

解説



最先端の科学技術とスーパーコンピューティング

3. 原子力工学における スーパーコンピューティング†

中川正幸†† 秋元正幸††

1. はじめに

原子力におけるスーパーコンピューティングは¹⁾、研究開発の種々の局面で重要な役割を演じている。原子力が他分野と根本的に異なっている点は、放射線、放射能の取扱いとその防護を考慮しなければならないことである。したがって、まず第一に重視されるのが安全確保である。すなわち、ウラン濃縮、燃料加工、原子力発電炉、燃料再処理などの原子力施設の設計段階では、さまざまに苛酷な事故を想定した安全解析のため大量のシミュレーション計算が行われる。当然、これら施設の設計、建設、運転を精度よく安価に行うためにも大量のシミュレーション計算が必要である。

これらの工学的なシミュレーション結果は実験などによってその正当性、妥当性が検証される。特に、安全性に係わるシミュレーションの信頼性は重要であり、実験・理論を参照し現象に忠実な数値モデル化を行う最適モデルとこれに十分な安全裕度を見込んだ評価モデルによるシミュレーションが通常行われる。たとえば、後述する軽水型原子力発電所の冷却材喪失事故のシミュレーションでは、電気ヒータの模擬炉心からなる縮小スケールの異なるいくつかの模擬装置による実験を解析し、実プラントの挙動を推定するなど周到な検証によって結果の信頼性を確保している。また炉心設計プログラムは多くの臨界実験を解析しその妥当性を確認した上で安全審査に用いられる。

また、より効率的なエネルギー生産手段としての新型の原子炉、あるいは核融合炉の研究開発が

不断に行われており、現象の模擬や性能の評価にはシミュレーションが用いられる。特に、核融合実験装置、核融合炉にはまだ実験データの少ない現象を対象にすることが多く数値シミュレーションが不可欠になる。

さらに、スーパーコンピュータ技術の発達にとめない、実験、理論に並ぶ第三の科学が台頭しており、研究開発における手法・スタイルに大きい影響を及ぼしつつある。このような状況を反映して、実験が困難な現象や非線形性などのためにその扱いが容易でない複雑なシステムを対象に、第一原理的モデル、基本方程式から出発した大規模数値シミュレーションの手法により、原子力関連の物性、熱流動などの非線形・大自由度系における複雑現象の解明に取り組んでいる。

2. 日本原子力研究所の現状と主な適用例

日本原子力研究所(原研)には、東海及び那珂研究所それぞれに FACOM VP 2600/10 及び平成5年度に完成した原研独自開発の専用スーパーコンピュータ Monte-4 の三台が設置されている。Monte-4 は共有メモリ型、4 プロセッサ構成の並列ベクトル機で、各プロセッサに条件分岐などの論理演算を高速処理する特殊モンテカルロ・パイプラインと従来のパイプラインをバランスよく装備した専用機である。このほか汎用機 FACOM M 780/10 S 2 式、同 M 780/20 1 式が設置され、複合 6 システムで全体を構成している。全利用者約 2000 人のうち、400 人の研究者が 3 台のスーパーコンピュータを利用している。保守・点検などを除き一日 24 時間、年間約 7500 時間の運転を行っている。平成 4 年度の分野別スーパーコンピュータ利用時間については、核融合が 45%、新型炉解析・計算科学などの基礎・基盤が 39%、安全性が 6%、その他が 10% である²⁾。

† Supercomputing in Nuclear Engineering by Masayuki NAKAGAWA and Masayuki AKIMOTO (Japan Atomic Energy Research Institute).

†† 日本原子力研究所

このような原研におけるスーパーコンピュータ利用は、研究開発動向の一端を反映したものであり、その内容は既存のシミュレーション計算を高速処理するもの及び今後の技術開発を加速するものに分けられる。本稿では、このような観点から主な適用例を示すとともに、原研で開発した高ベクトル化モンテカルロ計算プログラムによる高速・高精度シミュレーション、及びスーパーコンピューティングの新技术開発に果たす役割について述べる。

1) 核分裂炉，核融合炉の解析

原子炉の解析は複雑な形状をもった体系中で起こる放射線と原子核の反応や電磁場中の荷電粒子の挙動を扱うミクロのレベルから原子炉全体のシステムとしての特性や安全性を把握するマクロの現象までを精度良く予測するため膨大な解析を必要とする。このためスーパーコンピュータを用いて多種類の計算コードを使用する。

核分裂炉ではボルツマン輸送方程式によって記述できる中性子束分布を求めるため有限差分法、有限要素法、ノード法、モンテカルロ法(3.で述べる)などによって解を求める。また原子炉の過渡状態を知るためには多次元で動特性方程式を解く必要があり現象に対応して三種類程度の時間メッシュを用い拡散近似を行い、解法もノード法などの高速近似解法を用いるようになったがなおスーパーコンピュータでも時間のオーダの計算が必要である。

一方、現在研究が急速に発展している核融合炉分野では、プラズマの挙動解析を行い安定性や粒子、熱の輸送などの物理の理解を進め、これらの制御法に関する知見を得ることが理論的には最も重要な項目である。その一つは流体モデルを用いて不安定性を解析しプラズマが急激に消滅する巨視的不安定性現象を解明する。このため非線形抵抗性 MHD 方程式系(連続、運動量、エネルギー保存則、マクスウエル方程式)を時間発展についてシミュレーションする必要がある。また核融合燃焼の結果生成される α 粒子の拡散とプラズマ閉じ込めの関係を正確に予測するため数値積分による α 粒子の軌道計算とモンテカルロ法によるクーロン衝突を粒子モデルで行う。これらの計算は現在のスパコンでも不十分であり高(超)並列計算によって TFLOPS に近い計算速度が欲し

いところである。

2) 原子力の安全性評価解析

現在の軽水型原子力発電炉の設計時の想定事故である冷却材喪失事故の解析は、その膨大なシミュレーション計算を高速化する観点から、スーパーコンピューティングが重要な分野である。発電炉の冷却材配管がなんらかの原因で破断した際、減少する炉心冷却能を非常用炉心冷却装置の作動により食い止め、原子炉燃料棒の破損を防止することを確認する解析が不可欠である。この解析方法は、プラント内の複雑な体系中の水と蒸気のそれぞれについて、水-蒸気の相変化にともなう質量、運動量、エネルギーの相間輸送量を考慮した質量、運動量、エネルギーの保存式によって現象を追跡するもので、時間が重要なファクタとなる。解析は通常事故発生後 100~300 秒程度について行われている。このとき蒸気から水への凝縮が起こる数十秒間の相変化現象の時定数は 10^{-5} (S)程度といわれており、極度に小さい時間ステップ幅を設定する必要から、長時間の計算を必要とする。この解析計算では、体系の複雑な幾何形状、プラント機器を模擬する各部分での少ないメッシュ分割、非線形計算のゆえにベクトル型スーパーコンピュータによる高速化が困難である。しかし、一部アルゴリズムの変更などにより、この分野の代表的計算プログラムである RELAP-5 では、ベクトル化のために理論的整合性を保持しつつ処理フローを書き換えることにより約 3-4 倍の高速化を達成している³⁾。

このほか、有限差分法による複雑地形における放射性物質の移流・拡散を評価する環境安全性の研究においてもスーパーコンピューティングが重要な役割を演じている。図-1 は 1986 年ロシアのチェルノブイリ原発事故後の放出放射能(Cs-137)分布をシミュレーションした結果であるが、その後観測された各地の値と比較的良好一致を示した。たとえば、放射能濃度の日平均について、125地点の測定値と計算値を比較したところ、51地点において両者の比が10倍以内に入っていた⁴⁾。

3) 知能化技術の原子力分野への導入

原子力作業労働者の被曝低減化や運転員の操作ミスを起こさないヒューマンインタフェースのよい原子力プラントの開発は、今後の原子力利用に

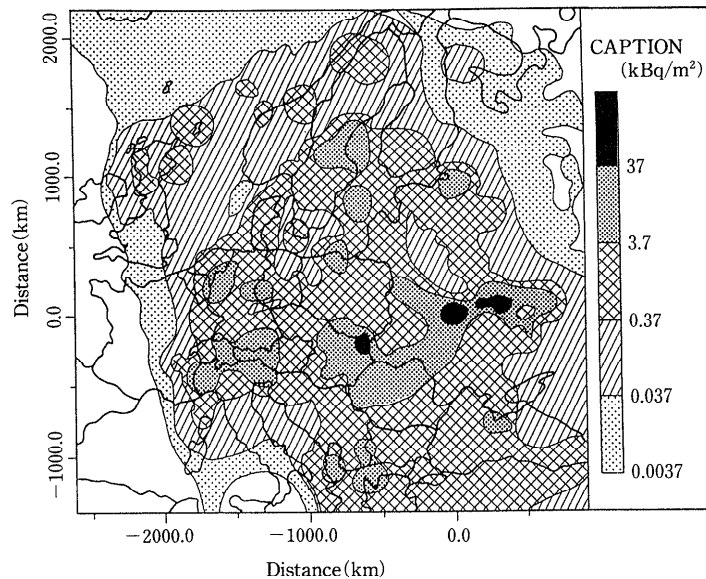


図-1 チェルノブイリ事故による降下放射性物質分布予測シミュレーション (文献4)より転載

にとって重要な問題である。人工知能や高速シミュレーションを活用し、高度な知能ロボットによる保守点検、プラント自ら異常を検出して正常な状態に自律的に復帰するなどの性能を有する自律型プラントの研究開発が、科技庁「原子力基盤技術開発研究」として行われている。原研では、原子炉建家内の任意の位置にアクセスして点検を行う知能ロボットの設計技術を開発することを目指して人間型知能ロボットのシミュレーションを行っている。このほか、新型原子炉などの研究開発における多分野に関わる設計技術の透明性・継承性を保持しつつ設計作業の省力化を目指した原子炉設計知的支援システムの開発にもスーパーコンピューティングを利用している。

3. モンテカルロ法による高速・高精度シミュレーション

モンテカルロ法は統計的手法によって方程式を解いたり物理現象をシミュレーションする方法であるが、その起源はかなり古くフェルミやフォン・ノイマンらが原子力分野に用いたのがその始めと言える。今日の計算機の能力の大幅な向上によりモンテカルロ法の応用分野や需要は急速に高くなっている。ここでは原子力工学の分野で不可欠な中性子、光子の輸送と衝突反応を精度良く解

析するためスーパーコンピュータ用に開発したコードについて述べる。

1) モンテカルロ法の特徴

原子炉の炉心内や各種の放射線遮蔽体中における中性子や光子の分布、核反応の割合などを知るためには、これらを集団とみたときに成立するボルツマン輸送方程式を解く必要がある。すなわち時刻 t 、位置 r においてエネルギー E をもち Ω 方向に飛行する粒子束は

$$\begin{aligned} & \frac{1}{v} \frac{\partial \phi(r, \Omega, E, t)}{\partial t} + \Omega \cdot \nabla \phi(r, \Omega, E, t) \\ & + \Sigma(r, E, l) \phi(r, \Omega, E, l) \\ & = \iint \Sigma(r, \Omega, E \leftarrow r', \Omega', E') \\ & \phi(r', \Omega', E', t) d\Omega' dE' + Q \end{aligned}$$

を解くことにより決定できる。ここで v は粒子の速度、 Σ は核反応の断面積、 Q は核分裂などの源項、右辺第1項は散乱項で位相空間 (r', Ω', E') において散乱された粒子が散乱後 (r, Ω, E) になる確率である。この式では媒質との相互作用は考慮されるが粒子間の衝突は無視している。本方程式を解くことはたとえ定常問題でも複雑形状では変数の離散化、形状の単純化、散乱モデルの近似などを導入しないと決定論的には解けない。中性子は気体ガス中の分子運動に似てランダムな

運動を行い核反応過程（散乱，吸収，生成）はすべて確率的に決まる。散乱項も物理モデルで計算できるものと確率的にしか決まらない場合がある。ボルツマン方程式はこれらの確率を集団として平均的に扱っているがモンテカルロ法は個々のすべての粒子の運動に着目しているのですべての確率過程をそのままシミュレーションすることができる。そして多数粒子の結果を統計処理することによりこの式の近似のない解と等価な結果を得ることができる。また複雑な幾何形状でも正確に扱える利点がある。すなわち核分裂炉，核融合炉あるいは人体モデルなどはきわめて複雑な形状要素から構成されているがそれらが二次または四次式の曲面で表される限り立体の組合せとして融通性の高い幾何形状表現が可能である。また上記方程式内に現れるエネルギー変数 E に関してはモンテカルロ法では連続変数としてそのまま扱える（連続エネルギー法と呼ぶ）。したがって散乱過程の一部も正確な物理法則に従って精度良く計算できる利点もある。一方問題点の一つは要求精度を満足するためには多数の粒子を追跡する必要がありその結果計算コストが高かついたことである。

2) ベクトル化プログラムによる高速化

世界の主要原子力先進国は20年以上かけて汎用コードを開発してきた。しかしそれらは当然のことながらいずれもスカラ計算機用コードである。これらは一つの粒子発生から消滅までを順次追跡するのでDOループの長さが短くまたその間に幾何形状や衝突反応に関するIF分岐の多い構造となっておりベクトル化にはきわめて不向きである。したがってベクトルスーパーコンピュータの性能を最大限に発揮するにはアルゴリズムを変え多数粒子を同時に追跡し，次に起こる事象タイプによって粒子をスタックに分類しベクトル演算を行わせる必要がある。このときのベクトル長は各スタックの総粒子数に比例する。また確率密度関数からのサンプリング法の工夫もベクトル化には重要である。

原研においてはモンテカルロ計算の高速，高精度化を図るためにベクトル計算機用汎用コードGMVP³⁾及びMVP⁴⁾を開発してきた。これらのコードは95—98%のベクトル化率を実現し，従来のスカラコードに比べ15—20倍（FACOM—VP 2600上）の高速計算が可能となっている。原

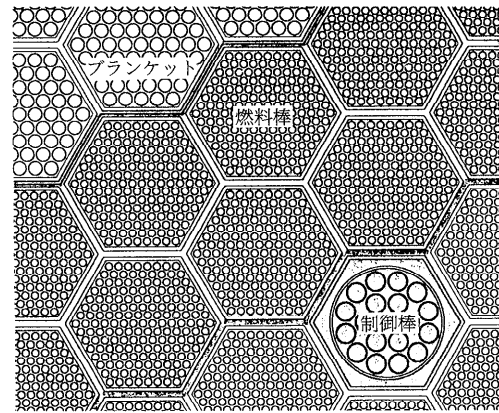


図-2 モンテカルロ法による高速炉の全炉心解析モデル(部分)

子炉の計算例を述べると，発電用原子炉内には核燃料棒（直径9.5mm）と制御棒が約5万本存在し各燃料棒もいくつかの領域から構成される。この炉心全体を正確にモデル化し中性子に対してモンテカルロ計算を行った。図-2はその計算モデルの一部の断面を拡大したものである。このように複雑な形状を少ない入力データで正確に表現する方法とそこでの粒子の追跡を高速で行うアルゴリズムの開発を行った結果⁷⁾計算時間は100万粒子の追跡が15—50分で行え，その解の精度は主要なパラメータについて設計精度を満足するものが得られた。このような正確なモデルで精度の高い解を得るにはスーパーコンピュータの存在なくしては不可能である。なお海外においてはいまだこのようなコードは開発されておらずしたがって世界最高速の計算が行えるようになった。

3) 並列計算機への適用

近年計算機のプラットフォームが多様化されるに従いユーザはさまざまな計算機環境にいる。したがってベクトル型の計算機以外でも高速計算を実現することが望まれる。言うまでもなくそれは並列計算による方法である。このためわれわれのコードは1)ベクトル並列型，2)高並列型，及び3)ネットワーク上のワークステーションを用いた並列計算が可能となっている。1)では共有メモリ型のNECのSX-3（前述のMONTE 4）を用い4cpuでのベクトル並列計算を行うと1cpuスカラ計算に比べると約18倍の高速化が達成された。2)の場合は富士通が開発した分散メモリ型のAP 1000で512台のcpuを用いた時でも並列化

率が80—100%の高率が得られている。3)については現在テスト中ではあるが並列処理ソフトPVM(米国のオークリッジ国立研究所が開発したパブリックソフト)で4台のEWSを用いると1台に比べ3.7倍程度の速度となる。このようにモンテカルロ計算でわれわれが開発したアルゴリズムを用いると、並列計算においてもかなり高い効率で達成でき並列化も比較的簡単である。

4. スーパーコンピューティングの新技術開発に果たす役割

原子力発電炉に関わる新技術開発については、現在の軽水型発電炉から高速増殖炉への移行が基本路線となっているが、一方で、発電炉の運転中に生成されるプルトニウムをリサイクルさせる軽水炉、重力などの自然の摂理を活用した自己制御性などによって異常時に自動的に原子炉が停止する受動的な安全炉など一層の安全性・経済性を追求した原子炉の研究開発が進められている。

核分裂炉の高速・高精度のシミュレーション技術が現実となりつつある現在では、新型炉の開発においても膨大な費用のかかる大規模モックアップ試験中心の従来の研究開発から、可能な限り小規模に抑えたモックアップ試験と手軽で安価に行える大規模シミュレーションによる実験代替によって、技術開発が加速されることは疑う余地がない。

また、現在の発電炉システムが発生する放射性廃棄物のうち超長半減期の廃棄物を加速器による核破砕によって短半減期の物質に変換する消滅処理技術が期待されている。しかし、これらの過程の数値シミュレーションでは、高エネルギービーム粒子とターゲット核との相互作用に複雑なカスケード状の核反応が含まれることなどから並列処理による高速シミュレーションが期待される分野である。

核融合炉においては、前述のようにプラズマの安定挙動と熱輸送を正確に予測することがきわめて重要な問題である。しかし、プラズマ閉じ込め性能は、微小な空間及び時間スケールで起こるプラズマ振動、磁気流体不安定性などの異常輸送現象によって支配されるのでプラズマの連続体近似に代わって、第一原理に基づく完全な粒子モデルによるシミュレーションが行われつつある。この

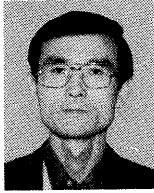
ためには、時間、空間を限定しても、異常拡散現象の完全な粒子モデルの計算には、約10 GFLOPSの演算速度が必要とされる。さらに、時間、空間の限定を除いた実空間、実時間スケールでの完全粒子モデルによる実験代替を意図したシミュレーションでは、300 GFLOPS～1 TFLOPSもの演算速度が必要となる。

そのほかに高放射線量下での作業者の被曝低減化や新型原子炉などの研究開発における多分野にまたがる複雑な設計技術の透明性・継承性を保持しつつ設計作業を省力的に行う知的支援技術の開発が今後重要になってくる。このためには、高速シミュレーション技術に加え、ロボット知能の高度化、原子力設計技術のノウハウをコンピュータ化した設計支援システムなど、スーパーコンピューティングによる人間代替が重要な技術となるがその可能性が今開かれつつある。

参 考 文 献

- 1) 浅井 清：スーパーコンピューティングとは何か，原子力工業，Vol. 38, No.3, pp.9-14(1992)。
- 2) 浅井 清他：ベクトル，パラレル計算処理の原子力コードへの適応性，JAERI-M, pp. 87-136(1987)。
- 3) 根元俊行他：原子力コードのベクトル化と改良，JAERI-M, pp. 92-142(1992)。
- 4) Ishikawa, H. and Chino, M.: Development of Regionally Extended/Worldwide Version of System for Prediction of Environmental Emergency Dose Information: WSPEEDI, (II), J. Nucl. Sci. Technol., 28, pp. 642-655(1991)。
- 5) Nakagawa, M., Mori, T. and Sasaki, M.: Comparison of Vectorization Methods Used in a Monte Carlo Code, Nucl. Sci. Eng., 107, pp. 58-66(1991)。
- 6) Mori, T., Nakagawa, M. and Sasaki, M.: Vectorization of Continuous Energy Monte Carlo Method for Neutron Transport Calculations, J. Nucl. Sci. Technol., 29, pp. 325-336(1992)。
- 7) Nakagawa, M., Mori, T. and Sasaki, M.: Hexagonal Lattice Geometry for Monte Carlo Calculations, Ann. Nuclear Energy, 18, pp. 467-477(1991)。

(平成6年3月10日受付中)

**中川 正幸**

1965年京都大学工学部原子核工学科卒業。1967年同大学院工学研究科修士課程修了。同年日本原子力研究所入所。1988年より茨城大学工学部非常勤講師兼務。工学博士。1983年原子力学会技術賞、1992年同論文賞受賞。主に、核分裂炉の核特性解析法の研究、放射線輸送計算法の研究を行う。最近ではモンテカルロ法による粒子輸送計算プログラムの開発研究、人工知能を用いた原子炉設計支援法の研究を行っている。原子力学会会員。

**秋元 正幸**

1941年生。1965年東京工業大学標準外課程卒業。1967年同大学院修士課程修了（原子核工学専攻）。同年日本原子力研究所入所。1991年同情報システムセンター室長。軽水型原子炉設計、軽水型発電炉の熱水力学的安全解析に関する研究を経て1989年より情報システムセンターに所属して大型計算機の管理、運営業務と人間型知能ロボットのシミュレーション研究に従事。平成4年度原子力学会技術賞受賞。原子力学会、混相流学会、機械学会、人工知能学会各会員。

