

軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の
利用ワーキンググループ

活動報告書

平成 27 年 3 月

【目次】

1. はじめに
2. 軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ (WG)
 2. 1 設立経緯
 2. 2 活動目的
 2. 3 活動内容
 2. 4 WG メンバー
 2. 5 会議開催記録・議事録
3. 軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用 WG 活動内容
 3. 1 最近のトリウム燃料研究についての状況把握
 - ①トリウム燃料物性研究の状況
 - ②炉心設計からのトリウム燃料の研究
 - ③トリウムに係る最近の国際動向
 3. 2 IAEA レポートレビュー
 - ①IAEA レポートの概要
 - ②各章のレビュー結果
 - ③各章のレビュー結果に対する議論・コメント
 3. 3 NRC レポートレビュー
 - ①NRC レポートの概要
 - ②各章のレビュー結果
 - ③各章のレビュー結果に対する議論・コメント
 3. 4 トリウム燃料に関する国際セミナー
 - ①セミナー開催目的
 - ②セミナーの内容と議論
4. まとめ

【添付資料】

添付1 WGメンバー名簿

添付2 議事録

添付3 「最近のトリウム燃料研究についての状況把握」に係るスライド

添付4 「IAEA レポートレビュー結果」に係るスライド

添付5 「NRC レポートレビュー結果」に係るスライド

添付6 トリウム燃料に関する国際セミナーにおける講演スライド

このページの添付資料タイトルをクリックすると、その添付資料が開きます。
本文中の「添付No」をクリックすると、その添付資料が開きます。

1. はじめに

超長寿命炉やプルトニウム・廃棄物低減における燃料形態として高いポテンシャルを有するトリウム固体燃料が数年前から注目され、各国で精力的に研究が進められるようになってきた。そのような状況を鑑みて、核燃料部会においてトリウム燃料の軽水炉等における利用について検討する「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ」（以下、トリウムWG）を設置することとした。また、近年 OECD/NEA においてトリウム燃料に関する総括的な議論がなされ、報告書のとりまとめが進められている。学会においても熔融塩炉に関する研究専門委員会活動が開始されるなど、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。東京電力（株）福島第一原子力発電所事故以降の原子力を取り巻く情勢変化を踏まえつつ、トリウム燃料技術に関する研究・技術動向について議論を進めることとした。本トリウムWGにおいて、学術団体・専門家としてのトリウム燃料関連技術・知識基盤を整備することを目的として活動した。

WGメンバーとしては、トリウム燃料を含めて原子力・サイクル全般の専門家に参加頂いた。また、トリウム燃料の研究開発の動機が、主に超長寿命炉や Pu・廃棄物等低減など、炉及びサイクル両側面にとっても革新的である概念であることから、炉、サイクル及び燃料の専門家に幹事を依頼しWGを運営することとした。

本報告書は、最近の国内外のトリウム燃料関連の研究開発の動向について議論し、トリウム燃料の位置づけと今後についての議論を行った結果をとりまとめたものである。

2. 軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ（WG）

2. 1 設立経緯

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」（トリウム WG）が設立され、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、検討等を進めてきたが、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ていた。近年、トリウム燃料に関する照射試験が行われ、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 を再開した。

2. 2 活動目的

1F 事故以降の原子力を取り巻く情勢変化を踏まえて、トリウム燃料技術に関する研究・技術動向について議論し、中断されたトリウム WG についての結論を得るとともに、超長寿命炉やプルトニウム・廃棄物低減における燃料形態として高いポテンシャルを有するトリウム固体燃料の軽水炉等における利用について、学術団体・専門家として関連技術・知識基盤を継続的に整備することを目的とする。

2. 3 活動内容

活動中断以降の国内外関連アクティビティをレビューするとともに、トリウム燃料の位置づけと今後について議論した。具体的には、以下の項目を計画し、実施した。

- ・最近のトリウム燃料研究についての状況把握
(物性研究、炉心設計、国際動向に関しての情報共有)
- ・IAEA レポートのレビュー
(Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems)
- ・OECD/NEA レポートのレビュー：未実施
(当初、2014 年末に発行予定であったため、本 WG の活動内容に計画していた。しかしながら、2015 年 2 月の段階でも未発行の状態であることから、この代替として、下記 U.S.NRC レポートのレビューを実施することとした。)
- ・U.S. NRC レポートレビュー
(Safety and Regulatory Issues of the Thorium Fuel Cycle)
- ・トリウム燃料国際セミナーへの参画

2. 4 WG メンバー

WG メンバー及び体制は以下の総勢 40 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 再開時）。

・主査：

山中伸介（阪大）

・幹事：

北田孝典（阪大）、牟田浩明（阪大）、伊藤邦博（NDC）、田中康介（JAEA）

・委員（大学等）：

有馬立身（九大）、池田泰久（東工大）、宇埜正美（福井大）、木下幹康（東大）、小無健司（東北大）、佐々敏信（JAEA）、佐藤修彰（東北大）、澤田哲生（東工大）、鈴木達也（長岡技大）、芹澤弘幸（JAEA）、高木直行（都市大）、寺井隆幸（東大）、檜木達也（京大）、山脇道夫（福井大）、大石佑治（阪大）、小宮山涼一（東大）、遠藤知弘（名大）、島津洋一郎（福井大）、赤堀光雄（JAEA）、澤部孝史（電中研）、藤井俊行（京大）、宇根崎博信（京大）

・委員（メーカー等）

安部田貞昭（原安進）、青木繁明（MNF）、大岡靖典（NFI）、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）、山崎正俊（NFI）、手島英行（MNF）、木村礼（東芝）、本田真樹（NFI）

2. 5 会議開催記録・議事録

平成 25 年 11 月から平成 27 年 2 月までの期間、下記のとおり合計 6 回の会議を開催した。添付 2 に会議議事録を示す。

①第 1 回 WG

・日時：平成 25 年 11 月 15 日（金）13:30～16:30

・場所：東京大学本郷キャンパス

・議題：

（1）WG 再開趣旨の確認

（2）WG 主査、幹事、事務局の確認（承認）

（3）最近のトリウム燃料の研究について

「トリウム燃料物性研究の状況」

阪大 牟田浩明幹事

「炉心設計からのトリウム燃料の研究」

阪大 北田孝典幹事

「トリウムに係る最近の国際動向」

JAEA 湊 和生 様

（4）今後の WG の活動方針

NDC 伊藤邦博幹事

（5）その他

「Thor Energy 社のアクティビティについて」

東大 木下幹康委員

②第 2 回 WG

・日時：平成 26 年 3 月 6 日（金）13:30～17:00

・場所：大阪大学 医学・工学研究科 東京ブランチ

・議題：

(1) 前回議事録の確認

(2) IAEA レポートのレビュー結果

” Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems”

第1章	阪大	北田孝典幹事
第2章	阪大	北田孝典幹事
	NFD	平井 睦委員
第3章	NFI	大岡靖典委員
	阪大	牟田浩明幹事
第4章	TNES	川島正俊委員
	MNF	手島英行委員
第5章	東大	小宮山涼一委員
第6章	東芝	木村 礼委員
第7章	阪大	北田孝典幹事

(3) トリウム燃料に関する国際セミナーについて： NDC 伊藤邦博幹事

③第3回 WG

・日時：平成26年6月11日(水) 13:30～16:30

・場所：大阪大学吹田キャンパス

・議題：

(1) 前回議事録の確認

(2) IAEA レポートのレビュー結果を受けた議論

” Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems”

第2章	阪大	北田孝典幹事
第4章	TNES	川島正俊委員
第6章	東芝	木村 礼委員

(3) 次のレビューレポートについて： 阪大 牟田浩明幹事

④第4回 WG

・日時：平成26年9月1日(月) 13:30～16:30

・場所：大阪大学 医学・工学研究科 東京ブランチ

・議題：

(1) 前回議事録の確認

(2) IAEA レポートのレビュー結果を受けた議論

” Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems”

第3章	阪大	牟田浩明幹事
第5章	東大	小宮山涼一委員

- IAEA レポートレビュー結果総括：
- (3) 次のレビューレポートについて：
- ⑤第5回 WG
- ・日時：平成 26 年 11 月 17 日（月）13:30～16:00
 - ・場所：大阪大学 医学・工学研究科 東京ランチ
 - ・議題：
 - (1) 前回議事録の確認
 - (2) U.S.NRC のレビュー結果と議論
 - ” Safety and Regulatory Issues of the Thorium Fuel Cycle”
 - 第 1 章、第 2 章
 - 第 3 章、第 7 章
 - (3) ワーキンググループ活動内容とりまとめ案の議論
 - (4) その他
 - 「第 2 回トリウム燃料国際セミナーの開催について」
- ⑥第6回 WG
- ・日時：平成 27 年 2 月 6 日（金） 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
 - (2) ワーキンググループ活動内容とりまとめ案の議論
 - (3) 第 2 回トリウム燃料国際セミナーについて
 - (4) その他

阪大 北田孝典幹事
阪大 牟田浩明幹事

JAEA 田中康介幹事
阪大 牟田浩明幹事

NDC 伊藤邦博幹事

主査、幹事
NDC 伊藤邦博幹事

3. 軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用 WG 活動内容

3. 1 最近のトリウム燃料研究についての状況把握

第1回トリウム WG のテーマとして、最近のトリウム燃料研究についての状況把握の観点で、下記3件の講演があった。講演のスライドを添付3に示す。

①トリウム燃料物性研究の状況

牟田浩明幹事より、最近のトリウム燃料の研究についての紹介の一環として、物性研究の状況についての報告があった。難焼結性を示すトリウム酸化物の特性におよぼす密度の影響についての紹介の後、ウランやセリウムなどとの混合酸化物の基礎的なデータ、固溶 FP 元素による各種物性への影響評価、パイロクロア型酸化物相の物性評価について述べられた。物性測定に供するトリウム酸化物の試料調製として放電プラズマ焼結 (Spark Plasma Sintering : SPS) を適用することにより、焼結温度 1600°C、保持時間 10 分間という低温・短時間の焼結で 90%T.D.以上の焼結体の作製に成功している。また、FP 元素固溶による熱伝導率の変化を Klemens-Callaway 法により解析することにより、熱伝導率を定量的に予測する手法を確立している。さらに、これまでの実験結果に基づき、トリウム-プルトニウム混合酸化物燃料の熱伝導率を計算により評価する研究成果が報告された。今後は、さらにデータの拡充を図るとともに、事故時燃料の特性についての知見が必要である旨説明があった。

②炉心設計からのトリウム燃料の研究

北田孝典幹事より、最近のトリウム燃料の研究についての紹介の一環として、炉心設計からのトリウム燃料の研究についての報告があった。トリウム燃料を採用した炉心を設計するうえで重要となる燃焼チェーン (Th-232 から U-233 までの燃焼チェーンと U-238 から Pu-239 までの燃焼チェーンの比較)、核反応断面積 (Th-232 と U-238 の捕獲断面積、U-233 と Pu-239 の捕獲・核分裂断面積の比較)、遅発中性子割合 (Th-232, U-233, U-235, U-238, Pu-239 の比較)、核分裂収率 (U-233, U-235, Pu-239 の比較) についての基礎的な説明があった。さらに、福島事故以降のトリウム燃料装荷炉心研究に関して、主に日本原子力学会や GLOBAL において報告された成果が紹介された。また、海外における最近の研究についても触れられた。

③トリウムに係る最近の国際動向

JAEA の湊和生氏より、最近のトリウム燃料の研究についての紹介の一環として、トリウムに係る最近の国際動向についての報告があった。トリウム燃料に係る最近の評価レポートや OECD/NEA/NSC におけるトリウムに係る最近の動きの説明の後、トリウムに係る最近の国際会議として ThEC13 及び GLOBAL2013 の論文についての説明があった。また、IAEA (2005 及び 2012 年)、SNETP (2011 年)、UKNNL (2011 年)、Norway (2008 年) の各種レポートについての紹介があった。

3. 2 IAEA レポートレビュー

本節では IAEA が 2012 年に発行したトリウム燃料に関するレポートである”Role of Thorium to Supplement Fuel Cycles of Future Nuclear Energy Systems”, IAEA Nuclear Energy Series No.NF-T-2.4 の内容についてのレビュー結果報告および議論・確認された内容について纏めている。

レポートでは参加国毎に取り纏められている部分が多々見受けられるが、当該専門家会議に出席した委員からの報告を踏まえると、本レポートは国を代表したものではなく、IAEA の会議に出席した人が自らの専門知識に基づいて書かれていると捉えるのが妥当であると考えられることには注意すべきである。

① IAEA レポートの概要

本レポート以前にも IAEA からはトリウム燃料に関するレポートが発行されている。特に INPRO(International Project on Innovative Nuclear Reactors and Fuel Cycles)として 2001 年から始まった活動の First phase の成果として、2008 年の 11 月に INPRO マニュアル”Guidance for the Application of an Assessment Methodology for Innovative Nuclear Energy Systems” ,IAEA-TECDOC-1575,rev.1 が発行されており、本節でレビューしているレポートは、この活動の Second Phase の成果となっている。Second Phase での活動には、カナダ、中国、インド、フランス、韓国、ロシア、スロヴァキア、ウクライナ、EC といった国々だけでなく、Thorium Power, Thor Energy, Institute of Energy Research at Julich といった企業や研究機関が参加して実施されており、以前の IAEA でのトリウム研究とは異なり、世界における原子力利用が大幅に増大した場合におけるウラン-プルトニウムサイクルを補完するトリウム燃料の潜在的な役割について、特に経済性と核拡散抵抗性に着目して検討することを目的としており、21 世紀における原子力利用の増大に対するトリウムが持つ潜在的な寄与に関する新たな知見を得ることが活動目標となっている。

レポートの構成は以下の通りとなっている。

第 1 章 Introduction

第 2 章 Use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle

第 3 章 Research and Development of Thorium in Nuclear Fuel

第 4 章 Global Scenarios with the Introduction of Thorium

第 5 章 Economic Considerations of Thorium Utilization

第 6 章 Proliferation Resistance Considerations of Thorium Fuel Cycles

第 7 章 Conclusions and Outlook

また Reference に加えて、Annex として各章の結果に関する詳細情報が載せられている。

②各章のレビュー結果

各章のレビューは下記の通りに分担し、レビュー結果をまとめたパワーポイント資

料を作成した。添付 4 に各章のスライドを示す。

第 1 章 Introduction	阪大	北田孝典幹事
第 2 章 Use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle	阪大 NFD	北田孝典幹事 平井 睦委員
第 3 章 Research and Development of Thorium in Nuclear Fuel	NFI 阪大	大岡靖典委員 牟田浩明幹事
第 4 章 Global Scenarios with the Introduction of Thorium	TNES MNF	川島正俊委員 手島英行委員
第 5 章 Economic Considerations of Thorium Utilization	東大	小宮山涼一委員
第 6 章 Proliferation Resistance Considerations of Thorium Fuel Cycles	東芝 NDC	木村 礼委員 伊藤邦博幹事
第 7 章 Conclusions and Outlook	阪大	北田孝典幹事

③各章のレビュー結果に対する議論・コメント

各章のレビュー結果に対する WG での議論およびコメントについて示す。

第 2 章 Use of Thorium in the Nuclear Fuel Cycle

(ロシア)

- ・ロシアは自ら保有するウラン資源量に余裕があまりないことを出発点にして原子力開発計画を立案しており、理論的帰結として、2050 年までに高速炉サイクルを実現してウランを長期利用することを考えている。
- ・原子力による発電量を毎年 2~3GW ほど増やしていく計画であり、将来像は高速炉を用いたクローズドサイクルを目標としている。2050 年までを対象に高速炉導入シナリオが検討されており、実在するウランの長期利用が検討されている。
- ・プラント (VVER) を海外に輸出することに積極的に取り組んでおり、ウラン燃料も同時に輸出することを想定している。高速炉の導入により、600 キロトンのウランで国内需要はまかなえる計算だが、輸出を考えると足りなくなる可能性があり、トリウムを使用する方策が検討されている。
- ・ロシアの軽水炉 (VVER) では燃焼初期の減速材温度係数を負にする対策として、ウラン 235 の代わりにプルトニウムの使用を考えている。

(ノルウェー)

- ・ロシアと異なり、ノルウェーではボイド係数を負とする対策として炉心の扁平化、稠密格子配置等の形状を変更する炉心設計で対応している。
- ・ノルウェーが BWR でのトリウム使用を検討していることについて、スペクトルを変えられる BWR の利点を生かすとともに、RBWR の実現が目標にあり、手始めに BWR から検討を開始したものと推定される。

(カナダ)

- ・カナダの CANDU 向けのトリウム燃料成型体への UO_2 溶液含浸についてペレット中心部への侵入が見られないことに対し、不均一性に起因して品質制御が困難であるとともに、燃料中心温度評価やスエリングなどの照射挙動評価が困難となる可能性がある。しかしながら、CANDU では低濃縮であること、また、燃料外周部で燃焼するので核的にも熱的にも問題ないと推定される。
- ・この燃料は DUPLEX 燃料と同様の考え方で燃料外周部を発熱させるため、あえて 2 相にした可能性も考えられる。

第 3 章 Research and Development of Thorium in Nuclear Fuel

- ・放射性毒性に関して、ウラン燃料の場合はプルトニウムと MA が毒性の大部分を占めるが、トリウム燃料のメリットはこれらが生成しないことであると思われる。しかしながら、EC の既存 PWR におけるトリウム利用検討の中でトリウム燃料の非放射毒性カーブが 10 万年後前後にピークが見られる。これはトリウム 229 や FP の鉛への崩壊過程の毒性によるものと解釈される。
- ・韓国の既存 PWR でのトリウム装荷検討で、平衡炉心の燃料装荷パターンが示されているが、新燃料の周りに出力ピークが立つものと考えられ、炉心燃料配置の成立性にやや疑問がある。
- ・EC の核拡散抵抗性検討の中で、45GWd/t 取り出し後の表面ガンマ線量値について、トリウム燃料の方が通常ウラン燃料よりも小さくなっており、評価結果に疑問がある（定性的にはトリウム燃料の方が線量は高いはず）。
- ・PWR の場合は高燃焼度・ワンスルーが有望とのフランスの整理は、これまでの研究から分かったものとのことであるが、トリウムはそもそも再処理しにくい燃料であること、トリウムを添加することで内部転換比が増加することから、一般的な知見から判断しても妥当と思われる。

第 4 章 Global Scenarios with the Introduction of Thorium

- ・本章では、限りあるウランをどのようにシェアするか、どの方法でトリウムを活用するのが良いのかを検討したものであり、各種パラメータを使用したシナリオ別のケーススタディ結果が述べられている。ただし、本レポートの作成に関与した国々（ノルウェー、インド、韓国など）の意向が強く反映されていることを認識しておく必要がある。

- ・この章の記述は俯瞰的であり、コストの詳しい説明もない。具体的な要素技術にどう結び付くかが明確でないことから、この結果をどう解釈し、どう使っていくかについては、別途議論の余地があると思われる。
- ・この章はノルウェーなどの資源国がトリウムの魅力や使用する意義を示す意図がうかがえる。資源国からの売り込みに対し、高い水準のプラント技術や燃料製造技術を有する日本からは、実現可能な技術を具体的に提供することが重要であると考えられる。

第5章 Economic Considerations of Thorium Utilization

- ・IAEA レポートで使用されているコスト評価式には金利も組み込まれている。
- ・炉型ごとに不確実性の高いウラン価格で発電コストの比較をしている点は評価できるが、基準が明確でないことを考慮しておく必要がある。
- ・標準 (Reference) ケースは古いデータに基づくもので、代替 (Alternative) ケースは比較的現状に近いデータ (建設コスト：2倍、再処理費：3倍) を用いたものであるが、それでも建設費、燃料費の評価は現実よりはまだまだかなり下回っている。
- ・インドの改良型重水炉 (AHWR) は耐用年数 100 年、稼働率 90% として経済性評価が行われており、その妥当性については疑問がある。ただし、ウラン価格の上昇によっては、トリウム利用の経済性が既存炉よりも上回る可能性はある。
- ・トリウム導入のシナリオに関して、改良型重水炉 (AHWR) でのトリウムのワンスルー利用が ALWR よりもメリットが大きいと結論づける前提として、均質混合利用の場合であることが挙げられる (非均質混合に係る検討は行われていない)。
- ・ALWR は LWR に比べてウラン価格に対する発電コストの変化が小さいが、これは、熱効率の違いが現れているものと思われる。
- ・発電コストを比較する際には、為替レートの換算方法が重要であるが、本レポートには明確に示されていない。
- ・論点整理の一つとして提示された日本におけるコスト等検証委員会報告書では、石油火力等に比べて原子力のコストを低く評価している。しかしながら、ここでは未だ円安となっている為替レートは反映されておらず、現状ではその差は更に大きくなっている。
- ・経済性に関して、技術の不確実性、政策の影響に係る分析が欠けている。

第6章 Proliferation Resistance Considerations of Thorium Fuel Cycles

- ・核拡散抵抗性を議論する上では、ウラン 233 に加え、ウラン 234 も考慮する必要があると考えられる。
- ・トリウム燃料のワンスルー利用では、高濃縮 (20%以上) ウラン 235 の使用が核拡散抵抗性を弱める。それを防ごうとしてウラン 238 を混合することも考

- えられるが、プルトニウム 239 が生成されるという問題が生ずる。
- 1980 年代のトリウム溶融塩炉においてはウラン 233 が生成され、核兵器転用を抑止する観点からウラン 238 を混合することが検討された経緯がある。
 - Radiation による核拡散抵抗性を考える場合、テロリストというような個人レベルの脅威を判断の俎上にはのせるのではなく、国家主体の問題として検討することが必要である。

3. 3 NRC レポートレビュー

①NRC レポートの概要

Safety and Regulatory Issues of the Thorium Fuel Cycle (NUREG/CR-7176, ORNL/TM-2013/543) は U. S. NRC から 2014 年 1 月に出版されたトリウムサイクルに関するレポートである。これはトリウム燃料の使用について基礎的概念以外にはじめて規制等の検討に踏み込んだものであり、以下の 7 章と付録から構成されている。()内はその章のページ数を示す。

第 1 章 Introduction (2)

第 2 章 Historical, Current, and Proposed Use of Thorium-based Fuels (20)

第 3 章 Material Properties of Thorium-based Fuels (6)

第 4 章 Qualitative Evaluation of Thorium Licensing in LWRs (8)

第 5 章 Quantitative Assessment of Thorium Fuel in LWRs (32)

第 6 章 Out-of Reactor Characteristics of Thorium Fuel (24)

第 7 章 Summary and Conclusion (12)

Appendix (33)

②各章のレビュー結果

4 章ならびに 5 章は軽水炉でのトリウム酸化物燃料使用に関わる許認可等についてのものであり、また 6 章については IAEA レポートとの重複が多い。そのためここでは 1 章および 7 章におけるこれらの概略を知るだけに留め、レビュー対象から外すこととした。以上から 1 章：イントロダクション、2 章：トリウム燃料の過去、現在、今後の使用方法、3：物性、7 章：まとめと結論、をレビュー対象とした。以下にそれぞれの章の分担者を示す。また各章についてのレビュー結果をまとめたスライドを添付 5 に示す。

第 1 章 Introduction JAEA 田中康介幹事

第 2 章 Historical, Current, and Proposed Use of Thorium-based Fuels

JAEA 田中康介幹事

第 3 章 Material Properties of Thorium-based Fuels

阪大 牟田浩明幹事

第 7 章 Summary and Conclusion

阪大 牟田浩明幹事

③各章のレビュー結果に対する議論・コメント

まずレビュー結果に基づいたそれぞれの章の概略を以下に示す。

第 1 章では各章の概略がまとめられており、本レポートはトリウム燃料を現行の LWR で用いることに焦点をおくことが述べられている。また本レポートの目的として以下の 4 点があげられている。

- ・原子炉において使用されるトリウム燃料の過去、現在、今後の使用方法についてまとめる。
- ・トリウム燃料におけるいくつかの重要な特性を提供する。
- ・現行の軽水炉 (LWR) の設計向けの炉内及び炉外の双方におけるトリウムベース

燃料サイクルに特有な安全性に関する問題や要求事項の定性的な評価を行う。

- ・米国においてトリウム LWR 燃料の許認可を取得する際にキーとなる知識、取り組むべき技術課題を明らかにする。

第 2 章では、背景情報としてトリウム燃料を利用する動機やトリウム燃料サイクルオプションのポテンシャルを述べている。米国と海外での原子炉におけるトリウム燃料の歴史的な使用状況を調査し、現在提案されているトリウム燃料の適用方法について議論されている。Thor Energy 社や Lightbridge 社における軽水炉での利用に関わる取り組みが紹介され、重水炉や高温ガス炉における取り組みは概略を述べるに留まっている。

第 3 章ではトリウム燃料を使用する際のキーとなる特性として増殖性、崩壊系列と放射性毒性、熱機械的特性について述べられており、それらが炉内、炉外の挙動にどのような影響をおよぼすかについて議論されている。ただごく短い概説に留まっており、詳しい物性に関しては例えば IAEA-TECDOC1450 および IAEA-TECDOC1496 など他のレポートを参考にあげている。

第 4 章と第 5 章では、炉内における安全面や、ワンスルー LWR 燃料サイクルにおけるトリウム燃料を使用するうえでの規制上の問題について述べられている。

第 4 章では、Standard review plan for the review of safety analysis reports for nuclear power plants: LWR edition (NUREG-0800)の重要な章をレビューすることにより、炉内の安全性が定性的に評価されている。また Appendix にはこのレビューと NUREG-0800 の対応が示されている。

第 5 章では、ワンスルー LWR 燃料サイクルにおけるトリウムベース燃料の定量解析結果を述べている。SCALE コードを用いて実施された集合体デザイン、ボロン反応度、出力分布など重要なパラメータについての解析結果が示されている。

第 6 章では、重要な炉外の挙動や傾向を推測するため、炉心から取り出したトリウムベース使用済燃料の解析結果が述べられている。トリウム燃料を使用する際の影響の大きさを確認するために、燃料同位体、崩壊熱、ソースタームが評価されている。

第 7 章では、安全要求事項への影響とトリウムの許認可のための技術基盤開発に関して、追加の解析や研究が必要となる知識についてまとめられている。ここでは、トリウム燃料の許認可に必要な重要な現象とこれらの現象に関連する様々なニーズ、影響する安全性の分野、それらの現象の重要度などについて議論し、これらの問題がランクづけされ、まとめられている。

次に各章のレビュー結果について WG でなされた議論およびコメントを示す。

- ・レポートではトリウムの埋蔵量が示されているが、年度等によって大きく変わらう。本レポートでは 2011 年の文献が参照されているが、注意が必要であるとの指摘があった。放射性毒性のデータについても、仮定するシナリオや燃料組成によって毒性に強く影響する ^{233}U の収量が異なり、その評価には注意すべきとのコメントがあった。こうしたシナリオ依存のデータは他にもレポート中で直接の言及が

ない場合があります、データの取り扱いには留意する必要があると思われる。

- 同様に 7 章のトリウム燃料に関する事象の重要度ランクづけにおいても、レポート中にその判断の根拠が示されていないものが多く、概要を把握するうえでは有用なものの注意が必要といえる。
- レビュー対象としなかったものの、4 章はトリウム燃料について基礎的概念だけでなく、はじめて実用化に向けた許認可取得についてまで踏み込んだものであり、意義深いレポートであるとのコメントがなされた。

3. 4 トリウム燃料に関する国際セミナー

①セミナー開催目的

原子力学会核燃料部会ではトリウム燃料利用に関わる検討を進めてきており、海外も含めたトリウム燃料の開発に携わっている専門家から最新の研究開発の状況について講演を受け、議論を活性化することを目的として、原子力学会核燃料部会の主催でトリウム燃料に関する国際セミナーを平成 26 年 4 月 9 日午後、東京大学山上会館で開催した。本セミナーでは、トリウムのペレット燃料形態での利用に重点を置いた講演が海外から 3 名、国内から 5 名の専門家により行われた。

②セミナーの内容と議論

最初に主催者を代表して核燃料部会「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ」の主査である大阪大学の山中伸介先生が有益なセミナーとなることを期待する旨の開会の挨拶を行った。次いでセッション 1 として、東京大学名誉教授の岩田修一先生の座長のもとで、下記 5 件の講演が行われた。

講演 1 : 「Thorium-Based Fuels in LWRs; The First Step Towards a Closed Thorium Cycle」

ノルウェーThor Energy 社 CEO の Øystein Asphjell 氏が、IAEA レポート(IAEA-TECDOC-1450)等を引用し、トリウム利用の動機・意義を述べた後に、トリウムサイクルの確立に向けてステップを踏んでいく開発のアプローチをとり、最初に軽水炉で利用することとし、2011 年に国際トリウムコンソーシヤムを設立し、将来的なトリウムサイクル確立に向けた着実な一歩を 2013 年にノルウェーのハルデン炉での照射試験により踏み出したことを強調した。

会場より、燃料の製造の困難性に係わる質問が出たが、焼結方法の改良によりクリアしたことが報告された。

講演 2 : 「Global Energy Strategy in Japan」

東京大学の小宮山涼一先生は、エネルギー戦略研究の専門家の立場から、東京電力福島第一原子力発電所の事故後の国内エネルギー環境の変化と輸入する燃料費の激増状況を整理した後、世界のエネルギー需要増に伴う化石燃料の高騰・枯渇、ウランの資源的制約、また地球温暖化ガス抑制を踏まえると、一定レベルの原子力の導入を前提としたエネルギーミックスの実現が不可避であり、トリウム利用の推進には核燃料の価格競争力の維持の面も含めて十分な意義がある、と説明した。

講演 3 : 「Thorium Core Characteristics」

大阪大学の北田孝典先生は炉物理の専門家の立場から、利用形態により差はあるものの、トリウムのウランに対する燃焼の優位性を核反応断面積により説明するとともに、トリウムを装荷した炉心特性には予想以上の不確実性があり、トリウムの核データの信頼性向上に向けた取り組みが重要であると指摘した。

講演 4 : 「Issues on Introduction of Th-Fuel to Actual Commercial Reactor」

三菱重工の小坂進矢氏はトリウム燃料の近未来での現実的な利用形態として商

用炉でのワンスルー燃焼について現状の知見を整理した上で検討し、炉心の成立見通しを示すと共に、最近 NRC が発表した「トリウム燃料サイクルの安全と規制問題」レポート（NUREG-CR7176）を精査してデータの不足を整理し、とりわけ安全性に関する知見の不足がトリウム利用の上で制約となる可能性があり、効率よく開発を進めることの重要性を指摘した。

講演 5 : 「RBWR (Resource-renewable BWR) for Fuel Recycling and Transmutation」

日立の大塚雅哉氏は、燃料格子を三角配列として六角状集合体に束ねて稠密化して水対燃料体積比を減らすことで高転換比を実現し、エネルギー長期安定供給と TRU 等の長寿命放射性核種を炉内で有効活用し環境負荷を軽減する RBWR (Resource-Renewable BWR) の設計検討を行い、高転換比 ~ 1 が実現できる見通しを示した。また、TRU 等の長期の毒性を有する核物質を短寿命の核物質に変換できる可能性があることを説明するとともに、米国や英国の大学などでトリウム燃料を使った RBWR の検討が行われていることを紹介した。

会場より、海外でのプロジェクトの進行状況に関する質問があり、海外との提携が進みつつあるとの回答がなされた。

コーヒーブレイクの後、セッション 2 として東京大学教授の寺井先生の座長のもとで 3 件の講演が行われた。

講演 6 : 「Thorium Fuel Properties」

大阪大学の牟田浩明先生は、トリウム酸化物燃料の熱伝導度データがウラン酸化物に比べて 1/10 程度であることに示されるようにトリウムに関するデータの取得が不足しているとの認識から、SPS (Spark Plasma Sintering : 放電プラズマ焼結) 法により均質で高密度のトリウム試料を製作し、熱伝導度等の基礎物性を取得し、汎用性のある物性式を導いたことを報告した。また燃焼に伴い生成するパイロクロア酸化物 (トリウム酸化物中に析出) を作製し、結晶構造の複雑性に起因して熱伝導度がトリウム酸化物に比べて非常に小さいこと、ヤング率、デバイ温度に変動は無いことから、熱伝導度の低下は複雑な結晶構造に起因すると説明した。

会場から商用の燃料を製造するには SPS 法は適さないのではないかと質問があり、今回は試験試料作製のために SPS 法を使用した、原子炉用の燃料の製造方法の開発が別途必要との回答がなされた。

講演 7 : 「Thorium Test Capabilities at Halden Reactor」

OECD ハルデンの Carlo Vitanza 氏は、ハルデン炉での照射試験シリーズのうち第一弾となる照射試験 (IFA-730.1A) の結果として、150 日間のトリウム燃料 (Th/Pu、Th/U) の燃焼挙動 (温度、内圧、等) がほぼ予測通りであり、また出力増加事象においても被覆管の破損は無く、照射が順調に進行していること、今後の照射試験計画に日本が参加した場合の有益性を説明した。

講演 8 : 「Results of Irradiation of Thorium-Pu fuel in The Halden Reactor」

Thor Energy 社の Julian Kelly 氏は、まずトリウム利用の優位点として、転換比が高いこと、高燃焼度が可能であることを指摘し、ハルデン炉での照射試験に供する (IFA-730.1B) トリウムペレット及び照射リグの製作方法及び今後のトリウム炉の開発計画等を説明した。燃料製造は通常の混合、プレス成型、炉焼結のプロセスを用いている。

講演終了後に山上会館にてセミナー参加者 45 名のうち 25 名が参加して懇談した。今回、NPO トリウム溶融塩炉フォーラム他、一般市民の方々も参加しており、トリウム燃料に対する関心の高さが窺われ、セミナーの継続を希望する意見も出た。

講演 1 から 8 までについて、それぞれの講師より提供を受けたスライドを添付 6 に示す（講師から提供されたスライド（講演 1、2、7、8）のタイトルは講演のタイトルと異なっているがそのまま掲載している）。

なお、更なる議論の活性化を図ることを目的として、平成 27 年 4 月中旬に国内外の専門家のご講演を受ける第 2 回トリウム燃料に関する国際セミナーを開催する。

4. まとめ

超長寿命炉やプルトニウム・廃棄物低減における燃料形態として高いポテンシャルを有するトリウム固体燃料の軽水炉等における利用について、東京電力（株）福島第一原子力発電所事故（1F 事故）以降中断していた「軽水炉・高速炉におけるトリウム燃料の利用ワーキンググループ」（トリウム WG）を再開した。1F 事故以降の原子力を取り巻く情勢変化を踏まえて、トリウム燃料技術に関する研究・技術動向について議論し、中断されたトリウム WG についての結論を得るとともに、学術団体・専門家として関連技術・知識基盤を継続的に整備することを目的に活動を実施した。平成 25 年 11 月から平成 27 年 2 月までに合計 6 回に渡る会合を開催することにより、物性研究、炉心設計、国際動向に関しての最近のトリウム燃料研究についての状況を把握するとともに、IAEA レポートのレビュー、U.S. NRC レポートレビューを実施し、議論した。また、トリウム燃料に関する国際セミナーに参画することにより、国内外関連アクティビティについて調査し、トリウム燃料の位置づけと今後について議論した。