

<第 51 回 炉物理夏期セミナーの実施報告>

炉物理部会 セミナー小委員会
担当幹事 名内泰志 佐藤駿介

会期 2019 年 8 月 5 日(月)~7 日(水)

会場 作並温泉 鷹泉閣 岩松旅館 (宮城県仙台市)

テーマ 「燃焼計算の基礎と実践」

参加人数: 52 名

講師 9 名、学生 19 名、社会人 33 名、(うち、非会員 18 人)

主催 日本原子力学会 炉物理部会、幹事の所属: 電力中央研究所

東北地方では旧暦で七夕を祝うが、仙台七夕(8 月 6 日~8 日)と同じ時期に、作並温泉で第 51 回炉物理夏期セミナーを開催した。作並温泉は仙台駅と同じ青葉区内に位置するが、駅からわずか 45 分の距離にも関わらず、仙台駅前の喧騒を離れ、緑濃い深山幽谷にたたずむ。もともと鎌倉幕府を開いた源頼朝が奥州征伐を行った際、一羽の鷹が川沿いの水辺に降り立ち、そこで羽を休めてから勇躍飛びたつ姿をみて、その跡を確認したところ出湯にめぐり合ったのが起源とされる。

本年度は「燃焼計算の基礎と実践」をテーマに設定した。原子力を利用すれば、ウランや構造材、冷却材において核種の生成、消滅という物理事象が発生し、これが原子炉の特性を変化させる。また使用済燃料を安全に管理するには、除熱や線量管理、臨界管理が必須であり、そのためには正確な燃焼計算が必須となる。この基礎と実務、統合的な計算手法、妥当性確認と使用済燃料の管理などについて国内の第一線で活躍する先生方に講師をお引き受けいただき、学生、社会人の若手の方、そして非会員の方に多くご参加いただいた。

織女と牽牛には嬉しい好天続きがあだとなり、講義室の空調が追いつかないという苦難に見舞われ、事務局として参加者にご迷惑をおかけした。にもかかわらず、講師の先生方も聴講の皆様にも熱心に取り組んでいただいた。また、8/6 の夕刻に開催された若手研究会では、8/5、6 の講義内容の理解度を大学院生が発表するという、充実したセミナーとなり、川辺の温泉で汗をながしつつ、昼な夜なと勉強し、参加者間の懇親を深める様子が見られた。きっと参加者の多くが鷹の如く世界に飛翔されるものと期待してやまない。

本セミナー開催にあたり、講師の先生方と御所属元には、謝金なし、旅費等まで持ち出しでご協力いただき、素晴らしいテキスト執筆とご講演を賜った。またテキスト広告には 6 社から温かいご協力を賜った。その他、炉物理運営小委員会の皆様及び学会事務局には基本方針や予算の確認などご協力頂戴した。本セミナーに参加していただいた皆様と、多大なご支援、ご協力を賜った皆様に、改めて心より感謝申し上げます。

【プログラム】

1 日目 (8/5(月))

開校式

講義(1) 燃焼計算の基礎と数値解法 (東北大/岩崎先生)

講義(2) 燃焼計算の研究現場応用 (JAEA/奥村氏)

講義(3) 燃焼感度計算の基礎とその応用例 (北大/千葉先生)

2 日目 (8/6(火))

講義(4) PWR 炉心管理と燃焼計算 (四国電力/大堀氏)

講義(5) BWR 炉心管理と燃焼計算 (GNF-J/東條氏)

講義(6) 汎用炉心解析システム MARBLE2 の燃焼計算機能(ライブ実行デモ) (JAEA/横山氏)

講義(7) 汎用炉心解析システム MARBLE2 の燃焼計算機能(ライブ実行デモ) (JAEA/横山氏)

講義(8) PIE における化学分析と燃焼率測定 (JAEA/小山氏)

若手研究会 (阪大/竹田先生、日立/村上氏)

3 日目 (8/7(水))

講義(9) 臨界安全設計への燃焼度クレジットの適用 (MHI/原田氏)

講義(10) 崩壊熱と原子炉ドシメトリ (JAEA/前田氏)

閉校式

【講義要旨】

講義 1 燃焼計算の基礎と数値解法 東北大学 岩崎先生

核種の数密度の増減から燃焼方程式が構成されていること、これが行列と数密度のベクトルで表現できることなどが紹介された。燃焼方程式の数値解法はまず比較的長い半減期の核種に有効な行列指数法と、短い半減期の核種に有効な Bateman 法があることが紹介された。これらは 1970 年代から米国 Oakridge 国立研究所で開発され、ORIGEN-2 コードで一つの完成をみており、理論などの学習にはここから入ると良いことが紹介された。燃焼計算の要諦は燃焼方程式を解くことと、その計算に必要な実効断面積と中性子束を適切に決めることにある。後者については、燃焼による中性子スペクトルの変化と共鳴吸収の取り扱いが肝要であるが、この計算のために SRAC コードと ORIGEN コードを組み合わせた SWAT コードなどのステップワイズ燃焼計算手法が開発されたことが紹介された。

講義 2 燃焼計算の研究現場応用 JAEA 奥村氏

燃焼計算ではチェーンに属する核種が多いほど計算時間を要する。またチェーンの中の半減期の長短は数桁以上の違いとなるが、これを全て考慮すると燃焼度ステップを各段

に細かくとること等が必要となる。実態として短半減期の核種で吸収断面積が小さく中性子スペクトルに影響のないものは累積収率を用い、チェーンのいきつく先の核種を直接生成させるような簡略化を行う。ただし、こうした簡略化では燃焼計算結果の適用先を見据えて適切かどうか判断する必要がある。例えば炉心燃焼特性の観点では ^{238}U から ^{239}Pu の生成過程にある ^{239}U 、 ^{239}Np を無視した累積収率を使っても適切な解が与えられるが、炉心停止直後の崩壊熱の考慮では ^{239}U 、 ^{239}Np は欠くべからざるものである。またたとえ燃焼方程式が正確に解けても、放射化核種の親物質あるいは生成物質が熱移動する(Cs 系核種など)あるいは原子炉冷却水配管中を移動する(鋼管中のステンレス鋼など)など、中性子反応および放射性崩壊と異なる物理現象を伴う可能性は意識しなければならない。とりあえず、初心の方が燃焼計算の結果を概略確認する場合は、以下の 3 点から入るとよいとのこと。

- 1) 到達燃焼度をあわせた計算を行う(細かい出力履歴の必要なケースは多くはない)。
- 2) 長期的検査など長めの冷却期間を考慮する。
- 3) 短寿命核種の評価には取り出し直前のサイクルの出力を把握する。

講義 3 燃焼感度計算の基礎とその応用例 北海道大学 千葉先生

着目する核種の生成に関係の深い捕獲断面積、反応をおこす親核種数、核分裂収率(**direct, cumulative**)などに着目し、どのデータがどの程度核種生成量計算値に影響するのか、という感度を見ることで、核データの誤差の燃焼への影響を見ていく燃焼感度計算が紹介された。ここではどの核種のどの時間の数密度に対して影響が大きいかを見る随伴数密度関数が主役をなす。この理解のため、核種 i が崩壊して安定核種 j になるという最も簡単な条件に対し、おのおのの数密度 N_{ij} の関する部分方程式の行列表現を作成し、その随伴式を解いて、ある時刻の N_j に対する N_i の感度が時々刻々変化する様などを演習として実施した。

講義 4 PWR 炉心管理と燃焼計算 四国電力 大堀氏

出力炉心の特性の大部分は燃料の燃焼による組成変化の影響をうける。この観点から、PWR の炉心管理の概要と、サイクル毎の取換炉心設計全般についての説明がなされた。燃焼に関係したところとしては、MOX 燃料の隣接効果が取り出し燃料の核物質質量に影響することなどが紹介された。また、炉心計算時は燃焼度等の関数としてマクロ断面積を用意するマクロ燃焼がベースとなっており、四国電力が自社開発している SHIKOKU コードではマクロ燃焼において燃料棒単位でマクロ断面積を用意している。一方、出力履歴の効果を確認する際や、 ^{157}Gd の燃焼など、部分的に燃焼方程式を解くマイクロ燃焼を導入している。この ^{157}Gd のマイクロ燃焼では、数密度を内挿して断面積を扱うことが多いとのこと。

今回は大学院生の参加者が多く、PWR 炉心解析の概論を頂戴したことも意義深かった。

講義 5 BWR 炉心管理と燃焼計算 GNF-J 東條氏

BWR でも炉心管理、取替炉心設計においてマクロ燃焼に加え、マイクロ燃焼による補正を

行うコードが導入されつつある。マクロ燃焼時の断面積を再構築するための内挿指標として、従来はノードの全燃焼期間に渡る単純平均のボイド率(履歴平均ボイド率)が利用されてきたが、最近では至近のボイド率の重みを大きくした重み付き履歴平均ボイド率で参照するモデルが提案されている。さらに無限体系の格子計算時と炉心体系の体系計算時のスペクトルの違いを考慮するスペクトル考慮履歴平均ボイド率に基づく断面積再構築モデルを用いることもある。

ミクロ燃焼に関しては目的に応じていろいろな燃焼チェーンを用意しており、例えば停止時中性子源評価では ^{140}La などの FP のチェーン、 $^{242, 244}\text{Cm}$ などの生成チェーンを用意している。その他の応用例として、払い出し燃料の核物質質量評価において、高度化した組成評価を求められる場合に備え、ミクロ燃焼の結果を利用したより厳密な解析手法を導入しているとのこと。

講義 6,7 汎用炉心解析システム MARBLE2 の燃焼計算機能(ライブ実行デモ) JAEA 横山氏

燃焼方程式や固有値計算など個別のコードの機能や関連データをカプセル化した部品として用意し、ユーザーが選択して組み合わせて用いる工学系モデリング言語である MARBLE2 が紹介された。工学系モデリング言語は開発者らの提案した概念であるが、この概念を現在の視点で説明すると、MARBLE2 は汎用のプログラミング言語である Python を利用した炉心解析用のドメイン特化言語(Domain Specific Language)である。このため、講義 6 において、Python の数値計算への利用が Jupyter Notebook を使ってなされた。Python 単体でも数値型の自動判別や、複数の階層になったデータの取り扱いの容易さ、Numpy、Scipy といった数値計算ライブラリが使えるといった利点がある。また講義 7 では、すでにカプセル化してある核種と核変換に関するクラス、原子数密度に関するクラス、実効断面積に関するクラス、崩壊定数や燃焼チェーンに関するクラスとその使い方、また行列指数法のソルバーの実動作などが紹介された。事前に希望者を募集した上でセミナー当日に MARBLE2 コードを無償配布していただき、講義を受けた参加者は早々に MARBLE2 を導入することが可能となった。

講義 8 PIE における化学分析と燃焼率測定 JAEA 小山氏

炉物理の計算手法は validation が必要であり、燃焼計算ではそれが照射後試験(PIE)による化学組成分析との比較となる。計算値と測定値の比較(C/E)をより深く理解するため、常陽で照射した燃料について、燃焼率を測定するための化学分離の手法・経験と、アメリカウム試料の照射後組成の分析が紹介された。いずれの手法も表面電離型質量分析計が用いられるが、同重体の異種元素が混在すると、同じ荷数の電離状態では分離できないため、化学分離プロセスが重要となる。燃焼率測定では適切な酸化力の硝酸と、必要であればフッ酸で溶解した後、還元材等で荷数調整した後、イオン交換樹脂で FP、U、Pu を分離した後、蒸発乾固させて分析にかける。この際、元素毎に蒸発のしやすさ等の感度に係ることが異なっ

てくるが、目的試料を 2 種類とし、片方に既知の元素・核種数密度のスパイク試料を混入させて得た質量分析結果と、目的試料との結果を比較することで感度を補正する。 ^{148}Nd 収量から燃焼率を求める際は、核分裂核種毎の ^{148}Nd 収率と実効断面積、これに測定した Pu,U 同位体比を用いるが、この実効断面積に照射中の平均断面積を与える必要があり、その意味で燃焼率の測定値が炉心計算と独立になっていない箇所があることに注意を要する。一方アメリカン試料については Cm/Am、Pu/Am の化学分離に限界があり、 α 線測定との併用でその比を求めようとしているが、これについてはサンプル中での α 線のエネルギー減衰などで分離性能に限界があるとのこと。

照射燃料は高線量であり、FP の分離過程で ^{137}Cs 等を除去するまでは全てホットセルでミニピュレータを用いて化学分析する。このような中で繰り返し操作により溶液分取の精度確認を行うなど、大変な努力をされていることが理解された。

講義 9 臨界安全設計への燃焼度クレジットの適用 三菱重工業 原田氏

核燃料が燃焼すると燃料中の核分裂物質質量が減少して臨界安全上の余裕が増す。このことを利用して、新燃料仮定に基づく設計よりもより稠密な条件で原子燃料の保管、管理を行う燃焼度クレジットの導入について、諸外国や、日本原子力学会の標準の基本的な考えと、日本で燃焼度クレジットが導入されている六ヶ所再処理工場の燃料貯蔵プールおよび溶解槽の例が紹介された。

設計においては best estimate と保守的評価がある。Best estimate は使う手法や核データの誤差がどの程度あるかをみるのに用いる。核種生成量に関する PIE の実験データによる validation と、ICS BEP や HTC 実験などの積分実験データを用いた臨界計算コードの検証などが成されている。一方、保守的評価としては中性子スペクトルを硬くして、 ^{239}Pu の生成量を増やすといったモデルが取られる。このためには、PWR のボロン濃度を高く設定する、あるいは可燃性毒物量を装荷する、さらに水密度を減らし気味にする計算等が知られる。また、さらに保守性をとる臨界計算モデルの設定が紹介された。例えば、集合体の燃焼度が隣接配置燃料の影響を受ける場合、集合体組成を均一で扱うなら、最小燃焼度の燃料の組成を用いる、などである。

会場からは、会場からは、破損燃料など、集合体に変形があった場合の対応について質問がでたが、通常燃料を納める中間貯蔵などでは破損燃料は扱わない方針である。

講義 10 崩壊熱と原子炉ドシメトリ JAEA 前田氏

原子炉、使用済燃料の崩壊熱はシビアアクシデント等で重要な量であるが、この量のカロリーメトリでの測定例は極めて少なく、高速実験炉「常陽」での使用済燃料の冷却 40~729 日における測定結果は極めて貴重である。まず冷却材(金属 Na)中から照射した燃料集合体を引き上げ、Na を洗浄し、缶詰めにして水プールで保管する。この缶詰めの状態でカロリーメータにいて、冷却水の出入り口温度差の安定を以ってその熱量を測定する。カロリーメータ

から γ 線として持ち去られるエネルギーについては計算で補正するが、通常崩壊 γ 線のエネルギースペクトルは時間とともに軟らかくなるので、補正係数は冷却時間とともに減少していくとのこと。発熱量の時間減衰の様子と、FPGS-90 コードとの比較などから、取り出し後 40 日～2 年程度の期間では ^{242}Cm , ^{144}Pr , ^{106}Rh などが主要な発熱体である報告された。

また高速中性子照射量、弾き出し損傷量、He 生成量、線量などを評価するための、ドシメトリについても報告があった。高出力炉である「常陽」では照射中性子フルエンスが大きく、試料数密度の照射による燃焼を陽に扱わないと正しい解が得られないこと、また、 ^{237}Np の照射量は生成した ^{137}Cs などで把握するが、中性子スペクトルが軟化した照射場では特に、 ^{237}Np から生成される ^{238}Pu の核分裂の数も有意に影響することが報告された。ドシメトリから炉内中性子スペクトルを求めることは劣決定逆問題となるが、NEUPAC-Jlog コードなどを用いてスペクトル計算値をドシメトリ測定データに adjust させている。

また、会場からは、「常陽」の新規制対応の状況と運転再開の見込み等が質問されたが、現状、設置変更許可について規制庁の審査中で、その後工事認可を得た上で耐震工事に入るため、まだ運転再開の具体的な年度が決められていない状況とのこと。

若手研究会 司会: 大阪大学 竹田先生、日立 GE 村上氏

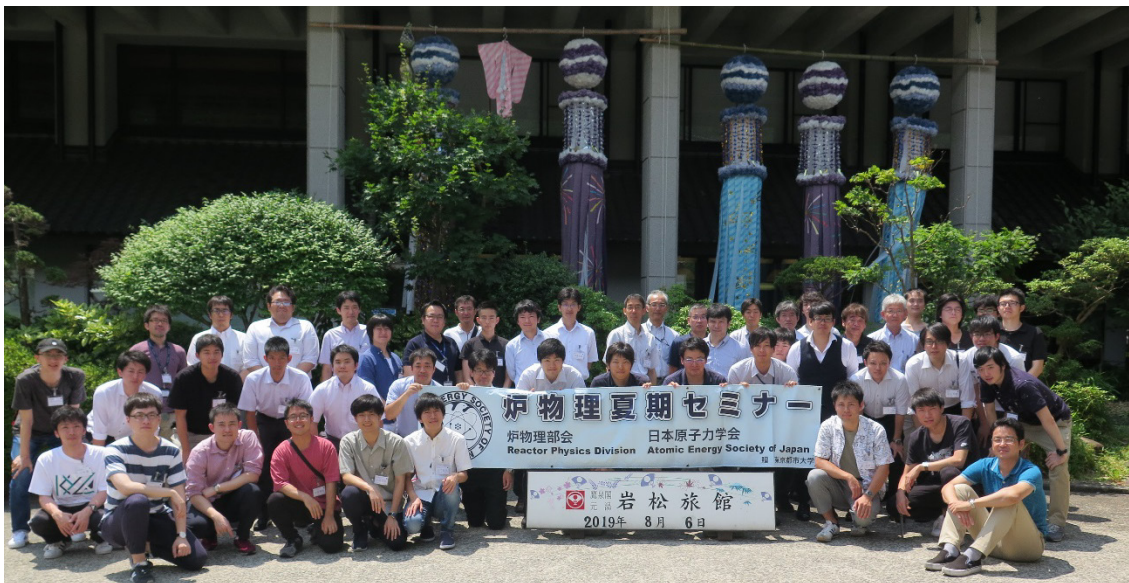
若手研究会には 30 名以上の若手が参加し、昨年度と同様にグループワークによる議論および発表を実施した。前半の部では講義 1~4 の要点を学生グループ内で議論したうえで発表し、若手社会人が発表に対してコメントすることで講義の要点を確認した。また、後半の部では、2017 年炉物理ロードマップにおいて優先して取り組むべき項目として挙げられている人材像の提示をテーマとして、学生と若手社会人がグループに分かれて議論および発表を実施した。講義内容の理解を深め、目指すべき人物像等の議論ができただけでなく、若手研究者の交流を深めることができた。

【アンケート結果】

(1) 開催時期、(2) 開催場所・会場、(3) 参加費・宿泊費、(4) テーマ、(5) 講義内容、(6) 運営、の全ての項目において「適切であった/良かった/役立った」という意見がほとんどであったが、次のような意見も挙げられた。

- ・暑い時期は避けてほしい。試験的に 1 度くらいは別の時期に開催してもよいかもしれない。
- ・七夕祭りと時期が重なり旅券の取得に苦労した。
- ・試験や大学院入試の関係で参加しづらい。
- ・旅館自体は良かったが、セミナー会場が暑くて集中力を削がれた。
- ・もう少しアクセスの良い場所での開催が好ましい。近くにコンビニがないのは悲しい。
- ・夜の 2 次会会場があると良い。部屋以外で個人作業ができるスペースがあると良い。

- 講義時間をもう少し長くするとさらに議論が深まったと思う。
- 予習のためテキストを事前配布してほしい。



集合写真 ~後方は七夕の吹流し飾り~



若手研究会の一コマ ~学習効果を確認中~

炉物理の研究 第72号 (2020年3月)

セミナー収支

(1) 収入

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)	(事務局に徴収)
(14201) 参加費収入							
部会員	不課税		15	10,000	150,000	150,000	
正会員	不課税		1	11,000	11,000	11,000	
学生部会員	不課税		10	3,000	30,000	30,000	
学生会員	不課税		1	3,500	3,500	3,500	
非会員	課税		8	12,000	96,000	96,000	
学生非会員	課税		8	4,000	32,000	32,000	
参加費 計		300,000	43		322,500	322,500	0
(14201) 懇親会参加費収入	課税				0		
(14265) 見学会費収入	課税				0		
(14241) 広告料収入	課税	120,000	6	30,000	180,000	150,000	30,000
(14361) テキスト売上収入	課税				30,000	30,000	
1部			4	3,000	12,000	12,000	
2部			1	6,000	6,000	6,000	
4部			1	12,000	12,000	12,000	
(14371) 宿泊費収入							
2泊3日	課税		38	26,220	996,360	996,360	
1泊2日	課税		5	13,110	65,550	65,550	
宿泊費 計		860,000			1,061,910	1,061,910	0
(14381) 昼食代収入	課税	40,000	48	1,080	51,840	51,840	
(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		
(14721) 寄付金収入	特定収入(共通)				0		
(14731) 受取利息収入	非課税				1	1	
(14751) その他収入	課税						
収入 小計		1,320,000			1,646,251	1,616,251	30,000

炉物理の研究 第72号 (2020年3月)

(2) 支出

(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				0		
(15041) 会議費	課税	260,000			282,335	282,335	0
会議室使用料		100,000	1	120,960	120,960	120,960	
飲食代			1	109,535	109,535	109,535	
昼食代		40,000	48	1,080	51,840	51,840	
懇親会費		120,000			0		
(15051) 旅費交通費	課税	940,000			1,061,910	1,061,910	0
国内旅費		80,000			0		
宿泊費		860,000			544,320	544,320	
					505,440	505,440	
					12,150	12,150	
(15061) 通信運搬費	課税	10,000			27,057	27,057	0
通信費		10,000			9,880	9,880	
運搬費					17,177	17,177	
(15091) 消耗品費	課税	10,000	1	4,308	4,308	4,308	
(15111) 一般外注経費	課税	100,000			136,900	136,900	
(15121) 出展費	課税				0		
(15131) 委託費	課税				0		
(15141) 賃借料	課税				0		
(15151) 保険料	非課税				0		
(15161) 諸謝金(含む源泉税)	不課税				0	0	0
物品諸謝金					0		
金銭諸謝金					0		
(15171) 雑費	課税		1	1,404	1,404	1,404	
(15181) 支払負担金	不課税				0		
(15191) 助成金	不課税				0		
(15291) 内部共催金	内部取引				0		
支出 小計		1,320,000			1,513,914	1,513,914	0
収支差額		0			132,337		