総説

〔89〕 原子力発電用スーパーシミュレータ

秋山 守*, 大橋 弘忠*, 太組 健児**,
篠原 慶邦**, 広瀬 正史**, 伴 博之**, 粕谷 俊郎**

(1993年 12月 6日 受 理)

Super-Simulator for Nuclear Power Plant

By Mamoru AKIYAMA, Hirotada OHASHI,
Kenji TAKUMI, Yoshikuni SHINOHARA,
Masashi HIROSE, Hiroyuki BAN and Toshiro KASUYA

The super-simulator is a conceptual name for future innovative simulators of nuclear power plants which surpass, to a large extent, the capabilities and performances of existing nuclear power plant simulators for operator training, plant analyzers for engineering studies or computer codes for dynamics analysis. Such super-simulators will be realized by employing highly advanced methods of mathematical modeling of the physical chemical and other related processes in the nuclear power plants and innovative methods of numerical computation using rapidly evolving high performance computing systems.

KEYWORDS : reactor simulators, performance, super-simulators, high performance computing systems credibility, reliability, serviceability

I. スーパーシミュレータ の目指す世界

原子力発電のスーパーシミュレータは、コンピュータ上に原子力発電所を再現し、通常運転時はもとより、異常や事故が起こった場合も含めた詳細なシミュレーションが可能であり、その解析結果を専門家のみならず、一般の人々にも広く理解し易い形で提供するシステムである。本稿では、スーパーシミュレータが必要とされる必然性、そしてそれによりもたらされるものの有用性等について述べる。

スーパーコンピュータの高度利用技術は、“ハイパフォーマンス・コンピューティング”あるいは“アドバンスド・コンピューティング”あるいは“スーパーコンピューティング”などと呼ばれ、理論・実験に続く“第3の科学”の地位を確立し、国家の繁栄に大きな影響を与えるキーテクノロジーであるとの認識が高まっている⁽¹⁾⁽²⁾。この背景に

はコンピュータ性能の飛躍的な向上がある。第1図に示すように、演算性能の向上は10年ごとに約100倍になるトレンドを維持しており、2001年には1 TFLOPS($=10^{12}$ 回浮動小数点演算/s)のコンピュータが出現することは確実である。このような高性能のコンピュータは、従来の科学技術計算分野への適用のみならず、より幅広い分野への適用が可能であり、社会経済・教育・文化にも大きな影響を与えていると考えられている。

このような認識の基に、日本では世界に先駆けて“第5世代コンピュータプロジェクト”を1983年にスタートさせ1992年に終了している。このプロジェクトに刺激された欧米でも、ヨーロッパでは“EUREKA プロジェクト”が1985年に、米国では“HPCCI(High Performance Computing and Communications Initiative)プロジェクト”が1992年にスタートした。特に、米国のHPCCIプロジェクト

* 東京大学 工学部 (Fac. of Eng., Univ. of Tokyo)

** 勸原子力発電技術機構 (Nucl. Power Eng. Corp.)

第1図 代表的なコンピュータの演算性能の変遷

詳細な物理モデルを使用した大規模な解析を行うためには、少なくとも1 TFLOPSの演算性能が必要となる。

は、ハイパフォーマンス・コンピューティングでイニシアチブをとる国が世界経済でイニシアチブをとることになるとの認識を明確に示し、1992年度は約6.4億ドル、1993年度は約8億ドルという巨費を投じてプロジェクトを推進している⁽³⁾。また、日本でも“R.W.C.(Real World Computing)プロジェクト”が1992年から新たにスタートしている⁽⁴⁾。

一方、原子力発電は着実にエネルギーの安定供給の実績を伸ばし、すでに全電力エネルギー供給の約1/3を占めるに至っている。水力発電や火力発電は、ダム建設による環境破壊や、大量のCO₂排出による温室効果に対する懸念が指摘されており、これらの発電によるエネルギー供給力の増大は次第に困難になりつつある。このような状況の中で、原子力発電は環境の保護と社会活動の持続的発展の維持を両立する上で不可欠な基幹エネルギーとして期待されており、一層信頼される、また真に人に優しいシステムとなるよう、絶えざる努力が続けられている。

スーパーコンピューティングは、原子力発電が基幹エネルギーとして成長する上で、原子力発電の安全性の実証、設計の支援、運転員の訓練など様々な面で重要な役割を果たし、その30年以上の歴史の中で常に密接な関係を保ち、互いの発展を加速してきた⁽⁵⁾。原子力発電システムの性能の向上や安全の確保にとって、スーパーコンピューティングが欠かせないものであると同時に、より

高度なスーパーコンピューティングへと向かわせる大きなモメンタムが原子力発電の分野から発せられている。

情報の科学技術を代表するスーパーコンピューティングと、新時代エネルギーの科学技術を代表する原子力発電とが、今後さらに連携を深め相互にその発展を加速するであろうことは疑いない。スーパーコンピューティングと原子力発電の連携によりもたらされる成果は、原子力分野における科学技術フロンティアを切り拓くのみならず、国家の繁栄にも大きな影響をもたらすであろう。両分野の連携の強化による技術開発は、これをわが国が主導することにより、多くの分野の技術開発における基礎技術ただ乗りといった批判を払拭し、国際貢献を一段と推進することができる。

原子力発電のスーパーシミュレータとは、原子力分野とスーパーコンピューティングの連携によって実現される、ハイパフォーマンス・コンピューティング社会における新たな社会資本の一種であると位置付けられる。スーパーシミュレータは、国民、地域社会、国、産・学界、技術者のそれぞれが必要とする原子力発電に関するあらゆる情報を生成し、提供することを目的とするものであり、原子力発電の円滑な発展と、その基盤となる原子力文明の理解・浸透のために必要不可欠であり、その実現が強く望まれる。

II. スーパーシミュレータの役割

原子力発電所のスーパーシミュレータの果たすべき役割の第1は、原子力発電に関する新たなインフラストラクチャを形成することである。現状においても原子力発電の安全性は技術的に十分実証されているが、スーパーシミュレータによってさらに一層その実証性を高め、定量的に、しかも、より理解し易い形で安全性を示すことにより、官・産・学の関係者に役立つことはもちろん、国民全体に原子力発電の必要性和安全性を理解してもらう役割を担う。

第2の役割は、新時代の基幹エネルギーである原子力発電を担う人材を育成することである。ハイパフォーマンス・コンピューティング社会において、スーパーコンピューティングと原子力の両

分野が連携を深めることにより、科学技術の最先端を引続き原子力分野に置き、科学技術のフロンティアを目指す優秀な人材の流入と、高度な人材の育成に資する。

第3の役割は、地域社会はもちろん国民全体に対するPAを推進することである。スーパーシミュレータは原子力発電に関するあらゆる情報を生成し、原子力発電の基盤となる原子力基礎科学技術、さらに広くは原子力文明全般についての関心の涵養、理解の促進と浸透に資する。

以上の役割を果たすため、スーパーシミュレータが具備すべき要件は3つのキーワードで表わされる。

(1) Credibility

技術者の原子力発電システムに関する理解と知見、ならびに解析能力を究極まで高め、もって技術者の技術的水準と信頼、ならびに原子力発電システムそのものの品質をより向上させることができる。

(2) Reliability

原子力発電の安全の問題に関して、解析・評価等の面でどこまでも要請に応えられるin-depthの対応を可能にし、もって信頼感をより高める。つまり、原子力の分野において想定されるあらゆる事象・事故等を忠実にシミュレートし、安全性を実証できる。

(3) Serviceability

原子力発電に関するあらゆる情報を直ちに生成し、情報を必要とする人に理解し易い適切な表現形式で提供できる。ここでいう情報とは、国にとっては規制の観点から必要とされる安全に関する、より詳細な技術情報であり、産・学界や技術者にとっては主として技術水準を一層高めるために必要な情報であり、地域社会や一般国民にとっては、原子力発電の安全性と基幹エネルギー源としての重要性を理解するための情報である。

第2図に、スーパーシミュレータが備えるべきserviceabilityの概念図を示す。これらの情報は、必要に応じてリアルタイムで生み出され、利用者に送られる。利用者はリアルタイムで情報を入力し、加工することができるものでなければなら

第2図 スーパーシミュレータが備えるべき serviceability

らない。

これらの要件を具備するスーパーシミュレータは、原子力発電に対するさらに極めて高度な技術水準と十分な安全維持を達成して、原子力発電に対する国民の考え方にも良好な影響を与え、原子力発電が真に安全で、かつ豊かな生活を支えるために不可欠なエネルギー源であることが、広く認識されるための社会的基盤となる。

Ⅲ. スーパーシミュレータのキーテクノロジー

スーパーシミュレータのソフトウェアの構成の概念図を第3図に示す。これを実現するために必要となるキーテクノロジーとして以下の5項目が挙げられる。

第3図 スーパーシミュレータのソフトウェアの全体構成の概念図

1. 現象を解析する理論と物理モデル

信頼性の高い情報を生成するためには、最大限に精度の高い解析を行う必要がある。このためには、現象を解析する理論を充実し、解析に使用する物理モデルの詳細化を図らなければならない。

このためには、従来のマクロレベルの物理モデルだけでなく、ミクロレベルの物理モデルを使用することも必要になってくる。

スーパーシミュレータが模擬する範囲は、原子力発電の通常運転時はもちろん、事故時を含むあらゆる事象を対象とするため、極めて広い研究分野の参加が必要となる。それらの研究分野の例を以下に示す。

- ・エネルギー・物質の粒子挙動
- ・材料の挙動
- ・構造物の挙動
- ・流体の挙動
- ・熱の移動
- ・化学的挙動
- ・放射性物質の変化・拡散・沈着
- ・人の挙動
- ・機器やシステムの挙動

2. 超高速コンピューティング

スーパーシミュレータに使われるコードは、従来の原子力分野のコードの規模をはるかに越える大規模なものであり、現在最高速のコンピュータの少なくとも1,000倍を越える演算性能を持つコンピュータが必要になると考えられる。従来の数値解析で使用されてきたベクトル型コンピュータは、性能の向上が限界に近づきつつあるとの認識が広まっており、現状の1,000倍もの高速化は難しい。このような演算性能の向上は、最近注目されるようになってきた超並列コンピュータによって実現されるであろう⁽⁶⁾⁽⁷⁾。しかし、超並列コンピュータは汎用コンピュータとしては適切ではないとの指摘もあり、並列型コンピュータを計算エンジンとし、ベクトル型コンピュータを主計算に用いる混合型の利用が当面は最適な利用形態と考えられる。並列コンピュータは現在草創期にあり、様々なアーキテクチャのコンピュータが存在している。これらの中からスーパーシミュレータを実現するために最も適切なものを見極める努力が必要となる。

3. 超高速ネットワーク

スーパーシミュレータは、主計算、計算エンジ

ン、可視化等の部分ごとに別個のコンピュータを接続し、利用者にとって1台のコンピュータであるかのように取り扱うことができる形にシステムを構築する必要がある。このシステムでは、スーパーシミュレータを構成するコンピュータ間を、高速で大量のデータを転送できるLAN(Local Area Network)が必須の技術となる。また、スーパーシミュレータは幅広い層の人々が利用できるものでなければならない。これを実現するためには遠隔地からシミュレータを利用できるシステムにしなければならない。リモートユーザが遠隔地からスーパーシミュレータを利用することを可能にするためには、高速なWAN(Wide Area Network)も必要となる。

4. AI・データベース

スーパーシミュレータは非常に大規模なコードであり、最先端の数値解析技術を使用するため、従来のコード体系の延長線上でシステムを構築すると、高度な専門家以外はシミュレータを利用することが困難になる。そこで、専門家の知識をコンピュータに取り入れ、利用者がシミュレーションを実行することを支援するAI(特に、数値解析支援エキスパートシステム)を導入しなければならない^{(8)~(10)}。

また、解析の支援という意味ではデータベースも重要な技術である。解析支援に用いられるデータベースはサイエンティフィック・データベースと呼ばれ、技術開発の局面に現れる、企画、詳細化、分析と検証、結果の提示、コミュニケーションといったすべての要素を支援する様々なデータを蓄積し、必要に応じてシミュレータの利用者に提供することを目的とする。特に、大規模シミュレータにおいてはサイエンティフィック・データベースが極めて重要な役割を果たすと考えられる。また、解析結果を蓄積し、再利用することを可能にするため、解析結果をデータベース化することも必要となる⁽¹¹⁾。

5. 3次元可視化技術

スーパーシミュレータは専門家以外の利用も想定するため、解析結果は誰にも理解し易い形に可

視化することが重要である⁽¹²⁾。従来のような数値を単純にグラフ化する手法では、十分な専門知識を持った専門家だけが解析結果の意味を理解することができた。また、専門家の場合にも1次元の単純な解析の場合には、従来の可視化でも解析結果の理解は比較的容易であるが、3次元解析の場合には数値あるいは従来の可視化手法による結果の理解は極めて困難なものとなる。原子力発電所を詳細に模擬するためには3次元の解析が必要であり、3次元の解析結果の理解を支援するためには実際の物理現象に即した形で3次元の可視化を行う必要がある。

解析結果を実際の物理現象に即した形で可視化する技術に対して、従来の visualization という言葉にかわって realization という言葉が使われるようになってきた⁽¹³⁾。より進んだ realization の手法として、仮想現実感、レーザーホログラフィーなどの研究も盛んに行われており、特に仮想現実技術は様々な分野での開発が進んでいることから、コンピュータのインターフェイスの将来の標準になる可能性もある⁽¹⁴⁾。スーパーシミュレータでも運転訓練に使用する場合には、このような高度なインターフェイスを持つことは重要であると考えられる。可視化技術の開発は科学技術分野よりもむしろ他分野で進んでおり、これらの開発された可視化技術を科学技術分野へ取り込んでいく努力が必要とされる。

以上の5項目がスーパーシミュレータを実現するうえで必要となるキーテクノロジーである。スーパーシミュレータの開発は、これらのキーテクノロジーを用いた高度な解析技術を開発することによって実現される。第4図に、従来の解析技術とスーパーシミュレータを実現するために必要となる高度な解析技術を比較する概念図を示す。これらのキーテクノロジーはいずれも最先端のテクノロジーであり、基礎的な研究・開発の段階から関連分野と連携して開発を進める必要があると考えられる。

IV. 技術的目標

冒頭に述べた通り、原子力発電システムのスーパーシミュレータは、原子力発電所をコンピュー

タ上に再現し、通常運転時はもとより、異常や事故が起こった場合も含めたあらゆる状況を想定し、いろいろな角度から統合的なシミュレーションができると共に、原子力発電に関するあらゆる技術情報をデータベースとして統合的に管理し、かつ柔軟に活用することを可能にするシステムである。本章では、ここまで説明したスーパーシミュレータを実現する上で必要となる技術面での目標を概説する。

原子力発電のシミュレーションでは、通常時には熱挙動・流体挙動・中性子挙動、事故時にはさらに構造挙動・化学的核種挙動等を模擬する必要がある。現象を微分方程式で記述してこれを差分化した式を適切な境界条件と初期条件のもとで解くアプローチがなされている。現在のこのようなアプローチのほとんどは、主としてコンピュータの計算能力の不足のために、また一部は現象自体の理解の不足のために、空間次元は1点近似または1次元に縮約した計算が行われ、現象のモデル化には経験やモックアップ実験から推定したモデルが採用されている。

これらはもちろん実証試験の結果などと比較して改善を行なっていくことによって、それぞれの現象を比較的狭いパラメータの範囲内で記述していくことは可能であるが、より忠実に現象を模擬して詳細な過程を理解するためには、計算する空間次元を3次元にまで拡張していくことが不可欠である。また、より普遍的に広範囲の現象を対象とし、特に実験からの情報を得ることが困難な事象も取り込んでいくためには、現象のモデル化を極力物理的な次元にまで落とし、この段階でメカニスティック(機構論的)なモデルを採用していくことが必要である。

このうち、後者については最近行われ始めたミクロレベルの物理モデルに基づく計算手法が有用となることも期待される。例えば流体分野でいえば、最近ではセルラオートマトン法、分子動力学法といった粒子的な挙動のレベルの解析を行おうとする試みが成果を挙げている^{(15)~(17)}。第5図に、メカニスティックなモデルやミクロモデルの採用による解析の詳細化の概念図を示す。スーパーシミュレータではこのような動向を踏まえ、

従来の解析技術

高度な解析技術

第 4 図 従来の解析技術と高度な解析技術の比較

第 5 図 メカニスティックモデルやマクロモデルの採用による解析の詳細化

できるかぎり詳細な物理モデルを採用しなければならない。

また、現在の大規模システムの解析では、熱と流体など限定された一部分については構成要素を連成した解析を行なっているが、その他の構成要素はそれぞれを独立に解析し、その結果を持ち寄って全体システムの挙動を解析するアプローチがほとんどである。しかし、このアプローチによる解析では、構成要素間の相互の影響が強い場合には正確な解析を行うことが困難であると考えられる。例えば、苛酷事故の現象は、第 6 図に示すように、各種構成要素間の影響が強い複合現象が

多くの現象が複合要素による連成現象である。

第6図 苛酷事故の現象

多く、関連するすべての構成要素について連成して解析を行う必要がある。

スーパーシミュレータを利用するうえで実現されるべき重要なポイントの1つは、スーパーシミュレータがあらゆる利用者のニーズに応えるデータジェネレータであり、様々な利用者に対してそのニーズの目的やレベルに応じて柔軟なシミュレーションレベルの設定が可能なシステムとして構築されていることである。つまり、技術者が設計支援にシミュレータを使用する場合と、一般国民が原子力の安全性について概要を知る目的で利用する場合とは、その解析のレベルは自ずと異なってくるものと考えられる。したがって、スーパーシミュレータは、多様な連成現象を詳細に取り扱うコードのみでなく、多様なニーズに答えるための簡略なコードも持ち、利用者によって柔軟にその選択が可能なシステムでなければならない。

スーパーシミュレータを利用するうえで重要なもう1つのポイントが、シミュレーションの速度である。いかに正確な解析結果を得ることができる解析コードでも、解析に要する時間が実現象よりも極端に遅いと実用に耐えるものとはならない。例えば、運転訓練用シミュレータとして使用する場合には、少なくとも実現象と同じ速度で解

析できることが必要である。また、設計支援に用いる場合にはパラメータサーベイを行うことが想定される。この場合には、実際の事象推移よりも早いことはもちろん、解析に要する時間が短ければ短いほど、エンジニアリング・シミュレータとしての価値が高まる。したがって、スーパーシミュレータは実現象よりも高速な解析が可能とならなければならない。

詳細なシミュレーションにおいては、対象を微視的に見るのが重要となってくる。例えば炉心内の二相流の挙動にしても、ここの気泡や液膜の様相までわかる程度の解像度が少なくとも望まれる。しかし、原子力発電所の全体を同時にこのような微視的な目で捉えることは、いかにテラフロップス級(TFLOPS)のコンピュータでも不可能であり、対象範囲は自ずと局限されたものとなる。当面はこのような微視的シミュレーションの局限度と、実時間より速いシミュレーション速度とは、計算機の性能と容量の範囲でトレードオフの関係にある。長期的将来において演算性能がさらに3桁以上も向上すれば事情は一転するであろう。

運転訓練に用いられる場合のシミュレータは、対話的に機能することが必要とされる。このためにはコンピュータのディスプレイ上に単に画像を出力するだけではなく、より現実感のあるインターフェイスが必要になると考えられる。このようなインターフェイスとして、仮想現実感システムやレーザーホログラフィーといったものがある^{(18)~(20)}。仮想現実感システムは視覚のみならず、聴覚・触覚といった部分も含めて現実世界の中にいるかのような錯覚を与えるシステムである。コンピュータ上に原子力発電所を再現するうえで、この種の優れた MMI (Man Machine Interface) を持つことはスーパーシミュレータにとって必須の要件となる。

データベースの必要性については、前章で述べたが、データベースの形態としては、テキストや数値データだけではなく、スーパーシミュレータで実現されるあらゆるマルチメディア情報を取り扱え、データベースに蓄えられたデータの形態に応じた検索や比較の処理が柔軟にできることが要求される⁽¹¹⁾。このようなデータベースを実現する

ことは、解析の支援や解析結果の再利用によるコンピュータ資源の節約といった面で重要な役割を果たすものと考えられる。

V. 海外の動向

エンジニアリング・シミュレータについては、チェルノブイル原子力発電所の事故以来、苛酷事故を含む広範な事象・事故を解析可能な総合コードが必要であることが世界各国の共通の認識となっており、各国で総合コードの開発が進められている。米国では、BWR,PWRとともに解析可能な MELCOR コード, MAAP コード, フランスでは PWR が解析可能な ESCADRE コード, EC では BWR, PWR がともに解析可能な ESTER コードが開発されている。これらのコードは苛酷事故を含むほとんどすべての事象・事故が解析可能な総合コードであるが、開発コストやコンピュータ性能の制約のために細部を簡略化したモデルを採用しており、現状ではどのコードも最適評価はできないが、原子力安全解析の信頼性の向上のため、解析モデルを詳細化し、最適評価が可能なコードへと改良が進められている。

また、米国の運転員訓練用シミュレータの現状も興味深い。NRC 当局は各原子力発電所に、それぞれ性能が証明された 1 基のシミュレータを備えることを義務付けている。このシミュレータは設計ベース内の事象のみを対象としているが、RELAP5 ベースのフルスコープ・シミュレータの開発がアイダホ国立工学研究所で試みられており、今後の NRC の動向によってはこのようなフルスコープ・シミュレータの開発に大きな力が注がれる可能性もある。

ドイツでは 1985 年から並列コンピュータを利用した原子炉内の 3 次元中性子挙動解析コードの開発を行っていたが、現在は予算不足のため中断している。炉心溶融が発生した場合の炉内の発熱量を正確に解析するためには、3 次元の中性子挙動解析が重要な問題となる。したがって、スーパーシミュレータは苛酷事故を正確に解析するために炉心の 3 次元中性子挙動解析を行う必要がある。

以上述べたように、現在、前章までに述べてきたようなスーパーシミュレータを所有している国

はない。しかし、上述のいずれのケースでも解析の詳細化、インターフェイスの改善、模擬範囲の拡大といった方向性を示しており、これらの方向性はスーパーシミュレータでも重要なポイントとなることから、海外の最新の動向に常に注意を払い、有益な技術を常に取り込んでいこうとする努力が要求される。

VI. スーパーシミュレータの開発

1. 開発スケジュール

スーパーシミュレータの開発を進めるためには、開発のグランドプランの策定、最先端のテクノロジーをスーパーシミュレータに取り込むための利用技術獲得、そして習得したテクノロジーを利用したシミュレータの開発、最後にシミュレータの性能の検証という 4 フェーズを経ることが適切と考えられる。以下にこれらのフェーズで実施されるべき内容を示す。

(1) グランドプラン策定期

この時期にはスーパーシミュレータの概念設計を行なってその具体的な姿を明らかにし、その開発のグランドプランを明らかにすることが目的となる。その中に盛り込まれるべき要素技術を最先端のテクノロジーの中から抽出し、その開発・適用の計画を立案する。ただし、最先端のテクノロジーの動向を反映するため、計画の細部は常に見直しが必要となる。

(2) キーテクノロジーの利用技術獲得期

前述のキーテクノロジーは、現代科学技術の最先端のものであり、これをスーパーシミュレータに適用するためには、グランドプラン策定期に設計されたスーパーシミュレータの実現という目的に合わせて利用することを可能にする技術を獲得しなければならない。

(3) システム開発期

前フェーズまでに獲得した技術をもとに、解析モジュール、マンマシンインターフェイス・モジュール、AI・データベース・モジュール等を作成する。このシステム開発期でグラ

ンドプラン策定期に設計されたスーパーシミュレータを完成させる。

(4) 性能検証期

スーパーシミュレータはその性能を検証し、性能に対する保証を与えなければならない。解析モジュールは実験データとの比較など、系統的に詳細な検証を行う。また、使い勝手に影響するマンマシンインターフェイス・モジュールやAI・データベース・モジュールを評価するため、多くの利用者に対してシミュレータを開放してその性能を検証することも必要になってくるものと思われる。

さらに、完成したスーパーシミュレータの運用は、国民・国・技術者のすべてに原子力発電に関するあらゆるデータを提供するという目的を達成するため、あらゆる人々に対して開かれた運用がなされなければならない。また、スーパーシミュレータによって達成された成果を、国際貢献の一環として各国に提供することも重要である。

2. 役割分担

スーパーシミュレータは原子力の安全性実証の面で重要な役割を果たすことから、国の主導のもとに開発することが望ましい。開発には基礎的な研究のレベルから、より応用的なレベルまでが含まれる。基礎的な研究のレベルでは大学等の研究機関が中心になり、応用的なレベルでは民間の企業が中心となることが適切と考えられる。また、世界各国で行われている原子力や関連分野の最先端の研究の成果を取り入れていくことは、計画推進のために必要不可欠であると考えられる。したがって、国際協力も念頭において官・学・産の協力はスーパーシミュレータの開発に必要不可欠なものとなる。

以上、原子力発電用スーパーシミュレータの構想と開発計画について概要を述べた。今後、この計画にわが国の関係者が主体的に取り組んでいく中で、国際的にも大きく寄与し得る成果が挙がることを期する次第である。

—参考文献—

- (1) "Grand Challenge : High Performance Computing

and Communications", (1991), Office of Sci. and Technol. Policy.

- (2) 有馬朗人, 村上周三, 金田康正共編: "アドバンスドコンピューティング, 21世紀の科学技術基盤", (1986), 培風館.
- (3) General Accounting Office Report on Advanced Research Projects Agency's Role in High Performance Computing, May 1993.
- (4) 通産省機械情報産業局編: "リアルワールドコンピュータ・シミュレーションパラダイム", (1992), 産調出版.
- (5) 秋山 守, 星野 力, 清水彰直, 宮 健三, 高橋 博, 岩田修一, 矢川元基, 中川雅俊, 近藤駿介, 原子力誌, 34 (3), 3~36 (1992).
- (6) 川合敏雄, 小柳義夫, 村岡洋一, 鈴木則久: 「超並列」のパラダイム, 日経サイエンス, 8月号, (1992).
- (7) 矢川元基編: 計算力学における並列コンピュータ・シミュレーション, コンピュータ・コントロール, 40 (1992).
- (8) 吉川栄和, 水谷直樹, 中尾賢一郎, 若林二郎: 原子力誌, 30 (8), 699~713 (1988).
- (9) ANDREWS, A.E.: Progress and challenges in the application of artificial intelligence to computational fluid dynamics, *AIAA-87-0593*, 1 (1987).
- (10) BURNETT, J.S., ENGELMORE, R.S.: SACON: Knowledge based consultant for structural analysis, *Proc. 6th Int. Conf. Artificial Intelligence*, 47 (1979).
- (11) JAIN, R.: Multimedia database, *SIGGRAPH '93 Course Notes*, 57 (1993).
- (12) KAUFMAN, A.(Ed.): "Introduction to Volume Visualization, in Volume Visualization", (1991), IEEE Computer Sci. Press.
- (13) 藤代一成: ビジュアルライゼーションからリアライゼーションへ, *PIXEL*, 122, 83~86 (1992).
- (14) 藤代一成: CAE; サイエンティフィックビジュアルライゼーションの新たな展開, 第3回ジャパンAVSカンファレンスプロシーディングス, (1993).
- (15) FRISH, U., et al.: *Complex Systems*, 1, 649~707 (1987).
- (16) 高橋亮一, 松隈洋介: 機 論, 58[545B], 106~110 (1992).
- (17) ROTHMAN, D., KELLER, J.M.: *J. Stat. Phys.*, 8, 1119~1127 (1988).
- (18) 広瀬通孝: 仮想現実感(バーチャルリアリティ)の現状と将来展望, 可視化情報, 12 (46), 161~167 (1992).
- (19) BURGER, R., et al.: Applied virtual reality, *SIGGRAPH '93 Course Notes*, 23 (1993).
- (20) BRYSON, S., et al.: Implementing virtual reality, *ibid.*, 43.