

「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用 WG」報告書

1. はじめに

近年の研究によれば、水素同士の核融合から始まって鉄 (Fe) までの元素は恒星内の核融合で生成されるが、トリウム (Th) やウラン (U) のように Fe よりも重い元素は恒星内の核融合では生成できず、超新星爆発後の中性子星の合体過程で生成されて、宇宙にまき散らされたとする説が有力となっている。46 億年前、超新星爆発が太陽系の生成を誘起し (太陽系スパイクと呼ばれる)、U、Th は他の重い元素とともに太陽系に取込まれ、太陽系内では核燃料物質である Th と U の存在比 (Th/U) が約 2.5 とされる。地球に取り込まれた U と Th は地球のコア (核) には存在せず (原子半径が大きく、また電子も多いことから、コアの Fe、Ni やマンツルの Si、Mg との親和性が低いため)、マンツルの表層と地殻に存在しており、地球地殻の Th/U 比は 3.33 となっている。地球では約 20 億年前頃からの大気中酸素濃度の急激な増加に伴って U の酸化物が形成され、酸化した U は水に溶けて局在化し、陸地、海水や海底の岩床に取り込まれた。一方、トリウム酸化物は水に不溶で、トリウムは地殻中に万遍なく存在する。

このように宇宙で生成され地球にもたらされた核燃料物質は、化石燃料が枯渇していく中で、人類社会が長期にわたって持続していく上での貴重なエネルギー源である。

核燃料部会では、資源論的な観点からの世界的なトリウム燃料への関心の高まりを受けて、大阪大学 (当時) の山中先生を座長とする「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用に関するワーキンググループ」を設立し (平成 22 年 6 月)、調査活動を開始し、東日本大震災と東京電力福島第一原子力発電所事故を受けて一旦活動を中断したが、トリウム燃料への関心が継続していることを受け、平成 25 年 11 月にワーキンググループ活動を再開し、IAEA および米国 NRC のトリウム燃料に関する報告書のレビュー・評価結果と、国内外の専門家を招いて国際セミナーを開催した成果を報告書に纏めて終了した。

その後、OECD-NEA からトリウム燃料サイクルに関する本格的なレポート「Introduction of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle, Short- to long-term considerations, NEA No. 7224」が公刊されたこと、また、軽水炉でのトリウム利用の研究開発として、ノルウェーの Thor Energy 社が組織した世界的なコンソーシアムのもとでホルデン炉でのトリウム燃料の照射試験が着実に進行しているという状況があり、ワーキンググループを平成 28 年 1 月に再々開し、同レポートの調査に加えて、国内外における活動状況の調査を行って平成 29 年 3 月に活動を終了した。

本報告書は、ワーキンググループ再々開後の活動の成果を取り纏めたものである。

2. ワーキンググループ活動全般

2. 1 設立経緯と活動状況

日本原子力学会核燃料部会に「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料利用に関するワーキンググループ」を設置し、平成 22 年 7 月から活動を開始した。炉心設計、基礎物性、社会受容性等について調査、検討等を進めたが、東日本大震災と東京電力 (株) 福島第

一原子力発電所事故（1F 事故）を受けて、平成 22 年 12 月を最後にその活動を中断した。しかし、トリウム燃料に関する照射試験が継続され、各種のトリウム燃料に関する総括的報告書などが発行される等、トリウム燃料についての関心度は更なる高まりを見せていることから、平成 25 年 11 月にトリウム WG を再開し、IAEA 及び米国 NRC のトリウム燃料に関する報告書のレビュー・評価結果及びまた国内外の専門家を招いて国際セミナーを開催した成果を報告書に纏めて終了し、その成果を平成 27 年秋の大会の企画セッションにて報告した。

その後、OECD-NEA からトリウム燃料サイクルに関する本格的なレポートが公刊されたことから、ワーキンググループを平成 28 年 1 月に再々開し、平成 29 年 3 月に活動を終了した。成果を平成 29 年の秋に大会の企画セッションにて報告した。

2. 2 活動目的

1F 事故以降、我が国のウラン燃料の利用は停滞を余儀なくされているが、目を世界に向けると、途上国を中心として原子力発電所の建設計画は膨らんでおり、私たちが平成 22 年にワーキンググループを発足させたときの将来的なウラン資源の枯渇問題に備えてのトリウム資源の有効利用検討の必要性は衰えを見せていない。

トリウムを核燃料としてウランの代わりに利用しようとする動きが世界で進行している背景には、上述のように、エネルギーの確保及び地球温暖化対策として世界的に原子力発電増設の動きが強まっており、将来的なウラン供給量への懸念があること、レアアース（希土類元素）抽出の過程で廃棄物となるトリウムが大量に累積され、その活用が望まれていることがある。これを受け、OECD-NEA からトリウム燃料サイクルに係る本格的な技術レポートが刊行された。

このような情勢を受けて、各国では、さまざまなタイプの原子炉でトリウムを使えるようにする研究開発が行われており、世界で広く使用されている軽水炉でのトリウム利用の研究開発として、ノルウェーの Thor Energy 社が組織した世界的なコンソーシアムのもとでハルデン炉でのトリウム燃料の照射試験が進められている。

そこで、こうした世界の状況に遅れることなく、トリウム燃料開発に係る海外との連携も視野に入れた取り組み方について議論し、トリウムの位置づけを検討・整理するためのワーキンググループを再々開し、OECD-NEA のレポートの調査に加えて、国内外における活動状況の調査を行うことを目的に活動した。

2. 3 活動概要

以下に記す作業を通して、現在の開発の状況、課題・問題の把握を行った。

- (1) OECD-NEA 報告書の調査
- (2) 専門家からの報告
- (3) ハルデン炉照射データ等の検討

2. 4 ワーキンググループ (WG) メンバー

WG メンバー及び体制は以下の総勢 24 名である (敬称略)。添付 1 に WG メンバーの名簿を示す (所属は WG 開催時)。

・主査：

山中伸介 (阪大)

・幹事：

北田孝典 (阪大)、牟田浩明 (阪大)、小宮山涼一 (東大)、安部田貞昭 (元 MHI)、
伊藤邦博 (NDC) * *事務局

・委員 (大学等)：

有馬立身 (九大)、木下幹康 (東大)、佐々敏信 (JAEA)、鈴木達也 (長岡技大)、
芹澤弘幸 (JAEA)、高木直行 (都市大)、檜木達也 (京大)、藤井俊行 (京大)、
宇根崎博信 (京大)、園田健 (電中研)、鷹尾康一朗 (東工大)

・委員 (メーカー等)

青木黎明 (MNF)、川島正俊 (TNES)、草ヶ谷和幸 (GNF-J)、後藤大輔 (GNF-J)、
小坂進矢 (MHI)、平井睦 (NFD)、深澤哲生 (日立 GE)

2. 5 会議開催記録・議事録

平成 28 年 1 月から平成 29 年 3 月までの期間、下記のとおり合計 4 回の会議を開催した。

① 第 1 回 WG (添付 2 に配付資料を示す)

・日時：平成 28 年 1 月 27 日 (水) 13:30~15:00

・場所：大阪大学 医学・工学研究科 東京ランチ 913 室

・議題：

- | | |
|------------------------------------|----------------------------|
| (1) ノルウエートリウムイニシアチブ | Thor Energy CEO Asphjell 氏 |
| (2) トリウム燃料の利用に関するワーキンググループ活動計画 (案) | 事務局 |
| (3) OECD-NEA のトリウム燃料サイクルに関するレポート目次 | 阪大北田幹事 |

② 第 2 回 WG (添付 3 に配付資料を示す)

・日時：平成 28 年 6 月 27 日 (月) 13:30~16:40

・場所：大阪大学 医学・工学研究科 東京ランチ 912 室

・議題：

- | | |
|---|------------|
| (1) 前回議事録の確認 | 事務局 |
| (2) OECD-NEA レポートのレビュー結果 | |
| 1 章 Introduction | 阪大 北田幹事 |
| 3 章 Front end of the thorium fuel cycle | NFD 平井委員 |
| 8 章 Waste management issues | JAEA 佐々委員 |
| 9 章 Non-proliferation issues | 京大 宇根崎委員 |
| (3) トリウム利用の世界動向 | 都市大 高木委員 |
| (4) トリウム燃料装荷炉心研究計画 | 元MHI 安部田幹事 |

③第3回 WG (添付4に配付資料を示す)

- ・日時：平成28年11月16日(水) 13:30~16:30
- ・場所：大阪大学吹田キャンパス A1棟 113号室
- ・議題：

- (1) 前回議事録の確認 事務局
- (2) 京大炉におけるトリウム臨界実験、断面積測定、不確かさ評価 京大 宇根崎委員
- (3) ADSにおけるトリウム利用 - ThEC15会議の話題を中心に- JAEA 佐々委員
- (4) OECD-NEA レポート報告
 - 2章 Perspectives on the use of thorium in the nuclear fuel cycle 阪大 北田幹事
 - 4章 Thorium fuel testing and qualification GNF-J 草ヶ谷委員
 - 10章 Economic aspects of thorium fuel cycles 東大 小宮山幹事

④第4回 WG (添付5に配付資料を示す)

- ・日時：平成29年3月21日(火) 13:30~17:30
- ・場所：大阪大学 医学・工学研究科 東京ブランチ 913室
- ・議題：

- (1) 前回議事録の確認 事務局
- (2) トリウム燃料照射データのレビュー 阪大 牟田幹事
- (3) 内外のエネルギー情勢の現状 東大 小宮山委員
- (4) OECD-NEA レポート報告
- 5章 Thorium fuel cycles in present day reactors
 - 5.1 軽水炉でのトリウム利用 5.2 重水炉でのトリウム利用 MNF 青木委員
 - 5.3 Thorium fuel cycles in present day reactors 5.4 Summary GNF-J 後藤委員
- 6章 Thorium fuel cycles in molten salt reactor designs
 - 6.1 The MSR concept 6.2 MSFR fuel salt processing 6.3 Breeder MSFR starting mode 阪大 北田幹事
- 7章 Spent fuel reprocessing
 - 7.1 THOREX process 7.2 Problem areas and prospects of the THOREX Process 東工大 鷹尾委員
 - 7.3 フッ化物揮発法 Annex A: トリウムの回収 日立GE 深澤委員
- 11章 Conclusions 阪大 北田幹事

3. WG 活動内容

WGにおいて、①OECD-NEAの報告書の検討、②専門家からの報告、③ハルデン炉照射データ等の検討を通してのトリウム燃料利用の課題・問題の把握を行った。

3. 1 OECD-NEA 報告書の検討

(炉心設計)

トリウム燃料は、トリウム酸化物（トリア）の高燃焼度達成可能性や、高い融点等の優れた熱特性を有することによる事故耐性燃料（ATF）としての可能性、プルトニウム（Pu）・マイナーアクチニド（MA）生成量の少なさ、熱中性子炉での高転換性能、トリウムを添加することによるウラン酸化物燃料の特性改善や炉運転特性の向上などを開発の動機として研究が進められている。特に炉心特性に影響する因子として、トリウムはウランに比べて熱エネルギー領域での中性子の α 値(σ_c/σ_f)が小さいことから η 値($\nu/(1+\alpha)$)が大きく、このことが転換性能を高めるとされるが、詳細に核反応断面積データを比較すると、熱炉での増殖性の達成はかなり困難である。しばしば米国の SHIPPINGPORT 炉が増殖を達成したことが引用されるが、SHIPPINGPORT 炉の増殖比は 1.014 とかろうじて 1 を上回ったものであり、それも毒物や制御棒を使用せず、燃料自体を上下に移動して反応度をコントロールするという特殊な運転方法を用いたことや、低燃焼度運転という炉心性能を犠牲にしたものであった。またトリウム炉の核分裂性物質ウラン 233 (^{233}U) の遅発中性子割合が軽水炉等の核分裂性物質ウラン 235 (^{235}U) と比べて小さいことによる安全特性への影響も注意を要する。

また、NRC のレポートが指摘しているように、トリウム燃料を導入するには多大な認証手続きが必要となることなど克服すべき課題も多く、導入する強い動機・大きなメリットが無いと前に進まない。これらを踏まえ、OECD-NEA レポートは、2030 年ごろまではトリウムを U/Pu 燃料に 5-10%程度付加した燃料により、核的特性の改善や可燃性毒物の低減を図りつつ高燃焼度に向けた既存炉（軽水炉、重水炉）を用いた照射経験を蓄積することが現実的と述べている。さらにレポートでは、2050 年以降の導入の候補の一つとされている熔融塩炉（MSR）などの第 4 世代原子力発電システム（Gen-IV）についても触れ、トリウム燃料利用開始に不可欠となる核分裂性プルトニウムの供給の手法とも絡めて、世界のエネルギー資源情勢も踏まえた炉型戦略が必要であるとしている。

国際的なグループのトリウム燃料利用に関わる認識が、冷静、沈着なものであると評価できる。

(照射挙動、リサイクル)

トリウム燃料を原子炉で燃焼するための許認可取得と商用利用のためには、信頼できる燃料照射試験と燃料挙動解析コードが必要であり、トリウム酸化物燃料の照射試験が、カナダ、欧州連合（EU）、ノルウェーなどにおいてなされてきた。ハルデン炉では(Th, Pu) O_2 、(Th, U) O_2 燃料の照射が継続して行われており、燃料挙動解析コードである「修正 FRAPCON」が解析に適用されている。EU では SOLMAS 法などによって作製された(Th, Pu) O_2 燃料について BR-2 炉で 37 GWd/tHM までの照射試験が行われ、燃料挙動解析コード「MACROS」による解析例が報告されている。これらの試験と解析により、トリウムを含有する酸化物燃料は UO_2 燃料とほぼ同等の照射特性を示し、均質燃料であればより良い核分裂ガス保持特性を持つことが示唆された。また現行の挙動解析コードは照射試験結果をよく再現できているものの、照射スエリングや放射率、熱機械的特性への化学量論組成からのずれの影響が不明

確であるなど、トリウム燃料については物性測定やモデル化が必要なものがいまだ残されている。

トリウムを含有する酸化物燃料を再処理する方法に関する研究の状況は、現状の UO_2 燃料の再処理法として実用化されている PUREX 法に近い THOREX 法や、フッ化物揮発法による検討がなされている。THOREX 法における分離については、PUREX 法と類似であるものの、抽出剤である高濃度 TBP を用いるときの第 3 相錯体形成リスクなどがあり、新しい抽出剤の開発などが行われているが、手法の成熟度は PUREX 法と比べて総じて低い。フッ化物揮発法では、実験室規模の高温フッ化試験により、模擬(Th, U) O_2 燃料からの U 分離が実証された段階である。

3. 2 専門家報告

(1) Thor Energy 社の Asphjell 氏報告

Thor Energy 社は今後とも世界的に軽水炉利用が継続するとの判断のもとに、第一ステップとして UO_2 燃料にトリウムを 5-10%加えたトリウム添加燃料「Th-Additive」の既存 LWR での利用（開発期間 2020 年頃まで）、第二ステップとして 90%Th-10%Pu の「Th-MOX」燃料の既存 LWR での利用（開発期間 2025 年頃まで）を事業として計画している。現在、KAERI の ATF 燃料もハルデン炉で照射されている。ATF 燃料とは 2vol%の SiC/TiO₂ 添加燃料及び 5vol%Cr 添加燃料を指す。被覆管として Mo 合金も採用している。

ノルウェー国内で「Th-Additive」及び「Th-MOX」燃料ペレットを製作し、ハルデン炉で照射中である（試験名称は前者が IFA-730 : 2013 年照射スタート、後者が IFA-790 : 2015 年 12 月照射スタート）。Pu はドイツの ITU からノルウェーに輸送した。照射に伴う燃料温度データも取得されており、これまでのところ、ほぼ予測された挙動を示している（Th 添加量が多いほど燃料温度低下がみられており、Th の高熱伝導度特性が現れている）。

(2) 海外の動向

2015 年 10 月にインドのムンバイで開催された「トリウムエネルギー会議」で示された世界のトリウム開発の動向は以下の通りである。

インドはおそらくもっとも広範囲にトリウム燃料に直接触れており、研究者・技術者も多い。但し、若者が海外で発表等を行うには厳しい規制がある。トルコも自国で算出する大量のトリウム資源の活用を模索している。ベルギーでは BR-2 炉でトリウム燃料の照射経験が豊富である。ノルウェーでは自国で算出するトリウムを利用すべく、国際コンソーシアムを組織してハルデン炉での照射試験を進めている。イギリスは余剰 Pu の効率的核変換に利用しようとしている。カナダは CANDU 炉でのトリウム燃料燃焼に強い熱意を持っている。インドネシアも豊富に産出するトリウムの活用方法を探っている。米国は近年トリウムが大量に発見されたため関心を高めつつあり、GA 社が小型 He 冷却増殖炉を検討している。

ADS におけるトリウム研究について、トルコでは、豊富なトリウム資源を将来的にエネルギー源として利用することを計画しており、その 1 形態として陽子加速器開発と並行して ADS の開発を検討している。スイスの iThEC (The international Thorium Energy Committee) は、ロシア INR の既存の設備を改造した ADS 実験を呼びかけた（ベルギーに建設が計画さ

れている MYRRHA 予算の 5%で実現できると主張)。米国ヴァージニア大学を中心とした ADS コンソーシアムは、同時期にワークショップを開催し、Th-U システム ADS の実用化には 25 年かかるが MSR (ADAM 計画) であれば即時導入が可能と説明した (但し、核物理研究者が主体のグループの意見)。インドでは 10 年ほど前から Pb-Bi ループでの流動実験を行っているが活動は限定的である。

(3) 京大炉における研究

京大炉では昭和 60 年代前半から木村逸郎先生等によりトリウム燃料の研究が行われてきており、近年の関心事として、①トリウム関連核種の断面積データの信頼性と不確かさ、②不確かさが炉心核特性に及ぼす影響、に着眼して研究を進めている。①に関して、KURRI-LINAC を用いた捕獲断面積評価測定と共鳴評価の結果、Th232 の捕獲断面積が JENDL4.0 よりも 3.3 に近く、両ライブラリ間の差異は大きく減少してきている。また、KUCA におけるゾーン型臨界実験によれば Th 無し炉心に比べて Th 炉心の C/E は過大評価となっているが、ライブラリ間の断面積差よりも断面積の不確かさに基づく実行増倍率への影響が無視できない。②に関して、BWR ウラン炉心、BWR トリウム炉心、MSR 炉心の実行増倍率、ドップラ反応度の不確かさを比較した結果、トリウム炉心はウラン炉心よりも不確かさが一桁大きいことが分かった。

(4) 昨今のエネルギー情勢

近年、原子力発電の競争力が低下している背景・要因として、原油価格・天然ガス価格の下落、電力市場自由化、再生可能エネルギーの普及などがある。しかし、原油価格の低下は、原油開発投資の見直しや撤退を引き起こし、長期的な原油安定供給のリスクになっており、同時に油価下落は、依然として世界の石油輸出拠点である中東産油国の石油輸出収入の低下による社会・政治の不安定化をもたらす可能性があり、国際的な原油安定供給のリスクが増大し、将来の世界のエネルギー安全保障に多大な影響を及ぼす懸念がある。また、2016 年に発効したパリ協定では、地球の平均気温上昇を産業革命前に比べ 2°C 未満に抑え、さらに 1.5°C 抑制に向けて努力するという目標が掲げられ、その実現には世界の温室効果ガス排出を早期に減少に転じさせ、今世紀後半までに排出量を実質的にゼロにする必要があるとされたことから、ますますエネルギーの徹底的な低炭素化が必須の課題となっている。このようなエネルギー安全保障問題や気候変動問題を解決するための特効薬は存在せず、広範なエネルギー源の研究開発が不可欠であり、また、ウラン資源制約の緩和など原子力エネルギーの長期的視点での持続的利用を可能にするためには、トリウムは重要な技術オプションの一つとして考えられ、今後ともトリウムの技術的課題の克服、経済性の改善、社会的受容性の確保に向けた取り組みが重要である。

3. 3 ハルデン炉照射データ等の検討

ハルデン炉で照射されている Th-MOX 燃料の熱・機械的照射挙動について FRAPCON3.4 コードをベースとして評価を行っている。使用する物性値の多くは O/M 比、燃焼度の影響を取込んでいないが、熱伝導度は O/M 比と燃焼度、熱容量は O/M 比の効果を取込んでいる。FP ガス放出率は小さくなることが期待されるが変更せず。また、中性子断面積は修正し、半径方

向の重元素移行を考慮している。Th-MOXでは熱中性子に対する強い自己遮蔽効果によりペレット周辺部で出力が高くなる（但し、燃焼が進むとTh-232の弱い共鳴吸収はエピソード中性子に対する自己遮蔽効果を弱めるので転換が均質に起こり、リム効果が小さいと予想される）。

燃料温度のオンライン計測データとFRAPCONによる解析結果と比較した結果、初期の24時間分の燃料中心温度は両者よく一致したが（7%以内）、数日の運転後計測温度が計算値を上回り、21MWd/kgHMで差が100Kまでになった。この要因として、Th-MOXの上下に配置したTh-UOXペレットが低密度(79%TD)であり、PC間ギャップが広がったこと、FP放出率が高かったこと、軸方向熱伝導効果等が考えられる。

PWR条件（155atm、300℃）を模擬し、(Th, Pu)₂O₇燃料の照射試験をベルギーのBR-2炉のCALLISTOループで行い、SCK/CENのMACROSコードの適性を評価している。ペレットはゾルゲル法とSOLMAS法で作製している（前者の方が均質で密度も高い）。(Th, Pu)₂O₇ペレットは通常のMOXと同等あるいは良好な特性を示した（低いFGR、被覆管が健全、等）。但し、金相観察では、外縁部に気孔がみられ、これは粒の除去による見掛け上のものと結論されたが、原因は不明である。

オンラインによる燃料棒熱出力（熱収支、中性子計測記録から算出）が、γ線スペクトロメトリ及び放射化学分析による燃焼度測定により精度良く較正することができた。放射化学分析によりU-233発熱の寄与が小さくPuの核分裂エネルギーの補正が1%以内であることも確認した（評価出力の精度が高い）。この出力に基づくMACROSの燃料温度計算結果は概ね測定値と一致（5%以内）したが、やや低い傾向があり、さらなる改良が必要である。

4. まとめ

ワーキンググループを平成28年1月に再々開し、OECD-NEAレポートの調査に加えて、国内外における活動状況の調査を行って平成29年3月に活動を終了し、平成29年秋の大会の企画セッション（その3）において、OECD-NEAの報告の調査結果を主体にして報告した。

再々開したワーキンググループの活動により、ウラン資源は乏しいがトリウム資源を多量に有するインド、トルコ、ノルウェーといった国々を中心にして、着実にトリウム利用の研究開発が進行していることが確認された。その開発の基本方針は既存の軽水炉ないしは重水炉に装荷することを第一ステップにし、その後トリウム-ウラン²³³炉心サイクルを開発するという方向にある。現在ハルデン試験炉で進行しつつある照射試験データが有益なものとなるとの期待がある。

一方で、トリウム燃料を炉心に装荷する上で、取得すべき炉物理データ、燃料照射特性データ等が多く残されており、着実に取得していくことの重要性も確認された。

また、再処理の技術開発、高放射線下での燃料取扱技術の開発、等、克服すべき課題があり、トリウム燃料炉心の実現には長期的に取り組む必要があることが認識された。