

第 10 回炉物理専門研究会の開催報告

2023 年 3 月 27 日

炉物理専門研究会担当教員 一同

第 10 回炉物理専門研究会の開催実績について、以下の通り報告致します。

同研究会における学生の発表件数は、近年、減少傾向にある。このため、通常の学会発表／国際会議とは異なる位置づけおよび開催意義の転換を目指して、従来とは異なる開催形態を試行するチャンスととらえ、令和 4 年度は以下の案 3 を採用し開催した。

- 案 1. 令和 4 年度は開催が予定されていなかったため開催しない。
- 案 2. これまでと同様に開催する。
- 案 3. 予稿提出を試行的になくし、申ししやすくした形式で開催する。
 - ・夏期セミナーの学生発表に近いイメージで、途中成果も歓迎。
(夏期セミナーの若手研究会との一体化も検討する。)
 - ・研究の背景や目的の説明に今まで以上に意識を置いてもらう。
(発表者による研究の理解度向上＋学生同士学び合い)。
 - ・産業界の若手職員等との交流機会の設定も検討する。

研究発表件数は 10 件（そのうち、若手 1 件）となり、例年よりも 2 件少なかったため、セッション構成について見直しの余地があるか検討する必要がある。各発表に対する質疑応答は、参加学生間で活発に行われていた。また、原子力産業界による業務紹介においても、参加学生から業務の背景や詳細について質問が寄せられていたため、今後も内容を見直しながら学生および産業界の双方にとってより有益な機会としたい。また、北田部会長の提案（炉物理部会第 58 回全体会議、2022/3/13）を踏まえて、炉物理夏期セミナーの学生発表セッションとの統合についても、今後、関係者間で検討することとした。

【概要】

1. 時期： 2022 年 12 月 9 日 9:00-16:00
2. 形態： Zoom オンライン
3. 主催： 炉物理専門研究会担当教員一同
4. 担当： 卞（京大）、相澤（東北大）、左近（近大）、竹田（阪大）、竹澤（長岡技大）
5. 予稿： なし
6. プレゼン資料： 部会報に開催報告とともに掲載（同意ありの発表のみ、次葉以降に示す）
7. 発表件数： 学生 9 件、若手 1 件、原子力産業界からの業務紹介 3 件
8. 参加者数： 62 名（そのうち学生 30 名程度）

第 10 回炉物理専門研究会プログラム

日時： 2022 年 12 月 9 日（金） 9:00 ～ 16:00

形式： Zoom 会議（リモート会議）

参加登録方法：下記 URL へアクセスいただき、必要事項をご登録ください。

<https://zoom.us/meeting/register/tJEkd-qppj4pE9xP2oq0CtHW6IbFTOey5TIJ>

登録後、ミーティング参加に関する情報の確認メールが届きます。

主催： 炉物理専門研究会担当教員一同

【午前の部】

9:00 開会挨拶（京大複合研・卞）

9:05-10:25（80分） セッション 1：炉物理一般①（進行 東北大・相澤 直人）

- 1-1 小型 PWR 用 TRISO 燃料に対する燃焼反応度損失の低減に向けた検討
山中 健史・大阪大学 環境エネルギー工学科 量子エネルギー工学コース 学部 4 年
- 1-2 高速炉(常陽)を用いたがん治療用 Ac-225 製造に関する研究
佐々木 悠人・東京都市大学大学院 総合理工学研究科 共同原子力専攻 修士 2 年
- 1-3 燃料デブリ水中落下時の臨界解析高速化に関する研究
三浦 拓也・東京工業大学原子核工学コース修士 2 年

休憩 5 分

10:30-11:50（80分） セッション 2：炉物理一般②（進行 長岡技大・竹澤 宏樹）

- 2-1 高温ガス炉の燃料ブロック内における詳細出力分布の予備評価
楠木 捷斗・九州大学大学院 工学府 量子物理工学専攻 修士 1 年
- 2-2 重水低減速炉における集合体集合に伴う反応度減少
篠原 知篤・東京都市大学原子力安全工学科 4 年
- 2-3 Summary of SMR and Research Reactor design studies in Mongolia
Byambajav Munkhbat・Associate Professor, National University of Mongolia

昼食

【午後の部】

13 : 00-14 : 20 (80 分) セッション 3 : 解析手法関連 (進行 阪大・竹田 敏)

- 3-1 離散座標法による輻射輸送方程式の数値計算におけるガラーキン法による射線効果の低減について
大橋 岳 北海道大学工学部機械知能工学科
- 3-2 核分裂生成物の生成抑制のための減速材装荷高速炉における遺伝的アルゴリズムを用いた検討
安田 慎之介 東北大学大学院 工学研究科
- 3-3 医療用中性子照射装置における最適化計算への一般化摂動論の適用
山方 啓太 北海道大学 工学院

休憩 5 分

14 : 25-14 : 50 (25 分) セッション 4 : 炉物理実験関連 (進行 近大・左近 敦士)

- 4-1 近畿大学原子炉における BGO 検出器を用いた Feynman- α 解析
後藤正樹・近畿大学大学院総合理工学研究科 博士前期 2 年

休憩 5 分

14 : 55-15 : 55 (60 分) 原子力産業界からの業務紹介 (進行 長岡技大・竹澤 宏樹)

- 5-1 電力中央研究所の業務紹介
佐藤 駿介・電力中央研究所
- 5-2 東芝エネルギーシステムズの業務紹介
吉岡 研一・東芝エネルギーシステムズ
- 5-3 テプコシステムズの炉心燃料分野に関わる業務紹介
吉井 貴・テプコシステムズ

16 : 00 閉会挨拶 (阪大・北田)

2022/12/09 炉物理専門研究会

小型PWR用TRISO燃料に 対する燃焼反応度損失の 低減に向けた検討

大阪大学 山中 健史
北田 孝典
竹田 敏
尾原 正人

発表の流れ

背景・目的

使用燃料組成・計算条件

核種ごとの燃焼反応度損失の低減への寄与

考察

結論と今後の展望

背景

- PWRでは減速材中のホウ素添加より以下のことが必要
 - ▶ ホウ酸リサイクルのためのシステム
 - ▶ 運転過渡時、停止時のホウ素の監視・調査
 - ▶ 流体系メンテナンス時のホウ酸処理・ホウ酸腐食によるメンテナンス
- **設計・運転・保守**の簡略化が可能になるので、小型PWRではホウ素を減速材に添加せず、安全性の高いTRISO燃料を使用した検討が進められている^{1,2}

¹Reactivity Hold-Down Technique for a Soluble Boron Free PWR Using TRISO Particle Fuel
 ICONE21-15275, V005T11A003; 6 pages Published Online: February 7, 2014
²2: Conceptual core design of an innovative small PWR utilizing fully ceramic microencapsulated fuel
 August 2014, Pages 63-71 [Progress in Nuclear Energy](#) Xiang Dai, Xinrong Cao, Shihe Yu, Chenglin Zhu

背景

- 先行研究では、TRISO燃料にPu240を添加することで**燃焼反応度損失の低減が可能**ということが確認された¹

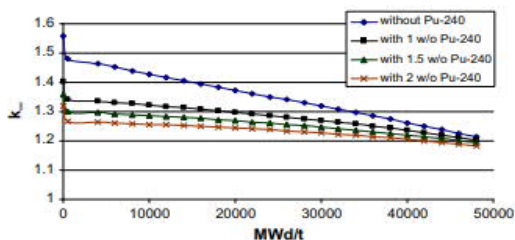


Fig. 1. Effect of Pu-240 on k_{∞} .

添加量	初期と末期の k_{∞} の差
基準	約0.35
基準 + 1wt%	約0.20
基準 + 1.5wt%	約0.15
基準 + 2wt%	約0.10

- ただ、PuからPu240のみを単体で取り出すことは技術上のハードルが高いという課題がある

¹Reactivity control technique for a pressurized water reactor with an inventive TRISO fuel particle composition
 Anwar Hussain^{*}, Cao Xinrong *Progress in Nuclear Energy* 51 (2009) 742-745

目的

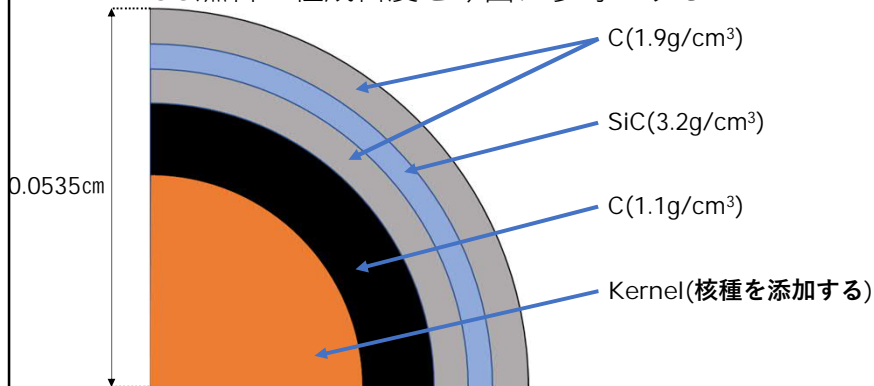
- TRISO燃料に添加することで**燃焼反応度損失の低減**に寄与する核種がPu240の他にあるのかを明らかにしたい

目的 TRISO燃料に核種を添加することで、どのように燃焼反応度損失の低減(**増倍率の平坦化**)に寄与するのかを明らかにし、**核分裂性核種と親物質**の最適な組み合わせを見つける

5

今回使用したTRISO燃料

- 小型PWRの炉心にTh232を添加したTRISO燃料を使用し燃焼解析を行っている先行研究をベースにTRISO燃料の組成密度を今回は参考にする¹



¹Neutronic Analysis of a PWR-type SMR Core Using Duplex ThO₂-UO₂ in TRISO Fuel Particles Jesús Rosales^{1,2}, Juan-Luis François¹, and Carlos García²

6

TRISO燃料に添加する核種

- 今回はkernelに以下の4つの核種を割合を変化させながら燃料に添加する

➤U235、Pu、U238、Th232

- Puは軽水炉の使用済み燃料ベースの同位体組成比のものを使用する(10年保管)^{*1}

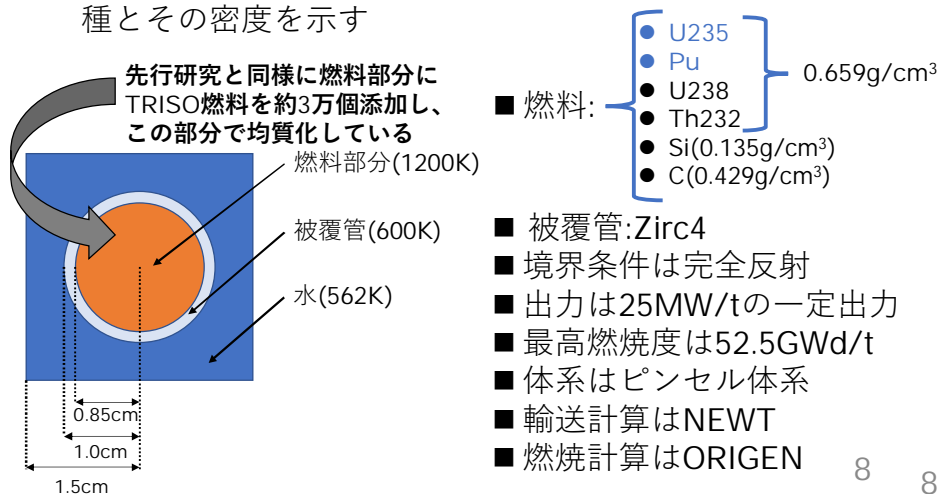
Pu238	2%
Pu239	59%
Pu240	27%
Pu241	8%
Pu242	4%

*1東京電力(株)福島第一原子力発電所3号機において長期保管したMOX新燃料の健全性に係る確認結果について

7

計算条件

- 今回使用した計算体系と、燃料部分に使用している核種とその密度を示す

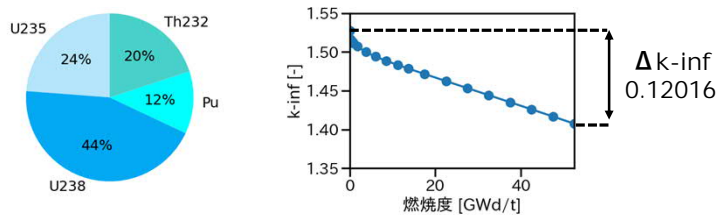


8

8

影響比較の基準の設定

- 核種が燃焼反応度損失の低減に与える影響を比較するために、まず**基準を設定**し比較解析を行う
- 以下に基準とする燃料組成、 k -inf(無限増倍率)の推移、初期と末端の k -infの差を表す Δk -inf(平坦化の指標)を示す

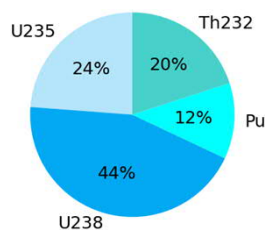


- PuとU235の比較(A)、その考察(B)、その後U238とTh232(C)、その考察(D)の比較を行う

9

(A).PuとU235の平坦化への寄与の比較

- 以下の**基準**となる組成から、Th232・U238の割合を固定してPuとU235の割合を変化させていく
- U235を減らし、その分Puの割合を増やす
- Δk -infの値を比べる

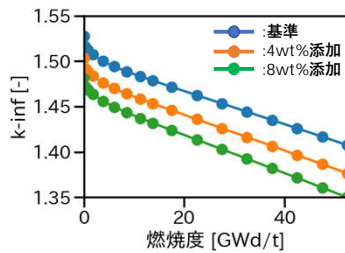


10

(A).U235とPuの平坦化への寄与

■U235を4wt%減らし代わりにPuを4wt%添加する

■k-infの推移と、 $\Delta k\text{-inf}$ の値を以下に示す



添加量	$\Delta k\text{-inf}$
基準	0.12016
基準 + 4wt%	0.12693
基準 + 8wt%	0.13282

差が大に

Pu添加よりもU235の方が平坦化に寄与している

■一般的軽水炉ではUO₂燃料よりMOX燃料の方が平坦になる

■燃料密度の違いによってU235とPuで平坦化への寄与が異なるのか調べる

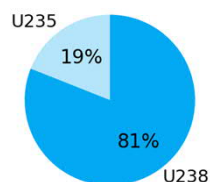
11

(A).密度の違いによるPuとUの平坦化1

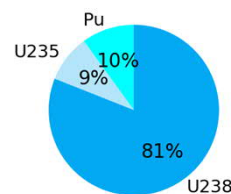
■以下の2つの燃料組成の密度による
 $\Delta k\text{-inf}$ の値の違いを調査する

■以下の密度で $\Delta k\text{-inf}$ の違いを調査する

密度
0.659g/cm ³
2.0g/cm ³
5.0g/cm ³
10.0g/cm ³



Uのみの燃料

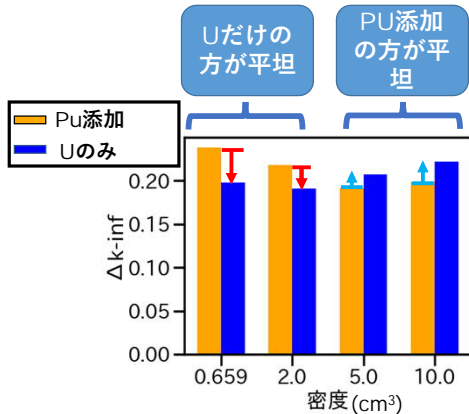


U10%分
Pu添加

12

(A). 密度の違いによるPuとUの平坦化2

■ 燃料密度の違いによる Δk_{inf} への影響を以下に示す



■ 密度が**通常**の軽水炉に近い場合はPuの方が平坦化に寄与する

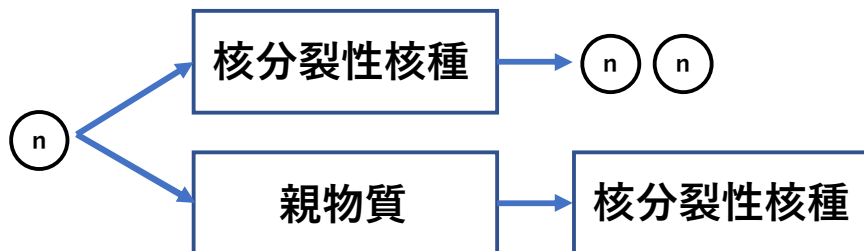
■ 今回の計算のように**密度が小さい**燃料密度ではU235の方が平坦化に寄与する

■ 以降で密度が小さい場合にU235が平坦化に寄与している考察を行う

13

(A). 増倍率の平坦化に寄与すること

■ 増倍率の平坦化とは時間による核分裂性核種の減少を抑えることで達成される



■ 上の関係から(n,f)反応では核分裂性核種が**減少**し、(n,γ)反応では核分裂性核種が**増加**していく

■ 親物質の捕獲率が**大きい方が平坦化に寄与**している
巨視的核分裂率

14

(B). U235が平坦化する考察1

■2つのk-infの推移を比較するために燃料密度0.659g/cm³とした以下の初期組成の親物質の捕獲率の値を比較した(巨視的核分裂率で除し規格化)

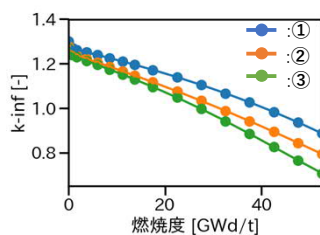
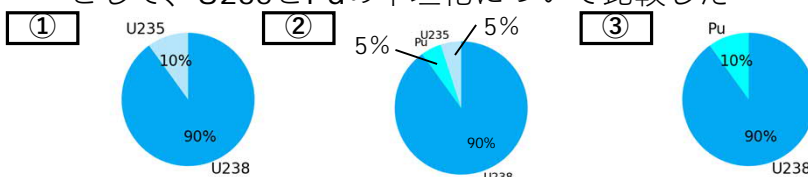


■上の結果では、Pu添加の方が平坦化するといえるが結果は逆となった→U235が過剰で、U235の若干の低減ではΔk-infが小さい可能性がある

15

(B). U235が平坦化する考察2

■初期のk-infを下げるために核分裂性核種の量を全体の10%として、U235とPuの平坦化について比較した



	初期k-inf	Δk-inf
①	1.3015	0.4143
②	1.2778	0.4833
③	1.2681	0.5600

差が大
U235の方が
平坦化

■初期のk-infを小さくしてもU235の方が平坦化に寄与した

16

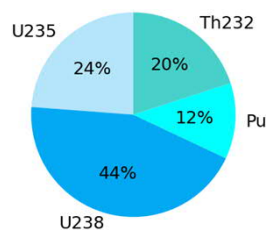
(B). U235が平坦化する考察3

- U235を5wt%としたときやThがある条件での検討などもしたが、PuよりU235が平坦化に寄与する結果であることを確認している
- 原因は調査中である

17

(C). Th232とU238の平坦化への寄与

- 以下の基準となる組成から、Pu・U235の割合を固定してTh232とU238の割合を変化させていく
- U238を減らし、その分Th232の割合を増やす
- Δk -infの値を比べる

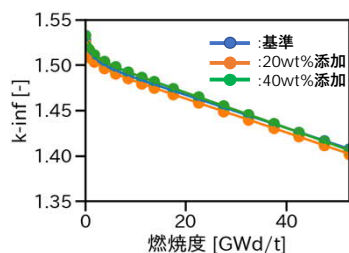


18

(C). Th232とU238の平坦化への寄与

■基準からU238を20wt%減らし代わりにTh232を20wt%添加する

■k-infの推移と、 $\Delta k\text{-inf}$ の値を以下に示す



添加量	$\Delta k\text{-inf}$
基準	0.12016
基準 + 20wt%	0.12243
基準 + 40wt%	0.12669

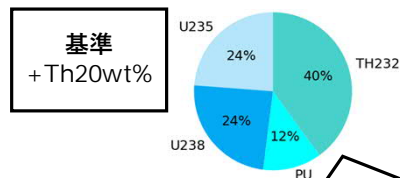
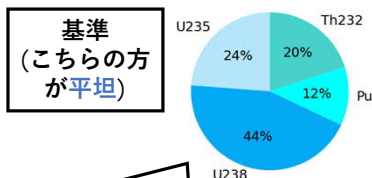
差が大に

Th232よりもU238の方が平坦化に寄与する
ただ差はわずか

19

(D). U238が平坦化した考察1

■基準と基準から20wt%U238の代わりにTh232を添加した以下の組成の初期組成の親物質の捕獲率を以下に示す (巨視的核分裂率で除し規格化)



U238の捕獲率	2.90E-2
Th232の捕獲率	1.10E-2
Pu238の捕獲率	1.81E-3
Pu240の捕獲率	6.85E-2
上の合計捕獲率	1.82E-1

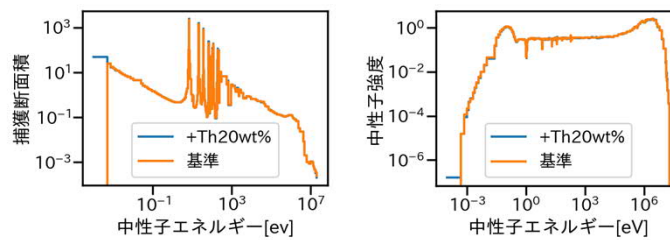
U238の捕獲率	2.02E-2
Th232の捕獲率	1.97E-2
Pu238の捕獲率	1.74E-3
Pu240の捕獲率	6.76E-2
上の合計捕獲率	1.79E-1

20

(D). U238が平坦化した考察2

■Th232からできるU233とU238からできるPu239では
 η 値が異なる

■以下に捕獲断面積と中性子スペクトルを示す



■わずかにThを20%添加した方が両者ともに上に出ており、**共鳴での捕獲反応率**が大きくなっていると考えられる

21

まとめ

- 今回のTRISO燃料均質化では燃料密度が通常の軽水炉と比べ約10分の1と**かなり小さい**
- 燃料密度が少ないとU235がPuよりも平坦化に寄与するが**原因は調査中である**
- U238の共鳴での中性子捕獲が大きくTh232よりも平坦化に寄与する
- 核分裂性核種ではPuより**U235**の方が、親物質ではTh232より**U238**の方が燃焼反応度損失の低減に寄与する

22

今後の展望

- TRISO燃料を使用して燃焼反応度損失の低減をするのには**ウランが適切**であることが分かった
- U235の平坦化の理由を明らかにする
- 今後は、ウランと相性のいい**毒物添加を試みていき**、さらなる平坦化を目指す

高温ガス炉の燃料ブロック内における 詳細出力分布の予備評価

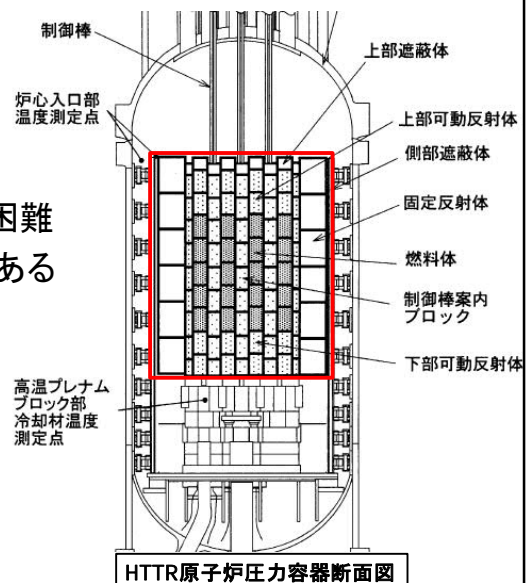
楠木捷斗¹, Irwan Liapto Simanullang¹, 藤本望¹
¹九大院工

2022年12月9日 第10回炉物理専門研究会



高温ガス炉の特徴について

- ✓ 炉心内で大きな温度差
→ 入口温度: 395°C、出口温度: 850/950°C
- ✓ 炉心構造上、炉内温度を直接計測することは困難
→ 解析値によって温度分布を推定する必要がある
- ✓ 燃料の健全性や解析精度向上の観点から
温度分布は必須



先行研究

- 拡散計算を基にした保守的評価^[2]
 - －燃料最高温度評価を目的とした評価
 - －径方向は温度が均一であるという仮定
 - 軸方向のみに限定した温度分布の評価

[2]N. Fujimoto, et al., JAERI-Tech-2000-091 (2000).

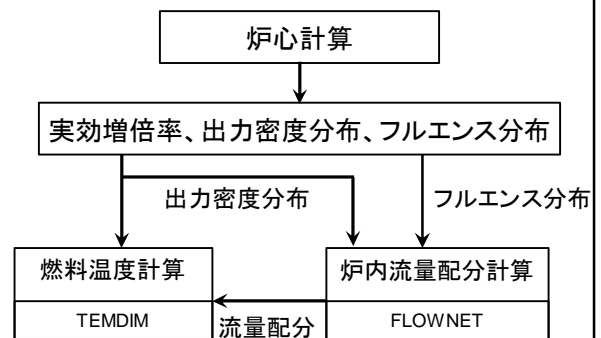
- モンテカルロ計算を基にした評価^[3]
 - －上記の研究で評価された温度を対象
 - －燃料直後から実効増倍率が1.0未満となる
 - 評価された温度分布が過大評価である可能性の指摘**

[3]R. Ikeda, et al., JAEA-Technology 2021-015.

	燃料ブロック	制御棒ブロック (燃料領域)	反射体
反射体	680		680
1段目	燃料 1050 減速材 900	840	
2段目	燃料 1230 減速材 1060	1020	740
3段目	燃料 1300 減速材 1180	1160	
4段目	燃料 1320	1260	
5段目	減速材 1280		
反射体	1260		

熱流設計の流れ

- 核計算による各種物理量の評価
 - －炉内出力分布とフルエンス分布の取得
- 解析コードを用いた炉内流量配分の評価
 - －出力分布及びフルエンス分布が必須
- 解析コードを用いた温度分布の取得
 - －出力分布及び炉内流量配分が必須



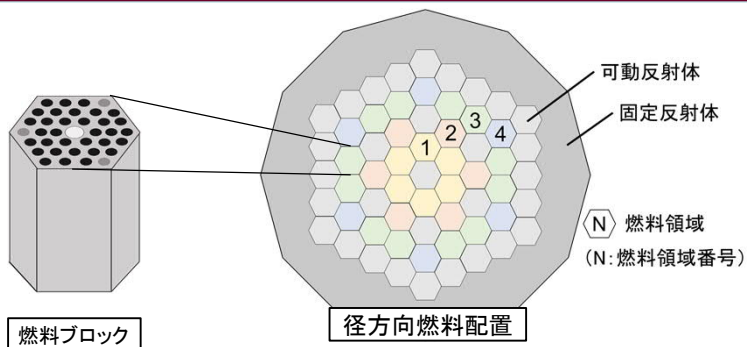
→**温度分布の評価には出力分布とフルエンス分布の評価が重要**

高精度な核特性評価に向けて

- ✓ 温度分布評価の見直し
 - 物理量の評価領域を細かく区切ることによる詳細な評価
 - 軸方向のみならず径方向についても考慮
 - **出力分布の詳細な評価に着目**
- ✓ 燃料ブロックごとの影響評価
 - 全炉心計算だけでなく燃料ブロックごとでも評価を行う
 - 燃料ブロックで得られる出力分布の傾向を全炉心での影響評価に活用

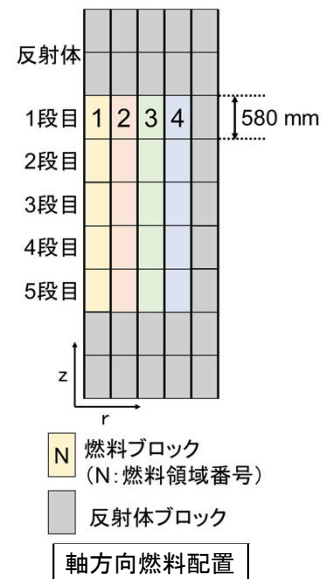
目的

HTTR燃料ブロックを対象に燃料棒当たりの出力分布を詳細に評価する



濃縮度配分^[1]

	濃縮度 [wt.%]			
	領域 1	領域 2	領域 3	領域 4
1段目	6.7	7.9	9.4	9.9
2段目	5.2	6.3	7.2	7.9
3段目	4.3	5.2	5.9	6.3
4段目	3.4	3.9	4.3	4.8
5段目				



[1] S. Saito, et al., JAERI-1332 (1994).

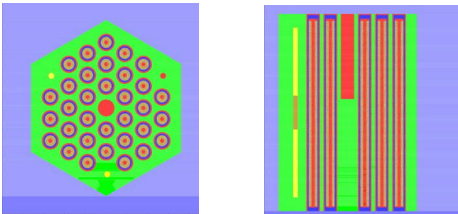
解析モデルについて

- ✓ 解析コード: 汎用中性子輸送計算モンテカルロコードMVP3^[4]
- ✓ 核データ: JENDL-4.0^[5] & 一部核種JENDL-3.3

[4]K. Shibata, et al., JAEA-Data/Code 2016-019,(2017). [5]Y. Nagaya, et al., J.Nucl.Sci.Technol.48(1),1-30,(2011).

■ 計算体系モデル

- ✓ HTTRの33pin燃料ブロックを詳細に模擬した一様温度体系
- ✓ 全ての燃料棒にタリー領域を設定



■ 計算諸元

ヒストリー数	20000 × (1000+10)
燃料濃度	6.7[wt.%]
BP濃度	2.2[wt.%]
燃焼日数	660[day]
出力	0.2[MW]
燃料温度	1200[K]
BP・減速材温度	1000[K]
境界条件	完全反射

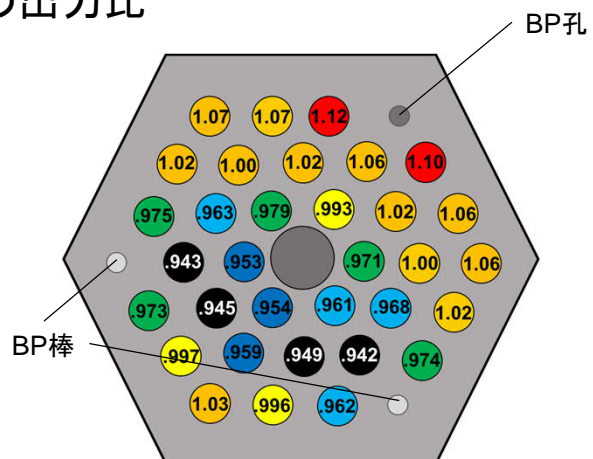
燃焼初期における燃料棒ごとの出力比

出力比の計算式

$$\text{出力比} = \frac{\text{各燃料棒の出力}}{\text{燃料棒の平均出力}}$$

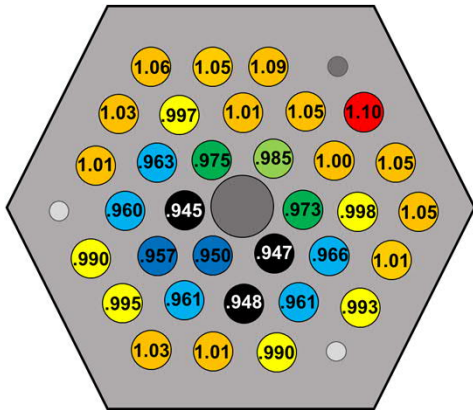
- ✓ BP周辺の燃料棒は出力が小さい
—ホウ素による効果
- ✓ 燃料ブロックの内側は出力が小さい
—掘み孔によって黒鉛の量が少ない

- 平均出力: 3.1×10^{-4} [MW/cc]
- 最大出力差: 0.174



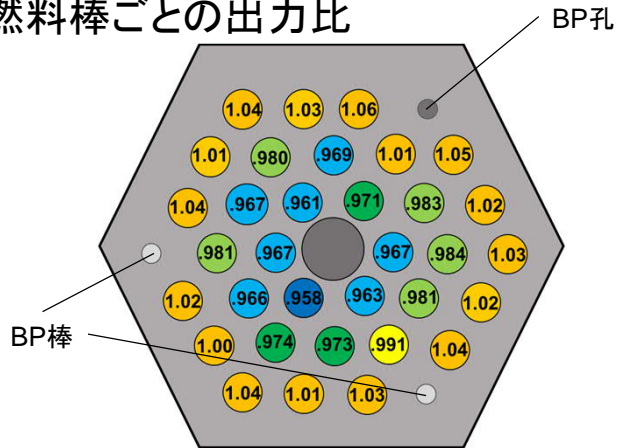
燃焼0日目における出力比

燃焼中期・燃焼末期における燃料棒ごとの出力比



燃焼300日目における出力比

- 平均出力: 3.1×10^{-4} [MW/cc]
- 最大出力差: 0.155

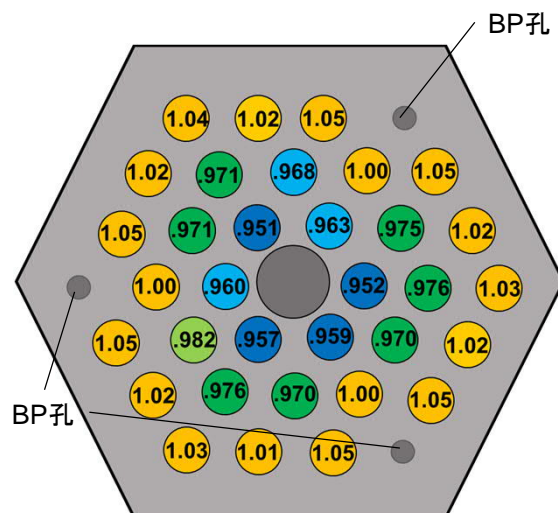


燃焼660日目における出力比

- 平均出力: 3.1×10^{-4} [MW/cc]
- 最大出力差: 0.089

BPによる影響評価

- ✓ BPを抜いた場合における解析
 - その他の計算条件は同じとした
- ✓ 燃焼による出力の変化はなし
- ✓ 外側の燃料棒ほど高い出力の傾向
 - 内側平均出力: 0.957 [MW/cc]
 - 中間平均出力: 0.973 [MW/cc]
 - 外側平均出力: 1.033 [MW/cc]
- 平均出力: 3.1×10^{-4} [MW/cc]
- 最大出力差: 0.099



燃焼0日目における出力比

○現状

- － 燃焼が進む場合における各燃料棒の出力比の挙動
- － 燃料棒単位での出力比差
- － 燃料ブロック内での径方向出力の挙動

○今後の展望

- － 燃焼による物質等の変化の調査
- － 燃料ブロックを対象とした径軸方向出力分布の調査
- － SRACによる計算でも同様の結果が得られるのか
- － 全炉心を対象とした計算