

活動報告

本報告は、平成 22 年 7 月 15 日～12 月 16 日の期間、日本原子力学会核燃料部会の主催で計 5 回開催された「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」における講演および議論内容をまとめたものである。次の 4 つのテーマ、(1)トリウム原子炉の特性と導入シナリオ、(2)トリウム燃料サイクル及びトリウム燃料材料の基礎物性、(3)トリウム燃料の社会受容に関する側面の検討、および、(4)トリウム燃料サイクルに係わる国内外の動向調査、に関する国内専門家の講演を元に、ワーキンググループメンバーの間で議論を行った。議論の結果と別途行われたアンケートの結果から、種々側面におけるトリウム燃料のポテンシャルが認められるものの、同時に存在する課題・問題点等の考慮、国内外で行われた過去の成果の再調査も含め、広範・基礎的なトリウム燃料の調査による課題抽出の継続が重要であるとの合意が得られた。

(1) トリウム原子炉の特性と導入シナリオ

トリウム炉の炉特性、導入シナリオ、発電コスト、そして各国の検討状況に関する報告・議論が行われた。以下にその演題および概要を紹介する。

① 水冷却トリウム増殖炉の可能性（第三回：JAEA・Sidik Permana）

現行軽水炉をベースに軽水または重水冷却の酸化物燃料トリウム増殖炉の設計可能性を検討した。増殖と負の冷却材係数を同時達成できる可能性があること、重水を用いた炉では軽水に比べて設計可能範囲が広がり経済的な炉心の構築が容易となるが、一次系の機器、構造材材料への負荷等、新たな課題を伴うことが報告された。

② 近年の固体燃料トリウム炉の研究動向（第三回：東海大学・高木 直行）

近年開催された国際会議（Global2009, ICONE18, ICAPP2010 等）の論文がレビューされた。ノルウェーのThor Energy社は、PWRの燃料を(U, Pu) O_2 から(Th, Pu) O_2 へ置き換えた場合、ほぼ同等かやや優れた核的性能を有し、さらなる燃焼度向上の可能性があると報告。トリウムパワー（現ライトブリッジ）社は、ロシアVVER-1000 に直接装荷可能なseed / blanket燃料集合体を開発し、事故事象を解析した結果、seed/blanketトリウム燃料集合体はVVER-1000 の安全規制制限値を満足したと報告。中国、カナダAECLは、燃料バンドルの中央 8 体をTh O_2 燃料とし、その周囲を天然ウランから低濃縮ウランに置き換えた燃料バンドルを装荷したCANDU炉を検討し、燃料利用とサイクルコスト両面で効率的であると報告している。

③ トリウム炉の導入シナリオと発電コスト（第三回：東海大学・高木 直行）

現行軽水炉から将来のトリウム増殖炉へ移行するまでの導入シナリオと発電原価の基礎的検討結果が報告された。発電容量 60GWe 分の軽水炉をトリウム炉にリプレースする 100 年間のシナリオとして、軽水炉→移行期 Th 炉→Th 増殖炉を検討した結果、1) 移行期炉心として Th-Pu 燃料を装荷した現行 PWR を用いる場合、U-233 の生成速度が遅く 100 年後のリプレース率は 50%程度だが、2) 移行期炉心に重水 PWR を用いる場合、100 年間で Th 炉への移行がほぼ完了するとの結果が示された。

④ 京都大学原子炉実験所におけるトリウム利用炉関連炉物理実験（第四回：京都大学・宇根崎 博信）

京大炉を利用したトリウム燃料関連核種の炉物理実験および核データ誤差解析結果について報告がなされた。ウラン燃料系核種に比べ、U-233 や Th-232 の断面積は核データライブラリー間の差が大きいこと、Th-232 の断面積誤差がトリウム燃料熱中性子炉の核特性に大きなインパクトをもつので、共鳴領域、エピソード領域等のデータ拡充が必要であることが指摘された。

⑤ 軽水炉へのトリウム燃料適用の検討（第四回：福井大学・島津 洋一郎）

電力と廃熱を利用する都市近傍設置を目指した安全小型長寿命軽水炉の設計例が示された（ $\text{ThO}_2+\text{PuO}_2$ 被覆粒子燃料を十分な実績のある軽水炉の被覆管内で保護し安全性をさらに向上）。臨界解析において、U-233 炉心の実効増倍率の核データライブラリー間の相違がPu炉心に比べて大きくなったことから、更なる測定、評価に基づく見直しが望まれるとされた。

(2) トリウム燃料サイクル及びトリウム燃料材料の基礎物性

トリウム燃料・材料・サイクルに関する講演の概要を紹介し、トリウム燃料の基礎物性について考察した。以下にWGにおける演題および概要を記載する。

① 酸素不定比を有するトリウム酸化物燃料の基礎特性（第一回：JAEA・逢坂 正彦）

トリウム酸化物を高速炉において利用する場合の酸素不定比の基礎物性に及ぼす影響について、実験と解析評価を行った成果について報告があった。

② トリウム燃料の基礎物性（第三回：大阪大学・牟田 浩明）

(U, Th) O_2 燃料の新規製造手法ならびに物性研究の成果が報告された。

③ トリウム系酸化物燃料の調製と照射挙動（第四回：JAEA・赤堀 光雄）

旧原研トリウム燃料研究室において行われたトリウム酸化物燃料の一連の基礎物性研究の成果が紹介された。

④ トリウム燃料の製造について（第四回：原子燃料工業株式会社・大岡 靖典）

実際に燃料製造することを想定した場合の検討結果として、難焼結性に起因する密度制御を克服する必要があること、回収（再処理）トリウムの高線量対策、加工施設としての許認可の課題等が紹介された。

⑤ トリウム燃料サイクルの課題（第五回：東京工業大学・鈴木 達也）

トリウム燃料を再処理する際の技術的課題として、主にトリウム燃料の溶解挙動が議論された。

(3) トリウム燃料の社会受容に関する側面の検討

トリウム燃料技術の社会受容に関する側面について行われた議論および概要を以下に示す。

① トリウムとエネルギー・環境戦略（第二回：東京大学・小宮山 涼一）

エネルギー資源から見たトリウムの位置づけが論じられた。エネルギー情勢、原子力の動向、トリウムの特徴、エネルギー・環境から見たトリウム開発の観点から、原子力が将来的にも不可欠であることは明白であり、トリウム燃料も大きなポテンシャルを秘めているとの報告があった。

② 原子力技術と社会の関係論 ―新技術導入を意識面から捉えなおす―（第二回：若狭湾エネルギー研究センター・篠田 佳彦）

一般公衆と原子力に係わる専門家の意識についての調査・分析結果が報告された。一般公衆の、未知のものへの恐れ、という特性から、トリウム技術の位置づけ（すなわち新技術として捉えるのか、既存商業炉への適合性が高く既存技術の延長として位置づけるのか）が導入の困難性を決定する際の重要な要素になるであろうとの分析結果が報告された。

③ トリウム燃料の許認可に係わる課題（第二回：三菱重工業㈱・福田 龍）

既存軽水炉への導入を前提とした許認可（安全審査）への影響について考察がなされた。Pu サーマル許認可の経験も踏まえ、技術的に特段の問題となる可能性のある項目は現状見当たらず、これはトリウムの良好な特性（熱特性、核特性）に主に起因していると思われるが、今後は照射試験データを効率的に取得していくことが重要との認識が示された。

④ 核物質管理と核拡散抵抗性（第二回：東京工業大学・澤田 哲生）

トリウム燃料の核物質管理と核拡散抵抗性に関して、核への転用技術の観点からの報告があり、核拡散抵抗性の意味や定義等のあいまいさについての問題提起がなされた。

⑤ トリウムサイクルの核拡散抵抗性（第二回：東海大学・高木 直行）

核拡散抵抗性は多くの評価側面があり、それらを多面的に考慮する必要があるとの国際的共通認識が得られつつあるという認識に立って、トリウム燃料の核拡散抵抗性が論じられた。

上記の個別トピックスに関する議論を受けて、総合的な議論が行われた。その結果、下表に示す共通認識が明らかとなった。トリウム燃料・炉心技術について、単一の側面においてはウラン・プルトニウム燃料との比較において魅力的な特性・特長を有する部分があるものの、現在までになされた様々な検討を含め、総合的・網羅的に評価していく必要性が改めて認識された。

- ・ 核不拡散性の多面的評価の必要性
- ・ 国内で行われた過去の成果の再調査も含め、広範・基礎的なトリウム燃料の調査による課題抽出が重要
- ・ 資源データベース整備、エネルギー利用効率を高め核を作りにくい炉体系の構築、(様々な) 課題の発掘・抽出が今後の課題

(4) トリウム燃料サイクルに係わる国内外の動向調査

トリウム燃料サイクルに係わる国内外の動向調査として、以下の講演および議論が行われた。

① 燃料戦略とハルデン炉照射に関する ThorEnergy 社パリ会議報告（第一回：電中研・木下 幹康）

2010年6月3、4日にパリで開催された会議の概要として、トリウム燃料の基礎的特性に関する説明および欧米を中心に高まっているトリウム利用の気運の高まりとそれを受けてのハルデン炉を用いたトリウム酸化物の照射試験計画の進行状況に関する報告があった。

② これまでのトリウム燃料研究会のレビュー（第一回：福井大学・宇埜 正美）

本ワーキンググループの前身として活動した研究会（「トリウム燃料研究会」、平成21年9月～22年5月まで、計3回開催、主査：大阪大学山中教授）の成果が紹介された。

③ トリウム燃料の軽水炉・高速炉への適用に関わる海外動向（第五回：(株)NDC・伊藤 邦博）

海外におけるトリウム燃料の過去の使用実績および今後の計画が報告された。ワンスルー・リサイクル含め、炉型に関しても様々なオプションがある。

(5) トリウム炉の基礎研究の意義・方向性に関するアンケート結果のまとめ

ワーキンググループメンバー全員を対象にトリウム炉の基礎研究の意義・方向性に関するアンケートを行ったところ、様々な意見が提出された。結果を表1に要約した。こうした意見を踏まえ、今後は専門委

員会で議論を発展させていく予定である。

表1 ワーキンググループメンバーを対象としたアンケート結果の要約

トリウムの魅力、期待は？	トリウムの不利な側面、課題は？	開発の方向性、政策上の位置づけは？
<ul style="list-style-type: none"> ・ 豊富な資源量、TRUの低減効果。 ・ ウランの有力な代替資源、資源セキュリティの向上、ウラン価格の抑制。 ・ 残滓トリウムを原子炉の核燃料として利用する事により、希土類鉱山での放射線管理の手間を削減。 ・ ウラン（酸化物）とさほど燃料物性が変わらないこと。 ・ トリウムの優れた転換性能を活かし超長サイクルが出来ればワンスルーの利用の可能性も出る。 ・ 増殖と負ボイド反応度を両立できる可能性のあること。 ・ アクチノイドでありながら、f電子が無く、IV族遷移金属（Ti, Zr, Hf）と同様な挙動をするため、他のアクチノイドとの分離がしやすいこと。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ トリウムは中性子を吸収して初めて核分裂物質(U-233)になること。 ・ 酸に対して溶解しにくい。商業規模での再処理の技術的・コスト的見通しが不明。 ・ 照射後の高エネルギー放射線により、燃料サイクル設備に負荷が大きい（現行サイクルとの比較で）。 ・ トリウムに対する専門家の評価が多様で、整理されていないこと。 ・ 日本の原子力政策との整合性（特にU/Puサイクルとの整合性）。 ・ 基本的にイオン結合性化合物が多く、揮発性化合物が少ないこと（但し、V価、VI価をとるウランの揮発性化合物とは、乾式法で分離しやすい可能性あり）。 	<ul style="list-style-type: none"> ・ 現行U-Puをメイン路線とし、それを補うオプションとしてトリウムを考えることは意味がある。 ・ トリウムサイクルの基礎研究を支援する体制の充実。 ・ 国内外の研究成果・知見の整理、試験燃料の製造と照射、再処理を実際にやってみる計画作りが必要。 ・ 湿式再処理法では前処理後、U（Pu）を選択溶解し、不溶性のThO₂を分離する。 ・ 現原子力政策と競合すること無く、トリウム燃料の日本での消費は考えず、資源国への貢献のカードという割り切った考え方もありうる。

以上