

平成14年8月23日

私の EUREKA !

仁科 浩二郎

knishina@asu.aasa.ac.jp

1. まえがき 大変、良い企画を編集長が提案されたことを喜び、感謝しております。この種のドラマを記録しておくことが、生き活きと血のかよった炉物理研究史を残す出発点になるに違いありません。ただしその執筆者に私を加えるべきかどうかは別です。以下をお読みになってご判断下さい。

私にも“EUREKA!”は何度かありました。ホームランではないが2塁打を数本、と言うところでしょうか。一般に理論解析で行う式の変形手順では、うっかりミスがない限り、数値的に両辺の値が異なる筈はありません。しかし数学的な変換だの、展開だの、積分路変更だのを施すと、物理的な内容は一変することがしばしばです。その時、心と時間に余裕があり、また変形前の各項の意味を把握していると、初めて目にする数式表現の新しさと美しさに気付きます。運が良ければ、その物理的解釈をさらに外挿して新たな表現式を予想・模索し、掘り当てることもできます。今その過程を式でたどって再現するのは、時間を要し、締め切り日達成不可能となるのであきらめ、ここではおぼろげな思い出話を語りましょう。

2. EUREKA!の思い出

(1) 二つの炉心から成る結合炉の解析： この体系で両炉心を結ぶ減速材領域に対して時間依存の応答関数を定義し、拡散方程式を書き換えてくれたのは、新川 稔さん(修士生)と山根 義宏さん(当時、博士課程)でした。¹ 領域境界の中性子部分流には、時空について実質的に変数分離を仮定。いわば時間依存のノード法です。当時提案されていた京大2号炉(2分割炉心でした)の基礎実験を支える意図でした。その長い式は何回となく研究室で報告、検討され、我々はメモなしで宙に書けるようになりました(うんざりしていた者も居たか?)。やがて理論計算の成果もまとまり、いよいよNS&Eに新川君が投稿する段階となりました。時を前後して彼は修士課程を修了して名古屋を離れたので、彼との原稿の推敲や意見のやり取りは郵便で続けられ、英作文の練り上げは私が担当しました。

さて論文の完成間近になってみると、一応の形は整ったのですが、英文として最後にパンチを効かせたくなかった。ご存知の通り、英文で論文を書く構文上、歯切れのよい結論を書かざるを得ない心境になります。だいたいどの投稿論文を見ても最後の方で、立派で難しいことが書いてあります。新川君の原稿を多少はみ出ても良いから、何か気の効いたことを一発言いたい。日立の川合敏雄さんの先行論文²は、物理的な洞察を見せた点で素晴らしい。それと我々の解析の相対的な位置付けが未だ不十分ではないか。

そこで強行したのが、我々の式の近似でした。ラプラス変換変数 s で書かれた方程式をテーラー展開しても良いのか、どういう意味があるのだ、と言うためらいはあったのですが、兎に角やってみると嬉しいことに、川合さんの式で使われた各量の表現との対応が明瞭になりました。近似限界の周波数も求まった。片方炉心の平均寿命が、相手炉心や反射体の効果でどれだけ長くなるかも、式で表現された。さらにそれまで誰の論文でも曖昧だった、結合炉における片方炉心の反応度とは何か、という点も示されたのです。この物理的な意味と美しさには感動しました。

¹ Shinkawa, M. et al, *NS&E* 67, 19-33(1978)

² Kawai, T. *Nucl. Sci. Technol.* 2, 245(1965).

これらの解釈はもっと声高に学会で言うべきだったかも知れません。別の言い方で表現すると、**adjoint function** が拡散方程式を本当に裏から支えている、という実感、さらには各領域間で反応度のやり取りがうまくつり合っているなど、中性子増倍系の新しい側面に気付いたのです。これをきっかけに、記述のベースに **adjoint** 関数を採用して、平均寿命に対する反射体の影響を丹念に取り上げ、論文にしたのが山根さんです。³ 当時、我々はパルス中性子実験の減衰定数に興味を持っていたのですが、一般に装置の実験的事情から反射体を付加せざるを得ない場合があります。炉心だけの減衰は非常に早いのに、反射体として黒鉛が付いているとその長い平均寿命に支配されて、遅い減衰を測ることになったりする。その効果を確かめるのにこの理論式が使える筈だ、と思っています。

さらに残念に思っていることがあります。今ここで示す余裕はないのですが、この(文献1の)解析方式を採用すれば、反射体の反応度効果も近似として示せた筈です。⁴ つまり 2群理論で反射体の応答関数を作り、⁵それを使って文献1と同じ方式で周波数応答 $Z(s)$ を導く。その分母に現れる、(一般化された)反応度に相当する項を同定すれば良かったのです。この方法では反射体の付加による炉心のスペクトル変化は無視しますし、また境界流に変数分離を仮定しているので、摂動論的な扱いとなりますが、導いてあれば JCO 事故での水抜き効果を論ずるのに役立った筈です。にも拘わらず、この種の **working formula** を直ぐに使える形に導出しておかなかったため、咄嗟の場合に役立たなかった事は無念でならず、忸怩たるものがあります。ちょうど実験装置を常に使える状態にしておかないと、直ぐにその装置のクセを思い出せず、使えないのと同じです。

結局、**EUREKA!** と当人は感じて、すべての人の共感を得るとは限らない。そこには当人の表現力の限界もありますし、また他人とは関心や動機の点で違いがあります。譬えて言えば、「運動エネルギーだけでなく、場所についても位置エネルギーを新たに定義すると、両者を加えて(力学的な)エネルギー保存則が成り立つのだよ、美しい」、と悦に入っている、運動エネルギーで事足りている人には迷惑な話です。それだけに、その種の解釈や美しさは一先ず差し置いて、実際のデータ解釈や設計に直接結びつくような、使い易い形に迄、導出を到達させないと、親しめる式として使われない。その点、我々が導いた式は **notation** の煩わしさを引きずっており、最初に読む人にとっては、分かりにくいに違いありません。

結局、言葉で述べてしまうと当然の事になりますが、新しい理論的観点の価値が多くの人に認識されるのは、その観点なしでは解決しないような、技術社会上の課題が目前に突き付けられている時でありましょう。

(2) 結合炉のパルス減衰公式⁶: 京大2号炉計画の周辺研究としては、我々は結合炉でのパルス中性子減衰をも研究していました。片側炉心にパルスを打ち込んだら、2炉心の出力がシーソー状に振動することはないか。その振動の始まる条件はどういう形で与えられるか。この追究のため、いわゆる2点炉動特性方程式を書き、それをラプラス変換しました。結果として分数式を含む連立方程式が得られます。減衰のモードはこの方程式の極に対応し

³ Yamane, Y. et al, *NS&E* **72**, 244-255(1979)

⁴ 従来、炉物理の教科書では反射体の効果を「反射体節約(反射体がもたらす炉心寸法の節約)」として表現してきましたが運転の立場からは反応度で表現する方がずっと直接的で役立つ筈です。

⁵ Yamane, Y. et al, *NS&E* **72**, 244-255(1979).

⁶ Nishina, K. et al, *Ann. nucl. Energy* **12**, 339 – 347(1985).

て無数にあるので、どうも見通しが悪いな、と村田 尚之さん、藤井 勝さん、山根 義宏さんと黒板を眺めて居ました。

その時、フト試みに式中の分数式を $(1+x)^{-1} = 1+x+\dots$ の形に展開してみたら、と私が提案しました。村田さんがその展開の各項を逆変換してみたところ、非常に見通しのよい表現がえられました。もともとが上述の展開式ですから、解は当然級数となるのですが、この方式で得た展開の各項は、二つの炉心の間をパルスが往復する回数にそれぞれ対応していたのです。これはあくまで2点炉という近似表現ですから、検出器位置を問題にするようなきめの細かい実験解析でどれほど役に立つかわかりません。しかし同一の解を表現するに当たって、ラプラス変換された方程式の無数の極に対応させて展開するか、それとも中性子集団の往復回数で展開するか、の選択で2種類の展開方式が存在すること、そして両表現の間は簡単な数式手順で行き来できる、ということに感じ入ったものです。

のちに *Annals of Nuclear Energy* に記載されたこの論文を読んで興味を覚え、来日に当たって名古屋大学を Host として選んでくれたのが、スウェーデンの Imre Pazsit 教授でした。同教授との交流がその後、予想以上の広がりを見せて展開したことを考えると、この論文（並びに EUREKA!）の価値は理論的な範囲に留まらず、実用的でもあった（?）と感じ入るのです。

3. 結び この他、私がミシガン大学で博士論文を書いた際の EUREKA! もありますが、それはまたの機会に振り返ってみたいと思います。今回はこの辺で。失礼します。

(2002年8月23日)