

< 第 46 回 炉物理夏期セミナー 概要報告 >

炉物理夏期セミナー小委員会

担当幹事 吉岡研一, 平岩宏司

1. 概要

第 46 回炉物理夏期セミナーを 2014 年 8 月 6 日～8 月 8 日の日程で、静岡県熱海市の熱海ニューフジヤにおいて開催しました。参加者は、講師の方々も含めて 72 名 (うち学生 25 名) でした。

今回のセミナーでは、「炉物理と原子力安全-未臨界と動特性の基礎と応用-」をテーマとして、基礎的な物理から、実機での応用例までを講義しました。学生や社会人の方からも、勉強になったと感想をいただきました。また、8/7 には若手研究会を開催しました。本会、若手研究会を含め、コミュニケーションも活発に行われ、有意義なセミナーでありました。(下記 概要参考)

なお、テキストの追加注文が多かったので、今回初めての試みとして、CD-ROM 版を作成し (1 枚¥1500) 販売しました。

なお、テキストはまだ残部がありますので、ご希望の方は、担当幹事 (kouji.hiraiwa@toshiba.co.jp) にご連絡ください。また、紙のテキストについては、学会事務局でも購入できます。

別紙 1 : セミナー実施概要

別紙 2 : 第 46 回炉物理部会夏期セミナー収支報告書

別紙 3 : 講義要旨

別紙 4 : セミナー写真

セミナー実施概要

テーマ：『炉物理と原子力安全 —未臨界と動特性の基礎と応用—』

会場： 熱海ニューフジヤホテル —コンベンションホール・ロイヤルベイ（本館 3 階）—

8 月 6 日（水）（13:00 受付開始・13:40 開校）

- 13:40～開校式 挨拶 京都大学原子炉実験所 中島健 炉物理部会・部会長
事務連絡 セミナー事務局
- 13:50～15:00 講義 1：未臨界系の炉物理と測定原理 京都大学原子炉実験所/山本俊弘 先生
- 15:00～15:10 休憩
- 15:10～16:20 講義 2：動特性方程式の基礎理論 名古屋大学/遠藤知弘 先生
- 16:20～16:30 休憩
- 16:30～17:40 講義 3：遅発中性子と崩壊熱の基礎 東京工業大学/吉田正 先生
- 18:30～20:30 懇親会（宴会場・燦光 A（本館 2 階））

8 月 7 日（木）（9:30 講義開始・17:20 講義終了・～21:00 若手研究会）

- 7:30～9:00 朝食 バイキング会場 麗峰（アネックス 2 階）
- 9:30～10:30 講義 4：動的制御棒価値測定法について-PWR-
原子燃料工業（株）/牛尾直史 先生
- 10:30～10:40 休憩
- 10:40～11:40 講義 5：炉雑音に基づく炉心安定性評価-BWR-（株）東芝/武内豊 先生
- 11:40～14:00 昼食（ホテル外のレストラン等にて各自にて食事）
- 14:00～15:00 講義 6：「もんじゅ」性能試験における未臨界・動特性試験
（独）日本原子力研究開発機構/谷中裕 先生
- 15:00～15:10 休憩
- 15:10～16:10 講義 7：加速器駆動未臨界原子炉（ADS）とその制御 東北大学/岩崎智彦 先生
- 16:10～16:20 休憩
- 16:20～17:20 講義 8：過渡臨界実験装置（TRACY）の経験
（独）日本原子力研究開発機構/會澤栄寿 先生
- 18:00～19:00 夕食（宴会場・燦光 A（本館 2 階））
- 19:00～21:00 若手研究会（コンベンションホール（前方区画を使用））
特異値分解法による簡易燃焼チェーン自動作成ツールの開発 北海道大学 梶原孝則
加速器駆動システムにおける金属水素化物を用いた反応度制御に関する研究 東北大学 田中純平
ラテン超方格サンプリング法を用いた核特性の不確かさ評価 名古屋大学 木下国治
トリウム燃料のドップラー反応度係数に関する検討 大阪大学 土淵昇
- 19:00～20:00 炉物理部会会合（コンベンションホール（後方区画を使用））

8 月 8 日（金）（9:30 講義開始・11:50 講義終了・12:10 閉校式）

- 7:30～8:30 朝食 バイキング会場 麗峰（アネックス 2 階）
- 9:00～9:50 講義 9：動特性パラメータの測定手法
（独）日本原子力研究開発機構/岡嶋成晃 先生
- 9:50～10:00 休憩

- 10 : 00 ~ 10 : 50 講義 10 : 連続エネルギーモンテカルロ法による随伴中性子束と動特性パラメータの評価法 (財) 電力中央研究所/名内泰志 先生
- 10 : 50 ~ 11 : 00 休憩
- 11 : 00 ~ 11 : 50 講義 11 : 1F 廃炉における炉物理の役割 京都大学原子炉実験所/中島健 先生
- 11 : 50 ~ 12 : 00 閉校式 総括 (株) 東芝 吉岡研一 炉物理部会・副部会長

第 46 回炉物理部会夏期セミナー収支報告書

		開催場所：静岡県熱海市銀座町1-16 熱海ニューフジヤホテル							
		開催期間：平成26年8月6日～8月8日							
		参加人数：72人（講師11人含む）							
単位：円									
(1) 収入		消費税の 取り扱い	予 算	実 績		実 績		内 訳	
				数 量	単 価	金 額	(部会で徴収)	(事務局に振込)	
(14201)	参加費収入								
	正会員	不課税		29	5,000	145,000	145,000		
	学生会員	不課税		21	0	0			
	非会員	課税		7	9,000	63,000	63,000		
	学生非会員	課税		4	2,000	8,000	8,000		
	参加費 計		600,000	61		216,000	216,000		0
(14201)	懇親会参加費収入								
	一般	課税		40	2,000	80,000	80,000		
	学生	課税		24	1,000	24,000	24,000		
	懇親会参加費計		200,000	64		104,000	104,000		0
(14265)	見学会費収入	課税							
(14241)	広告料収入	課税	300,000			420,000	120,000	300,000	
(14361)	テキスト売上収入								
	本	課税		25	3,000	75,000	75,000		
	CD-R	課税		1	1,500	1,500	1,500		
	テキスト売上収入合計	課税	20,000	26		76,500	76,500		0
(14371)	宿泊費収入								
	2泊3日（一般）	課税		35	24,060	842,100	842,100		
	2泊3日（学生）	課税		23	24,030	552,690	552,690		
	1泊2日（一般）	課税		4	12,030	48,120	48,120		
	宿泊費計		1,000,000			1,442,910	1,442,910		0
(14381)	夕食代収入	課税	100,000	4	4,000	16,000	16,000		
(14561)	内部共催金収入	内部取引				0			
(14691)	協賛金収入	特定収入(共通)				0			
(14711)	賛助金収入	特定収入(共通)	0			0			
(14721)	寄付金収入	特定収入(共通)				0			
(14731)	受取利息収入	非課税				42	42		
(14751)	その他収入	課税				0			
	収入 小計		2,220,000			2,275,452	1,975,452		300,000

炉物理の研究 第 67 号 (2015 年 3 月)

(2) 支出	消費税の 取り扱い	予 算	実 績			実 績 内 訳	
			数 量	単 価	金 額	(部会で支払)	(事務局で支払)
(15021)							
臨時雇賃金	不課税						
(15041)							
会議費	課税	0			112,348	112,348	0
会議室使用料							
お茶代					4,426	4,426	
弁当代							
懇親会費					107,922	107,922	
(15051)							
旅費交通費(実費)	課税	1,450,000			1,555,116	1,482,216	72,900
国内旅費		350,000			52,900	0	52,900
宿泊費		1,100,000			1,502,216	1,482,216	20,000
(15061)							
通信運搬費	課税	20,000			0	0	0
通信費							
運搬費							
(15091)							
消耗品費	課税	50,000					
(15111)							
一般外注経費	課税	300,000			253,013	253,013	
(15115)							
会場費	課税	400,000			172,800	172,800	
(15121)							
出展費	課税				0		0
(15131)							
委託費	課税				0		0
(15141)							
賃借料	課税				0		0
(15151)							
保険料	非課税				0		0
(15161)							
諸謝金(含む源泉税)	不課税	0			0		0
物品諸謝金					0		0
金銭諸謝金					0		0
(15171)							
雑費	課税				89,906	89,906	
(15181)							
支払負担金	不課税				0		0
(15191)							
助成金	不課税				0		0
(15291)							
内部共催金	内部取引				0		0
支出 小計		2,220,000			2,183,183	2,110,283	72,900
収 支 差 額					92,269		
収 支 差 額 内 訳	セミナー残金	内部取引			73,815		
	(15301) 本部繰入金	内部取引			18,454		
支出 合計		2,220,000			2,275,452		

講義要旨

講義 1：未臨界系の炉物理と測定原理

京大炉 山本俊弘 先生

未臨界度測定法として代表的な中性子源増倍法、パルス中性子法、指数法、炉雑音法について炉物理的な基礎原理と特に測定上考慮しなければならない高次モードの影響について講義。高次モードがわかりやすく解説され、他の講義を理解する上で、大変役に立った。

講義 2：動特性方程式の基礎理論

名大 遠藤知弘 先生

「中性子束が従う時間微分方程式」について、物理的なイメージを説明し、一点炉動特性方程式およびその解析解の導出、反応度や外部源強度の変化に伴う出力挙動について解説。反応度や未臨界度測定法の原理についても紹介し、一点炉動特性方程式を対象として、数値解析手法の基礎である差分化について講義。一点炉動特性方程式を基本から、また、即発、遅発の違い、インポートランスの意味も理解できた。

講義 3：遅発中性子と崩壊熱の基礎

東工大 吉田正 先生

原子力技術と原子核に関するデータ及び知識の関係を解説。遅発中性子放出と崩壊熱という、原子核のベータ崩壊と深く結びついたプロセスについて、そのデータの見方と背後にある原子核の挙動が講義された。 β 崩壊を基本である核物理から理解できた。また、Kamland、W ボゾン、ジオリアクター など寄り道も興味深かった。

講義 4：動的制御棒価値測定法について-PWR-

原子燃料工業 牛尾直史 先生

発電用加圧水型軽水炉 (PWR) においては、取替炉心設計の妥当性確認や炉心の安全性確認等の観点から行われる原子炉起動時の零出力時炉物理検査について解説。核特性パラメータの一つである PWR の反応度制御に重要な役割を果たす制御棒価値測定が講義された。3次元動特性解析の実用例、高速化による稼働率向上、炉物理検査の貴重な体験、安全性向上にも役立っていることが興味深かった。

講義 5：炉雑音に基づく炉心安定性評価-BWR-

東芝 武内豊 先生

PWR、BWR の安定性の違いを解説。炉心安定性と領域安定性、高次モードについて講義された。随伴中性子束の利用についても講義があり、これまでの講義内容と実機での応用についてのつながりが理解できた。

講義 6：「もんじゅ」性能試験における未臨界・動特性試験 JAEA 谷中裕 先生

もんじゅでの零出力炉物理特性試験について解説。逆動特性法による未臨界での制御棒価値測定、未臨界、動特性の実機適用例が講義された。逆動特性測定、ロッドドロップ法は参照値と土

10%程度で一致など、実機の測定結果が興味深かった。

講義 7：加速器駆動未臨界原子炉 (ADS) とその制御 東北大 岩崎智彦 先生

加速器駆動未臨界原子炉 (ADS) の概要とその課題が解説された。ADS は安定的に運転できるかがキーであり、まだ核データにも誤差が大きく、精度良い実験のできる新たな実験施設の重要性も提起された。

講義 8：過渡臨界実験装置 (TRACY) の経験 JAEA 會澤栄寿 先生

TRACY の超臨界実験を解説、臨界事故時動特性についても講義。温度係数、ボイド効果が出力に影響することを実験値から説明。まだ、十分検討されていないデータもあり、これらのデータの有効利用が必要である。

講義 9：動特性パラメータの測定手法 JAEA 岡嶋成晃 先生

β_{eff} 測定法、誤差をどう抑えるかの工夫について解説。また、測定と計算のあり方、生データを残しておくことの重要性についても提起があり、今後の実験炉物理の在り方についても考えさせられた。

講義 10：連続エネルギーモンテカルロ法による随伴中性子束と動特性パラメータの評価法

電中研 名内泰志 先生

Iterated Fission Probability (IFP)による随伴中性子束を解説、これを用いた β_{eff} の計算などを解説。本機能は MCNP6 で実装され、既に広まっている。今後、発展が期待できる。

講義 11：1F 廃炉における炉物理の役割 京大炉 中島健 先生

福島第一原子力発電所 (1F) の事故時の経緯やデブリ取り出し時の臨界安全の在り方、臨界評価の精度、デブリ体系の動特性コードが解説された。臨界性評価、未臨界監視、事故規模評価などが講義され、安全確保、早期の廃炉の重要性も提起された。

セミナー写真



(全体記念写真、2日目昼)



(講義の様子、1日目)

(若手研究会の様子、2日目)

第 46 回炉物理夏期セミナー 若手研究会 実施報告書

学生・若手小委員会 担当幹事

四電エンジニアリング (株)

東北大学

吉田絵美

相澤直人

日時：8 月 7 日 (木) 19:00～21:00 (夏期セミナー2 日目)

内容：若手研究者の研究発表 (発表 15 分+質疑応答 10 分)

若手研究者として、4 名の学生から研究内容の紹介があった。15 分の発表の後、質疑応答の時間を設け、活発な議論が交わされた。若手研究会のプログラム、発表概要は以下のとおり。

19:00～19:05

開会の挨拶 (学生・若手小委員会担当幹事)

19:05～

研究発表

■ 研究発表概要

19:05～19:30

「特異値分解法による簡易燃焼チェーン自動作成ツールの開発」

北海道大学 修士 1 年 梶原 孝則

<概要>

特異値分解法を用いることによって、燃焼中の中性子束場の再現を担保した上で、詳細燃焼チェーンから、評価すべき炉物理量を所用の精度で評価するための必要最小数の核種から構成される簡易燃焼チェーンへと自動的に変換するツールを開発した。

<質問>

- ・ 核異性体の存在によって収率に影響はあるのか。
- ・ 中規模チェーンから簡易チェーンを作成する際の収率の補正はどのようにしているのか。
- ・ 擬似 FP の使用検討の理由は？
- ・ 特定の核物理量の選択での微分の必要はあるのか。
- ・ ベクトル空間の取り方によって収率が変わってくるはずだが、特異値分解ではどうなるのか。

19:30~19:55

「加速器駆動システムにおける金属水素化物を用いた反応度制御に関する研究」

東北大学 修士 1 年 田中 純平

<概要>

核変換処理施設である加速器駆動システム(ADS)において、金属水素化物を可燃性毒物として用いた炉心を設計し、反応度制御を行うことで、陽子ビーム電流値を低減し、ADSで課題となっているビーム窓の設計改善につなげることを目的とした研究。

<質問>

- ・ 核変換量の目標は？
- ・ 反応度価値による毒物の選定について、制御体価値で選定をしているが、何故燃焼特性で選ばないのか。
- ・ MVP-BURN の計算について、どのような手法を用いているのか。(固有値 or 固定源)
- ・ BP (バーナブルポイズン) 集合体の数について
- ・ BP 集合体の設計の順番について、何故発表のような順番で行ったのか。
- ・ 20MeV 以上の中性子の輸送の取り扱いについて。
- ・ 第 2 サイクル以降で毒物集合体は使うことが出来るのか。

19:55~20:20

「ラテン超方格サンプリング法を用いた核特性の不確かさ評価」

名古屋大学 修士 1 年 木下 国治

<概要>

ラテン超方格サンプリング法を用いて、集合体計算において核特性の不確かさ評価を実施した。ラテン超方格サンプリング法を適用することにより、断面積の不確かさに起因する核特性の不確かさを、少ないサンプル数でも統計精度を保ったまま評価できることを確認した。

<質問>

- ・ ラテン超方格サンプリング法でのサンプル数の上限をランダムサンプリング法と同じにするとどうなるのか。
- ・ あえてパラメータを重なるようにした方が、精度が良くなるのでは？
- ・ 不確かさの標準偏差とは？
(発表内グラフにて) サンプル数と真値が直線となるのは何故？
- ・ 恣意的にメッシュを変えることは出来るのか。今後の研究の展望は？

20:20~20:45

「トリウム燃料のドップラー反応度係数に関する検討」

大阪大学 修士 1 年 土淵 昇

<概要>

トリウム燃料のドップラー反応度係数は、従来のウラン燃料と比較して負側に大きくなることが知られている。しかしながら、トリウム ^{232}Th の共鳴積分は、ウラン ^{238}U より小さい。本研究では共鳴積分が小さい ^{232}Th の方が ^{238}U よりもドップラー反応度係数が大きくなる要因について感度解析を行い検討した。

<質問>

- ・ 熱外領域での断面積の違いとドップラーの関係はどのようになっているのか。
(1MeV 以上は非分離共鳴であるため、ドップラー効果はあまり変わらないのではないか)

20:45~20:55

講評 (電力中央研究所 名内様)

発表者が全員 M1 学生ということだったが、発表の内容を見る限り、進学から短期間であるにもかかわらず、よく研究しているようだ。これからも頑張っていってほしい。また、将来は原子力分野への就職、ドクターコースへ進学してくれることを期待している。

加速器駆動システムにおける金属水素化物を用いた反応度制御に関する研究

東北大学大学院工学研究科 田中純平

1.1 背景

原子力発電の課題として、使用済み燃料中に含まれる高レベル放射性廃棄物(HLW)の問題が存在する。HLW には人体への毒性が強く、半減期の長い核種であるマイナーアクチニド(MA)や半減期が数千年を超える長寿命核分裂生成物(LLFP)などが含まれる。今後原子力発電が世界のエネルギーを支えていくためには、これらの HLW を適切に処理することが重要である。

そこで、これらの核種の処理方法の1つとして、加速器駆動システム(Accelerator Driven System : ADS)による核変換処理の研究が進められている。これにより、核分裂反応や中性子捕獲反応を利用して、MA や LLFP を毒性が弱く、短寿命の核種に変換することが可能である。

1.2 加速器駆動システム(ADS)

ADS は大強度陽子加速器、核破砕ターゲット、未臨界炉心により構成されるハイブリッドシステムであり、核変換処理特性に優れた原子炉である。Fig.1.1 に ADS の概念図を示す。大強度陽子加速器により加速された高エネルギー陽子ビームを鉛ビスマスなどの重核種ターゲットに入射することで核破砕反応を発生し、これにより発生した大量の高エネルギーの核破砕中性子を未臨界炉心に入射することで、MA を効率的に核変換処理することが可能となる。

ADS の特徴として、核変換処理特性に優れていることの他に、未臨界体系であるため臨界事故の危険がない、加速器の停止に

より原子炉が停止するなど、安全性においての利点が挙げられる。また、燃料装荷の自由度が高く、多量の MA を装荷でき、設計上の利点ももたらす。

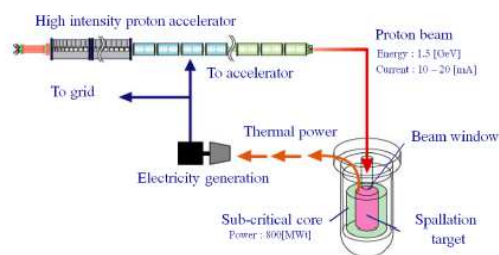


Fig. 1.1: ADS の概念図

1.3 ADS におけるビーム窓に関する課題

ADS における大きな課題の一つに、ビーム窓に関する課題がある。ビーム窓とは、加速された陽子が通過するビームダクトと、核破砕ターゲットの境界にあたる部分である。

ビーム窓は、ビームのロスを抑制するために高真空に保たれたビームダクトと、高温の液体金属となっている核破砕ターゲットとを隔てている。入射する陽子と核破砕反応で生じる中性子の両方からの照射損傷や、液体金属中での構造材料の脆化、応力腐食割れ、溶解などの問題が予想され、ビーム窓は非常に過酷な環境下に晒されていることがわかる。また、高エネルギーの陽子ビームが透過することによる発熱、照射損傷、外圧、座屈などの多大な負荷を考慮すると、ビーム窓の形状は複雑な長円形となり、厚さや球殻の形状の設計は困難を強いられ、成立性に問題が生じる。

このビーム窓の負担を軽減するためには、

陽子ビーム電流量を低減、安定させることが必要である。現在の ADS では、運転中に実効増倍率が減少するに伴って、一定出力を得るために、陽子ビーム電流を増強させることで出力制御を行うことを想定している。つまり、実効増倍率を一定に保つことで、陽子ビーム電流の増強を軽減、安定させることができる。現在の ADS では、1.5[GeV]、20[mA] の陽子ビームが想定されているが、これを 14-16[mA] 程度まで低減することができれば、ビーム窓は簡単な半球形状で成立し設計改善に繋がると考えられている。この陽子ビームによらない ADS の出力制御の方法として、本研究では可燃性毒物を用いた反応度制御法に着目する。

1.4 可燃性毒物による ADS の反応度制御

可燃性毒物とは、燃料中に装荷される中性子吸収材のことである。可燃性毒物は、運転とともに中性子を吸収して減少していくが、燃料よりも燃焼が早いので、初期の核分裂反応を抑えることが可能である。

高速スペクトル炉において、核種単体で有効な中性子吸収材は存在しない。そこで、可燃性毒物として金属水素化物を用いることで、高速中性子を水素原子で減速させ、熱中性子に対して大きな吸収断面積を持つ金属で吸収することができるようになる。

1.5 研究目的

本研究では、金属水素化物を可燃性毒物として用いた ADS の反応度制御を行うことを目的とする。

具体的な数値の目標として、陽子ビーム電流値を 14-16mA 程度にすることで、ビー

ム窓の設計改善につながることから、最大陽子ビーム電流値を 14mA 以下に低減することを目標とする。

これを行うために、まず毒物物質の選定、可燃性毒物集合体の設計を行い、その後反応度制御をする。

対象炉心は JAEA 提案鉛ビスマス冷却型 ADS 炉心(Fig1.2, Fig1.3)とし、断面積ライブラリは JENDL-4.0 を用いて MVP コード、MVP-BURN コード、PHITS コードにて解析を行った。

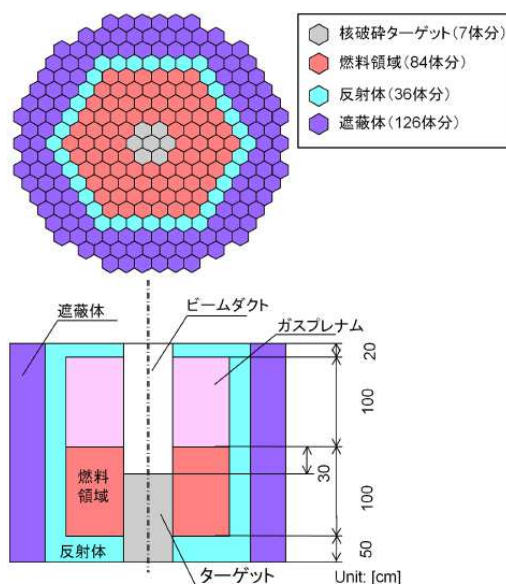


Fig.1.2: ADS 炉心図

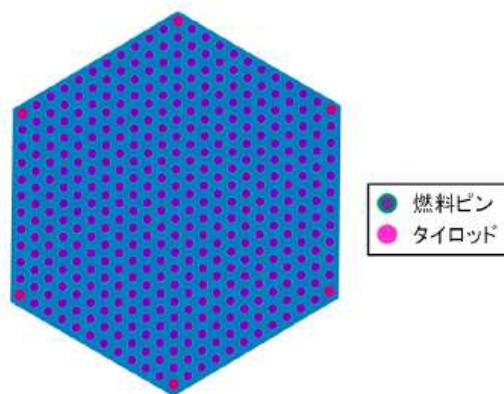


Fig.1.3: 燃料集合体図

2. 毒物物質の選定

熱領域において、大きな中性子吸収断面積を持つ Cd,Sm,Eu,Gd,Dy,Er,Hf の 7 つの物質の中から、ADS に適した物質を反応度価値、燃焼特性の 2 つの観点から選定した。

反応度価値は、Cd,Sm,Eu,Gd の 4 物質が大きいという結果になった。これらについて燃焼計算を行うと、Fig.2 のような結果が得られた。

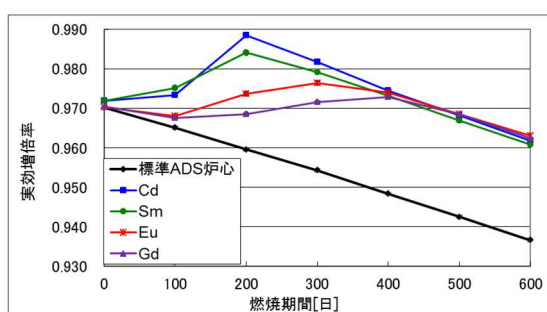


Fig.2: 各物質の実効増倍率の推移

Cd,Sm は吸収効果寿命が 100 日程度と短く、200 日付近で実効増倍率が急上昇しているのに対し、Eu,Gd は寿命が 300 日程度あるため、緩やかで小さな増減を伴った推移となった。このことから、可燃性毒物として、Eu,Gd の 2 つを選定した。

3. 可燃性毒物集合体の設計

可燃性毒物集合体のピン配置、ピン数、金属水素化物(Gd+Zr,Eu+Zr)の組成および、炉心への装荷位置を反応度価値、燃焼特性の観点から最適化した。

ピン数、ピン配置は、Fig.3.1 に示すように、集合体の外側に 66 本配置したときに反応度価値が大きくなった。また、金属水素化物の組成は、Gd 水素化物ピンは Gd30%+Zr70%のとき、Eu 水素化物ピンは、Eu25%,Zr75%のときに燃焼スイングが最

小となった。

この可燃性毒物集合体は、Fig.3.2 のように、燃料層の内側から 2 層目に 6 体装荷したときに反応度価値が最大となった。

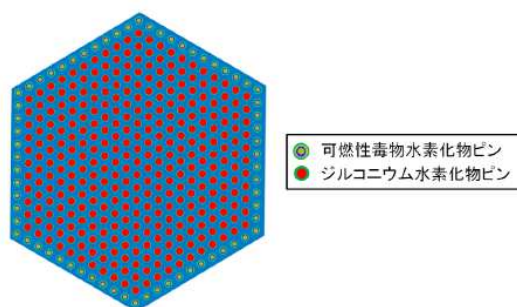


Fig. 3.1: 可燃性毒物集合体

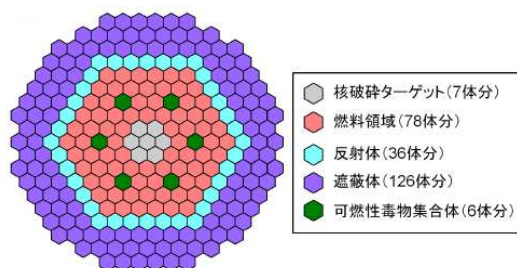


Fig. 3.2: 可燃性毒物集合体装荷 ADS 炉心

4. Eu 水素化物、Gd 水素化物を用いた反応度制御

3 章で最適化した可燃性毒物集合体装荷炉心を用いて ADS の反応度制御を行った。その結果を Fig.4 に示す。

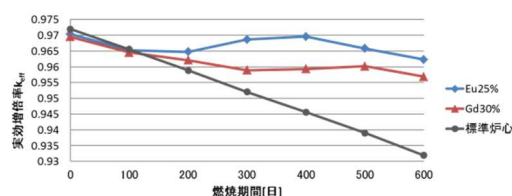


Fig.4: 各炉心の実効増倍率の推移

燃焼スイングは、Eu 装荷炉心で標準炉心に対して 19.5%、Gd 装荷炉心で 30.9%まで低減でき、それに伴って最大陽子ビーム電

流値も Eu 装荷炉心で 12.7mA、Gd 装荷炉心で 14.6mA に減少し、Eu では目標値の 14mA 以下を達成できた。しかしながら、核変換量については、標準炉心で 501kg であったのに対し、Eu 装荷炉心では 453kg、Gd 装荷炉心では 471kg となり、減少してしまった。

5. まとめ

本研究では、ADS の反応度制御法として、金属水素化物集合体を可燃性毒物として用いた解析を行った。Eu 水素化物、Gd 水素化物が毒物物質として適しており、これらを用いることで、ビーム電流値の低減を実現し、ユウロピウム水素化物を用いた反応度制御法の可能性が示された。核変換量向上のための改善を行うことにより、この ADS の反応度制御法はさらに世の中に貢献できる可能性がある。

ラテン超方格サンプリング法による核特性の不確かさ評価

名古屋大学大学院 工学研究科 マテリアル理工学専攻
修士課程 1 年(山本研究室) 木下 国治

1. 序論

原子炉の安全性は、数値シミュレーションを利用した炉心解析により炉心特性を予測することで評価されている。しかし、数値シミュレーションを利用して得られる炉心解析結果は必ず不確かさが存在する。この炉心解析結果の不確かさを定量的に評価することは、炉心解析結果の信頼性の観点から重要である。

炉心解析結果の不確かさに影響を与える要因には、計算モデルの近似、製造公差や核データの不確かさ、運転条件の不確かさなど様々な要因がある。本研究では、これらの不確かさのうち、核データの不確かさ、特に断面積の不確かさに起因する炉心特性の不確かさに着目する。

断面積が炉心特性に及ぼす不確かさの評価方法の一つとして、モンテカルロ法に基づいたサンプリングを利用した方法が存在する[1,2]。モンテカルロ法に基づいたサンプリングを利用する不確かさ評価手法は、断面積の不確かさを与える断面積の共分散データに基づいて微視的多群断面積のランダムにサンプリングを行うことで集合体計算コードの入力値となる多群微視的断面積ライブラリを多数作成し、それぞれの断面積ライブラリに対して一連の炉心解析を行い、得られた炉心特性を統計処理することにより断面積起因の不確かさを定量評価する。

この手法はモンテカルロ法に基づいてサンプリングすることから、得られる核特性の不確かさには必ず統計的誤差が存在する。統計的誤差を小さく、つまり、断面積の不確かさによる影響を精度良く評価するために、従来用いられていたランダムサンプリング法では作成する断面積ライブラリの数(サンプル数)を多くとる必要があった。しかし、サンプル数を多くとると、その分だけ炉心解析を行わなければならない、計算コストが増加する。そこで、モンテカルロ法に基づく不確かさ評価に、精度を保ったままサンプル数を低減できるような、効率的なサンプリング手法の開発が期待されている。

本研究では、効率的なサンプリング方法として、統計的安全解析手法において適用された実績もあるラテン超方格サンプリング法に注目した[3,4]。そして、ラテン超方格サンプリング法を不確かさ評価手法に適用することを目的とし、ラテン超方格サンプリング法を不確かさ評価に適用した場合の妥当性とラテン超方格サンプリング法の性能を検討した。若手研究会では、その検討した結果について報告する。

2. モンテカルロ法に基づくサンプリングによる炉心特性の不確かさ評価

モンテカルロ法に基づくサンプリングによる炉心特性の不確かさ評価は以下の手順で行う。

- (1) 評価済み核データライブラリから NJOY[5]を用いて断面積の共分散データを得る。
- (2) (1)で得られた共分散に基づき、断面積をモンテカルロ法に基づきサンプリングし、断面積ライブラリを多数作成する。
- (3) (2)で作成したそれぞれの断面積ライブラリについて、一連の炉心解析を行い、それぞれの断面積ライブラリに対して炉心特性を得る。
- (4) (3)で得られた炉心特性から統計処理をし、炉心特性の不確かさを求める。

以上で述べた不確かさ評価の手順を図 1 に示す。

この不確かさ評価において最も重要となるのは、手順 2 の断面積に対してモンテカルロ法に基づくサンプリングを行い、断面積ライブラリを作成することである。

モンテカルロ法に基づくサンプリングとは、ある母集団の中から乱数を用いて標本抽出することである。本研究では断面積が母集団であり、断面積をモンテカルロ法に基づきサンプリングすることにより、断面積のばらつきを再現する。断面積のばらつきを少ない断面積ライブラリで適切に再現することができれば、効率的にサンプル数を減らすことができる。

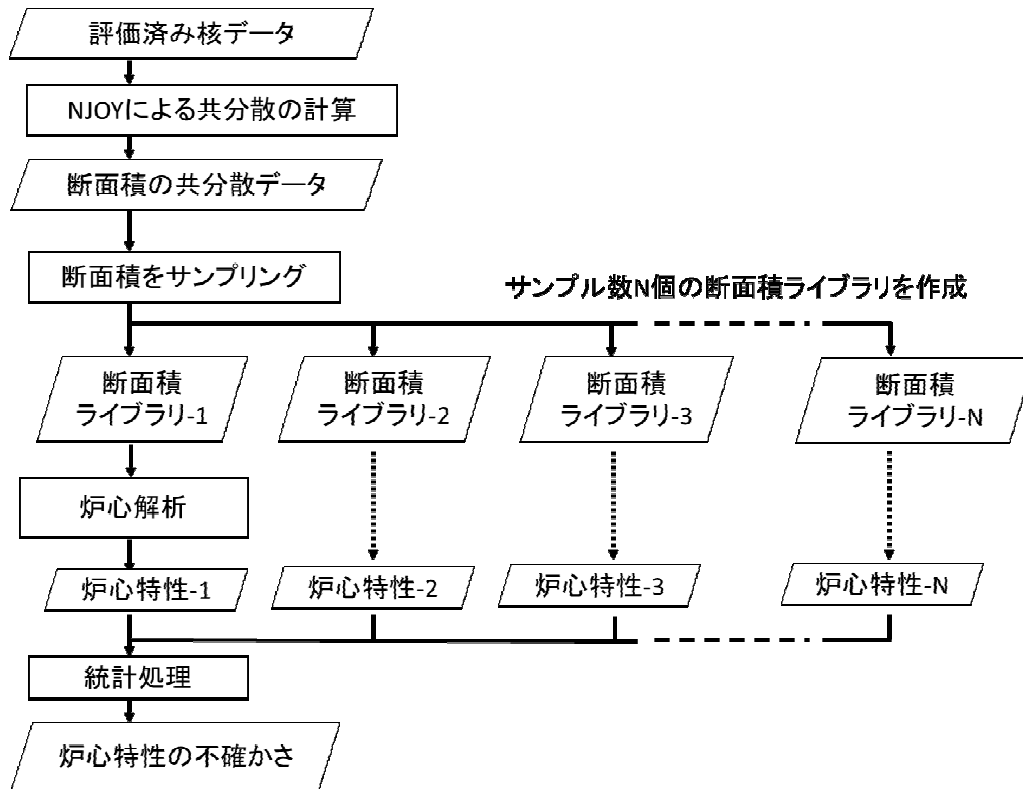


図 1 不確かさ評価のフローチャート

3. ラテン超方格サンプリング法

断面積の不確かさによる影響を精度良く評価するためには、影響を評価する入力パラメータをその不確かさに従うようにできる限り一様にサンプリングする必要がある。従来用いられていたランダムサンプリング法では、この条件を達成するために、サンプリングする点をできるだけ多くとる必要がある。限られたサンプル数で不確かさの範囲を一様にサンプリングするためには、あらかじめサンプリングする範囲を適切に分割し、各範囲内でサンプリングすることが考えられる。

サンプリングする範囲の分割には様々な方法があるが、本研究では、ラテン超方格サンプリング(LHS)法に注目する。ラテン超方格サンプリング法とは、各入力パラメータのサンプリング範囲をサンプル数と同じ N 個の区間に分割し、どの入力パラメータに対しても各区間に属するサンプル点が 1 個ずつとなるようにサンプリングする手法である。入力パラメータ数が 2、サンプル数が 9 の場合について、ラテン超方格サンプリング法を用いて各パラメータを(0,1)の区間でサンプリングした一例を図 2 に示す。

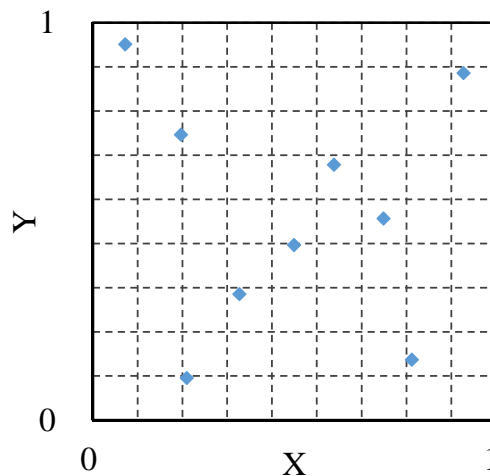


図 2 ラテン超方格サンプリング法の一例

また、ラテン超方格サンプリング法とよく似た手法として層化サンプリング法がある。層化サンプリ

ング法では、入力パラメータ毎にある決められた数の区間に分けて、それによってできる複数のパラメータからなる領域について、そのすべての領域から 1 点ずつサンプリングする必要がある。そのため、入力パラメータの数に対して、サンプル数が指数関数的に増加していく。このため、入力パラメータの数が増えるとサンプリングする点が膨大な数になり、現実的な計算量に収まらない可能性がある。一方、ラテン超方格サンプリング法では、各入力パラメータについて、サンプリング範囲をサンプル数と同じ N 個の区間に分割している。ゆえに、ラテン超方格サンプリング法では、入力パラメータの数が増加したとしてもサンプル数は一定で、入力パラメータの数が増える場合でもサンプリングを実施することができる。

4. 検証計算

本研究では、比較的計算コストの少ない集合体計算によって、LHS 法の適用性の検討を実施した。集合体計算コードとしては CASMO-4 を使用した[6]。

ここで、核特性の不確かさとしては、集合体計算で得られた無限増倍率を評価対象とした。断面積に起因する集合体核計算の不確かさ評価手順は、図 1 で述べた手順と同じである。本検証の場合には、図 1 で示したフローチャートにおいて、炉心解析が集合体計算、炉心特性が無限増倍率に対応する形となる。

モンテカルロ法に基づくサンプリングによる不確かさ評価手法では、乱数を用いて不確かさを評価するので、評価された不確かさそのものにも統計的なばらつきが生じることとなる。すなわち、初期乱数を変えて不確かさ評価を行うと、統計的なばらつきの範囲内で評価される不確かさ変動する。

各サンプリング手法で評価される不確かさは等しくなると予想される。そこで、各サンプリング法の性能を評価するために、評価された不確かさの統計的なばらつきに注目する。この統計的なばらつきが小さければ、そのサンプリング法の優位性が示せる。

評価される不確かさの統計的なばらつきを定量的に評価するために、初期乱数を変えて複数回不確かさ評価を行い、統計処理をして標準偏差を求めた。その検証方法を図 3 に示す。なお、図 3 における「不確かさ評価」は、図 1 に示す手順により、断面積に起因する集合体の無限増倍率の不確かさを評価する手順を示している。

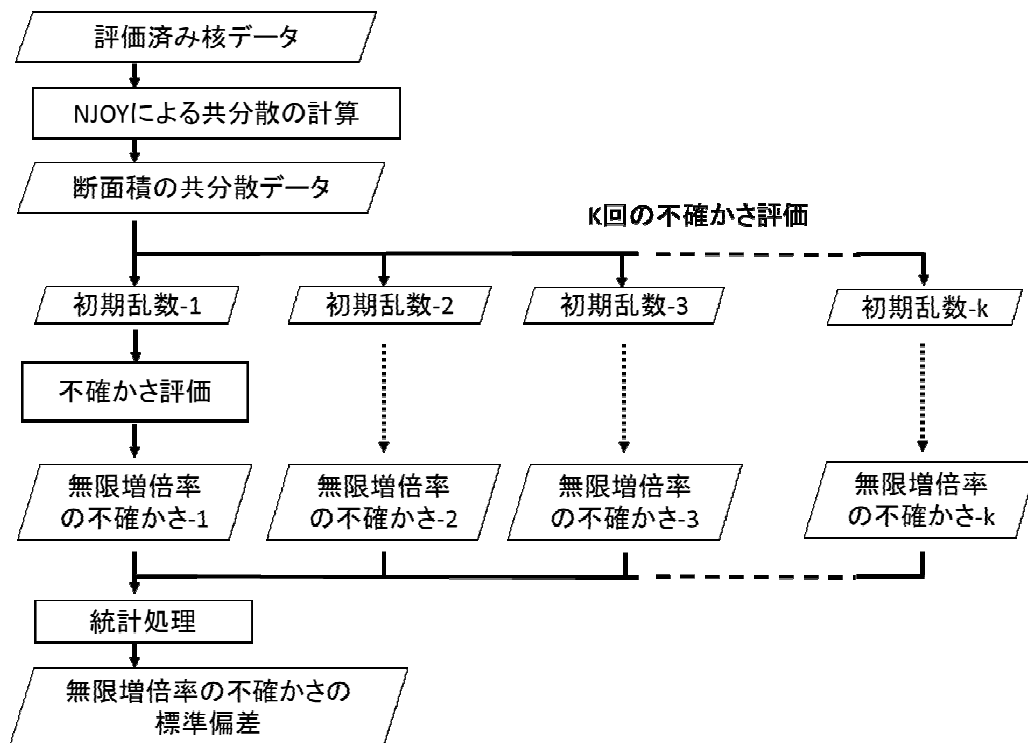


図 3 検証計算のフローチャート

今回、解析対象としたのは Peach Bottom 2 号機を対象としたベンチマーク問題における Type 1 の BWR 燃料集合体である[7]。この BWR 集合体の形状を図 4 に示す。

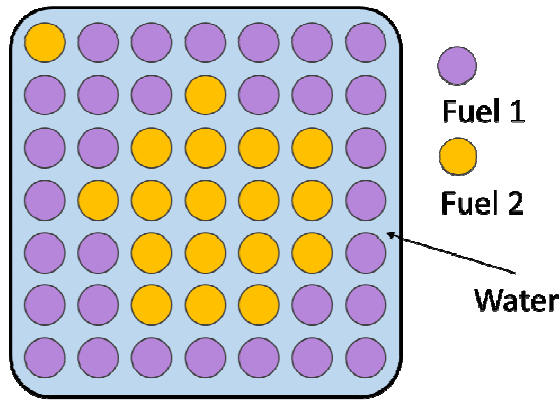


図 4 検証対象とした BWR 燃料集合体の形状

評価項目は燃焼度 0MWd/t, ボイド率 40%における無限増倍率である。また、今回の検討では、断面積の分散共分散データとして、U-235 の散乱断面積、核分裂断面積、捕獲断面積、平均発生中性子数、U-238 の散乱断面積、捕獲断面積のみを考慮した。共分散は JENDL-4.0 を使用した[8]。また、U-235 と U-238 については JENDL-4.0 の修正ファイルである JENDL-4.0u を用いた[9]。

LHS 法の性能を評価するため、評価される無限増倍率の不確かさの標準偏差(評価したい不確かさのばらつき)に注目し、サンプル数に対する無限増倍率の不確かさの標準偏差について検討した。サンプル数を 50,100,250,500 として無限増倍率の不確かさ評価を繰り返し行い、無限増倍率の不確かさの標準偏差を求めた。サンプル数が多くなれば、無限増倍率の不確かさに対する初期乱数による影響は小さくなる。そこで、初期乱数の変更回数に関しては、サンプル数ごとに異なる値とした。ただし、RS 法と LHS 法で初期乱数の変更回数が同じになるようにした。具体的には、RS 法と LHS 法を用いて、それぞれサンプル数 50 で 250 回、サンプル数 100 で 125 回、サンプル数 250 で 50 回、サンプル数 500 で 25 回、初期乱数を変えて不確かさ評価を行った。その結果、各サンプル数における無限増倍率の不確かさは図 5 のようになった。

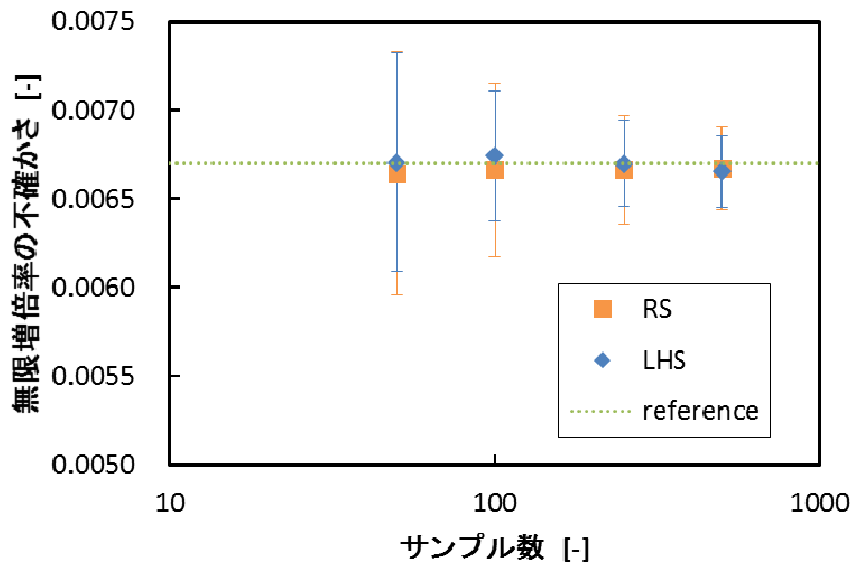


図 5 サンプル数に対する無限増倍率の不確かさ

図 5 では、無限増倍率の不確かさについての標準偏差を図 5 で誤差バーとして表した。また、図 5 における直線は、無限増倍率の不確かさの参照値として、RS 法でサンプル数を 25000 とサンプル数を十分多くして不確かさ評価を行った結果である。図 5 から、無限増倍率の不確かさが参照値とほぼ一致していることが分かる。このことから、LHS 法を用いた場合でも不確かさが妥当に評価されているといえる。

また、不確かさの標準偏差に注目し、不確かさの相対標準偏差を次式のように定義すると、サンプル

数に対する不確かさの相対標準偏差は図 6 のようになった。

$$R.S.D_{S,D} = \frac{S_{S,D}}{\langle S,D \rangle} \quad (1)$$

ここで、 $R.S.D_{S,D}$ を不確かさの相対標準偏差とし、 $S_{S,D}$ は不確かさの標準偏差、 $\langle S,D \rangle$ を不確かさの平均値としている。

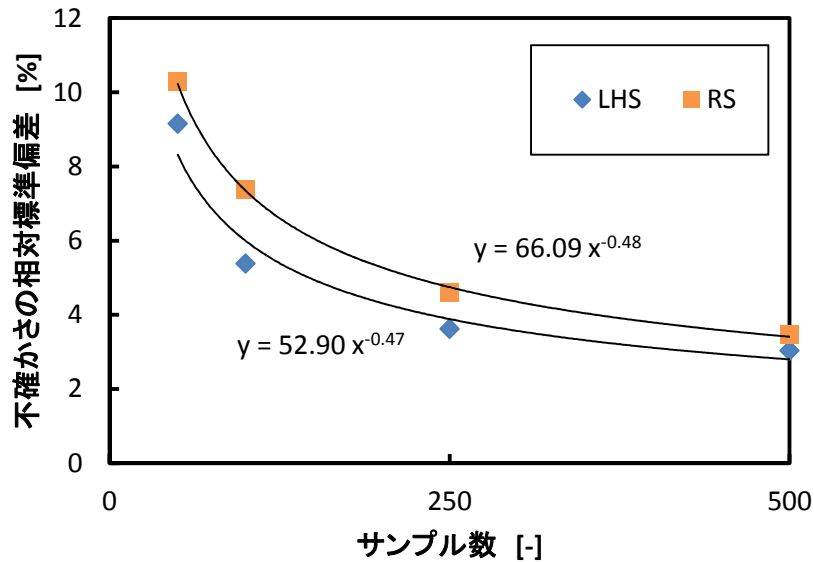


図 6 サンプル数に対する不確かさの相対標準偏差

図 6 から、LHS 法を用いた方が一貫して不確かさの相対標準偏差が小さいことがわかる。よって、LHS 法を用いることで、少ないサンプル数でも同程度の精度で不確かさの定量評価ができる。例えば、図 6 の近似式から、サンプル数 500 で RS 法を用いた場合と同じ統計精度を得る場合、LHS 法ではサンプル数おおよそ 330 とすれば良いことが分かる。すなわちこのケースでは、LHS 法を不確かさ評価手法に適用することで、不確かさ評価を行うためのサンプル数を約 35% 低減可能である。

5. まとめ

今回の若手研究会では、モンテカルロ法に基づくサンプリングによる不確かさ評価手法に注目し、効率的なサンプリング法として、ラテン超方格サンプリング法の適用について検討し、その結果を報告した。

結論として、LHS 法による不確かさ評価結果と RS 法による不確かさ評価結果から、LHS 法を適用することで、従来から広く用いられている RS 法と同等の不確かさ評価を行うことができることを明らかにした。また、得られた無限増倍率の不確かさの評価精度の観点から RS 法と LHS 法を比較し、LHS 法を適用することで RS 法よりも少ないサンプル数で同程度の評価精度で核特性の不確かさが評価できることを示した。本検証の場合、LHS 法を適用することで、RS 法と比較して、不確かさ評価に要するサンプル数を約 35% 低減することができた。

参考文献

- [1] W. Wieselquist, *et al.*, “Nuclear data uncertainty propagation in a lattice physics code using stochastic sampling”, *Proc. PHYSOR2012*, Knoxville, Tennessee, April 15-20, 2012, (2012). [CD-ROM].
- [2] T. Watanabe, *et al.* “Uncertainty and Correlation Estimation of Reload Safety Parameters of PWR using Random Sampling Method”, *Trans. Am. Nucl. Soc.*, **109**, pp1365-1368, (2013).
- [3] M. D. McKay, “Evaluating Prediction Uncertainty”, NUREG/CR-6311 LA-12915-MS(1995).
- [4] T. Takata and A. Yamaguchi, “Uncertainty Correlation in Stochastic Safety Analysis of Natural Circulation Decay Heat Removal of Liquid Metal Reactor”, *Proc. 13th Int. Topical Meeting on Nucl. Reactor Thermal Hydraulics (NURETH-13)*, Kanazawa, Japan, Sep 27- Oct 2, 2009, (2009).
- [5] R. E. MACFARLANE and D. W. MUIR, The NJOY Nuclear Data Processing System Version 91, LA-12740-M (October 1994).
- [6] *CASMO-4 A Fuel Assembly Burn-up Program. User's Manual*, SSP-09/443-U Rev 0, Studvik Scandpower, Inc. (2009).
- [7] N. H. Larsen, “Core Design and Operating Data for Cycle 1 and 2 of Peach Bottom 2”, *NP-563*, EPRI (1978).
- [8] K. Shibata, *et al.*, “JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering,” *J. Nucl. Sci. Technol.* **48**, 1 (2011).
- [9] JENDL-4.0u, <http://www.ndc.jaea.go.jp/jendl/j40/update/>, Japan Atomic Energy Agency, (参照:2013/1/16).

トリウム燃料のドップラー反応係数に関する検討

大阪大学大学院 工学研究科 環境・エネルギー工学専攻

博士課程前期 1 年 土淵 昇

1. 背景・目的

トリウム燃料のドップラー反応度係数は、従来のウラン燃料と比較して負側に小さくなることが知られている。しかし、トリウム ^{232}Th の共鳴積分は、ウラン ^{238}U より小さい。表 1 に MVP Version2 により求めたトリウム燃料とウラン燃料のドップラー反応度係数、表 2 に ^{232}Th と ^{238}U の共鳴積分を示す。

表 1 トリウム燃料とウラン燃料のドップラー反応度係数

	トリウム燃料 ($^{232}\text{Th} + ^{235}\text{U}$)	ウラン燃料 ($^{238}\text{U} + ^{235}\text{U}$)
ドップラー反応度係数 [$\Delta k/k'/K$]	-2.62×10^{-5}	-1.79×10^{-5}

表 2 ^{232}Th と ^{238}U の共鳴積分

	^{232}Th	^{238}U
共鳴積分 [barn]	84.29	275.6

本研究では、共鳴積分が小さい ^{232}Th を含むトリウム燃料の方が、共鳴積分が大きい ^{238}U を含むウラン燃料よりも、ドップラー反応度係数が負側に大きくなる要因を調査した。

2. 検討方法

本研究では、ドップラー反応度係数の感度係数を求め、比較することで、トリウム燃料とウラン燃料のドップラー反応度係数の差異に大きく影響している核種及びその核反応を明らかにする。

計算コードは、断面積作成に SRAC2006^[1]、感度計算に SAINT-II を使用した。核データライブラリは、JENDL-4.0^[2] を使用し、エネルギー群は 107 群とした。

燃料は、 $^{232}\text{ThO}_2$ と $^{235}\text{UO}_2$ の混合物をトリウム燃料、 $^{238}\text{UO}_2$ と $^{235}\text{UO}_2$ の混合物をウラン燃料とし、どちらも ^{235}U の割合は 3.0 wt% とした。被覆管領域、冷却材領域の温度は変化させずに、燃料領域の温度を 600 K から 900 K に変化させた場合について検討を行った。その他の計算条件を表 3 に示す。

表 3 計算条件

体系	PWR ピンセル	
燃料領域半径	0.41 cm	
被覆管領域半径	0.47 cm	
冷却材領域半径	0.71 cm	
燃料	トリウム燃料	$^{235}\text{UO}_2 + ^{232}\text{ThO}_2$
	ウラン燃料	$^{235}\text{UO}_2 + ^{238}\text{UO}_2$
^{235}U 割合	3.0 wt%	
温度条件	600 K → 900 K	
被覆管	Zry-4	
温度条件	600 K	
冷却材	H_2O	
温度条件	600 K	

3. 計算結果・考察

SAINT-II による感度係数の結果を、燃料領域、冷却材領域に存在する核種について、感度係数のエネルギー積分値、反応断面積の総和をとったものを図 1 に示す。トリウム燃料中の ^{235}U とウラン燃料中の ^{235}U を比較すると、トリウム燃料中の ^{235}U の方が負の感度係数が大きい。このことから、トリウム燃料とウラン燃料の ^{235}U の違いは、トリウム燃料とウラン燃料のドップラー反応度係数の差を縮める方向に寄与していることがわかる。 ^{232}Th と ^{238}U の感度係数を比較すると、 ^{232}Th の方が正の感度係数が大きい。このことから、 ^{232}Th の方が ^{238}U よりもドップラー反応度係数を負側に大きくする寄与が大きいことがわかる。

ドップラー反応度係数の差異を大きくする方向に寄与している ^{232}Th と ^{238}U について、感度係数のエネルギー積分値を反応断面積別に比較したものを図 2 に示す。グラフから、捕獲、 ν 値、核分裂による寄与が大きいことがわかる。

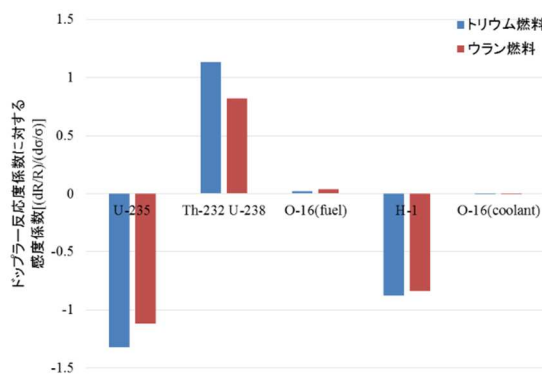


図 1 核種別の

ドップラー反応度係数に対する感度係数

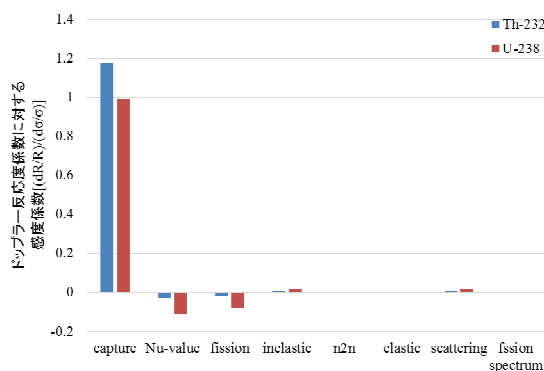


図 2 反応断面積別の

ドップラー反応度係数に対する感度係数

^{232}Th と ^{238}U の ν 値、核分裂断面積のドップラー反応度係数に対する感度係数のエネルギー依存性を図 3, 4 に示す。 ν 値、核分裂断面積の感度係数を見ると、1 MeV 以上の高エネルギーにおいて寄与が大きいことがわかる。

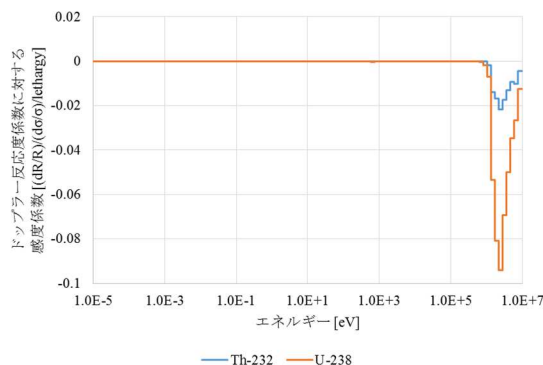


図 3 ν 値の

ドップラー反応度係数に対する感度係数

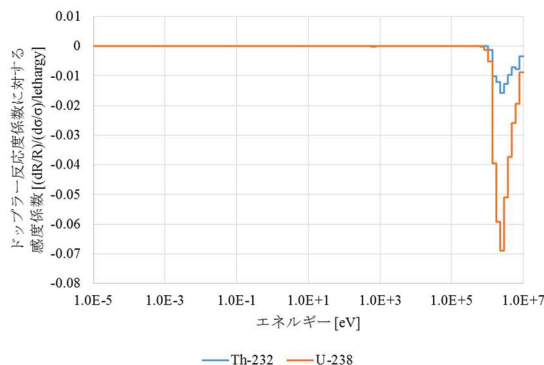


図 4 核分裂断面積の

ドップラー反応度係数に対する感度係数

ν 値、核分裂断面積の感度係数を見ると、1 MeV 以上の高エネルギーにおいて寄与が大きいことがわかる。これは、 ^{232}Th と ^{238}U の核分裂断面積の差異に起因すると考えられる。 ^{232}Th と ^{238}U の核分裂断面積を図 5 に示す。1 MeV 以上では、 ^{238}U は ^{232}Th の約 3 倍の核分裂断面積をもっているため、 ^{238}U の方が負に大きい感度係数をもつと考えられる。

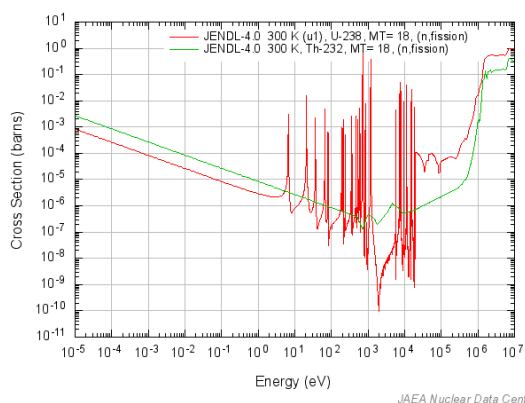


図 5 ^{232}Th と ^{238}U の核分裂断面積

捕獲断面積についても、ドップラー反応度係数に対する感度係数のエネルギー依存性を図 6 に示す。捕獲断面積による寄与は、熱領域における寄与と共鳴を含む熱外領域における寄与に分けて考察する。熱領域においても熱外領域においても ^{232}Th の方が ^{238}U よりもドップラー反応度係数に対して大きな寄与があるといえる。

熱領域における寄与は、スペクトルが硬くなることと、断面積の大きさが影響していると考えられる。燃料温度が 600 K から 900 K に変化すると、熱領域での中性子束のピークが高エネルギー側にシフトし、捕獲反応率が変化する。 ^{232}Th と ^{238}U の捕獲反応断面積を図 7 に示す。熱領域では、 ^{232}Th は ^{238}U の約 3 倍の捕獲断面積をもっているため、 ^{232}Th の方が正に大きな感度係数をもつと考えられる。

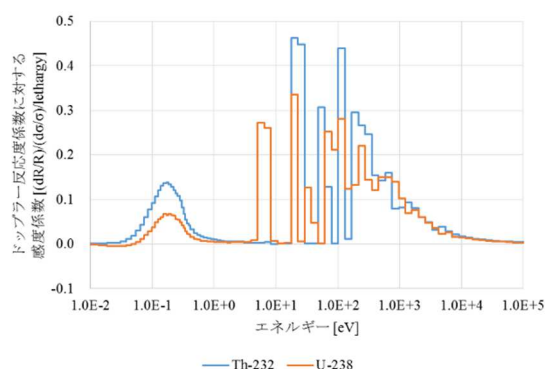


図 6 捕獲断面積の

ドップラー反応度係数に対する感度係数

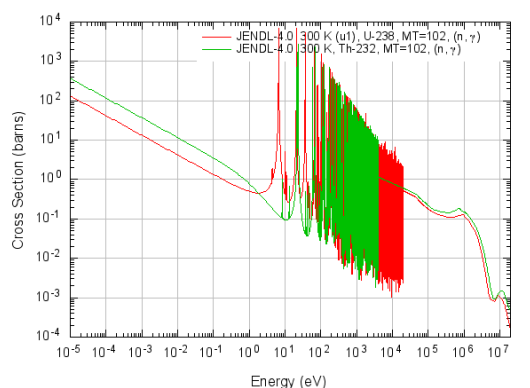


図 7 ^{232}Th と ^{238}U の捕獲断面積

熱外領域における寄与は、燃料温度変化による断面積の変化に起因していると考えられる。燃料温度が 600 K から 900 K に変化したことによる捕獲断面積の変化が、 ^{238}U と比較して ^{232}Th の方が大きい。このことから、 ^{232}Th の方が ^{238}U よりも自己遮蔽因子の温度依存性が大きく、ドップラー効果によって共鳴が広がりやすいということが考えられる。

4. まとめ

^{232}Th と ^{238}U の違いによるドップラー反応度係数の差異への寄与について検討を行った。

感度解析による検討の結果、ドップラー効果とは無関係である ^{232}Th と ^{238}U の高エネルギーにおける核分裂断面積、熱エネルギーにおける捕獲断面積の違いによる寄与も存在すると考えられる。高エネルギーにおいて ^{232}Th よりも ^{238}U の方が、核分裂断面積が大きく、熱エネルギーにおいて ^{238}U よりも ^{232}Th の方が、捕獲断面積が大きいことが、トリウム燃料の方がウラン燃料よりもドップラー反応度係数大きくなることに寄与している。

捕獲断面積の共鳴においては、燃料温度変化による断面積変化が大きいことから、 ^{238}U よりも ^{232}Th の方がドップラー効果によって共鳴が広がりやすいということが考えられる。

5. 参考文献

- [1] Keisuke OKUMURA, Teruhiko KUGO, Kunio KANEKO and Keichiro TSUCHIHASHI, "SRAC2006 : A Comprehensive Neutronics Calculation Code System, " JAEA-Data/Code 2007-004 (2007).
- [2] K. Shibata, O. Iwamoto, T. Nakagawa, N. Iwamoto, A. Ichihara, S. Kunieda, S. Chiba, K. Furutaka, N. Otuka, T. Ohsawa, T. Murata, H. Matsunobu, A. Zukeran, S. Kamada, and J. Katakura: "JENDL-4.0: A New Library for Nuclear Science and Engineering," J. Nucl. Sci. Technol. 48(1), 1-30 (2011).