

令和 2 年 6 月 15 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的研究（開拓）

研究期間：2017～2019

課題番号：17H06231

研究課題名（和文）超高速中性子と高レベル廃棄物の有効利用による革新的核変換核融合炉の提案

研究課題名（英文）Proposal of the innovative fusion reactor for nuclear transmutation by the utilization of a super fast neutron and the high-level radioactive waste

研究代表者

橋爪 秀利（Hashizume, Hidetoshi）

東北大学・工学研究科・教授

研究者番号：80198663

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 19,800,000 円

研究成果の概要（和文）：核融合反応で発生する超高エネルギーの14 MeV中性子と、原子力発電所より生じる使用済み核燃料に含まれる高レベル廃棄物（核分裂生成物やマイナーアクチノイド）を組み合わせたこれまでにないコンセプトを持つ新しい核融合炉の概念設計を行った。マイナーアクチノイド燃料と核変換部の設計、および核分裂生成物の核変換部を含むブランケット設計評価を実施し、当該核融合炉の導入によりこれら高レベル廃棄物の国内における貯蔵量を確実に低減可能となるシナリオを示した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では、核分裂生成物やマイナーアクチノイドを有効に利用した新しい核融合炉の概念設計を行い、高レベル廃棄物の地層処分以外の選択肢を示すことにより、現在の原子力エネルギー問題を解決すると同時に、核融合炉に対するコスト低減の要求を緩和することによって、核融合炉の近い将来における意義の明確化を行った。第5期科学技術基本計画にある、第3章「経済・社会的課題への対応」に記載されている「将来に向けた重要な技術である核融合炉等の革新的技術、核燃料サイクル技術の確立」を同時に解決する研究内容であり、新しい核燃料サイクルの未来図を示し、原子力エネルギーの社会的受容性を格段に向上させる可能性を持っている。

研究成果の概要（英文）：We have proposed a completely new concept of a fusion reactor that combines ultra-high-energy 14 MeV neutrons generated by fusion reactions with high-level waste (fission products and minor actinides) contained in spent nuclear fuel produced by nuclear power plants. We have performed designing of the minor actinide fuel and transmutation system, and also the blanket including the fission products transmutation system. We have indicated successful scenarios that it is possible to surely reduce the domestic storage amount of these high-level wastes by introducing the innovative fusion reactors to Japan.

研究分野：核融合炉工学

キーワード：核融合 高レベル廃棄物 核燃料サイクル 核分裂生成物 マイナーアクチノイド 核変換 原子力エネルギー

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

現在、フランスにおいて国際協力に基づいたトカマク型磁場閉じ込め核融合実験炉 ITER の建設が進められており、制御された核融合の実現が現実的な段階へと着実に進歩してきている。しかしながら、日本 EU で進められているトカマク型核融合炉の原型炉の設計においては、ダイバータに対する熱負荷・中性子負荷に対する非常に高い要求から、核融合出力が当初の 300 万 kW 程度から 200 万 kW 程度に縮小され、さらに、この低減された出力に対しても実際にダイバータを設計し製作することには、かなり工学的困難さが伴うということが現段階で示されており、いわゆる将来の実用的な核融合炉に向けた出力増加は、現段階では非常に厳しい状況にある。すなわち、発電という視点から核融合炉を評価すると、競争力が弱い状況にある。今後、発電コストを下げるために必要となる、より大きな出力の核融合炉の実現に向けて材料やプラズマ制御に関する研究開発が進められはいるが、未来像を描くことは非常に困難な状況であると言わざるを得ない。一方、安価で持続的に電力を供給できることから、世界で 500 基程度の原子力発電が稼働しているが、核燃料の再処理によって発生する高レベル廃棄物の処分の問題は、依然として解決の見通しはついていない。

そこで、核分裂で発生する約 2 MeV の中性子より、核融合反応で発生する圧倒的にエネルギーの高い超高速の 14 MeV 中性子を有効に利用し、核燃料の再処理後に残る FP (核分裂生成物:Cs (セシウム)・Sr (ストロンチウム) など) や MA (マイナーアクチノイド:超ウラン元素の中で、プルトニウムを除いたもの) の減容化をはかるという着想に至った。なお、核融合炉では、中性子の数を増やすために増倍材として、ベリリウムを使用しているが、14 MeV 近傍では、Cs・Sr の断面積はベリリウムのものより断面積が 2 倍以上大きく、この物性を利用しない理由が無いと考えた。同時に、MA に対しても、右図に示すように 14 MeV の中性子の断面積は比較的大きく、核融合反応による中性子を利用して、核分裂を起こす核燃料として有効利用することで、廃棄物として処分する必要がなくなる。

2. 研究の目的

核融合反応で発生する、超高エネルギーの 14 MeV 中性子と、FP や MA を組み合わせることによって、これらを有効に利用した核融合炉の概念設計を行い、核燃料サイクルにおける高レベル廃棄物の地層処分以外の選択肢を示すことにより、現在の原子力エネルギー問題を解決すると同時に、核融合に対する大規模発電によるコスト低減の要求を緩和することによって、核融合炉の近い将来における意義を明確にすることを目的とする。

3. 研究の方法

研究テーマとして

- 1) MA 核変換部の設計
- 2) FP 核変換部を含むブランケット設計
- 3) 核変換部を含む核融合炉全体設計

を取り上げ、それぞれ以下のような具体的な研究を進める。

○ MA 核変換部の設計

核融合炉に導入される消滅処理部の設計について、燃料形態の評価と事故時の安全性を含めた熱構造設計を実施する。核融合炉におけるダイバータ部やポート部に導入する消滅処理部の熱構造設計を進める。

○ FP 核変換部を含むブランケット設計

発電効率にはこだわらず、Sr-90, Cs-137 や長寿命核分裂生成物を効率良く核変換させ、効果的に消滅させることが可能となるブランケット設計を示す。検討するブランケットシステムとしては、固体増殖材 / 水冷却ブランケット・溶融塩ブランケット・鉛系ブランケットとし、FP の消滅・トリチウムの増殖の観点からの最適設計を行う。

○ 核変換部を含む核融合炉の全体設計

既存の核融合炉設計を基礎とし、照射領域の幾何学的条件等を反映した詳細な核計算による MA 消滅の評価を行い、変換効率や安全性の観点から MA 核変換部の導入位置・導入量等の最適化を図る。

4. 研究成果

(1) MA 冷却材毎の核変換特性評価

冷却材として、水、溶融塩 (Flibe、Flinabe)、液体金属 (PbLi、PbBi) を配置した場合の MA 核種の核変換特性を評価した。図 1 は照射期間に伴う MA 核種の減少量を示しており、水を冷却材として用いた場合の減少率が最も大きくなるという結果が得られた。これは水により熱中性子エネルギー領域の中性子束が増加し、MA の中性子吸収反応によって MA 核種から別核種へ変換されることが主要要因であり、変換先は主に Pu-238、Pu-242 等の Pu 偶数核種である。核分裂反応ではなく中性子吸収反応がメインとなることから、領域における発熱密度は非常に低く抑えられる。

以上を受けて、MA 核変換においてはあえて軟らかい中性子場とすることで、MA を Pu 偶数核種へ変換する核変換システムコンセプトを見出した。そもそもの核融合炉ブランケットにおいてはプラズマからの熱負荷が大きく、かつ冷却のためのスペースも十分に確保できないため、さらに核分裂による発熱は極力抑える必要がある。当該コンセプトにおいては、元々の長寿命か

つ毒性の高い MA を確実に別核種へ変換できるとともに、中性子吸収がメインのためブランケット設計に与える熱設計要件が緩やかにできる。Pu 偶数核種は核不拡散上の問題となる核種ではなく、これら核種がさらに 1 つの中性子を吸収することで核分裂性物質へと変換される。したがって、核変換により生成された Pu を軽水炉、または高速炉において燃料として利用可能ならば、閉じた核燃料サイクル実現に大きく近づくだろうという指針を得た。

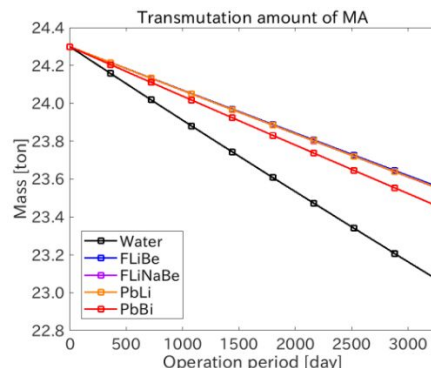


図 1 MA 核種の残存量変化

(2) 国内 MA インベントリ低減シナリオの構築

(1)における冷却材毎の MA 核変換特性評価、ならびに種々の基礎的評価に基づいて設計条件を絞り込み、ヘリカル型核融合炉 FFHR-d1 を導入した場合の国内 MA インベントリ低減のシナリオを構築した。国内の核融合炉は、2050 年に熱出力 1 GW、2070 年に熱出力 2 GW、2090 年に熱出力 3 GW、2110 年に熱出力 3 GW が導入される、という仮定の下に試算している。得られたシナリオを図 2 に示す。図 2 より 2090 年から MA インベントリが減少し始めている。したがって、合計の熱出力 5 GW の核融合炉導入により、国内の MA インベントリを低減できることが明らかとなった。

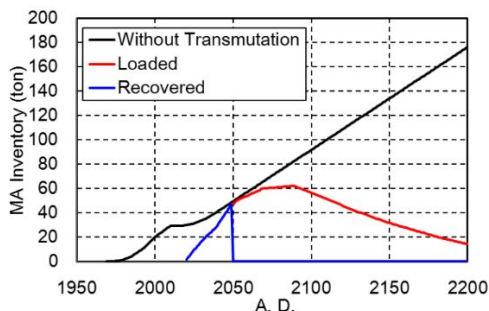


図 2 核融合炉導入による日本国内の MA インベントリ低減のシナリオ

(3) 核変換生成 Pu を装荷した高速炉炉心特性評価

(1)の MA 核変換特性評価において得た知見に基づき、核変換後に生成される Pu 偶数核種を高速炉に装荷した場合の炉心特性評価を実施した。炉心体系は JSFR の設計を用いた。Pu 富化度は 12.4% である。図 3 に核変換生成 Pu 転換量に対する高速炉の実効増倍率変化を示す。核変換生成 Pu は Pu-238 や Pu-242 等の核分裂性核種ではないため、装荷量の増加に伴い、実効増倍率は低下している。しかし、これらの核種が中性子を吸収すると核分裂性核種へと変換されるため、運転期間に伴い核分裂反応は増加する。よって、実効増倍率の減少率は未装荷の場合と比べて小さくなり、出力の経時変化をより平坦化できる特性を持っていることを見出した。

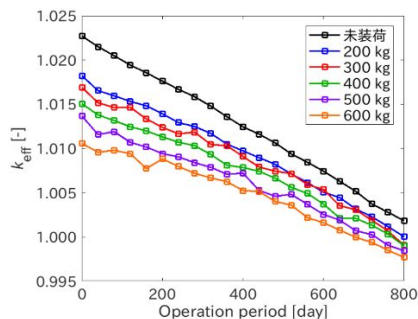


図 3 核変換生成 Pu 転換量に対する高速炉の実効増倍率変化

核変換生成 Pu の装荷により明らかに実効増倍率が減少したため、炉心燃料における Pu 富化度を増加させた場合の実効増倍率変化を図 4 に示す。核変換生成 Pu の装荷未装荷に対して、Pu 富化度による実効増倍率の変化は極めて大きいことが明らかとなった。以上から、偶数核種よりなる核変換 Pu を高速炉へ装荷する場合、Pu 富化度を増加させることで、少なくとも炉心全体としては運転期間において臨界を維持できることを見出した。

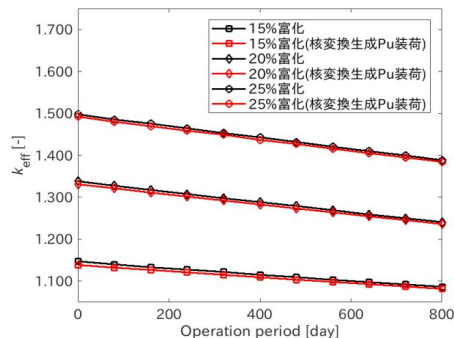


図 4 Pu 富化度および核変換 Pu 装荷に対する実効増倍率変化

今後は出力分布の平坦化や、軽水炉における当該 Pu 核種の利用可能性の検討が課題として挙げられる。

(4) 核分裂生成物(FP)の核変換特性評価

発熱性核種として問題となる Cs-137 および Sr-90 を自己冷却式溶融塩ブランケットに装荷した場合の核変換特性を評価した。高エネルギーの核融合中性子によるロックアウト反応を利用した核変換を期待したが、溶融塩ブラケット中の中性子スペクトルは軟らかく、(n,2n)反応率は向上しなかった。当該核種の放射性崩壊による減少率に比して、核融合中性子を照射した場合は年間当り 0.01% 程度しか向上しないことが明らかとなった。当該核種の核変換のためには、装荷時の化学形態や他物質との核的相互作用を踏まえ更なる検討が必要である。

また、長寿命核分裂生成物 (LLFP) についても同様の評価を実施した。発熱性核種について検討した際、照射される核融合中性子の多くが溶融塩中の Li に吸収されていることが明らかとなった。よって、より効率よく FP を中性子と反応させるために、ブランケット候補材の Flibe ではなく、トリチウム増殖を担わない核変換に特化した BeF₂ をベースとする溶融塩を検討した。図 5 に BeF₂-CsF と Flibe-CsF における Cs-135 の核変換率を示す。図 6 より同じ CsF 添加率においても、Flibe-CsF に比して BeF₂-CsF における Cs-135 の核変換率が大きく向上することが明らかとなった。これは Li による吸収反応がないこと、加えて(n,2n)断面積の大きい Be が増えたためである。

以上から、LLFP の中でもフッ化物が安定して存在する CsF、ZrF₄、PdF₂ について核変換特性を評価し、MA と同様に国内インベントリーのシナリオを構築した(図 6)。本シナリオにおいては、核融合炉のみでなく、他機関によって提案がなされた高速炉による LLFP 核変換も考慮している。Cs-135 および Pd-107 は合計熱出力 5 GW の核融合炉導入によって国内インベントリーが減少することが明らかとなった。一方で、Zr-93 の中性子吸収反応断面積は非常に小さく、当該核種を中性子による核変換により完全に減容させるのは困難であることが明らかとなった。

(5) FP 含有溶融塩の熱物性評価

(4)にて提案した核変換に特化した溶融塩について、分子動力学法を用いた熱物性評価を実施した。熱物性として定圧比熱、粘度、熱伝導率を評価し、それらをプラントル数としてまとめた結果を図 7 に示す(温度 1273 K)。CsF 単体の場合のプラントル数は、文献値と比して概ね一致する結果が得られた。BeF₂ 比が増加するにつれ、BeF₂ がもつガラスに似た構造が形成され粘度が上昇し、結果としてプラントル数が上昇している。同 BeF₂ 比において Flibe と比較すると、BeF₂-CsF は高いプラントル数を有している。以上から、BeF₂-CsF を第一壁冷却にも適用することは困難であることが示唆された。

以上の通り、FP 含有の溶融塩に対する熱物性評価の手法を構築したものの、熱伝導率評価に限っては計算における標準誤差が非常に大きく、十分な信頼性を有しているとは言えない。本研究において適用したグリーン久保の公式に基づく平衡分子動力学計算では、算出過程においてどうしても誤差が大きくなってしまいうため、当該塩への適用は困難であることが明らかとなった。今後の評価手法構築においては、計算条件の検討、および他手法の適用等が必要である。

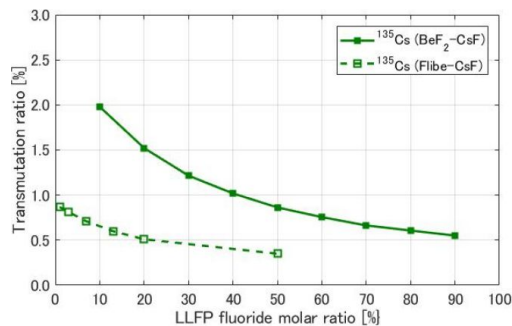


図 5 BeF₂-CsF と Flibe-CsF における Cs-135 の核変換率

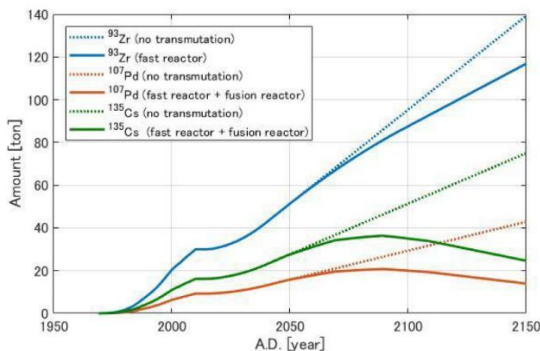


図 6 核融合炉および高速炉導入による LLFP インベントリー低減シナリオ

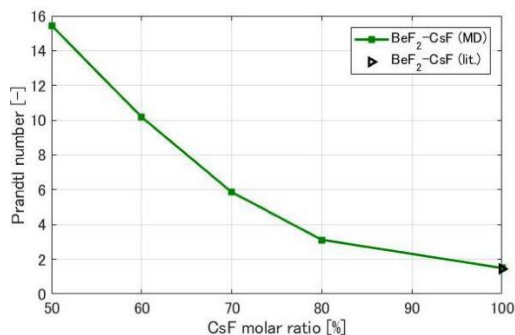


図 7 CsF 比に対する BeF₂-CsF のプラントル数 (1073 K)

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件／うち国際共著 0件／うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Furudate Yuki, Shishido Hiroki, Yusa Noritaka, Hashizume Hidetoshi	4. 巻 103
2. 論文標題 Construction of minor actinides reduction scenario in Japan utilizing fusion reactors	5. 発行年 2018年
3. 雑誌名 Progress in Nuclear Energy	6. 最初と最後の頁 28 ~ 32
掲載論文のDOI（デジタルオブジェクト識別子） 10.1016/j.pnucene.2017.11.003	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 -

〔学会発表〕 計14件（うち招待講演 2件／うち国際学会 8件）

1. 発表者名 H. Hashizume, N. Yusa, H. Shishido
2. 発表標題 Introduction of Fusion Reactor as Transmutation System for Minor Actinides and Fission Product
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 H. Shishido, H. Hashizume, Y. Ishii, N. Ohtori
2. 発表標題 Experimental Evaluation of the Dynamic Viscosity of Molten Salt Flinabe and Validation of the Polarized Ion Model
3. 学会等名 The 14th International Symposium on Fusion Nuclear Technology（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 T. Kitasaka, H. Shishido, H. Hashizume
2. 発表標題 Neutronic and Thermophysical Characteristics Evaluation of Molten Salts Specialized for LLFPs Transmutation in a Fusion Reactor
3. 学会等名 The 28th International Toki Conference on Plasma and Fusion Research（国際学会）
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 宍戸博紀, 橋爪秀利
2. 発表標題 設計余裕度向上のための機能材料添加熔融塩ブランケットの核的特性評価
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 北坂卓, 宍戸博紀, 橋爪秀利
2. 発表標題 核融合熔融塩ブランケットにおける長寿命核分裂生成物の核変換を目的とした熔融塩の検討
3. 学会等名 日本原子力学会2019年秋の大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 今中佑太, 宍戸博紀, 遊佐訓孝, 橋爪秀利
2. 発表標題 核融合中性子による核変換生成プルトニウムによる高速炉炉心特性評価
3. 学会等名 日本原子力学会2018年秋の大会(国内学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 北坂卓, 宍戸博紀, 遊佐訓孝, 橋爪秀利
2. 発表標題 長寿命核分裂生成物核変換機能を有する核融合ブランケットの工学的成立性評価
3. 学会等名 第12回核融合エネルギー連合講演会(国内学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 橋爪秀利、遊佐訓孝、宍戸博紀、今中佑太、北坂卓
2. 発表標題 核融合炉による放射性廃棄物変換システム及び核燃料サイクルの提案
3. 学会等名 第23回動力・エネルギー技術シンポジウム（国内学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 T. Kitasaka, H. Shishido, N. Yusa, H. Hashizume
2. 発表標題 Feasibility study for long-lived fission products transmutation using fusion reactors
3. 学会等名 30th Symposium on Fusion Technology（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Shishido, Y. Imanaka, N. Yusa, H. Hashizume
2. 発表標題 A Dynamic Model of the Sustainable Twin Nuclear Fuel Cycle by Introducing Fusion Transmutation Reactors
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 H. Hashizume, N. Yusa, H. Shishido, Y. Imanaka, T. Kitasaka
2. 発表標題 Realizable Scenario to Introduce Fusion Reactor with Providing Transmutation Functionality of Minor Actinides,
3. 学会等名 The 27th International Toki Conference on Plasma Fusion Research & The 13th Asia Pacific Plasma Theory Conference（招待講演）（国際学会）
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Yuki Furudate, Hiroki Shishido, Noritaka Yusa, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Proposal of a double-strata fuel cycle utilizing fusion reactors to transmute minor actinides
3. 学会等名 3th International Symposium of Fusion Nuclear Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 Yuki Shibayama, Yuki Furudate, Hiroki Shishido, Noritaka Yusa, Hidetoshi Hashizume
2. 発表標題 Neutronics and Thermal Evaluation of Transmuting Minor Actinides in a Magnetic Confinement Fusion System
3. 学会等名 3th International Symposium of Fusion Nuclear Technology (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 今中佑太、宍戸博紀、遊佐訓孝、橋爪 秀利
2. 発表標題 放射性廃棄物の核変換処理を目的とした核融合炉ブランケットの核的性能および伝熱性能に対する冷却材の影響評価
3. 学会等名 日本原子力学会2018年春の年会,
4. 発表年 2018年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究 分担 者	山村 朝雄 (Yamamura Tomoo) (20281983)	京都大学・複合原子力科学研究所・教授 (14301)	

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究分担者	染谷 洋二 (Someya Youji) (20589345)	国立研究開発法人量子科学技術研究開発機構・六ヶ所核融合研究所 核融合炉システム研究開発部・主任研究員（定常） (82502)	
研究分担者	岡本 敦 (Okamoto Atsushi) (50396793)	名古屋大学・工学研究科・准教授 (13901)	
研究分担者	金 聖潤 (Kim Seong-Yun) (50574357)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	遊佐 訓孝 (Yusa Noritaka) (60466779)	東北大学・工学研究科・准教授 (11301)	
研究分担者	近藤 正聡 (Kondo Masatoshi) (70435519)	東京工業大学・科学技術創成研究院・准教授 (12608)	
研究分担者	穴戸 博紀 (Shishido Hiroki) (90827792)	東北大学・工学研究科・助教 (11301)	