

炉物理の面白さについて語ろう！

千葉 豪

(A) 本日は自称「炉物理マニア」の B さんに、炉物理の面白さをいろいろ語ってもらおうと思っています。では早速ですが、「炉物理」といっても非常に幅が広いわけですが、B さんはどのあたりに精通されているのですか？

(B) 業界用語で言うと、「格子計算」「炉心計算」「摂動計算」といったところですかね。精通しているといってもまだまだなわけですけども。

(A) 炉物理には、それ以外でも、炉雑音とか、色々な分野もありますが、その辺はどうですか？

(B) そうですね、「原子炉計算手法」という括りは、数値計算法、応用数学なんかがベースになっている一方、炉雑音とかそういった分野は **Science** の香りがして、ちょっと憧れるところがありますね。でもなんだか難しいので、あまり考えたことはありません。

(A) 静特性のみならず、動特性とか、燃焼計算といった分野もありますか？

(B) 動特性はここ 1 年間で結構勉強しました。これまでは臨界試験データの解析とか、そういったところばかりやってきたので、あまり関心が無かったのですが、**KUCA** での学生実験などを担当するようになって、原子炉の動的な挙動をよく理解できていないといかん、と思うようになったのがきっかけです。

(A) 動特性も面白いですか？

(B) 面白いですね。実はまだ一点炉から進歩していないのですが、原子炉ペリオドとか逆時間方程式とか、面白いですね。遅発中性子のパラメータがいろいろあるわけですけど、最終的な漸近状態ではそれらから唯一決まる原子炉ペリオドで出力が上昇していく、というのなんとも面白いです。

(A) **KUCA** の学生実験はどうですか？

(B) 個人的には実験というのはあまり性に合わないと思っていたのですが、いろいろ理解した状況で取り組んでみると非常に面白いです。**KUCA** の実験は、学生のとくにやったときはちんぷんかんぷんで、それこそ、ソフトボールとかバーベキューとか「ぴちぴちビーチ」とか教官の先生が語る凄いエピソードとか、そういったところが強く思い出されるのですが、今やってみると、違った趣ですね。京大炉の先生方の講義や実験の進め方なども、大変参考になります。

(A) それではちょっと脱線しましたので、話を本筋に戻しましょう。さきほど、「格子計算」「炉心計算」「摂動計算」というキーワードが三つでできましたので、それぞれについて聞いてみたいと思います。まずは格子計算から。

(B) 格子計算と一言でいっても、それはさらに分割されるわけですよ。「共鳴計算」「輸送計算」「均質化計算」という感じでしょうか。

(A) どのあたりが得意なのですか？

(B) 得意がどうかは知りませんが、基本は一通り勉強しました。共鳴計算では、やはり等価原理とか、**f-table** (もしくは共鳴積分テーブル?) とか面白いですよ。非均質系の燃料からの脱出確率を有理近似で記述すると、均質系と同じ表式になるとか、弦分布関数を適切に仮定することにより、格子配列の効果を適切に取り入れられるとか、面白いですよ。最近ではエネルギー群分割を詳細化することで対応するので、この辺りのテクニックは廃れていくのかもしれませんが、大変面白いです。あと、**Dancoff** 補正と **Dancoff** 係数はどっちがどっちだったかいつも混乱するのは困りますね。

(A) サブグループ法というのがありますね。

(B) サブグループ法もまたユニークですよ。マルチバンド法とも呼ばれていますが、最近はそのような言い方は聞かないですね。マルチバンド法とサブグループ法にはそれぞれ厳密な定義があるというようなことを聞いたことがあります、忘れてしまいました。

(A) サブグループ法では確率テーブルの決め方がいろいろあります。

(B) **fitting** 法は、減速を考慮して作成した **f-table** から計算できますので、減速を陰に考慮できるのがよいですが、分割数が大きくなるについですよね。その点、**Ribon** の **moment** 法は 10 くらいに分割しても大丈夫だったような、、、。

(A) **moment** 法と言えば「非整数次モーメント」ですよ。

(B) 宇根崎先生が考案されたもので、非整数次モーメントを保存させると、少ない分割数で良好に積分が計算できる優れた方法ですよ。この方法は、ある観察から導かれたものなのですが、それが優れた積分計算法であることを数学的に証明できないところがなかなか厳しい。山本敏久さんは「ミステリー」と呼んでいましたね。

(A) サブグループ法は **DeCART** なんかで採用されていたような。

(B) 基本的に、サブグループ法は衝突確率法と組み合わせて使っていたわけですが、山本敏久さんは **Sn** 法と、牛尾さんは **MOC** と組み合わせて、いろいろされていたと思います。あと、巽さんや儀宝さんのマルチバンド **CCCP** 法も懐かしい。

(A) **CCCP** 法というのはよく知られた方法なのですか？旧ソ連も、略称がそんな感じではなかったでしたっけ？

(B) **CCCP** 法は **CEA** の **APOLLO** でも使われていたと思いますし、結構、メーカーさんの格子コードでも使われているのではないのでしょうか。

(A) **APOLLO** と言えば、**Background matrix** 法ですよ？

(B) 何回か勉強したのですが、あの辺はよく分からないのですよ。**CEA** の共鳴計算法については **Coste-Delaclaux** さんが **PNE** か何かでレビュー論文を出されていたように記憶していますので、今度また勉強してみたいですね。

(A) さて、**CCCP** 法がでたということは、、、。

(B) やっぱ、**MOC** ですよ。みんな大好き **MOC**。

(A) 最近では **MOC** の研究も落ち着いてきたような感じですが、ひところは凄かったですよ。

ね？

(B) MOC と言って思い出すのは、やっぱり小坂さんの CHAPLET ですよね。あれはインパクトが強かった。海外の人の文献にもよく引用されていて、「すげーなー」とよく思ったものです。

(A) 「DNPL 法」というものが提唱されていますよね？

(B) いや、実はあれがよく分かっていなくて。いわゆるサイクリック法とどう違うのかな、と。基本形状をぐるぐる回転させても大丈夫、というのは DNPL なのかな、などと勝手に考えています。

(A) MOC と言えば、あとは AEGIS とか GALAXY とかですかね。

(B) GALAXY は名前がいいですよ。COSMO-S とパッケージ化して。もう〇〇〇〇〇の世界ですよ。

(A) 日本では、あとは KRAM とか J-MOC とかもありますね。ここまでついてこれる人はそういないと思いますが。

(B) 竹田先生の「ミクロ炉物理」で、中性子束の角度依存性が視覚化されたり、あとは共鳴計算で全断面積の方向依存性をカレント重みで押し込める ND2001 の論文なんかはよく勉強しました。

(A) さて、「均質化」もこれまた大きなテーマですよ。

(B) 反応率を保存するという観点から中性子束分布を重みとして断面積を平均化するわけですが、それだけでは済まない、というのが面白いところですよ。反応率保存法とか、ユニークなところでは反応率比保存法というのもあります。

(A) 反応率ではなく、その比を保存させることに、どういう物理的意味があるのでしょうか？

(B) そのあたりはすっかり忘れちゃいました。自分で勉強して下さい。

(A) 均質化といえば、拡散係数ですよ。

(B) 有名なのは Benoist の拡散係数ですね。これ、最初、間違った読み方で覚えちゃいましたよ。正しく言えない人はもぐりですよ。高速炉の分野では極めて有名なのですが、一方、軽水炉の分野ではそれほどでもないようです。

(A) 異方性衝突確率を使うんですよね？

(B) 表式はシンプルなのですが、なかなか理論が難解なんです。

(A) 実は、Benoist の拡散係数って、異方性衝突確率がなくても計算できるんですよ。一般的に使われる Benoist の拡散係数は様々な近似の導入により得られているわけですが、原式に近いところからも拡散係数を定義することができるのです。勿論、ずっと昔から知られていることなのですが。

(B) そうなのですか。それは素晴らしいですね。

(A) Benoist の拡散係数といわゆる「輸送効果」のすみわけ、というのも難しい問題です。中性子輸送計算において中性子漏洩を保存させるように決まる拡散係数ですから、それを

使っちゃえば「輸送補正」は不要なのではないか、という議論もあります。

(B) 「ストーリーミング効果」ですね。

(A) 「均質化」と言えば、SPH や不連続因子というものも避けて通れませんよね。

(B) それは「炉心計算」の方に譲るとして、「衝突確率法」について、まだあまり語っていない気がします。

(A) 衝突確率の解析式の研究は、炉物理黎明期にそれこそ懸命に行われたわけですよ。Benoist さんなんかもその時代からの方です。日本でも優れた先人の方々の名前を論文等で拝見することができます。最近、Ray tracing で全部できちゃいますからね。

(B) Ray tracing というとなんか CLUP77 ですよ。

(A) 何かのレビュー論文だったかと思いますが、土橋さんの CLUP77 が ray tracing による複雑形状の衝突確率計算法として引用されており、同じ日本人として大変誇らしい気持ちになったことがあります。今でも SRAC で使われているわけですからね。

(B) そろそろ「炉心計算」について語りたと思うのですが、いかがでしょうか。

(A) いやいや B さん、実はもう時間が来てしまったので、今日はここで開きとさせていただきます。一時間は話していましたよ、私達。

(B) この原稿は推敲されるのですよね？

(A) いやいや B さん、実は締切がとっくに過ぎていたので、推敲する余裕などありませんよ。上書き保存したら、速攻でメール送信です。

(B) 我々、何か問題となるようなことを話しませんでしたか？

(A) う〜ん、B さんが、GALAXY/COSMO-S を「○○○○の世界」とってしまったのは、場合によっては気分を害される方がいらっしゃるかもしれませんので、伏字にしておきましょうか。

(B) いや、全く悪い意味で話したことではないですから、気にしすぎではないですか？

(A) まあ、念のため、ということです。でも GALAXY は共鳴計算部分から輸送計算部分まで様々な工夫、テクニックが導入されていて、素晴らしいと思いますよ。

(B) A さん、特定のメーカーさんのことばかり強調するのは問題ではないですか？

(A) いやいや B さん、日本の炉物理分野の素晴らしいところって知っていますか？それは、たとえ競合する相手であったとしても、連携できる部分は連携して、皆で分野全体を高めようとする意志が皆さんにあるところなのです。あまり野暮なことは言いません。

(B) 分かりました、A さん。ところで、この対談は、「大学教員として、こんな学生を育てたい」というのが主旨だった筈なのですが、その目的が達成されたようには思えないのですが、大丈夫ですか？

(A) いやいや B さん、それは大丈夫。あなたはまだ新米なのだから、まずは自分を育てて下さい。どんどん炉物理の面白さを周りに伝えて下さい。そして「炉物理マニア」としての頂点を極めて下さい。勿論、大学教員なのですから、学生を育てることも忘れてはいけませんからね。

(B) Aさん、ありがとうございます。要領の良さだけが取り柄の私が大学教員などやっているのも不思議な話ですが、これも何かの縁です。「面白い炉物理」に学生を巻き込みつつ、お互いに切磋琢磨していきたいと思っています。

(A) Bさん、なんと素晴らしいことをおっしゃる。でも、あなたは口ばかりですから、たまにはガツンとした論文でも書いて、皆さんをあっと言わせてくださいね。

(B) はい、がんばります。でも、Aさんも、口ばかりですから、きちんとやって下さいね。

(A、B) お互い、がんばりましょう。

齢 36 にして、こんな文章しか書けない自分が愚かしいです、、、。