

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

平成22年12月16日

NDC 伊藤邦博

1

内容

1. 初期のトリウム炉
2. シッピングポート炉
3. 米国NERIトリウム炉心研究
4. カナダ、中国の動向
5. トリウムパワー(現ライトブリッジ)社
6. Thor-Energy社とハルデンププロジェクト
7. インドの動向
8. フランスの動向
9. ロシアの動向
10. まとめ

2

1. 初期のトリウム炉

- 1950年代から1970年代半ばまで、ウラン資源節約のため、世界的にトリウム燃料及びトリウムサイクルへの関心が高まった。
- 1960年代半ばから80年にかけてトリウム燃料を使ったいくつかの実験炉、原型炉が順調に運転された。例えばIndian Point 2炉 (PWR)、Ft St Vrain炉 (HTGR) でトリウム燃料が使われた。

3

2. シッピングポート炉

•出力: 60MWe

•操業開始: 1958年 運転終了: 1982年

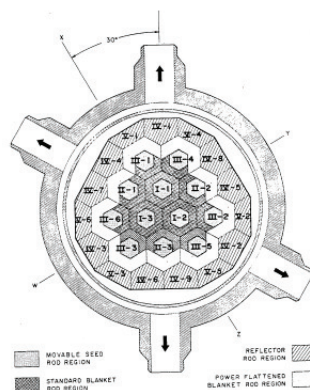
•軽水冷却増殖炉型に改造: 1977年

可動型シード燃料(濃縮ウラン酸化物燃料)

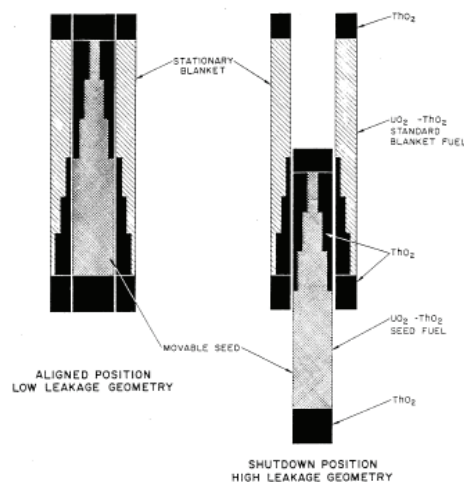
固定型ブランケット燃料(トリウム酸化物)

炉心断面図

増殖を達成したとされるが、詳細なデータは公開されていない。



- U238/Pu239 サイクルは高速中性子でのみ増殖が可能
- Th-232/U-233 サイクルは熱中性子、速中性子、高速中性子で高転換あるいは増殖が可能



4

3. 米国NERIのトリウム炉心研究

- NERIプログラム
 - 米国DOE開始(1999年)の公募型研究プログラム
 - 目的
 - 原子力分野での国際競争力確保
 - 21世紀におけるエネルギー・環境問題の主導権確保
 - トリウム関連研究4件
 - **Optimization of Heterogeneous Utilization of Thorium in PWRs to Enhance Proliferation Resistance and Reduce Waste**
 - Reporting Period: (October 2000-September 2003)
 - **Brookhaven National Laboratory**
 - Principal Investigator: Dr. Michael Todosow
 - **Advanced Proliferation Resistant, Lower Cost, Uranium-Thorium Dioxide Fuels for Light Water Reactors**
 - Reporting Period: (September 1999 – August 2002)
 - **Idaho Engineering and Environmental Laboratory**
 - Principal Investigator: Dr. Phillip E. MacDonald
 - **Fuel for a Once-Through Cycle (Th, U) O₂ in a Metal Matrix**
 - Reporting Period: (September 1999 – June 2003)
 - **Argonne National Laboratory**
 - Principal Investigator: Dr. Sean McDevitt
 - **A Proliferation Resistant Hexagonal Tight Lattice BWR Fuel Core Design for Increased Burnup and Reduced Fuel Storage Requirements**
 - Reporting Period: (October 2001-December 2002)
 - **Brookhaven National Laboratory**
 - Principal Investigator: Dr. Hiroshi Takahashi

5

米国NERIトリウム炉心研究(1/4)

- テーマ名: 'Optimization of Heterogeneous Utilization of Thorium in PWRs to Enhance Proliferation Resistance and Reduce Waste' Project No. 00-014
- 研究代表者:
BNL Dr. Michael Todosow
共同研究者:
MIT Prof. M. Kazimi 等(韓国、ロシアも参画)

ラドコフスキトリウム炉(RTR) 概念

・シード・ブランケット燃料集合体採用 (SBU)

シード部 U-Zr金属

ブランケット部 ThO₂+UO₂

- ・既存のPWR、VVER燃料との置換可能
- ・核拡散抵抗性、Pu燃焼等目的に応じた多様な設計

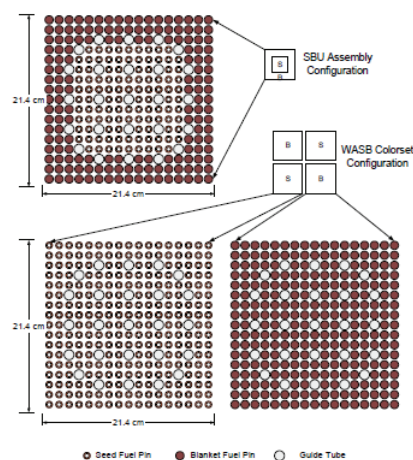
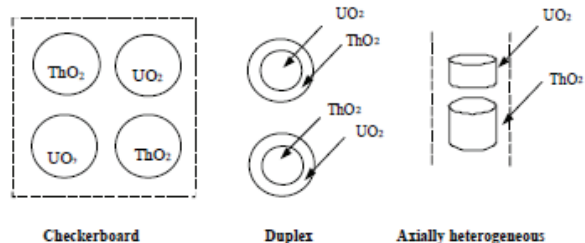


Figure-1 SBU and WASB Fuel Assembly Design

6

米国NERIトリウム炉心研究(2/4)

- テーマ名:
‘Advanced Proliferation Resistant, Lower Cost, Uranium-Thorium Dioxide Fuels for Light Water Reactors’
Project No. 99-153



- 研究代表者:
INEEL Dr. Phillip E. MacDonald
MIT等の4大学、米国内のすべてのPWRメーカー、韓国が参画

Figure Basic configurations of micro-heterogeneous ThO₂/UO₂ fuel.

7

BNL、INEEL、MIT等によるトリウム炉心研究成果

- WASB (Whole Assembly Seed Blanket) 及びラドコフスキーが提唱したSeed-Blanket Unit (SBU) 炉心について研究。再処理、リサイクルを伴わないトリウム利用
- 従来のウラン炉心に比べてトリウム炉心ではPu238の割合が3から4倍多くなることを確認
- 従来のウラン炉心に比べてラドコフスキーの設計した炉心ではPu239の生成量が60から70%減少
- トリウムベースの燃料コストがウラン燃料に比べて±10%の範囲と予測
- このコストの大きな不確定さの要因は主にシード燃料とするU233のコスト予測の不確定さにある(U233の濃縮度がウラン炉心でのU235の濃縮度の4倍となる)

8

米国NERIトリウム炉心研究(3/4)

- テーマ名:
‘Fuel for a Once-Through Cycle (Th, U) O₂ in a Metal Matrix’
Project No. 99-095
- 研究代表者:
ANL Dr. Sean McDevitt
Purdue大学も参画
- Zrマトリクス中に(Th,U)O₂粒子を混在(サーメット燃料)→高燃焼度、直接処分

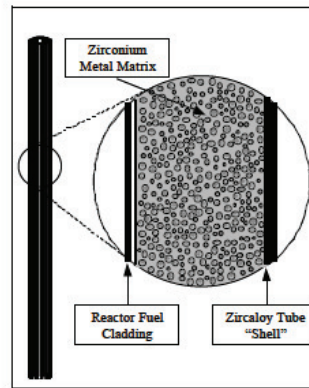


Figure 1. Comparison of (a) the original concept sketch for (Th,U)O₂ cermet fuel pin and (b) photograph of the final (Th,U)O₂ cermet fabricated during this project.

9

米国NERIトリウム炉心研究(4/4)

- テーマ名:
‘A Proliferation Resistant Hexagonal Tight Lattice BWR Fuel Core Design for Increased Burnup and Reduced Fuel Storage Requirements’
Project No. 99-164
- 研究代表者:
BNL Dr. Hiroshi Takahashi
Purdue大も参画
- (Th,Pu)O₂燃料六角集合体のHCBWRへの適用検討
 - 高速中性子領域→ボイド係数正への対策→ボイド管採用
 - 安全性向上、建設コスト低減→高深度(500-1000m)地中プラントを提唱



Fig.1 Normal Fuel Assembly

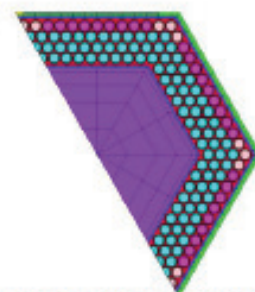


Fig.2 Assembly with Void Tube

10

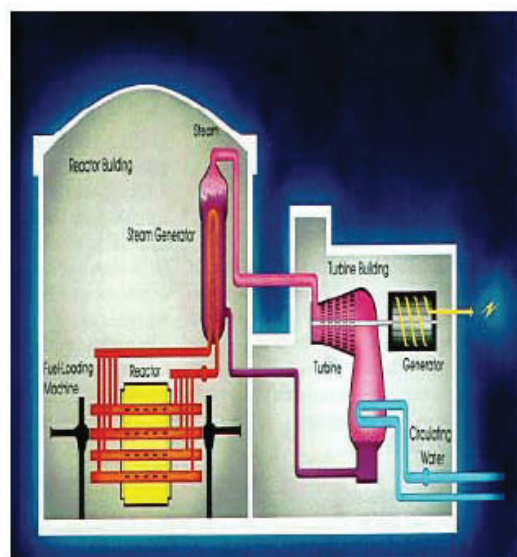
米国トリウム炉心研究の纏め(東海大 高木先生)

- PWRの燃料を(U, Pu)O₂から(Th, Pu)O₂への置換
 - 制御棒価値・ボロン価値: 増加
 - ドップラー係数: 変わらず
 - 減速材温度係数: 負で値がやや小
 - 使用済み燃料崩壊熱: 放射能は同等、Pu消費率はより効率的の傾向
- (Th, Pu)O₂は通常MOXに比べてほぼ同等かやや優れた核的性能を示し、燃焼度向上の可能性

11

4. カナダ、中国の動向

- カナダ(AECL)では既存炉燃料をウランからトリウムに換える設計継続、トリウム燃料、集合体の製造、照射実績が豊富(国としての取り組み有り)。
- 中国はレアアース抽出残渣である多量のトリウムを抱え、トリウムの処理研究に取組中。中国はカナダAECLと組んで、国内のCANDU炉でトリウム燃焼を検討中。燃料バンドル中央8体: ThO₂燃料、その周囲を天然Uから低濃縮Uに置き換え



12

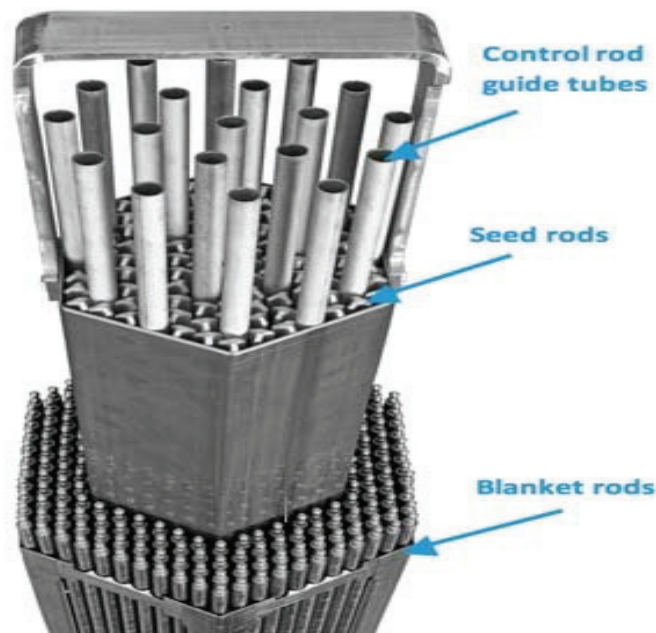
5. トリウムパワー(現ライトブリッジ)社

- トリウムパワー社はラドコフスキーが提唱したシード燃料とブランケット燃料からなるトリウム炉心構成について特許を取得
- トリウム燃料をLWR、VVERで照射する計画
- 現行のLWR燃料集合体と同等形状で問題なく燃焼が可能であることを確認
- トリウムとウランを混ぜて核拡散抵抗性を高めた燃料の照射試験と照射後試験(PIE)をロシアのクリャトフ研究所で実施
(Source: U.S. News & World Report, 3/26/09)



13

VVER向けトリウム装荷燃料集合体 (ライトブリッジ社)



14

6. Thor-Energy社とハルデンプロジェクト

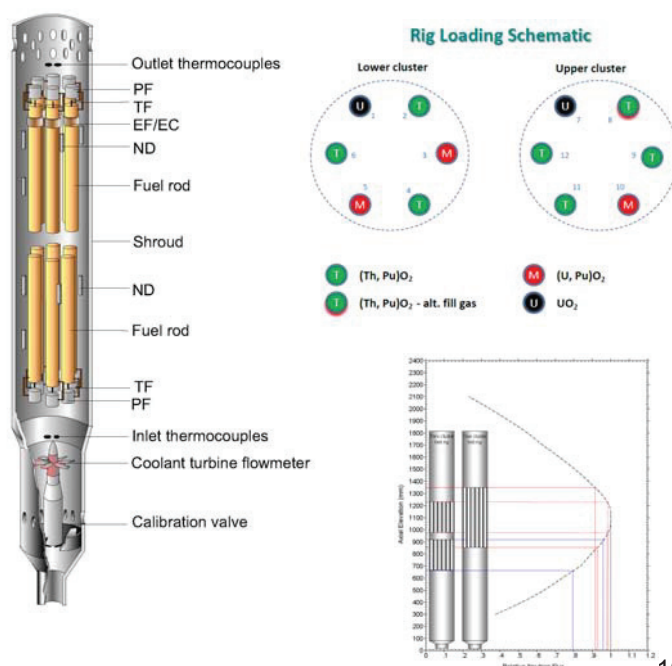
- ・ ノルウェーのREC社 (Renewable Energy Corporation:太陽光発電、風力発電を手がける)の傘下
- ・ 2010年6月パリ会議開催
 - 日、米、仏、韓、等から19名が参加。
 - ハルデン炉での $(Th,Pu)O_2$ 燃料の照射試験実施を目指す(国際コンソーシアムの結成)
 - 日、米、仏がコンソーシアムに参加する可能性
- ・ Thor Energy社はノルウェーの最初のトリウム燃料原子炉をノルウェー東方のGrenland、Porsgrunn 郊外の山中に建設する計画を発表

(ソース: Norwegian business daily Dagens Naeringsliv (DN) on January 28, 2008)

15

ハルデン炉照射リグと燃料ピン配置計画 (Thor-Energy社計画)

- ・ 二つのクラスターに7本のトリウム燃料ピンを装荷
- ・ 燃料ピンの内圧、温度、機械的安定性を計測
- ・ リグには中性子計測器、熱電対、流量計を具備
- ・ Pu濃度11%
- ・ 5年照射



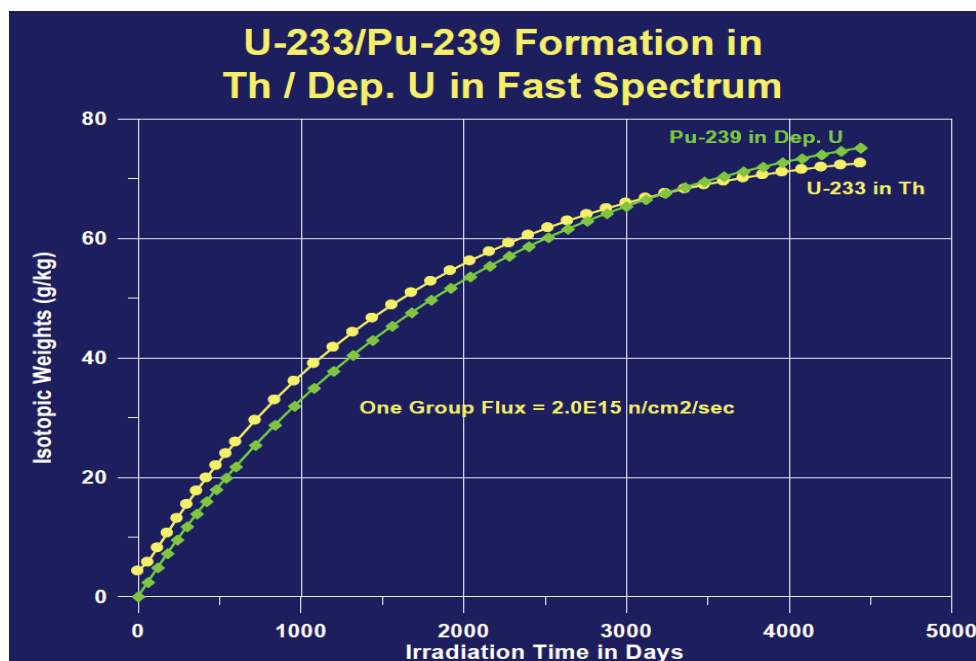
16

7. インドの動向

- ウラン輸入見通しが立たず、豊富な埋蔵資源トリウム利用の独自の原子炉開発を推進
- 加圧水型重水炉 (PHWR) での Pu 生産
→ FBR での U233 製造 → 先進型重水炉 (AHWR) での U-233 と Pu の燃焼、Th から出力の 2/3 を得る。
- AHWR 炉での U233 燃焼サイクル開発維持
- 近年、急激な経済成長を背景に電力需要の増大を見込み、軽水炉導入に意欲。

17

高速炉への適用可能性



Dr. V. Jagannathan,
Head, Light Water Reactors Physics Section
Bhabha Atomic Research Centre
Tokai University Takanawa Campus- Nov.,05,2010

18

8. フランスの動向

- CEAは不連続的にトリウム研究を実施。これにはトリウム燃料の照射と再処理研究が含まれる。
 - CEAの基本概念は
 - Th-U233の閉じた軽水炉(PWR)サイクルの実現
 - Th-U233の閉じた高速炉サイクルの実現
- AREVA社: 軽水炉でトリウム燃料を装荷する研究に関する研究協力協定をLight bridge社と締結
 - 2010年ロンドン会議でのAREVA報告
 - トリウム燃料の商業化は10年先以降
 - 軽水炉での増殖は困難
 - U233の抽出が重要
 - ガラス固化体 5から6割増加
 - U-Pu利用を継続
 - 2030年以降高速炉の導入でウラン利用量を90%削減

19

9. ロシアの動向

- ウラン-プルトニウム利用に邁進、トリウムへの関心は一部に留まっており、国の開発計画は無い。ただし、クリチャトフ研究所はトリウムパワー社の委託で、VVER照射燃料のPIEを実施。
- 国家プロジェクト: U-Puサイクル5基の新型原子炉建設計画
 - BN-800(Na冷却FBR).....BN-600サイト2014年
 - BN-1200(Na冷却FBR).....BN-600サイト2019年
 - BREST-300 設計進捗
 - Pb-Bi冷却FBR.....2019年
 - 多目的高速試験炉MBIR(Na冷却).....150MWt2019年 BOR-60後継
- 中国との間でBN-1200を2基、輸出契約締結

20

10. まとめ

- 原子エネルギー民生利用:トリウム熱増殖の追及から開始
- ウラン-プルトニウムサイクルの確立、インフラ整備を受けて、トリウム利用の狙いが変質
 - 核拡散防止、Pu燃焼、
 - ウラン消費の補完:現行軽水炉での燃焼
- ウラン系:高速中性子領域のみでプルトニウム増殖が可能
- トリウム系:低速から高速まで幅広い中性子領域で高転換
 - 軽水炉での燃焼から始め、軽水炉トリウム高転換サイクル、更なる先では高速炉トリウムサイクルの可能性