

令和元年度

文部科学省 国家課題対応型研究開発推進事業

原子力システム研究開発事業

高速炉を活用した
LLFP核変換システムの研究開発

成果報告書

令和2年3月

国立大学法人 東京工業大学

本報告書は、文部科学省の原子力システム
研究開発事業による委託業務として、国立大
学法人 東京工業大学が実施した平成 28 年度
－令和元年度「高速炉を活用した LLFP 核変換
システムの研究開発」の成果を取りまとめた
ものです。

目次

概略	x
1. はじめに	1-1
2. 業務計画	
2.1 全体計画	2.1-1
2.2 各年度計画	2.2-1
3. 実施内容および成果	
3.1 LLFP 核データの収集・評価	3.1-1
3.1.1 LLFP 核分裂収率に関わる研究【H28-H29】	3.1-1
3.1.2 LLFP 中性子核データの評価検討【H30-R1】	3.1-1
3.1.3 LLFP 中性子核データの評価検討【R1】	3.1-2
3.2 核変換ターゲットの材質、構造、配置（再委託先：東北大学）	3.2-1
3.2.1 材質・添加剤の検討【H28-H29】	3.2-1
3.2.2 材質・配置の検討【H28-H29】	3.2-2
3.3 高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換法（再委託先：東北大学）	3.3-1
3.3.1 配置、交換法の検討【H29-R1】	3.3-1
3.4 LLFP 炉心ターゲットを含む高速炉の炉心特性	3.4-1
3.4.1 炉心特性（再委託先：東京都市大学）【H28-R1】	3.4-1
3.4.2 熱特性（東京工業大学）【H29-R1】	3.4-26
3.4.3 安全性（再委託先：東京都市大学）【H29-R1】	3.4-36
3.5 核変換ターゲット集合体の構造設計（再委託先：東北大学）	3.5-1
3.5.1 集合体構造設計【H30-R1】	3.5-1
3.6 大型高速炉での適用性評価（再委託先：東北大学）	3.6-1
3.6.1 大型炉への適用解析【H30-R1】	3.6-1
3.7 核変換ターゲット構成材料の物性（再委託先：原子力機構）	3.7-1
3.7.1 物性調査・適用性検討【H28】	3.7-1
3.7.2 高温安定性試験【H29】	3.7-1
3.7.3 共存性試験【H30】	3.7-1
3.7.4 強度特性への影響試験【R1】	3.7-1
3.8 核変換ターゲットの製造（再委託先：原子力機構）	3.8-1
3.8.1 LLFP 製造試験【H30】	3.8-1
3.8.2 模擬回収 LLFP 製造試験【R1】	3.8-1
3.9 LLFP 回収技術の検討（再委託先：原子力機構）	3.9-1
3.9.1 手法評価【H28】	3.9-1
3.9.2 炉内回収のロス率評価【H29】	3.9-1

3.9.3	再処理工程からの回収手法の検証【H30】	3.9-1
3.9.4	再処理回収ロス率評価【R1】	3.9-2
3.10	照射試験計画（再委託先：東京都市大学）	3.10-1
3.10.1	照射試験計画の策定【H30-R1】	3.10-1
3.11	社会科学的意義（再委託先：東北大学）	3.11-1
3.11.1	調査・分析・まとめ【H28-R1】	3.11-1
3.12	研究推進	3.12-1
3.12.1	プロジェクトの総合推進【H28-R1】	3.12-1
3.12.2	全体まとめ【H28-R1】	3.12-4
4.	結言	4-1

表一覧

表 3.1.3-1	TMC 法によって得られた核変換率と SF の誤差	3.1-3
表 3.2.1-1	原型炉炉心基本仕様	3.2-4
表 3.2.1-2	評価条件	3.2-5
表 3.2.1-3	LLFP の核変換率 (減速材:YD ₂ (重水素化イットリウム))	3.2-5
表 3.2.1-4	LLFP の核変換率と SF (減速材:YH ₂ (水素化イットリウム))	3.2-5
表 3.2.1-5	各 LLFP の装荷量と核変換量、核変換率 (非均質化 1/2/3 各層 18/12/6 ピン、減速材 YD ₂)	3.2-6
表 3.2.1-6	各 LLFP の装荷量と核変換量、核変換率 (均質混合ペレット)	3.2-6
表 3.2.1-7	減速材材質 (YH ₂) と各 LLFP の装荷量と核変換量、核変換率 (非均質化 1/2/3 各層 18/12/6 ピン)	3.2-7
表 3.2.1-8	LLFP 部ペレット高さ (93cm 時) と各 LLFP の装荷量と核変換量、核変換率 (非均質化 1/2/3 各層 18/12/6 ピン)	3.2-7
表 3.2.1-9	LLFP 部ペレット高さ (183cm 時) と各 LLFP の装荷量と核変換量、核変換率 (非均質化 1/2/3 各層 18/12/6 ピン)	3.2-7
表 3.3.1-1	高核変特性を持つ核変換ターゲット集合体の配置、交換法	3.3-12
表 3.3.1-2	核変換特性の比較	3.3-12
表 3.3.1-3	減速材材質と LLFP 各元素のピンの本数	3.3-12
表 3.3.1-4	核変換特性	3.3-13
表 3.3.1-5	主要核特性	3.3-13
表 3.3.1-6	ボイド反応度とドップラー係数	3.3-13
表 3.3.1-7	3 基炉心システムの核種毎、炉心毎の核変換率と SF (案 1)	3.3-14
表 3.3.1-8	炉心 B での I+YH ピンの I の比率と I、T _c の核変換率の関係	3.3-14
表 3.3.1-9	3 基炉心システムの核種毎、炉心毎の核変換率と SF (案 2)	3.3-15
表 3.3.1-10	¹³⁵ Cs 同位体の装荷量の増加方策とその SF の増加効果	3.3-15
表 3.3.1-11	Cs と Zr の SF の特性	3.3-16
表 3.3.1-12	第 1 層に Cs100%とした場合と Cs70%YD30%の場合の炉心 A の SF と変換率	3.3-16
表 3.3.1-13	第 1 層に Cs100%とした場合と Cs70%YD30%の場合の炉心 A の SF と変換率、 炉心高さ 93cm 部分、各層の数値	3.3-16
表 3.3.1-14	3 基炉心システムの核種毎、炉心毎の核変換率と SF	3.3-17
表 3.3.1-15	3 基炉心システムの炉心毎の増殖比、実行増倍率	3.3-17
表 3.3.1-16	3 基炉心システムの炉心 B の隣接外側燃料の集合体内ピーキング	3.3-17
表 3.3.1-17	3 基炉心システムの炉心部軸方向平均中性子束分布	3.3-18
表 3.3.1-18	4 核種 2 基炉心システムの核変換率と SF	3.3-18
表 3.3.1-19	増殖比	3.3-18
表 3.3.1-20	LLFP3 核種の核変換システムでの核変換率と SF	3.3-19
表 3.3.1-21	LLFP3 核種の核変換システムでの核変換率と SF (Se 集合体 6 体)	3.3-19

表 3.4.1-1	LLFP ターゲット装荷炉心の 2 次元 R-Z 燃焼計算条件	3.4-7
表 3.4.1-2	LLFP ターゲット装荷炉心の 2 次元 R-Z 燃焼計算結果	3.4-8
表 3.4.1-3	LLFP ターゲット装荷炉心の核特性検討条件	3.4-8
表 3.4.1-4	LLFP ターゲット装荷炉心のナトリウムボイド反応度および ドップラー係数	3.4-9
表 3.4.1-5	LLFP ターゲット装荷炉心 (炉心 B) の最大線出力 (BOEC)	3.4-9
表 3.4.1-6	LLFP ターゲット装荷炉心 (炉心 B) の制御棒価値	3.4-10
表 3.4.1-7	LLFP ターゲット装荷炉心 (炉心 B) の炉停止余裕	3.4-10
表 3.4.1-8	最大線出力低減策の得失整理	3.4-11
表 3.4.1-9	LLFP ターゲット装荷炉心 (炉心 B) の 3 次元 TRI-Z 拡散計算結果 燃料ペレット製造密度向上の感度解析	3.4-12
表 3.4.1-10	線出力と燃料中心温度評価結果	3.4-12
付表 3.4.1-1	70 群炉定数ライブラリと 900 群縮約 79 群のエネルギー構造	3.4-19
付表 3.4.1-2	燃料集合体内 LLFP 装荷炉心 (炉心 D) 検討条件	3.4-22
付表 3.4.1-3	LLFP ターゲット装荷炉心の 2 次元 R-Z 拡散燃焼計算および摂動計算結果	3.4-23
表 3.4.3-1	もんじゅの許認可で想定した主に炉心に関する事象	3.4-46
表 3.4.3-2	LLFP ターゲット集合体を起因とした安全性に影響する事象	3.4-47
表 3.4.3-3	主要な高速炉における燃料の破損 (主として運転用燃料)	3.4-48
表 3.4.3-4	LLFP ターゲット燃料ピン内の重水素、水素量	3.4-49
表 3.4.3-5	LLFP ターゲットピン破損 (減速材による流路閉塞) の解析条件	3.4-50
表 3.4.3-6	LLFP ターゲットピン破損 (減速材による流路閉塞) の解析結果	3.4-50
表 3.4.3-7	LLFP ターゲットピン破損 (炉心部への水素、重水素の混入) の解析条件	3.4-51
表 3.4.3-8	LLFP ターゲットピン破損 (炉心部への水素、重水素の混入) の解析結果	3.4-51
表 3.5.1-1	LLFP 集合体出力と冷却材必要流量	3.5-4
表 3.5.1-2	LLFP 集合体出力および隣接集合体のピーキング	3.5-4
表 3.5.1-3	I 装荷ピンの健全性評価条件	3.5-5
表 3.5.1-4	装荷 LLFP の形態 (6 核種 3 炉心システム)	3.5-5
表 3.6.1-1	大型炉の炉心基本仕様	3.6-3
表 3.6.1-2	大型炉の燃料仕様	3.6-3
表 3.6.1-3	大型炉の体積比 (%)	3.6-3
表 3.6.1-4	LLFP 集合体ピン仕様	3.6-4
表 3.6.1-5	核変換率、SF、増殖比	3.6-4
表 3.6.1-6	反応度特性	3.6-4
表 3.7.4-1	LLFP の炉内装荷形態と供試体仕様	3.7-4
表 3.7.4-2	高温保持試験条件	3.7-4
表 3.7.4-3	SUS316 鋼の高温保持試験前後の重量変化	3.7-5
表 3.7.4-4	引張試験条件	3.7-5
表 3.7.4-5	SUS316 鋼の引張試験結果	3.7-6
表 3.8.2-1	Ag 系吸着剤からの回収条件	3.8-6

表 3.8.2-2	I の回収結果	3.8-6
表 3.8.2-3	IH 生成試験条件	3.8-6
表 3.8.2-4	吸着剤からの I の回収結果	3.8-6
表 3.8.2-5	NaI からの IH 生成条件	3.8-7
表 3.8.2-6	NaI からの IH 生成結果	3.8-7
表 3.8.2-7	IH からの BaI ₂ の製造手順	3.8-7
表 3.8.2-8	IH 回収液および BaI ₂ 製造時硝酸溶液中の不純物	3.8-7
表 3.8.2-9	模擬廃液組成	3.8-8
表 3.8.2-10	回収物の成分分析結果	3.8-8
表 3.8.2-11	ろ液、析出物の Cs 分析結果	3.8-9
表 3.8.2-12	CsNO ₃ 含有硝酸溶液による Cs ₂ CO ₃ 製造効率	3.8-9
表 3.8.2-13	LLFP と中性子減速材の混合比	3.8-9
表 3.8.2-14	粒径調節による BaI ₂ と YD ₂ の粒子数比	3.8-10
表 3.8.2-15	Y の重水素化条件	3.8-10
表 3.8.2-16	不活性ガス融解-熱伝導度法による D ₂ 分析結果	3.8-10
表 3.9.4-1	Re に対する抽出および逆抽出条件	3.9-7
表 3.9.4-2	Re 抽出における模擬廃液と逆抽出液の分析結果	3.9-7
表 3.9.4-3	Re 抽出における抽出率および逆抽出率	3.9-8
表 3.9.4-4	Pd に対する抽出および逆抽出条件	3.9-8
表 3.9.4-5	Pd 抽出における模擬廃液と逆抽出液の分析結果	3.9-9
表 3.9.4-6	Pd 抽出における抽出率および逆抽出率	3.9-9
表 3.9.4-7	高速炉における LLFP 生成量	3.9-10
表 3.10.1-1	常陽 Mark-IV 炉心および照射ターゲットの主要パラメータ	3.10-6
表 3.11.4-1	平成 30 年度の段階で導いている「コミュニケーション指針」	3.11-3
表 3.11.5-1	令和元年度のインタビューを通じて得られた知見と「指針」の関係	3.11-4

図一覧

図 2. 1-1	全期間を通じた研究実施計画	2. 1-1
図 2. 1-2	令和元年度研究実施計画図	2. 1-2
図 3. 1. 2-1	^{99}Tc の中性子捕獲断面積の相対標準偏差と相関行列	3. 1-2
図 3. 1. 3-1	T6 と TMC 法の処理流れ	3. 1-4
図 3. 2. 1-1	原型炉炉心径ブランケット領域、遮へい体領域でのイットリウム水素化物 減速材による LLFP 核変換モデル（均質混合ピンの場合）	3. 2-8
図 3. 2. 1-2	原型炉炉心径ブランケット領域でのイットリウム水素化物減速材による LLFP 核変換モデル（減速材/LLFP 非均質化時詳細）	3. 2-9
図 3. 3. 1-1	原型炉サイズの径方向ブランケット領域での MVP 計算モデル	3. 3-20
図 3. 3. 1-2	Cs 核変換ターゲット集合体の装荷層と ^{135}Cs の SF の変化	3. 3-20
図 3. 3. 1-3	原型炉サイズの径方向ブランケット領域での SCALE/XSDRN 計算モデル	3. 3-22
図 3. 3. 1-4	減速材体積比と核変換率（%/年）、サポートファクタ (SF) との関係 (^{79}Se)	3. 3-23
図 3. 3. 1-5	減速材体積比と核変換率（%/年）、出力ピーキング (PK) との関係 (^{79}Se)	3. 3-23
図 3. 3. 1-6	減速材体積比と核変換率（%/年）、サポートファクタ (SF) との関係 (^{99}Tc)	3. 3-24
図 3. 3. 1-7	減速材体積比と核変換率（%/年）、出力ピーキング (PK) との関係 (^{99}Tc)	3. 3-24
図 3. 3. 1-8	減速材体積比と核変換率（%/年）、サポートファクタ (SF) との関係 (^{107}Pd)	3. 3-25
図 3. 3. 1-9	減速材体積比と核変換率（%/年）、出力ピーキング (PK) との関係 (^{107}Pd)	3. 3-25
図 3. 3. 1-10	減速材体積比と核変換率（%/年）、サポートファクタ (SF) との関係 (^{129}I)	3. 3-26
図 3. 3. 1-11	減速材体積比と核変換率（%/年）、出力ピーキング (PK) との関係 (^{129}I)	3. 3-26
図 3. 3. 1-12	減速材中の H 比率と核変換率（%/年）、 出力ピーキング (PK) との関係 (^{99}Tc)	3. 3-27
図 3. 3. 1-13	減速材中の H 比率と核変換率（%/年）、 サポートファクタ (SF) との関係 (^{99}Tc)	3. 3-27
図 3. 3. 1-14	Tc ピンの体積比率と核変換率（%/年）、 出力ピーキング (PK) との関係 (^{129}I)	3. 3-28
図 3. 3. 1-15	Tc ピンの体積比率と核変換率（%/年）、 サポートファクタ (SF) との関係 (^{129}I)	3. 3-28
図 3. 3. 1-16	減速材体積比と核変換率（%/年）、 サポートファクタ (SF) との関係 (^{93}Zr)	3. 3-29
図 3. 3. 1-17	減速材 (YD_2) 体積比と核変換率（%/年）、 サポートファクタ (SF) との関係 (^{93}Zr)	3. 3-29
図 3. 3. 1-18	減速材 (YH_2) 体積比と核変換率（%/年）、 サポートファクタ (SF) との関係 (^{93}Zr)	3. 3-29
図 3. 3. 1-19	減速材体積比と核変換率（%/年）、 サポートファクタ (SF) との関係 (^{135}Cs)	3. 3-30
図 3. 3. 1-20	減速材体積比と核変換率（%/年）、 サポートファクタ (SF) との関係 (^{135}Cs)	3. 3-30

図 3.3.1-21	ターゲット集合体のターゲットピン配置	3.3-31
図 3.3.1-22	外側炉心第二層の燃料集合体のピン毎のピーキング係数	3.3-32
図 3.3.1-23	LLFP 配置	3.3-33
図 3.3.1-24	各領域の LLFP 装荷集合体	3.3-34
図 3.3.1-25	径方向出力分布の比較	3.3-35
図 3.3.1-26	高速炉核変換システム 案 1	3.3-36
図 3.3.1-27	BaI ₂ ピンの BaI ₂ 比率と核変換率および SF の関係	3.3-37
図 3.3.1-28	高速炉核変換システム LLFP 配置 案 2	3.3-38
図 3.3.1-29	20 年冷却と 100 年冷却の Cs 同位体の比率	3.3-39
図 3.3.1-30	RB 第 1 層の減速材装荷の有無による Cs 装荷各層での核変換率、SF、 中性子束の挙動	3.3-40
図 3.3.1-31	下部軸ブランケット体積比と Zr の FS の関係	3.3-41
図 3.3.1-32	下部ブランケットへの Zr の装荷方法	3.3-41
図 3.3.1-33	高速炉核変換システム LLFP 配置	3.3-42
図 3.3.1-34	炉心 A、B、C の炉心部軸方向平均中性子束分布	3.3-43
図 3.3.1-35	LLFP4 核種を装荷した 2 つの炉心を組み合わせた核変換システム	3.3-44
図 3.3.1-36	地層処分への被ばく量の核種の寄与	3.3-45
図 3.3.1-37	LLFP3 核種を装荷した 2 つの炉心を組み合わせた核変換システム	3.3-46
図 3.3.1-38	LLFP3 核種を装荷した 2 つの炉心を組み合わせた核変換システム (⁷⁹ Se 集合体本数増加)	3.3-44
図 3.4.1-1	LLFP ターゲット装荷炉心の構成	3.4-13
図 3.4.1-2	燃焼計算のモデル (炉心 B)	3.4-13
図 3.4.1-3	2 次元 R-Z 体系で計算した BOEC における燃料領域の出力分布 (炉心 B)	3.4-14
図 3.4.1-4	炉心 B の出力ピーキング係数 (3 次元 TRI-Z 拡散計算結果) (BOEC)	3.4-15
図 3.4.1-5	炉心 B のピーク集合体内の最大線出力 (3 次元 TRI-Z 拡散計算結果) (想定サイクル数 : 13)	3.4-16
図 3.4.1-6	制御棒位置	3.4-17
図 3.4.1-7	定格時の最大線出力と過出力時の燃料最高温度の関係 (中実燃料ペレット)	3.4-18
図 3.4.1-8	定格時の最大線出力と過出力時の燃料最高温度の関係 (中空燃料ペレット)	3.4-18
付図 3.4.1-1	燃料集合体中に配置した LLFP ピンの位置 (炉心 D)	3.4-24
付図 3.4.1-2	燃料集合体の実効断面積を計算する際の多重リングモデル (炉心 D)	3.4-24
付図 3.4.1-3	燃焼計算における 2 次元 R-Z 炉心モデル (炉心 D)	3.4-25
図 3.4.2-1	高速炉核変換システム B	3.4-27
図 3.4.2-2	RELAP5-30 による解析対象高速炉核変換炉心の解析モデル	3.4-30
図 3.4.2-3	「もんじゅ」タービントリップ試験時の炉心出口温度と解析結果	3.4-30
図 3.4.2-4	燃料部のモデルと LLFP 集合体のモデル	3.4-31
図 3.4.2-5	第 9 リングの LLFP 集合体出力分布	3.4-31

図 3.4.2-6	炉心全体の集合体出力の比較	3.4-33
図 3.4.2-7	炉心全体の集合体流量比較	3.4-33
図 3.4.2-8	炉心全体のピーキングを考慮した被覆管温度評価	3.4-34
図 3.4.2-9	出力誤差 1.02 を考慮した YH ₂ -BaI ₂ ピンの中心温度	3.4-34
図 3.4.3-1	LLFP ターゲットピン移動の解析モデル	3.4-52
図 3.4.3-2	LLFP ターゲットピン移動による燃料ピンのピーキング係数解析結果	3.4-52
図 3.4.3-3	LLFP ターゲットピン破損時の減速材の挙動	3.4-53
図 3.4.3-4	LLFP ターゲットピンの破損（減速材による流路閉塞）の解析モデル	3.4-54
図 3.4.3-5	LLFP ターゲットピンの破損（減速材による流路閉塞）の解析結果	3.4-55
図 3.4.3-6	もんじゅの破損燃料検出系	3.4-56
図 3.4.3-7	もんじゅのタギング法破損燃料検出装置の概要	3.4-56
図 3.4.3-8	レーザー共鳴イオン化質量分析法（RIMS）の概要	3.4-57
図 3.4.3-9	もんじゅへの RIMS の導入方法（提案）	3.4-57
図 3.4.3-10	希釈ガスを用いた RIMS の検出性能の確認	3.4-58
図 3.4.3-11	常陽の Na シッピング法破損燃料検出装置	3.4-58
図 3.5.1-1	(I+YH ₂ 、Tc) 集合体内発熱分布	3.5-6
図 3.5.1-2	YH90I10 の径方向出力分布	3.5-6
図 3.5.1-3	ペレット中心温度のヨウ素核変換率の依存性	3.5-7
図 3.5.1-4	ヨウ素核変換率と CDF、プレナム圧力 初期加圧を行わない場合 (初期圧力 \sim 3kg/cm ²) CDF=0.5 核変換率 24.0%	3.5-7
図 3.5.1-5	ヨウ素核変換率と CDF、プレナム圧力 (初期加圧 20kg/cm ²) CDF=0.5 核変換率 21.5%	3.5-8
図 3.5.1-6	ヨウ素核変換率と CDF、プレナム圧力 (初期加圧 30kg/cm ²) CDF=0.5 核変換率 20.0%	3.5-8
図 3.5.1-7	炉心燃料集合体 (炉心 A、B、C 共通)	3.5-9
図 3.5.1-8	炉心 A 径ブランケット第 1 層装荷用 Cs 集合体	3.5-10
図 3.5.1-9	Cs 装荷集合体 (炉心 A、炉心 B、炉心 C 共通 径ブランケット第 2 層 \sim 遮蔽体第 4 層)	3.5-11
図 3.5.1-10	炉心 B 径ブランケット第 1 層装荷 (I+YH ₂)、Tc 装荷集合体	3.5-12
図 3.5.1-11	炉心 C 径ブランケット第 1 層装荷 Pd+YD ₂ 装荷集合体	3.5-13
図 3.5.1-12	炉心 C 径ブランケット第 1 層装荷 Se+YD ₂ 装荷集合体	3.5-14
図 3.6.1-1	大型炉心の炉心配置図	3.6-5
図 3.6.1-2	ターゲット集合体の構造図	3.6-6
図 3.6.1-3	R-Z 体系計算モデル	3.6-7
図 3.6.1-4	大型炉と高速炉 (原型炉) との核変換率の比較	3.6-8
図 3.6.1-5	大型炉と高速炉 (原型炉) とのサポートファクターの比較	3.6-8
図 3.6.1-6	大型炉と高速炉 (原型炉) との増殖比の比較	3.6-9
図 3.7.4-1	共存性試験装置	3.7-7
図 3.7.4-2	共存性試験装置外観	3.7-7

図 3.7.4-3	SUS316 鋼試験片の高温保持試験前後の外観	3.7-8
図 3.7.4-4	SUS316 鋼試験片の高温保持試験前後の SEM 像	3.7-9
図 3.7.4-5	SUS316 鋼試験片の元素分析結果 (受入材試験片の表面)	3.7-10
図 3.7.4-6	SUS316 鋼試験片の元素分析結果 (ZnSe 試験片の表面)	3.7-10
図 3.7.4-7	SUS316 鋼試験片の元素分析結果 (Zr 試験片の表面)	3.7-11
図 3.7.4-8	SUS316 鋼試験片の元素分析結果 (Pd 試験片の表面)	3.7-11
図 3.7.4-9	SUS316 鋼試験片の元素分析結果 (BaI ₂ 試験片の表面および断面)	3.7-12
図 3.7.4-10	SUS316 鋼試験片の元素分析結果 (Cs ₂ CO ₃ 試験片の表面および断面)	3.7-13
図 3.8.2-1	IH 生成の試験体系	3.8-11
図 3.8.2-2	試験開始時から XRD 供試体までの試料外観	3.8-11
図 3.8.2-3	蒸発乾固体の XRD 結果	3.8-12
図 3.8.2-4	粉末状 YD ₂ の XRD 結果	3.8-12
図 3.8.2-5	細孔付ペレット状 YD ₂ の XRD 結果	3.8-13
図 3.8.2-6	40BaI ₂ -60YD ₂ ターゲット (粉末混合焼結型)	3.8-13
図 3.8.2-7	70Cs ₂ CO ₃ -30YD ₂ ターゲット (粉末混合焼結型)	3.8-14
図 3.8.2-8	Cs ₂ CO ₃ ターゲット	3.8-14
図 3.8.2-9	10BaI ₂ -90YD ₂ ターゲット (混合複合体型)	3.8-14
図 3.8.2-10	10Cs ₂ CO ₃ -90YD ₂ ターゲット (混合複合体型)	3.8-15
図 3.9.4-1	MIDOA の抽出特性	3.9-11
図 3.9.4-2	Re 抽出操作時の外観	3.9-11
図 3.9.4-3	MIDOA による抽出後の分離相	3.9-12
図 3.9.4-4	MIDOA 抽出における逆抽出液	3.9-12
図 3.9.4-5	TDGA の抽出特性	3.9-13
図 3.9.4-6	Pd 抽出操作時の外観	3.9-13
図 3.9.4-7	TDGA による抽出後の分離相	3.9-14
図 3.9.4-8	TDGA 抽出における逆抽出液	3.9-14
図 3.9.4-9	Zr、Tc、I および Cs のマテリアルバランス	3.9-15
図 3.10.1-1	Cs の主な燃焼・崩壊チェーン	3.10-7
図 3.10.1-2	常陽の炉心断面と照射集合体装荷位置	3.10-7
図 3.10.1-3	照射集合体と常陽への炉内装荷位置	3.10-8
図 3.10.1-4	照射集合体装荷位置 (Position-1)	3.10-8
図 3.10.1-5	照射集合体装荷位置 (Position-2)	3.10-9
図 3.10.1-6	FISPACT-II による燃焼計算の流れ	3.10-9
図 3.10.1-7	Position-1 に装荷した照射集合体の燃焼領域	3.10-10
図 3.10.1-8	Position-1 における Cs 同位体の照射日数依存性	3.10-11
図 3.10.1-9	Position-1 における Ba 同位体の照射日数依存性	3.10-11
図 3.10.1-10	¹⁵⁵ Gd および ¹⁵⁷ Gd の原子数密度の照射日数依存性	3.10-12
図 3.10.1-11	照射集合体に隣接する燃料棒の径方向出力ピーキング係数の 照射日数依存性	3.10-12

図 3. 10. 1-12	照射集合体に隣接する燃料棒の軸方向出力ピーキング係数	3. 10-13
図 3. 10. 1-13	ターゲット ($\text{YH}_2+\text{Cs}_2\text{CO}_3$) および減速材 (YH_2) の中性子スペクトル	3. 10-13
図 3. 10. 1-14	ガドリニア棒 (Group-1) の中性子スペクトル	3. 10-13
図 3. 10. 1-15	Position-2 に装荷した照射集合体の燃焼領域	3. 10-14
図 3. 10. 1-16	Position-2 における Cs 同位体の照射日数依存性	3. 10-14
図 3. 10. 1-17	Position-2 における Ba 同位体の照射日数依存性	3. 10-15

略語一覧

BCR	: Backup Control Rod (後備炉停止系・後備炉停止棒)
BOEC	: Beginning Of Equilibrium Cycle (平衡サイクル初期)
CCR	: Coarse Control Rod (主炉停止系・粗調整棒)
CDF	: Cumulative Damage Fraction (累積損傷和)
CG	: Cover Gas (カバーガス)
ENDF	: Evaluated NUclear Data File
EOEC	: End Of Equilibrium Cycle (平衡サイクル末期)
EXFOR	: Experimental Nuclear Reaction Data
FCR	: Fine Control Rod (主炉停止系・微調整棒)
FFD	: Failed Fuel Detection (破損燃料検出装置)
FFDL	: Failed Fuel Detection and Location (破損燃料位置検出装置)
FP	: Fission Product (核分裂生成物)
ICP-MS	: Inductively Coupled Plasma-Mass Spectrometry (誘導結合プラズマ質量分析)
JEFF	: Joint Evaluated Fission and Fusion Nuclear Data Library
JENDL	: Japanese Evaluated Nuclear Data Library
LLFP	: Long-lived fission products (長寿命核分裂生成物)
MA	: Minor Actinide (アクチノイドに属する超ウラン元素のうちプルトニウムを除いたもの)
MVP	: Monte carlo code for Vector Processors (連続エネルギー法に基づく汎用モンテカルロコード)
PGM	: Platinum Group Metals (白金族元素)
PIE	: Post irradiation examination (照射後試験)
RIMS	: Resonance Ionization Mass Spectrometry (レーザー共鳴イオン化質量分析法)
SD	: Smear Density (スミア密度)
SF	: Support factor (サポートファクター)
TDS	: Thermal Desorption Spectroscopy (昇温脱離ガス分析)
XRD	: X-ray Diffraction (エックス線回折)

概略

高速炉を活用する革新的な核変換システム概念を構築し、従来に比べて飛躍的に高い効率を有するLLFP核変換システムを開発する。そのために有害度の高い全てのLLFPに対し、それらを含む新規の減速材入りターゲット要素を開発し、それを用いるシステムの核変換率、炉心核熱特性、安全性の評価、ターゲットの物性測定、製造技術、LLFP回収技術、核データの高精度評価手法等の要素技術開発を遂行し、全体システムの最適化、高速炉での照射試験計画策定を行う。また、実用化段階の大型高速炉に対して、本LLFP核変換システムの適用性を評価する。

このうち、東京工業大学ではプロジェクトの総合的推進およびLLFP核分裂収率・中性子捕獲断面積データの評価、東北大学では核変換ターゲットの材質、構造、配置の解析評価、高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換法の検討、社会科学的意義の検討、東京都市大学ではLLFPターゲットを含む高速炉の炉心特性の解析と照射試験の検討、原子力機構では核変換ターゲット構成材料の物性、ターゲット製造、回収技術の開発を実施する。

令和元年度の成果を以下に示す。

(1) LLFP 核データの収集・評価では、LLFP 核種断面積の共分散ファイルの作成および核変換率の誤差推定を行った。LLFP の 6 核種 ^{129}I 、 ^{99}Tc 、 ^{79}Se 、 ^{107}Pd 、 ^{135}Cs 、 ^{93}Zr の共分散ファイルを作成し、本業務で構築した Total Monte Carlo 法を用いて 3 つの炉心を組み合わせた 6 核種核変換システムにおける中性子捕獲断面積誤差に起因する核変換率の誤差を求め、サポートファクター (SF) の誤差を推定した。

(2) 核変換ターゲットの材質、構造、配置の検討 (再委託先：東北大学) では、LLFP 核種のターゲット集合体 (減速材含む) を、高速炉のブランケット領域および遮蔽体領域に装荷する場合の配置、交換法を検討し、炉心核特性解析を実施し、核変換特性、サポートファクター等との関係を明らかにした。これにより、優れた核変換特性を持つ核変換ターゲット集合体の配置、交換法をまとめた。

LLFP の元素分離での再処理の適合性の点で I、Tc、Se、Pd を別に扱うことを考えて 3 つの炉心 A、B、C を組み合わせた 6 核種核変換システムを検討した。6 核種全て $\text{SF} > 3$ となるシステムを構築でき、かつ ^{129}I 、 ^{99}Tc 、 ^{79}Se 、 ^{107}Pd は 3%/年程度の高い核変換率とすることができた。

6 核種の 3 基炉心から ^{135}Cs と ^{93}Zr を除く 4 核種とすると $\text{SF} > 3$ でかつ増殖比 1 を確保する持続性のある高速炉核変換システムを構築することができた。

I と Se は地層処分での被ばくの支配核種であることを鑑み、Pd を除く I、Tc、Se の 3 核種に対し 1 炉心で 3 核種それぞれ $\text{SF} > 3$ となる炉心を設定した。本炉心にブランケット有炉心と組み合わせ 2 基組で増殖比を 1 とできる持続性のある高速炉核変換システムを構築できた。

(3) LLFP ターゲットを含む高速炉の炉心特性に関し、①炉心特性 (再委託先：東京都市大学) では、LLFP 核変換の最適化炉心について炉心特性解析評価を行った。LLFP6 核種の核変換を目的とする 3 種類の炉心 A、B、C の炉心特性を評価した。その結果、燃焼反応度と最大線出力は炉心 B が最も高くなったため、代表として炉心 B を対象に炉停止余裕と出力分布、出力ピーキングの評価を行った。炉心 B はもんじゅ炉心と同等の炉停止余裕を有することを確認したが、ブランケットが削除されたため最大線出力は制限値 360 W/cm を超過した。このため、燃料溶融を防止する観

点から対策をまとめ、実施が現実的と考えられる燃料ペレットの高密度化と中空化の効果について検討した。その結果、中空径 1 mm、燃料ペレットの製造密度を 90%TD とすることで過出力状態を考慮しても燃料溶融を防止できる見込みが得られた。

また②熱特性では、LLFP 核変換炉体系における冷却材流量配分を決定し LLFP ターゲットの熱的健全性を評価した。LLFP 集合体の配置が適切になったことにより、炉心入口流動抵抗を変更することなくブランケットを LLFP 集合体で置き換えて照射しても駆動炉心の健全性には問題を生じないことが明確になった。一方、第 9 リングに装荷される $\text{YH}_2\text{-BaI}_2$ のピンは、ペレット中心温度がギャップ部のガス組成に左右されるが、初期に 2MPa で封入した He (100 モル%) が、照射で発生した Xe ガスで薄まって約 20%に減少するまでは、温度制限値以内で照射できることが分った。このペレットに最大 1.8 mm の中心孔を設けた場合には、より大きな余裕をもって照射が行える結果になった。

③安全性 (再委託先：東京都市大学) では、最適化炉心についてターゲット集合体ピンの破損を想定し安全性の評価を行った。また、ターゲットピンの破損検出方法概念を検討、提案した。最適化炉心を対象に安全性に影響を与えると考えられる 3 項目 (LLFP ピン内のペレット移動によるサーマルスパイク、減速材による流路閉塞、炉心部への水素・重水素混入) について評価を実施した結果、いずれの事象も燃料ピンの出力は過出力係数 (116 %) 以下であり燃料ピンの健全性は維持されることを確認した。また、もんじゅの破損燃料検出系と常陽に導入が検討されている RIMS を調査し、LLFP ターゲットピンの破損検出方法について検討した。その結果、タグガスの充填範囲を LLFP ターゲット集合体まで拡張し、CG 法 FFD とタギング法 FFDL または RIMS の組み合わせを用いることにより、LLFP ターゲットピンの破損を検知できる見通しが得られた。

(4) 核変換ターゲット集合体の構造設計 (再委託先：東北大学) では、(2) で検討した結果を基にして、LLFP 核種のピン構成、集合体構造の最適化を行った。また、LLFP 核種を装荷したピンの温度評価、ピン圧力評価を行い、健全性を確認した。それぞれの LLFP 元素をいれたペレットを装荷した集合体について、構造はブランケット燃料と同一とするが、複数の炉心を組み合わせた核変換システムで燃料集合体下部ブランケット部と Cs を装荷した集合体は Zr 装荷量を増やすために太径ピンに形状を調整した。また、LLFP 核種を装荷したピンの中でも BaI_2 ピンでは Xe の発生により内圧が発生し、さらにギャップコンダクタンスの低下により温度が上昇し発熱も大きいため温度、内圧、CDF の評価を行った。その結果、初期 He 封入圧を大きくして Xe によるギャップコンダクタンス低下を緩和することで 3 年の燃焼では燃料温度は制限値以下にすることができた。また内圧は 3 年で $100\text{kg}/\text{cm}^2$ 以下であり、CDF も制限目安を十分下回ることから健全性を確認した。

(5) 大型高速炉での適用性評価 (再委託先：東北大学) では、大型高速炉に対して、今まで検討してきた LLFP 変換手法を適用し、核特性、炉心特性、安全性を解析し、大型高速炉での適用性を評価した。原型炉クラスの高速度炉での評価に基づき、 $\text{Tc} + (\text{BaI}_2 + \text{YH}_2)$ の LLFP 集合体を装荷した炉心进行评估した。その結果、増殖比 > 1 、SF > 1 であることを確認した。安全性にかかる反応度係数は、ボイド反応度、ドップラー係数とも LLFP を径ブランケット第 1 層に装荷しても殆ど影響がないことが確認でき、安全性は LLFP 集合体を装荷しない場合と同等であると考えられる。

(6) 核変換ターゲット構成材料の物性 (再委託先：原子力機構) では、SUS316 鋼と Tc を除く 5 種類の LLFP 候補化合物の共存性試験前後の状態において引張試験を実施し、LLFP 核変換ター

ゲット 5 種類の LLFP 候補化合物のうち ZnSe、Zr、Pd と共存性試験を行った試験片には変色が認められたものの強度特性に大きな変化は無かった。また、BaI₂、Cs₂CO₃ と共存性試験を行った試験片では、変色とともに試験片表面の変質が認められ、一様伸びや全伸びがやや低下したが、引張強度や 0.2%耐力には大きな低下は認められなかった。これらの結果から、各 LLFP 候補化合物が被覆管材料の強度特性に及ぼす影響は大きくないことが明らかとなった。ターゲットの候補形態が被覆管材料の強度特性に及ぼす影響を評価した。

(7) 核変換ターゲットの製造（再委託先：原子力機構）では、ヨウ素およびセシウムについて、再処理工程を模擬したプロセスから回収しそれぞれを用いて核変換ターゲット用の候補化合物（BaI₂、Cs₂CO₃）を製造した。各候補化合物の構造解析と不純物分析を行い、それら候補化合物の特性を明らかにした。また、重水素化物を減速材とし非放射性的の LLFP 元素からなる模擬 LLFP ターゲットを試作し、製造性を明らかにした。試作する模擬 LLFP ターゲットは平成 30 年度までに検討した粉末混合焼結型と混合複合体型の 2 種類とした。

Ag 系吸着剤からの回収ヨウ素を用いた BaI₂ 製造からは、主に Al、Si が不純物として随伴するとともに、ヨウ化水素製作過程が BaI₂ の製造上で重要なポイントになることが明らかになった。一方、模擬放射性廃液から抽出したセシウムを用いた Cs₂CO₃ 製造では、主に Ba が不純物として随伴するが、これは Cs 抽出や Cs₂CO₃ 合成に用いた試薬に由来するものと推測された。

また、粉末状と細孔付ペレット状のイットリウムを重水素化し、BaI₂ および Cs₂CO₃ に対して混合粉末焼結型と混合複合型の LLFP ターゲットが製造可能であることを確認した。重水素化イットリウムと BaI₂ の混合粉末焼結ではそれぞれの粒径調節により従来困難であった混合比でも焼結できる見通しが得られた。これにより、いずれの型でのターゲットについても製造に見通しが得られた。

(8) LLFP 回収技術の検討（再委託先：原子力機構）では、先行研究や文献の調査により 6 種の LLFP の再処理工程からの分離回収におけるロス率を評価した。一部、模擬元素を用いた溶媒抽出実験を実施し、ロス率を実験的に評価した。また、LLFP サイクルに関するマテリアルフローを調査・検討し、再処理工程での分離回収、高速炉による核変換、その後のリサイクルにおけるマテリアルバランスを評価した。

6 種の LLFP のうち、Tc、Pd、Cs については過去の群分離研究の成果から 1~2%程度のロス率と推定された。Se、Zr、I については移行挙動や除去率、吸着率の研究結果等からロス率は 1%程度と推測された。Tc を模擬した Re と Pd の模擬廃液からの溶媒抽出実験からは、それぞれのロス率は約 30%および約 10%と見積もられた。これらのロス率の改善のためには抽出条件の最適化や抽出方法の多段化が必要となることが明らかとなった。

LLFP サイクルにおけるマテリアルバランスとして、⁹³Zr、⁹⁹Tc、¹²⁹I および ¹³⁵Cs は一定期間の照射後のリサイクル処理により持続的なサイクルを維持できることが明らかとなった。一方、⁷⁹Se と ¹⁰⁷Pd は同位体が多く元素分離のリサイクル処理ができないが、一定期間炉内装荷することで最大 90%近くまで変換できる見通しが得られた。

(9) 照射試験計画（再委託先：東京都市大学）では、核変換特性、集合体の健全性を確認するために高速炉を用いて核変換ターゲット集合体 1 体を照射する照射試験計画を策定した。

日本原子力研究開発機構の高速実験炉「常陽」を用いて、天然 Cs と減速材（YH₂ または YD₂）からなるターゲット集合体 1 体を照射する核的検討を行うことにより、LLFP 核変換の実証性を示

すための照射集合体および照射場を構成することができた。その結果、照射により生成される LLFP 核種である ^{135}Cs を含む Cs 同位体およびそれらの中性子吸収と崩壊により生じる Ba 同位体の生成量を評価することができた。これらにより、照射後試験で同位体組成が測定されれば積分実験として核変換の実証性を定量的に示すことができる。

(10) 社会科学的意義（再委託先：東北大学）では、LLFP 核変換の社会的受容性に関する説明方法、理解度調査のまとめを行った。原子力について理解のある女性オピニオンリーダー7 名を対象として、説明会を開催し、コメントを受け、それを反映した説明方法をまとめた。

(11) 研究推進に関して、①プロジェクトの総合推進では、本業務全体を適切に遂行するために再委託者との連絡を緊密に取り、さらに定期的な会合を開催することで進捗状況を把握し業務を滞りなく進めた。定期的な会合を開催し再委託先との連絡を緊密に取り、各機関における研究の進捗状況の把握および連携の効率化を図り、成果の出版およびプレスリリースを適宜実施し業務を滞りなく進めた。また②全体まとめでは、平成 28 年度から令和元年度における成果のまとめを行い、報告書類の作成を行った。本プロジェクトにおける研究活動を総括し、結論をまとめ成果報告書の作成を行った。未出版の成果については引き続き論文作成を行っていくこととした。

1. はじめに

使用済み燃料の再処理により発生する廃棄物には、多くの放射性核種が含まれている。そのうち、マイナーアクチノイド(MA)と呼ばれるいくつかのアクチノイド核種と長寿命核分裂生成物(LLFP)は、長寿命の放射性核種であり、特にMAは、バックエンド分野の研究において放射性廃棄物の潜在的毒性の主要因と考えられている。処分場面積の節約には、MAなどの長寿命で発熱性を有する核種を除去することが有効であるとされている。一方、LLFPには、深地層処分後に地下水に溶出し移行しやすい核種があるため、処分場の安全性能(遠い将来の公衆への被ばく線量)やリスク低減の観点から問題とされている。長期間にわたって被ばく線量をもたらすLLFP主要核種として、 ^{99}Tc : 21万年、 ^{129}I : 1570万年、 ^{79}Se : 33万年、 ^{93}Zr : 161万年、 ^{107}Pd : 650万年、 ^{135}Cs : 230万年の6核種の他に ^{126}Sn : 23万年が挙げられる。

将来の原子力エネルギーシステムには、安全性に優れ、放射性廃棄物による環境負荷を効果的に低減し環境と調和する高い性能が求められる。このような放射性廃棄物の処理・処分の分野においてMAを効率的に除去する手法として、MAを化学的に分離し、原子炉内や加速器駆動システムを用いた核変換による低害化(分離・核変換: Partitioning and Transmutation)が検討されてきた。しかしながら、MAの核変換を行っても最終的には大部分が核分裂によりFPに変換され、最終的にLLFPを生じる。このような観点から、MAの核変換とともにLLFPの分離・核変換も重要であると考える。特にLLFPは地層処分後数十万年程度経過後に地表に移動し線量を与える可能性のある主要因であることから、地層処分が社会からの感情的反発を受ける主な原因となっている。

長寿命 LLFP の核変換については、その方策の一つとして、余剰中性子が多い高速炉を利用した核変換システムが有効であり、大幅な有害度低減が期待できる。しかし、これまでの研究における高速炉を用いた LLFP 核変換の課題としては、低い LLFP 核変換率(年間 2~3%、取出し時: 約 11% : ブランケット領域装荷)が挙げられている。また、 ^{79}Se 、 ^{93}Zr 、 ^{107}Pd 、 ^{135}Cs の核変換については、ImPACT プロジェクトで検討されているが加速器が中心で、高速炉での核変換についての研究は行われていなかった。LLFP 核変換は、不確実性を伴う超長期の放射性廃棄物処分リスクを低減し、地層処分の安全性を一般社会に分かり易い形で提示すること、そして原子力の信頼性を取り戻し一層高めるため必要である。

本研究開発では、ナトリウム冷却高速炉を利用することを念頭に、中性子吸収断面積が極端に小さいと推定されている ^{126}Sn 以外の6LLFP核種、すなわち ^{99}Tc 、 ^{129}I 、 ^{79}Se 、 ^{93}Zr 、 ^{107}Pd 、 ^{135}Cs を対象として、従来に比べて飛躍的に高い核変換効率を可能とする減速材を用いた核変換ターゲットを開発し、LLFP核データ評価、核変換特性、高速炉での核変換ターゲット集合体の交換法、高速炉での炉心特性評価、熱特性評価、安全性評価、ターゲットの物性測定評価、製造技術開発、LLFP回収技術開発、核変換ターゲット集合体の構造検討、照射試験計画策定、社会科学的意義の検討等により、実現性の高い高速炉LLFP核変換システムを確立し、放射性廃棄物減容・有害度低減に寄与すること目的とする。

2. 業務計画

2.1 全体計画

本業務の全期間を通じた研究実施計画および令和元年度研究実施計画図を図 2.1-1 および図 2.1-2 に示す。

図 2.1-1 全期間を通じた研究実施計画

年度	平成28年度	平成29年度	平成30年度	令和元年度
項目				
(1) LLFP核データの収集・評価	LLFP収率データの収集	LLFP収率データ評価	LLFP中性子核データ評価検討	LLFP中性子核データ評価検討
(2) 核変換ターゲットの材質、構造、配置 (東北大学)	材質、添加材の検討	材質、配置の検討		
(3) 高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換法 (東北大学)		ブランケット配置検討	高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換	交換法検討
(4) LLFPターゲットを含む高速炉の炉心特性 (京都市大)				
① 炉心特性	基本炉心特性解析	炉心特性解析評価	炉心特性解析評価	最適化炉心の炉心特性解析評価
② 熱特性 (平成30年度より東工大で実施)		熱特性解析	流量配分設定	最適化炉心の熱特性解析
③ 安全性			安全性解析評価	最適化炉心の安全性解析評価
(5) 核変換ターゲット集合体の構造設計 (東北大学)			集合体構造設計評価	集合体構造設計評価
(6) 大型高速炉での適応性評価 (東北大学)			大型高速炉への適用解析	大型高速炉への適用解析評価
(7) 核変換ターゲット構成材料の物性 (原子力機構)	物性調査・適用性検討	高温安定性試験	共存性試験	強度特性への影響試験
(8) 核変換ターゲットの製造 (原子力機構)			LLFP製造試験	模擬回収LLFP製造試験
(9) LLFP回収技術の検討 (原子力機構)	回収試験I(手法評価)	回収試験II(炉内回収のロス率評価)	回収試験III(再処理工程からの回収手法の検証)	回収試験III(再処理回収ロス率の評価)
(10) 照射試験計画 (京都市大)			照射試験計画の策定	集合体照射計画の検討
(11) 社会科学的意義 (東北大学)	予備調査	調査・分析	調査・分析	評価・まとめ
(12) 研究推進				
① プロジェクトの相互推進	プロジェクト推進のための会合	プロジェクト推進のための会合	プロジェクト推進のための会合	プロジェクト推進のための会合
② 全体まとめ	まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価	まとめ・評価

図 2.1-2 令和元年度研究実施計画図

区 分	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3
(1) LLFP核データの収集・評価												
①LLFP中性子核データの評価検討	←											→
(2) 高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換法 (再委託先：東北大学)												
①配置、交換法の検討	←											→
(3) LLFPターゲットを含む高速炉の炉心特性												
①炉心特性（再委託先：東京都市大学）	←											→
②熱特性					←							→
③安全性（再委託先：東京都市大学）		←										→
(4) 核変換ターゲット集合体の構造設計 (再委託先：東北大学)												
①集合体構造設計	←											→
(5) 大型高速炉での適用性評価 (再委託先：東北大学)												
①大型炉への適用解析	←											→
(6) 核変換ターゲット構成材料の物性 (再委託先：原子力機構)												
①強度特性への影響評価試験	←											→
(7) 核変換ターゲットの製造 (再委託先：原子力機構)												
①模擬回収LLFP製造試験	←											→
(8) LLFP回収技術の検討 (再委託先：原子力機構)												
①再処理回収ロス率の評価	←											→
(9) 照射試験計画 (再委託先：東京都市大学)												
①照射試験計画の策定	←											→
(10) 社会科学的意義 (再委託先：東北大学)												
①調査・分析・まとめ	←											→
(11) 研究推進												
①プロジェクトの総合推進	←											→
②全体まとめ												←→

2.2 各年度計画

各年度の計画の概要を下記のような年度毎の項目別の計画概要として記載する。

平成 28 年度の項目別の計画概要は以下のとおり。

(1) LLFP 核データの収集・評価では、実験データベースおよび文献により LLFP の核分裂収率に関するデータを収集し、統計解析および理論解析のためのデータベースを構築する。また評価済み核分裂収率データライブラリーおよび核分裂理論模型を用いる計算値との比較を行う。(2) 核変換ターゲットの材質、構造、配置（再委託先：東北大学）では、「もんじゅ」ブランケット領域を想定して、LLFP または LLFP 化合物と中性子減速材の混合物の組成・混合割合、および LLFP ターゲット集合体のターゲットピン内のペレット部高さおよび減速材配置をパラメータにした核特性解析を実施し、核変換率、核変換量とこれらのパラメータの関係を明らかにする。(3) 「もんじゅ」炉心特性評価（再委託先：東京都市大学）では、核変換ターゲットを装荷した炉心との比較のために「もんじゅ」基準炉心の仕様調査、解析データの整備および炉心特性（反応度係数、出力分布、制御棒反応度等）の解析評価を行う。また、「もんじゅ」ブランケット領域に核変換ターゲット集合体を装荷した場合のターゲット核変換特性（サポートファクター(SF)等）、炉心出力分布の解析評価を行う。(4) 核変換構成材料の物性（再委託先：原子力機構）では、核変換ターゲットの候補となる構成材料について、高速炉の炉内環境や中性子減速材との混合ターゲット製造を考慮した適合性を評価するため、熱伝導度、熱膨張率、融点などの物性とともにも水溶性や酸、アルカリへの可溶性、化学的反応性について、熱力学データベースや文献により調査する。また、一部の特性については簡易的な実験（物性測定試験）により調査する。(5) LLFP 回収技術の検討（再委託先：原子力機構）では、炉内から取り出された照射後ターゲットや使用済み燃料の再処理工程からの LLFP 回収法を確立するため、それぞれにおける核種の存在状態を考慮して最適な回収手法を検討する。再処理工程からの回収については、再処理プロセスや関連先行研究の情報を収集し、これらに基づき最適な回収法を検討する。(6) 社会科学的意義（再委託先：東北大学）では、環境負荷低減の社会的受容性のアンケート調査のための予備検討を行う。(7) 研究推進のうち①プロジェクトの総合推進では、本業務全体を適切に遂行するために再委託者との連絡を緊密に取り、さらに定期的な会合を開催することで進捗状況を把握し事業を滞りなく進める。②全体まとめでは、平成 28 年度における成果のまとめを行い、次年度以降の計画策定への反映と報告書類の作成を行う。

平成 29 年度の項目別の計画概要は以下のとおり。

(1) LLFP 核データの収集・評価では、平成 28 年度に構築した LLFP 核分裂収率データベース、収集した理論模型計算コードおよび評価済み核分裂収率データライブラリーを基に LLFP 領域核の核分裂収率およびその精度評価を行う。(2) 核変換ターゲットの材質、構造、配置（再委託先：東北大学）では、LLFP ターゲット集合体内のターゲットピンおよび減速材のみのピンの本数およびピン配置をパラメータにした炉心解析をモンテカルロコード MVP にて実施し、核変換効果とこれらのパラメータの関係を明らかにする。(3) 高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換法（再委託先：東北大学）では、径ブランケット領域の各層に対し、LLFP を含むターゲット集合体、減速材物質のみの減速材集合体、径ブランケット燃料集合体の 3 種類の集合体の組み合わせを変化させた各種配置に対し、炉心特性解析を実施し、核変換特性、増殖性、出力分布等とブランケット配置の関係を明らかにし、適切なブランケット領域の集合体配置を選定す

る。(4) LLFP ターゲットを含む高速炉の炉心特性のうち①炉心特性（再委託先：東京都市大学）では、調査で得られたデータを反映して、各種反応度係数を評価する。また、核変換ターゲット集合体の出力分布を解析するとともに、燃料のサーマルスパイクを解析評価する。②熱特性では、高速炉炉心槽内に核変換ターゲット集合体を装荷した場合の炉心出力分布等の炉心特性解析評価を行う。また、これらのデータを反映して LLFP 集合体の装荷前後の平衡炉心サイクル初期および末期の伝熱流動計算が行えるようにするための入力データを作成し、試計算を行う。(5) 核変換ターゲット構成材料の物性（再委託先：原子力機構）では、核変換対象核種のうち単体融点の低い Se および Cs について、化合物形態での高温安定性を調査し、高速炉核変換用ターゲットとしての適合性を評価する。また、Se、Pd および I のターゲット候補形態について、中性子減速材の母相である Y および Zr との高温での反応性を調査する。さらに、異なる形状の YH_2 および ZrH_2 を製作し、高速炉炉内温度での水素乖離性の差異について調査するとともに、Y および Zr の重水素化を試みる。(6) LLFP 回収技術の検討（再委託先：原子力機構）では、放射性ヨウ素の核変換ターゲットの候補形態である BaI_2 について、照射後ターゲット組成を模擬した体系からの回収試験を実施し、ヨウ素の回収率を評価する。得られた回収率から炉内回収ターゲットにおけるロス率を評価する。なお、本回収試験は安定同位元素を用いて実施する。また、Se、Zr、Pd および Cs について、平成 28 年度に実施した分離検討試験に基づき有効な分離が見込める核種に対して分離効率を評価する。(7) 社会科学的意義（再委託先：東北大学）では、環境負荷低減の社会的受容性のアンケート調査の分析を行う。(8) 研究推進では、本業務全体を適切に遂行するために、再委託者との連絡を緊密に取り、さらに定期的な会合を開催することで進捗状況を把握し事業を滞りなく進めるための調整を実施する。

平成 30 年度の項目別の計画概要は以下のとおり。

(1) LLFP 核データの収集・評価では、LLFP 核種の中性子捕獲反応断面積データの精度検討と、共分散データの評価を行う。(2) 高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換法（再委託先：東北大学）では、径ブランケット領域の各層に対し、LLFP 核種として ^{129}I 等を対象としたターゲット集合体（減速材含む）、径ブランケット燃料集合体等の組み合わせを変化させた配置、交換法に対し、炉心特性解析を実施し、核変換特性、増殖性等とブランケット領域内の集合体配置の関係を明らかにし、高核変換特性に適切なブランケット領域の集合体配置、交換法を選定する。(3) LLFP ターゲットを含む高速炉の炉心特性のうち①炉心特性（再委託先：東京都市大学）では、主炉停止系および後備炉停止系の制御棒反応度値の解析を行い停止余裕等の評価を行う。②熱特性では、LLFP 核変換炉体系における流量配分を設定するための伝熱流動解析を行う。③安全性（再委託先：東京都市大学）では、ターゲット集合体ピンの破損を想定し、減速材漏出による炉心特性の変化を評価し安全性を確認する。そのため、減速材が分離・放出することによる挿入反応度および出力分布の評価を行う。(4) 核変換ターゲット集合体の構造設計（再委託先：東北大学）では平成 29 年度の評価で選定された目標性能（LLFP 6 核種の $SF > 1$ ）を達成するピン構成、集合体構造を設計し、健全性を確認する。そのため、本炉心の流量配分結果を基に LLFP ターゲット装荷したピンの温度評価、ピン圧力評価を行い、健全性を確認する。(5) 大型高速炉での適用性評価（再委託先：東北大学）では、大型高速炉において、高速炉を対象とした LLFP 変換システムを適用し、核特性、炉心特性を評価し、大型高速炉での適用性を評価する。(6) 核変換ターゲット構成材料の物性（再委託先：原子力機構）では、ターゲット候補形態のうち、先行研究によ

り被覆管材料との共存性が明らかとなっている I と Tc を除き、Se、Zr、Pd、Cs の候補形態について、被覆管材料との共存性を評価する。共存性評価は簡易試験と文献等による調査で実施する。(7) 核変換ターゲットの製造（再委託先：原子力機構）では、LLFP製造試験として、先行研究や一般産業技術情報を基に6種のLLFP候補形態の製造手法を明らかにする。また、中性子減速材として用いるYおよびZrの水素化物、重水素化物について、ペレット状や板状での製造と炉内装荷状態を想定した温度条件での水素保持特性評価試験を行う。(8) LLFP回収技術の検討（再委託先：原子力機構）では、6種のLLFP元素のうちターゲット候補形態の選定や照射後状態からの分離回収法に関する検討が進んでいるBaI₂に対して、再処理工程での存在状態からの回収手法について実験室規模の回収試験を行い、有効性の検証を行う。また、他のLLFP元素については再処理工程内での存在状態に応じた回収手法の検討を行い、候補となる回収手法を提示する。さらに、平成28年度および平成29年度の業務成果に基づき、照射後組成を模擬した成分系における分離手法の検討を進める。(9) 照射試験計画（再委託先：東京都市大学）では、照射炉の調査を行い、照射サンプルの種類、サンプルの形状、照射位置等を考慮して照射試験計画を立案する。(10) 社会科学的意義（再委託先：東北大学）では、LLFP核変換の社会的受容性に関する説明方法の検討を行う。(11) 研究推進①プロジェクトの総合推進では、本業務全体を適切に遂行するために再委託者との連絡を緊密に取り、さらに定期的な会合を開催することで進捗状況を把握し業務を滞りなく進める。②全体まとめでは、平成30年度における成果のまとめを行い、次年度以降の計画策定への反映と報告書類の作成を行う。

令和元年度の項目別の計画概要は以下のとおり。

(1) LLFP中性子核データの評価検討では、LLFP核種断面積の共分散ファイルの作成および核変換率の誤差推定を行う。(2) 高速炉での核変換ターゲット集合体の配置、交換法（再委託先：東北大学）では、LLFP核種のターゲット集合体（減速材含む）を、高速炉のブランケット領域および遮蔽体領域に装荷する場合の配置、交換法を検討し、炉心核特性解析を実施し、核変換特性、サポートファクター等との関係を明らかにする。これにより、優れた核変換特性を持つ核変換ターゲット集合体の配置、交換法をまとめる。(3) LLFPターゲットを含む炉心特性のうち①炉心特性（再委託先：東京都市大学）では、LLFP核変換の最適化炉心について炉心特性解析評価を行う。②熱特性では、LLFP核変換炉体系における冷却材流量配分を決定しLLFPターゲットの熱的健全性を評価する。③安全性（再委託先：東京都市大学）では、最適化炉心についてターゲット集合体ピンの破損を想定し安全性の評価を行う。また、ターゲットピンの破損検出方法概念を検討、提案する。(4) 核変換ターゲット集合体の構造設計（再委託先：東北大学）では、(2) で検討した結果を基にして、LLFP核種のピン構成、集合体構造の最適化を行う。また、LLFP核種を装荷したピンの温度評価、ピン圧力評価を行い、健全性を確認する。(5) 大型高速炉での適用性評価（再委託先：東北大学）では、大型高速炉に対して、今まで検討してきたLLFP核変換手法を適用し、核特性、炉心特性、安全性を解析し、大型高速炉での適用性を評価する。(6) 核変換ターゲット構造材料の物性（再委託先：原子力機構）では、SUS316鋼とTcを除く5種類のLLFP候補化合物の共存性試験前後の状態において引張試験を実施し、LLFP核変換ターゲットの候補形態が被覆管材料の強度特性に及ぼす影響を評価する。(7) 核変換ターゲットの製造（再委託先：原子力機構）では、IおよびCsについて、再処理工程を模擬したプロセスから回収しそれぞれを用いて核変換ターゲット用の候補化合物（BaI₂、Cs₂CO₃）を製造する。各候補化合物の構造解析と不純物分析

を行い、照射後回収元素から製造した候補化合物の特性を明らかにする。また、重水素化物を減速材とし非放射性的のLLFP元素からなる模擬LLFPターゲットを試作し、製造性を明らかにする。試作する模擬LLFPターゲットは平成30年度までに検討した粉末混合焼結型と混合複合体型の2種類とする。(8)LLFP回収技術の検討(再委託先:原子力機構)では、先行研究や文献の調査により6種のLLFPの再処理工程からの分離回収におけるロス率を評価する。一部、模擬元素を用いた溶媒抽出実験を実施し、ロス率を実験的に評価する。また、LLFPサイクルに関するマテリアルフローを調査・検討し、再処理工程での分離回収、高速炉による核変換、その後のリサイクルにおけるマテリアルバランスを評価する。(9)照射試験計画(再委託先:東京都市大学)では、核変換特性、集合体の健全性を確認するために高速炉を用いて核変換ターゲット集合体1体を照射する照射試験計画を策定する。(10)社会科学的意義(再委託先:東北大学)では、LLFP核変換の社会的受容性に関する説明方法、理解度調査のまとめを行う。(11)研究推進のうち①プロジェクトの総合推進では、本業務全体を適切に遂行するために再委託者との連絡を緊密に取り、さらに定期的な会合を開催することで進捗状況を把握し業務を滞りなく進める。②全体まとめでは、平成28年度から令和元年度における成果のまとめを行い、報告書類の作成を行う。