.75	核分裂性核種残留 増加 (MOXペレット用)
TRU中の放射性毒性	Pu+MA	-	FORSETI/基準 =50.4/93.7 =0.54 <Sv/g>	放射性毒性生成量の低減
HLW中の長期発熱源	²⁴¹ Pu+ ²⁴¹ Am	-	FORSETI/基準 =9.52e-4/1.26e-3 =0.76	ガラス固化体発生量の低減

ウラン濃縮度を燃焼度に必要な濃度以上に添加することで、マイナーアクチニド、TRU 中の放

放射性毒性、使用済み燃料中の長期発熱源(^{241}Pu 、 ^{241}Am の合計)をいずれも大きく低減でき、環境負荷低減型軽水炉に適した燃料仕様であることがわかった。また、残留する核分裂性核種濃度は増大となる。MOX 炉の検討結果からこの残留組成を MOX 燃料に適用することで MOX 燃料のプルトニウム富化度を低減でき、各指標を改善できる可能性があることもわかった。

以上のように FORSETI では燃料集合体や炉心、プラントは全く変更せずにウラン濃縮度のみを増加することでウラン炉、MOX 炉の両方で環境負荷低減に関する指標の改善ができる可能性があり、同様に指標の改善が期待される高減速型軽水炉と合わせて今後も検討を継続する。

(2)次世代軽水炉（第一世代、第二世代）

次世代軽水炉として燃焼度を 70GWd/t まで増大させた場合の次世代軽水炉（第一世代）およびそれ以上の燃焼度とした場合の次世代軽水炉（第二世代）のウラン炉心、MOX 炉心についても同様の評価を行い、既設軽水炉の場合と同じ指標について評価した。

既設軽水炉での評価と異なる点は、大型燃料や高いウラン濃縮度やプルトニウム富化度の場合、出力密度増大の場合など対象に評価を行ったことである。有害度等への高減速化などによる影響は濃縮度やプルトニウム富化度の影響により程度の差はあるものの、既設炉で得たものと同様な効果が得られることを確認した。

2.2 軽水炉仕様への影響検討

(1)毒物(中性子吸収材)の添加による有害度低減

毒物(中性子吸収材)の添加による有害度低減に関する検討においては、毒物として、主要なランタノイド、中性子吸収材となる B、Cd、In、Ta、W、さらに MA である Np、Am の各核種を調査対象とした。これらの調査により、有害度低減に効果がある可能性のある核種が明らかになった。

(2)核分裂 FP イールド由来の有害度評価精度向上研究

核分裂収率（独立収率、累積収率）の実験データベースのサーベイ、および評価に利用可能な最新の核分裂理論コードの調査・収集を行った。核分裂収率（独立収率、累積収率）の実験データベースのサーベイを行ってその中から評価に利用可能な実験データの収集と核分裂理論コードの調査・収集を行った。その結果に基づいて ^{235}U と ^{239}Pu の熱中性子核分裂からの独立収率の評価を開始した。

3. 今後の研究（継続課題の場合）

本年度の検討により、軽水炉仕様の検討においてはウラン燃料、MOX 燃料ともにガラス固化体量、TRU 量、有害度の各指標の低減について有意な効果が期待できるあるべき燃料仕様や炉心仕様の方向性がほぼ明らかになった。

軽水炉仕様への影響検討においては有害度低減効果の可能性のある核種の抽出ができた。また核分裂生成物の核分裂収率評価精度の向上に資すると考えられる実験データの収集と核分裂理論コードの調査・収集ができた。

来年度はこれらの成果を基に軽水炉仕様の検討および軽水炉仕様への影響検討についてさらに定量的に評価を進めるとともに燃料サイクル諸量や燃料サイクル全体の経済性へ影響する事項の定量評価のための準備を進める計画である。