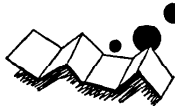


解説



原子力分野における超高速計算技術の応用と展望†

星野 力††

1. 原子力計算のニーズ

原子力分野における計算需要は巨大である。実験でえられた物理的工学的知識は数学的モデルにまとめられ、設計、安全解析、あるいは、運転管理用の計算機プログラム（習慣的にコードと呼ばれている）として蓄積されている。計算機が巨大システムを設計し、動かしているといっても差支えなく、原子炉を設計する目的だけに実験装置をもっている原子炉メーカーは、もはや存在しない。原子力プラントの事故は複雑な現象の複合したものであり、個々の現象を実験的に追求することはできても、全システムとしての振舞をあらゆるプラントについて実験することは困難である。むしろ数学モデルを用いて計算機の助けをかりて合成するのが得策である。

これらの計算コード体系は、たとえば表-1のように分類され、コードライブラリとして利用者に供されている。ここでは代表的な計算として1.2, 1.3, 2.4, 3.2, 4.3の各項目について計算速度に対する要求を紹介する。

1.2の中性子拡散と輸送は、炉心における核分裂の結果うまれた中中性子の従う拡散方程式またはボルツマ

ン輸送方程式を解き、中中性子の分布を求め再び核分裂分布を求めて全体をくり返し、最低固有値に対応する臨界状態を求めるものである。代表的な問題のサイズは、空間格子点100~1,000点、変数は中中性子エネルギーに対応して1~100、中中性子分布を求めるくり返し10~100、固有値を求めるくり返し1~10、ジョブ当り $10^7 \sim 10^{10}$ FLOP (Floating point OPERations, 浮動小数点演算) ぐらいの計算量である。

計算アルゴリズムとしてはSOR法(逐次過緩和法)がよく用いられている。最も基本的な計算であり、2.2の計算プログラムなどと合体して、より大きな3.2のプログラムの中のくり返しループの一番深いところに用いられる。

1.3の遮蔽計算は複雑な形状の遮蔽体を通して中中性子やガンマ線などの輸送方程式を通常積分形式でとくものであるが、2次元以上の形状には数値計算上の困難が増す。この種の問題は上の拡散モデルとは異なり、粒子の流れに大きな非等方向性が現われる。これを扱うには粒子の空間、エネルギーのみならず角度分布をも考慮せねばならないため高次元の問題となる。空間3次元の体系で、とくにダクトストリーミング(放射線が細長いすきまや通路を通して漏れてくる現象)のある場合では多数の粒子の運動を一つ一つ計算機でおいかけるモンテカルロ・シミュレーションに訴えることになる。遮蔽体の内側に対して外側の粒子密度は 10^{-10} にも達する減衰をうけている。すなわち単純なモンテカルロ法では 10^{10} 粒子を内側に発生させても外側に1個がもれてくるだけである。普通は常識的な計算時間の範囲内で統計的精度がえられるように分布にバイアスをかけるとか、領域を分割し問題のサイズを縮小するなどの種々のテクニックを用いる。遮蔽計算には少なくともジョブ当り 10^{13} FLOP以上の計算需要があると見られる。

2.4の工学的安全性コードは原子力プラントの事故解析を目的とするもので軽水炉の冷却材喪失事故を例にとれば、①冷却系パイプの破断により冷却材が流出

表-1 原子力コードの分類

1. 原子炉物理
1.1 核データおよび炉定数, 1.2 中中性子の拡散と輸送,
1.3 遮蔽
2. 原子炉工学
2.1 動特性と制御, 2.2 熱流動, 2.3 構造解析,
2.4 工学的安全性, 2.5 燃料挙動, 2.6 環境安全性
3. 運転管理
3.1 運転監視, 3.2 炉心管理
4. 核融合
4.1 電磁流体モデル, 4.2 トカマクコード,
4.3 粒子シミュレーション

† Review on the Applications of the Very High Speed Computing Technique in Atomic Energy Field by Tsutomu HOSHINO (Institute of Structural Engineering, University of Tsukuba).

†† 筑波大学構造工学系

するブローダウン過程, ②緊急炉心冷却系により冷却水が注入され炉が水没する再冠水過程, ③この間の燃料棒の温度上昇過程, を解析する。一例をあげれば TRAC コードは気液 2 相, 熱的には非平衡モデルで, 質量, エネルギーおよび運動量の保存方程式を解き, 圧力, 流量および密度などの時間的变化を求めている。物理現象としては複雑な現象の組み合わせたもので数学的には非線形微分方程式の時間発展問題である。個々の現象の実験はできてもトータルな現象の構成は計算機の助けをかりて, はじめて可能といえる。TRAC コードの計算量は CDC 7600 を用いて, 5 msec の実現象をシミュレートするのに 1 空間格子点当り 2~3 msec を要する。1,000 格子点, 10,000 時間ステップの計算は約 8 時間である。

高速増殖炉の炉心溶融事故のシミュレーションを行う SIMMER コードは, 2次元の気, 液, 固体の 3 相を扱うモデルで数値解析上の安定条件を満たす時間ステップを刻んで時間発展問題がとかれる。計算時間の 1 例は CRAY-1 で 17 日である。

3.2 の炉心管理コードは, 正常運転時の炉心内部の状態, とくに燃料の燃焼, 出力分布, 種々の安全性の指標をあらかじめ計算し, 数か月から数年間にわたる運転計画をたて, 可能な限り最適化することである。炉心は 3次元多相で非線形性が強い。1.2 の中性子分布を求める計算と熱伝導, 冷却材への熱伝達, 冷却材の流動の計算が最深ループを構成し, それに対する種類の制御動作, 炉心中のゼノンの蓄積, 燃料の燃焼, 燃料の交換に対応したループが外部にかかってくる。炉心 3次元 20,000 格子点, これにかかるループが 5~6 重になり, のべ 10^{13} FLOP 以上の計算量になる。この種の計算は炉心の運転管理を行うオフィスではルーチン的に行われているものである。

4.3 の粒子シミュレーションは電磁場を介して相互に干渉し合う多数の荷電粒子の輸送を時間を追って求めてゆくもので, やはり発展方程式を扱うものである。

変位電流を無視するいわゆる静磁モデルを例にとると, 計算量は粒子数 N_p に比例する粒子輸送の部分と, 空間メッシュ点 N_s として $N_s \log_2 N_s$ に比例する電磁場の計算部分から推定できる。現在の計算例は $N_p=8192$, $N_s=16 \times 128$, 時間ステップ 50 として M 200 で 142 秒であるが, ユーザはこの規模の計算に満足しているわけでは決していない。たとえば, $N_p=10^8$, $N_s=10^6$, $t=10^5$ とすれば 1.3×10^{13} FLOP の計

算量となり M 200 で 46 日を要する。この種のモデルはきりがない計算需要をもっているといえる。

以上 2~3 の代表例を紹介するにとどまったが, これらの計算はいずれも巨大な理工学システムの計算の典型といえる。構造解析を除けば, 大別して二つのモデルにわけることができる。物理系を, (i)連続体と見なす「流体モデル」と(ii)有限個の粒子より成ると見なす「粒子モデル」である。

(i)の流体モデルでは質量, 運動量およびエネルギーの保存則を表した偏微分(あるいは積分)方程式が基礎方程式として現われる。たとえば

$$\partial X / \partial t = \mathbf{A}X + b \quad (1)$$

としよう。方程式は時間 t , 空間 ij 両方向に差分近似される。

$$\left(\frac{X_{i+1} - X_i}{\Delta t} \right)_{ij} = \left(\sum_{k=i \pm 1} a_{ki} X_{ki} / (\Delta x)^2 + b_{ij} \right)_i \quad (2)$$

初期値より出発して時間方向にステップを刻んで積分が進んでゆく。前の時間ステップの値から, 次の時間ステップの値を各点ごとに計算してゆく解法(陽解法という)が数値的に安定であるためには, 空間刻み Δx と時間刻み Δt の間に Courant-Friedrichs-Lewy 条件 $\Delta t < \Delta x / c$ が成り立たねばならない¹⁾。ただし c は最も速い成分の伝播速度で, 拡散方程式の場合は, $c=2D/\Delta x$, ただし D =拡散係数, に相当する。

よく現われるケースは伝播速度 c が, 現象全体の進む速さ(最低時間固有値に対応するもの)よりずっと速い成分が含まれる stiff な場合である。

たとえば

$$\frac{1}{c} \frac{\partial X}{\partial t} = \mathbf{A}X + \mathbf{B}Y + b \quad (3)$$

$$\frac{\partial Y}{\partial t} = \mathbf{C}X + \mathbf{D}Y \quad (4)$$

のとき(3)式の方が速い成分を表わし, (4)式の方で全体の進み方がきまるとしよう。このとき, 時間ステップは $\Delta t < \Delta x / c$ の条件から短くしなければならない。

一方, 現象全体の進み方は Δt に比べて桁違いに遅いので時間ステップ数は膨大になり, データの有効桁数も長いものが必要になる。

しかし大抵は物理現象との対比から速い成分に対応する物理現象は瞬時に伝播し安定するとして取り扱われる。すなわち(3)式で $c \rightarrow \infty$, すなわち $1/c=0$ とおき

$$X = -\mathbf{A}^{-1}(\mathbf{B}Y + b) \quad (5)$$

$$\partial Y/\partial t = CX + DY \quad (6)$$

として Y に関して時間方向に陽に解かれる。たとえば熱や流体の現象より早い中性子分布は瞬時に決るとして、全空間の中性子密度を連立させてとき（陰解法という）、遅い現象については各点ごとに計算する陽解法を用いる。この陰解法では線形あるいは非線形連立方程式(5)をとく必要があり、しばしば計算時間が最も長くなる部分となる。

また A や B のマトリックスの要素は単純な定数ではない。時間のステップごとに系を構成する物質の状態方程式を計算する必要がしばしばある。状態方程式は陽に書き表わせないことが多く、通常、表を引いたり実験式を計算したりする。

流体の基礎方程式の表現にも二種類がある。空間に固定した座標から見たオイラー表現と流体にのった座標から見たラグランジュ表現である。オイラー表現では移流項という非線形項が現われ数値的に取扱いが難しくなる一方、ラグランジュ表現では時間がたつにつれて格子が歪んでくるという問題がある。

(ii)の粒子モデルは、多数の粒子が媒質中を運動し、場合によっては電磁力などを及ぼし合って干渉し、また衝突により、化学反応または核反応により複数の粒子を発生し、また吸収される過程を表現するものである。個々の粒子と、それから発生した粒子の運動は個々の条件（たとえば体系外へ去るとか、エネルギーがあるレベル以下になるなど）を満たすまで追跡される。

この技巧は通常モンテカルロ法と呼ばれるものである。前述の1.3の遮蔽計算や4.3の粒子シミュレーションはこれに当る。後者の場合は、オイラー表現される電磁場などのデータと、ラグランジュ表現される粒子の運動データとの間の変換作業が必要になる。

どちらのモデルをとるにせよ、対象とするのは複雑な幾何学的形状と非均質で非線形な物体であり、それらを記述するデータが多い。できるだけ多種多様な場合を単一の汎用コードで扱おうとするから、いきおいプログラムはこれらのデータに依存する分岐のら列となる。これは並列処理上、考慮しておかねばならない点である。

原子力関係の計算は、いずれの計算も原子力エネルギーの開発と安全性の確保という目的のためやむを得ない巨大計算であり、CPUの能力と予算の許す限り、ぎりぎりのサイズにまで拡張された内容となっている。設計計算のかなりの部分は確立されたモデルと

いってよく、コードシステムとして自動化がなされつつある。工学的安全性コードには最近集中的な開発努力がはらわれているが、まだ未熟さが残っている。

まず行われるべきことは計算モデルと実験データとの対応をとり、モデルを鍛えてゆくことである。その上で計算機の能力が大きくなるにつれて実験のある部分は計算機シミュレーションにおきかえられてゆくであろう。しかし現状は計算機の速度が遅すぎてより正確なモデルを導入できないことが多い。少なくとも現在の汎用機の1,000~10,000倍の能力がほしいところである。

もちろん10,000倍の能力アップが実現したところですべてのニーズが満足されるわけではない。より詳しいモデルをもちこむことによってニーズは無限に拡大すると考えることもできよう。

2. パイプライン方式の計算技術

従来の汎用機の技術の延長上に最も実用化のすすんでいるアーキテクチャであり、CRAY-1ははじめ多くの商用機が出現しているのは周知のとおりである。

メモリから逐次的にとり出されたデータ(ベクトル)はバッファレジスタを介して、または直接にパイプラインに流される。各データはパイプの各段に相当する処理を順次うけるが、ある時間断面を切つて見れば各段での処理は同時に行われており、処理のスループットは増加する。しかし各段でうける処理は、時間的ずれはあるものの、すべてのデータにとって同一であり、これはFlynnの分類⁹⁾によるSIMD方式のアーキテクチャに属するものである。

パイプラインによる処理は次のような特徴をもつ。

① 各データに依存する分岐やパイプ中を流れるデータ相互間の計算がある場合は、逐次的な処理によって行わざるをえなくなる。

② また、分岐やデータ相互のからみのないようなベクトルをあらかじめ作成しておくという逐次的前処理を行い、パイプを通過した後、必要ならば再び前処理の逆変換を施すことも可能である。

③ データがパイプを通過してもメモリへは戻さず、再びパイプを通すというチェイニングも可能である。

④ 通過するベクトルの長さがパイプの段数に比して短い場合は、ベクトルがパイプに入ってもすぐには出てこないという。いわゆる立ち上りの無駄時間が生じる。

⑤ パイプは、いくら高速であってもメモリからのデータのとり出しが遅くては性能は出ない。まとめてパイプに流すベクトルの大きさは、このメモリアクセスの方式（インタリーブの枚数など）も考慮に入れて決める必要がある。

⑥ 商用機では、自動的に並列処理の面倒を見られるようなコンパイラの開発がなされており、使いやすさや、従来のプログラムからの移行性にすぐれているが、パイプラインのもつ高性能を十分に引き出すには、ユーザがプログラムの書き換えを行わなければならない。

パイプラインはマトリックス演算に帰着する問題では効率よく動作するから、応用上は微分方程式系の問題に比較的好く使われている。しかし大抵の差分近似では、近接格子点におけるデータの間の演算であるから、マトリックスは疎 (Sparse) になってくる。

疎の度合は、もとの物理空間が多次元になり格子点数が多くなるほど著しい。疎なマトリックスからとり出され、パイプに流される疎なベクトル、また短いベクトルはパイプラインの効率を著しく低下させる。むしろ、陽解法は長いベクトルを生じさせるのでパイプライン方式のアルゴリズムとして適している。

また前述の粒子モデル、とくに複雑な多くの分岐が現われるモンテカルロ・シミュレーションの計算にはパイプラインは無効に近いことを指摘しておく。

パイプラインの計算技術は、これらの難点を避けながら、いかに並列可能部分の効率のよいベクトル化を行うかにかかっている。

3. 並列プロセッサ方式の計算技術

空間的に多数のプロセッサを配置し、並列処理可能なタスクを各々に割り当てて同時に処理を行う方式を、ここでは並列プロセッサ方式と呼ぼう。

有名な ILLIAC-IV はこのタイプといってよいが、ILLIAC-IV は命令ステップレベルでの SIMD であるため、前述のパイプラインの欠点のうち SIMD に起因するものは、そのまま持っている。すなわちランダムなデータ依存の分岐が複雑にからまってくると困難が生ずる。

並列プロセッサ方式は各プロセッサが非同期的に動作する MIMD 動作を導入するのが容易で、モンテカルロ法のようなデータ依存の複雑な分岐が生じる問題にも適用できる。また、必要とあれば、全プロセッサの同期をとり SIMD 的に動作することも、またデー

タをプロセッサ空間で一方向に流してパイプラインの動作を行うこともできる。このように問題に対する適用性がより大きく、その意味ではパイプラインよりも、はるかに汎用的であるといえる。

2次元直角格子状にプロセッサを配置するシステムを考えてみよう。元の物理的空間も同形の2次元領域とすれば、各部分空間を各プロセッサに割り当てるような写像が可能である。ある領域内で進行する現象はそのまま対応するプロセッサ内で逐次的に計算できる。もちろん、ある物理的空間を常にあるプロセッサに固定する必要はない。この写像は必要に応じて可変にしよう。

3次元空間を2次元アレイで処理する場合、残る1次元方向は逐次的処理とすることもできる。

しかし2次元方向に流体の流れや粒子の出入があるときは、近接したプロセッサとのデータ交換が必要となる。このとき、いかにプロセッサを結合し、少ないオーバーヘッドでデータ交換を実現するかがポイントである。

大抵の物理現象は近接した媒質または場との作用で決定されるという性質をもっている。物理現象を直接陽解法を用いてシミュレートする限り、データ交換は近接のプロセッサのみでよい。しかし、このアプローチは、前述の stiff な系では困難になるから陰解法を部分的に用いざるをえなくなる。逆行列 A^{-1} を計算する時点でガウス消去のようなアルゴリズムを採用すれば、遠方のプロセッサとの通信が必要になってくる。

ILLIAC-IV では隣接4方向プロセッサとの通信を許すのみであったが、その後、より汎用のプロセッサ間結合の方式が研究されている。たとえば1次元に配置されたプロセッサ間を結合する omega-network と呼ばれる方式³⁾や binary n-cube という方式もある⁴⁾。また一般に N 個のプロセッサを N^2 のサイズのクロスバースイッチを通して結合する方式もある⁵⁾。これらの汎用性のあるネットワークでは、より広範囲のアルゴリズムを適用することができる。

一方、近接したプロセッサ間のみ計算のくり返しを収束するまで行い、また収束の加速を行うことによって A^{-1} を計算するアルゴリズムも存在する。たとえば SOR 法 (Successive Over-Relaxation Method) は、そういう解法の一つである。ADI 法 (Alternating Direction Implicit Method) も局所的なデータ交換で済む解法である。前述の試行の独立なモンテカルロ法

ではプロセッサ間通信は不要で、ましてや汎用性のあるネットワークを必要としない。一般的に近接プロセッサ間通信に限定した方がハードウェアが作りやすいことはいうまでもない。

このように並列プロセッサ方式と一言でいっても種々のアーキテクチャが可能であり、それは特定のアルゴリズムと対象問題のデータ構造を選び好みする。むしろユーザの立場から見れば、解くべき問題がまず存在し、それに対して最適なアルゴリズムとアーキテクチャが決ってくるのである。現在まだ、この並列プロセッサ方式は、研究開発段階にあり、最適なアーキテクチャ、アルゴリズムと応用問題の相互関係については、決着はついていない。

4. ケーススタディ

現在実用になっているシステムの一例として米国ローレンス・リバモア研究所の計算機ネットワーク

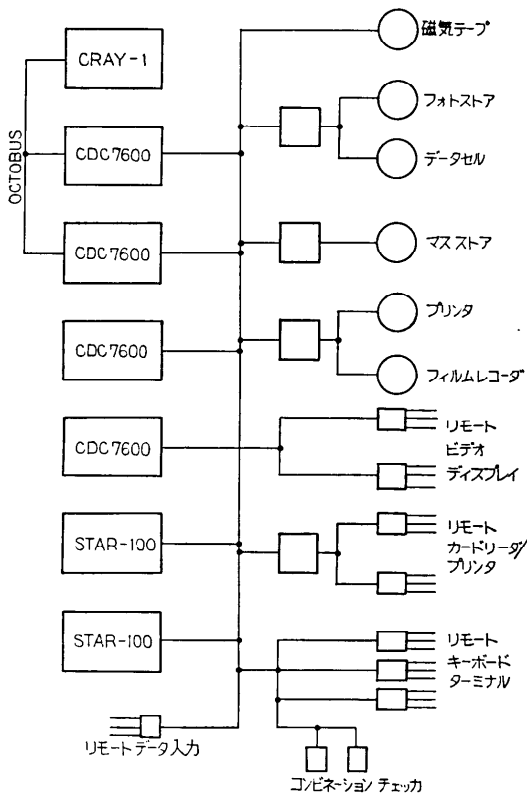


図-1 ローレンスリバモア研究所 OCTOPUS ネットワーク⁸⁾。大きい四角は主計算機、中サイズの四角は中型計算機、小さい四角は小型計算機を表わす。

OCTOPUS を挙げておく。図-1 のように7台の主コンピュータより構成され1,200のキーボードターミナルと37のリモートジョブ端末をもっている⁸⁾。このほかに CRAY-1 1台と CDC 7600 1台より構成される磁気核融合プロジェクトの全国ネットワークがある⁷⁾。ほかの原子力研究機関の計算機はこれと類似のもので、規模はより小さいと考えてよい。

機械に対して最適のプログラミングを行ったとき、CDC 7600 は 3~5 MFLOPS (逐次処理) STAR-100 は 10~20 MFLOPS (パイプライン処理) CRAY-1 は 20~50 MFLOPS (パイプライン処理) の能力をもつといわれている⁹⁾。

CRAY-1 を代表とするパイプライン・マシンの性能評価は原子力関係の各国立研究所で精力的になされている。米国アルゴンヌ国立研究所では代表的なコードを IBM 370/195 と CRAY-1 にかけて、スピードアップの倍率を測定している^{8),9)}。この結果のまとめを表-2 に示す。結論として¹⁰⁾

① 直接変換では 370/195 より約40% 計算時間の減少となる。

② 何らかの書き直しをすれば2~4倍の速度アップとなる。

③ それ以上に倍率を上げようとするれば CRAY-1 のアーキテクチャに有利な新しいアルゴリズムの開発が必要である。

よく使用される3次元拡散コード DIF 3 D については、評価が多くなされており⁹⁾⁻¹¹⁾ 370/195 の Scalar FORTRAN で 2.98 MFLOPS であったのが CRAY-1 Vector FORTRAN で 11 MFLOPS が測定されている。

高速炉事故解析コード SAS は、とくにベクトル化を意識してコードが作成されており、IBM 370/195 に対して CRAY-1 で CFT (Cray FORTRAN) を用いたとき5.9倍、さらに内挿ルーチンを CAL (アセ

表-2 IBM 370/195 に対する CRAY-1 の速度向上率*

コード内容	直接	小規模な書き換え	大規模な書き換え
中性子の断面積計算	1.4	2.0	10.0
相対論的原子構造	2.3	2.6	—
プラズマの Particle-in-Cell モデル	3.4	7.6	22.0
Molecular Dynamics コード	1.3	1.7	—
高速炉用差分近似拡散コード	1.0	1.3	—
パイピングシステムの2次元解析	1.7	2.2	—
逆行列、行列の積	1.0	1.3	4.5
フーリエ解析ルーチン	1.8	7.7	37.9

* 数値に約 4 MFLOPS をかければ、CRAY-1 にとっての絶対的な速さが求まる。

ンプル言語)でコーディングしたとき7.1倍の速度向上が見られている^{12),10)}.

プラズマ物理によく現われる Fokker-Plank 方程式のベクトル化に対する評価の一例では, CRAY-1 でベクトル化を行ったとき, 行わないときの比として, 3.65 倍が報告されている^{13),10)}.

国内でも CRAY-1 でベクトルを行ったとき M200 に対して 1.99 倍, 粒子運動の部分のみベクトル化を行ったとき, 3.8 倍になること, また FACOM 230-75 と, FACOM 230-75-APU についても同様の測定の結果, 3.9 倍の倍率がえられている¹⁴⁾.

トカマクプラズマの線形 MHD 不安定性を解析する 2次元コード ERATO は有限要素法の処理の後, 行列の固有値問題をとくコードであるが, FACOM 230-75 と同 APU で実行したときの倍率として 6~7 倍をえている¹⁵⁾.

またトカマクプラズマの抵抗性 MHD 不安定性を

解する 2次元コード AEOLUS-R 1 の例では, 陰解法の採用の結果, 倍率 4 倍をえている¹⁵⁾.

これらの実測例は, ハードウェアの名目速度よりかなり下まわっており, 現実的なコードにとって, 名目速度がいかに出にくいを示しているともいえる. 少なくとも今の計算能力の 1,000~10,000 倍がほしいというユーザの願望に, パイプライン方式のみでは(あと 1 桁の素子速度の改善があったとしても)到底, 答えることはできないであろう.

CRAY-1 などは, 科学技術計算機として汎用をねらったものであるが, もう少し専用化したシステムの例として UCLA の CHI システムを紹介する¹⁶⁾. これは, プラズマ物理の粒子モデルや, 電磁流体モデルのために設計されたもので, 図-2 のように, パイプライン方式のベクトル演算装置 AP 120 B とディスク記憶への並列アクセスパスを 4 組有している. 性能の実測と評価を表-3 に示す.

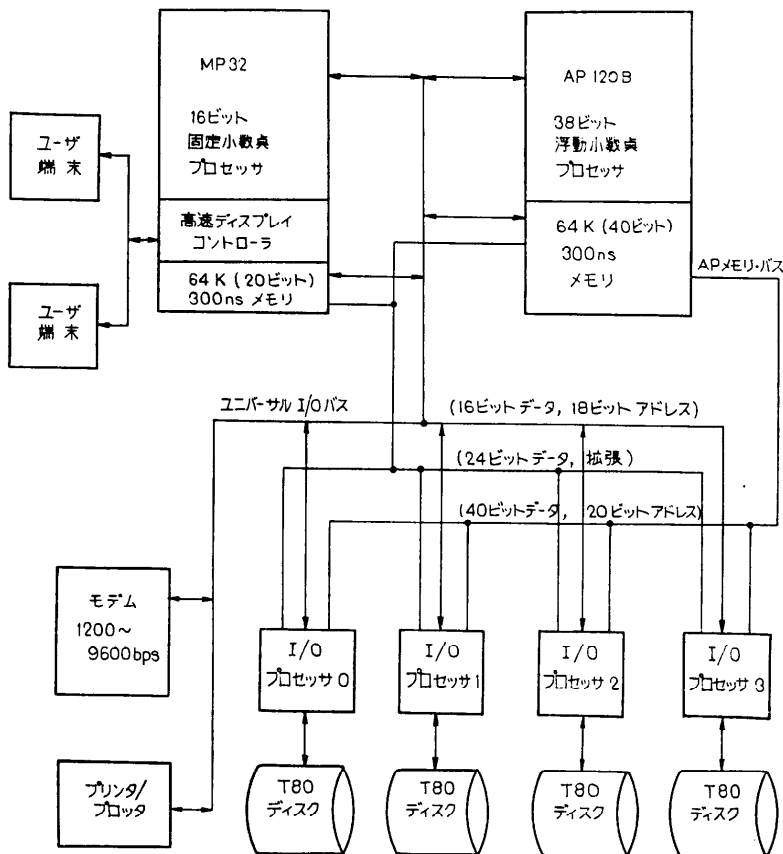


図-2 UCLA CHI コンピュータ構成図¹⁶⁾

表-3 CHI コンピュータの性能評価¹⁹⁾

計 算 内 容	IBM 360/91	CHI
粒子コード		
1 タイムステップ当りの粒子の運動	Aセンブリコード	
CPU	55 μ sec	13 μ sec
I/O	—	14 μ sec
全 体	55 μ sec	14 μ sec
10 ⁸ 粒子, 4,000 タイムステップ		
時 間	61 hr	16 hr
3次元電磁流体コード	FORTAN-H	
1 格子点当りの時間	230 μ sec	90 μ sec
64 ³ 格子点, 4,000 タイムステップ		
時 間	33 hr	13 hr

並列プロセッサ方式のシステムで、原子力分野で実用化されているものはまだ存在しない。しかし目的を原子炉炉心計算に限定したシステムの提案はなされている¹⁷⁾。マイクロプロセッサを多数用いて、炉心の各燃料要素を分担して計算する考え方であり、アーキテクチャとしては、ジメンス社の SMS¹⁸⁾ に類似のものを念頭においている。提案されているシステムは、一本のバスに全マイクロプロセッサが連なっており、プロセッサ間のデータ交換はバスを制御しているミニコンピュータが逐次的に行っているため、オーバーヘッドが大きくなっている。評価では 9×9 の燃料要素をもつ炉心の中性子分布計算が、約 10 分と見積られている。

実験的なシステムとして、原子力分野を含む科学技術計算への応用を目指したものに PACS がある¹⁹⁾。マイクロプロセッサ 32 台を 8×4 の 2次元直角格子状に配置した MIMD マシンですでに 8×8 の沸騰水型原子炉炉心の 3次元計算は約 10 秒で計算が完了し、文献 17) の予想を上まわる形で、並列処理の有効性が実証されている²⁰⁾。また、並列プロセッサに適しているとされているモンテカルロ型の計算も、核融合炉心プラズマにおける高速イオンの軌道計算について、M200 の約 1/7 の速度が実測されている²¹⁾。PACS システムを含めて、これらの実験的なマシンを紹介する十分な紙幅がないが、より詳細な内容や主張については、文献を参照していただきたい。

5. 将来の展望

実用化の一番進んでいるのはパイプライン方式のシステムであるがその性能は原子力関係の計算の需要を満たすには不十分である。やはり並列プロセッサ方式の計算機が将来本命となってくるのは間違いないものと思われる。ただし並列プロセッサシステムのアーキ

テクチャは多種多様であり正確な評価をあらかじめ行うのは簡単ではない。

やはり解くべき問題の設定を行い可能なアルゴリズム、アーキテクチャと、それを可能にするコンピュータ技術を一貫して評価し最適なものを選ばなければならない。このとき重要なポイントは並列プロセッサ方式で汎用性をどこまで保てるかであろう。もちろん汎用と専用の切り分けはマーケットの大きさにも関係している。

しかし VLSI の急速な進歩を前提に考えれば、少数の汎用スーパーコンピュータというイメージよりも、多数の専用シミュレータというイメージの方が現実味があるように筆者には思われる。いずれにしても何種類かの実験的マシンが近い将来出現し、アーキテクチャと応用の関係を解明してゆくことが望まれる。

日本の原子力の歴史はすべて米国直輸入そのものであったといっても大きな誤りではない。原子力コードもその例外ではない。1. で紹介したコードの多くは米国で開発され、日本で若干の改良が加えられたものばかりである。米国に比して日本のコード開発力は 1/10 程度である。この対外依存体質は、かつては日本の技術すべてがもっていたものである。エレクトロニクスは、今やこれから脱しつつあり、原子力は今もってこれを脱却しきれていないといえる。(ただし核融合開発はスタートから外国依存でないことは断わっておかねばならない)

この日本で、原子力のための並列計算機を実現したければ、原子炉がそうであったように、まずアメリカの国立研究所や企業での実現を待ち、その輸入をはかるのが近道である。それでは困るというならば、大規模な開発プロジェクト(多分国の主導の)が必要であろう。

しかし幸いにしてスーパーコンピュータは原子力のためにのみ存在するのではない。また日本のコンピュータは IBM の真似を脱却し、真の国産技術として育ってきているはずである。まさか CRAY の真似ばかりして原子力分野のような対米依存の轍をふむことはないと確信しているのだが……。

終りに原子力コードに対するパイプライン計算機の評価について、多くのご教示をいただいた石黒美佐子氏(原研)に感謝いたします。

参考文献

- 1) 矢嶋信男, 野木達夫: 発展方程式の数値解析, 岩波, p. 272 (1977).
- 2) Flynn, M. J.: Some Computer Organizations and their Effectiveness, IEEE TC, Vol. C-21, No. 9, pp. 948-960 (1972).
- 3) Lawrie, D. H.: Access and Alignment of Data in an Array Processor, IEEE TC, Vol. C-24, No. 12, pp. 1145-1155 (1975).
- 4) Lang, T. and Stone, H. S.: A Shuffle-Exchange Network with Simplified Control, IEEE TC, Vol. C-25, No. 1, pp. 55-65 (1976).
- 5) Widdoes Jr., L. C.: The S-1 Project: Developing High-Performance Digital Computers, COMPCON '80, pp. 282-291, IEEE (1980).
- 6) Rodrigue, G., Giroux, E. D. and Pratt, M.: Perspectives on Large-Scale Scientific Computation, IEEE COMPUTER, pp. 65-80 (Oct. 1980).
- 7) U. S. Department of Energy: Magnetic Fusion Energy and Computers, the Role of Computing in Magnetic Fusion Energy Research and Development, DOE/ER-0033, DOE (1979).
- 8) Rudsinski, L. and Pieper, G. W.: Evaluating Computer Program Performance on the CRAY-1, ANL-79-9, ANL (1979).
- 9) Rudsinski, L. and Pieper, G. W.: Production Runs on the CRAY-1, ANL-79-68, ANL (1979).
- 10) 石黒美佐子: 私信.
- 11) Derstine, K. L.: Experience with the Conversion of the Large-Scale Production Code DIF 3D to the CRAY-1., CONF-790902, Impact of Advanced System on Scientific Computations, pp. 116-127, Livermore (Sept. 1979).
- 12) Dunn, F. E. and Kyser, J. M.: Impact of Advanced Systems on LMFBR Accident Analysis Code Development, CONF-790902-3, ibid(1979).
- 13) McCoy, M. G., Mirin, A. A. and Killeen, J.: Vectorized Fokker-Plank Package for the CRAY-1, CONF-790902-1, ibid (1979).
- 14) 阿部芳彦, 上村鉄雄: プラズマ粒子コードのレイプロセッサへの適用, 核融合研究 Vol. 44/別冊その3, pp. 63-71 (1980).
- 15) 松浦俊彦: MHDコードのFACOM230-75APUへの適用例, ibid, pp. 51-61 (1980).
- 16) Dawson, J. M., Huff, R. W. and Wu, C.: Plasma Simulation on the UCLA CHI Computer System, PPG-334, UCLA Dept. of Physics (1978).
- 17) Honeck, H. C.: On the Feasibility of Using Parallel Microprocessors for the Calculation of 3-Dimensional Rating Distributions in Operating Reactors, pp. 413-420, NEACRP Specialist's Meeting on Calculation of 3-Dimensional Rating Distributions in Operating Reactors, Paris (Nov. 1979).
- 18) Kober, R. and Kuznia, C.: SMS 201-A Powerful Parallel Processor with 128 Microcomputers, EUROMICRO JOURNAL, Vol. 5, pp. 48-52 (1979).
- 19) 星野他: 科学技術専用並列計算機 PACS の開発 (I), (II), 昭和 55 年電子通信学会総合全国大会, 1400-1401.
- 20) 星野 力: 並列計算機 PACS-32 による BWR 炉心計算, 原子力学会誌 Vol. 23, No. 8 (1981).
- 21) 伊藤, 星野, 佐藤: 専用並列計算機 PACS によるシミュレーション(II), モンテカルロ・シミュレーションによるロス・リージョンの計算, D18, 昭和 56 年原子力学会年会.
(昭和 56 年 7 月 27 日受付)