

< 研究会報告 >

「第1回モンテカルロ教育専門家会合」報告

元原子力機構 桜井 淳 阪大大学院 村田 勲  
三菱総研 佐藤 理 原子力機構 山本俊弘

- 1) 目的 原子力研究施設及び核燃料サイクル施設の臨界・遮蔽計算の安全審査対応策の調査。
- 2) 開催日・場所 2008年9月26日、三菱総研。
- 3) 主催 日本原子力学会「最適モンテカルロ計算法」研究専門委員会
- 4) 発表・参加形式 原子力学会メーリングリストにより発表者及び参加者を募集。
- 5) 発表表題 5-1 阪大大学院におけるモンテカルロ教育の現状と課題(村田 勲)、5-2 モンテカルロシミュレーション研究会セミナーにおけるモンテカルロ教育の現状と課題(桜井 淳)。

6) 発表内容

6-1【阪大大学院におけるモンテカルロ教育の現状と課題】

(1)モンテカルロ教育の位置付け、(2)モンテカルロ講義の実際、(3)モンテカルロ教育の課題、(4)モンテカルロ教科書の役割、について報告。

(1)について、阪大電気電子情報工学専攻では、モンテカルロ理論の講義は、院生のみ対象としている。院生でも本当に必要としている者は極めて少ない。(2)修士課程1年後期の「核融合炉工学」において、乱数・サンプリング・タリー・分散低減まで教えている。具体的には、第1回:核融合炉工学基礎知識、第2回及び第3回:核融合反応の選択、第4回:中性子遮蔽、第5回:核施設の設置許可、第6回:中性子輸送計算(拡散法・Sn法・モンテカルロ法)、第7回:モンテカルロ法の基礎、第8回:モンテカルロ法における分散低減法の詳細とAWW法、第9回:スカイシャイン現象、第10回及び第11回:核融合・核分裂ハイブリッド炉、第12回:中性子・ $\gamma$ 線核データベンチマークであるが、これらのうち、モンテカルロ理論と位置付けているものは、第6回から第11回までの6コマの講義である。モンテカルロ理論の基礎となる乱数とタリーについて、前者に対して、MCNPを例に、Lehmer法(線型合同法)について、後者に対して、ポイントエスティメータについて( $C_{ij}$ はなぜ $R^2$ に逆比例するのか、 $\Phi$ はなぜ $C_{ij}$ の和なのか等)の詳細な説明をしている。

(3)について、理論だけで、計算まで立ち入っていない。院生は、卒業研究で必要ない場合は、そこまでの理解は要求されておらず、特に必要な者や将来就職して必要になる場合には、桜井主査が主催しているSafety Net(講習会)に参加するのも解決策のひとつと位置付けている。

(4)について、モンテカルロ理論の講義に対する院生の理解度が低いため、独学できる良い教科書が必要である。原子力学会「最適モンテカルロ計算法」研究専門委員会がまとめている教科書(次々事項 8)参照)が、そのような役割を果たすことを期待している。今の学生は昔の教科書の書き方ではまったく読まない。たとえば、小林「原子炉物理」は、網羅的でとても詳しく、辞書的な使い方に向いているが、初学者の教科書としては少し辛い。モンテカルロ計算ハンドブックは、使い方解説書であり理論的な側面では必ずしも分かりやすく記載されていない。ブルーボックス的な書き方では、少し読み物過ぎる。分担執筆している教科書の原稿では、朝永振一郎『量子力学Ⅰ、

II』(みすず書房)方式、つまり、読み物的で、理論的にも深く、正しく理解できることを目指した。

6-2【モンテカルロシミュレーション研究会セミナーにおけるモンテカルロ教育の現状と課題】 2000年以降、8種セミナーを80回開催し、約400名の修了者(詳細はTrans. At. Energy Soc. Japan, Vol.4, No.4, pp.248-258(2005)参照)。特徴は、計算に直結する理論、ベンチマーク実験解析による計算の信頼性の確認。

#### ①モンテカルロ基礎理論セミナー実施内容

1日目(初級コース) テキストは連続エネルギーモンテカルロ教科書(JAERI-Rev.2002-004)の理論を組み込みモンテカルロ基礎理論として体系化した論文(Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol.2, No.4, pp.555-566(2003))。

10:00-11:00 連続エネルギーモンテカルロコード、核データファイル、ポイントワイズ中性子断面積編集システム、汎用中性子断面積ライブラリ及びその他関連ライブラリの現状

11:00-11:30 積分出現粒子密度方程式の導出及び物理的意味

11:30-12:00 乱数及び酔歩

13:00-13:30 計算値の評価(誤差、臨界計算の線源相関、中性子断面積の共分散の考慮)

13:30-14:00 各種分散低減法(特にウェイトウィンドウ(WW)法及びWWジェネレータの理論、中性子深層透過計算におけるウェイト下限値最適推定法、物質密度減少法)

14:00-14:30 最適エスティメータ設定法

14:30-15:30 臨界計算法

15:30-16:00 モンテカルロ固定線源問題最適計算法

16:00-16:30 質疑応答

2日目(上級コース) モンテカルロ計算の現状と最適計算のための改善すべき事項。

10:00-11:00 桜井・他「モンテカルロ法による中性子・光子輸送シミュレーションの現状」、(Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol.41, No.6, pp.614-627(1999))

11:00-12:00 桜井・山本「国内大型原子力施設へのモンテカルロ計算適用の現状」、(Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol.2, No.2, pp.201-214(2003))

12:00-13:00 桜井「モンテカルロ法による高エネルギー輸送計算の現状」、(書き下ろし)

13:00-14:00 桜井・山本「モンテカルロ法による中性子深層透過計算でのウェイト下限値の推定法」、(Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol.4, No.2, pp.172-176(2005))

14:00-15:00 桜井・山本「公開文献から読み取れるモンテカルロ計算における分散低減法適用に見る懸念事項」、(Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol.4, No.3, pp.219-226(2005))

15:00-16:00 桜井・山本「原子力分野におけるモンテカルロ法解析の教育方法」、(Trans. At. Energy Soc. Japan, Vol.4, No.4, pp.248-258(2005))

16:00-16:30 質疑応答

#### ②モンテカルロ法による中性子遮蔽解析セミナー実施内容ー最適ウェイト下限値推定法ー

10:00-11:00 MCNP WWG 理論(物質密度減少法含む)

11:00-12:00 MCNP-4C2 インストール及び最も簡単な鉄球体系での計算演習

13:00-15:00 FNS 14MeV 中性子の鉄深層透過ベンチマーク実験問題(1m)計算演習

15:00-16:00 核分裂中性子の鉄及びコンクリート深層透過問題(1m)計算演習

16:00-16:30 質疑応答

③モンテカルロ法による核燃料サイクル施設の未臨界安全セミナー実施内容

1 日目(初歩的計算)

10:00-11:00 モンテカルロ法による臨界固有値計算に必要な基礎知識

11:00-12:00 MCNP-4C2 インストール及び最も簡単な球体系での臨界固有値計算演習

13:00-14:00 JCO 沈殿槽事故時 U 溶液体系及びその他の実施設臨界固有値計算演習

14:00-16:00 実施設模擬 8 種(Los Alamos Criticality Primer の演習問題)の溶液体系の入力作成及び臨界固有値計算演習

16:00-16:30 質疑応答

2 日目(実際のベンチマーク実験解析)

10:00-16:00 各種TCA軽水炉燃料棒未臨界体系臨界固有値計算演習 (指数実験未臨界度  $k_{\text{eff}}=0.63-0.999$  との比較)。TCA燃料棒配列体系  $17 \times 17, 16 \times 16, 14 \times 14, 11 \times 11, 8 \times 8, 17 \times 11, 17 \times 5, 17 \times 17-7 \times 7, 17 \times 17-12 \times 12, 17 \times 17-144, 17 \times 17-206$ (詳細は、桜井・山本「指数実験及びモンテカルロ計算により評価された未臨界度の比較」、日本原子力学会和文論文誌, Vol.40, No.4, pp.304-311(1998) 参照)。

16:00-16:30 質疑応答

7) 討論内容

村田委員のレクチャー内容は、他の文献には記載されていないような表現があり、現象や式の意味を良く吟味した内容になっている点が好ましい。そのような表現は、モンテカルロ研究で原著論文を書いてきた研究者でなければ出せない味であり、大学でのモンテカルロ教育としては、最も優れていると考えられる。原子力学会「最適モンテカルロ計算法」研究専門委員会が進めているモンテカルロ教科書(事項参照)の分担執筆部分のポイントエスティメータを例に、深い考察をしており、専門家同士の議論であれば、当然のこととして通り過ぎてしまうところを、院生の根源的疑問にも答えられ、また、良く理解してもらえるような工夫が見られる。

村田委員の配布資料には、「使用方法を教えることは講義にはなじまない」とあるが、桜井主査の経験からすれば、理論と計算演習は、明確に切り離せず、計算演習をとおして、理論をより深く理解できる場合も有り、また、院生にもモンテカルロ研究の面白さを実感させ、将来の研究の動機付けにするためにも、高速パソコンに MCNP 等をインストールしての計算演習は、有効であるように思える。現段階では、村田委員(理論中心主義)と桜井主査(必要最低限の理論を基にした計算演習中心主義)のモンテカルロ教育の内容は、相互補完的であり、うまく棲み分けているように思える。なお、阪大では、経済産業省の原子力人材育成プログラムにおいて実験と MCNP による解析を組合わせた教育の試みを実施しているが、計算演習を希望する院生には、夏休み等を利用して、桜井主査の主催するセミナーに参加させる等の教育的配慮も必要かも知れない。

今回は、第 1 回ということで、また、他の講習会経験者にも声をかけたにもかかわらず、原子力

研究施設及び核燃料サイクル施設の臨界・遮蔽計算の安全審査対応策に重きを置いたが、今後は、MCNP だけでなく、MVP(原子力機構主催の講習会)、PHITS(原子力機構主催の講習会)、EGS(高エネルギー研主催の講習会)も含めると良い。核燃料サイクル施設の安全審査対応策だけでなく、日本のモンテカルロ全体の教育による底上げを目指す必要がある。

これまで集まっているモンテカルロ教科書(事項 8)参照)の原稿から判断すると、良く吟味された内容であり、オリジナリティも高く、期待どおりの出来栄になっており、学部生・院生・若い研究者のための良い教科書になるものと思う。原子力学会「モンテカルロ計算法高度化」研究専門委員会編著『モンテカルロ計算ハンドブック』は、専門家向けの教科書であるが、普通、学会研究専門委員会の成果報告書の印刷部数は、200 部とされていたものの、内容が長期的視点でまとめられているため、400 部印刷し、2 年間で 155 部売れており、3 年間で 200 部、6 年間で 400 部くらい完売できる。つぎの教科書は、学部生・院生・若い研究者が対象なので、長期的視点から、1000 部くらい印刷したいと考えている。刊行され次第、阪大(村田委員)やセミナー(桜井主査)でテキストとして採用することを確認している。

8) 補足 原子力学会「最適モンテカルロ計算法」研究専門委員会における教科書の内容

『原子力工学のためのモンテカルロ粒子輸送理論』編集 桜井主査

(教科書作成の意図は、これまでの歴史的名著(たとえば、朝永振一郎『量子力学 I、II』、みすず書房)のように、物理的意味や方程式の導出等まで遡り、しかも、教育的配慮だけでなく、オリジナリティの高い内容とする。)

まえがき(全体の枠組み。この本で取り上げた範囲は中性子 $<20\text{MeV}$ 。2章-8章までの関係を明らかにする、つまり第1章を読んでからどこの章へも飛べるようにする) 1p 桜井主査

第1章 モンテカルロ粒子輸送計算コード 10p 山本委員

第2章 ランダムサンプリング法 15p 村田委員

第3章 モンテカルロシミュレーションのための粒子輸送理論 20p 山本委員

第4章 誤差評価 10p 山本委員

第5章 核データ 20p 深堀委員

第6章 エスティメータ 10p 村田委員

第7章 分散低減法 25p 村田委員

第8章 固有値問題 10p 山本委員・野尻委員・関根委員・佐藤理委員

第9章 固定源問題 10p 佐藤聡委員・黒澤委員・田山委員・佐藤理委員

付録1 面積・体積計算への応用 5p 村田委員

付録2 現在使用可能な主要モンテカルロコード 5p 熊田委員

あとがき(自動分散低減法や高エネルギーも含む)―現状と課題― 10p 桜井主査

重要用語解説(乱数、ランダムウォーク、スプリットティング、ルシアンルーレット、ウェイトウィンドウ、指数変換、エスティメータ等) 3p 野尻委員

索引

著者経歴 1p