

研究課題別事後評価結果

1. 研究課題名： 原子力発電プラントの地震耐力予測シミュレーション
2. 研究代表者名及び主たる研究参加者名(研究機関名・職名は研究参加期間終了時点):
研究代表者
吉村 忍 (東京大学大学院工学系研究科 教授)
主たる共同研究者
堀 宗朗 (東京大学地震研究所 教授)
中島 憲宏 ((独)日本原子力研究開発機構システム計算科学センター 次長)
河合 伸一 ((独)防災科学技術研究所 主任研究員)
酒井 理哉 ((独)電力中央研究所地震工学領域 主任研究員)
折田 修一 (東京電力株式会社原子力設備管理部機器耐震技術グループ 主任)

3. 研究実施概要

本チームでは、原子力発電プラントの真の地震耐力の定量的予測を行うことを目的に、稼働中ないしスクラム直後の過渡状態にある原子力発電プラントの機能限界を、マルチスケール・マルチフィジックス統合シミュレーションにより定量的に見極める地震耐力予測シミュレータを研究開発した。

吉村グループでは、地震耐力予測シミュレータのうち、建屋・機器解析システムの研究開発を担当した。有限要素法による並列構造解析ソルバADVENTURE_Solidの高度化とマルチフィジックス連成カプラADVENTURE_Couplerの研究開発により、建屋および炉容器の解析、内部流体の付加質量を考慮した連成解析が可能となった。また、同様の連成解析の手法を用い、大規模構造物中に存在するき裂の進展挙動シミュレーションに適した手法の開発も行った。解析を支援するソフトウェアとして、細分割機能を持つ階層型領域分割ツールADVENTURE_Metis Ver.2、多点拘束や連成解析に必要な境界条件データを作成するADVENTURE_BCtool Ver.2、大規模モデルの可視化をオンラインまたはオフラインで行うとともにウォークスルー可視化を行うADVENTURE_POSTtoolの研究開発も行った。これらを総称してADVENTURE2と呼ぶ。これらのソフトウェアは、代表者がリーダーを務めるADVENTUREプロジェクトのホームページにて、ソースコードを無料で2012年8月より一般に公開している。さらに、平成21年度より次世代スーパーコンピュータ用アプリケーション開発強化支援の一環として、ADVENTURE_Solidに次世代スパコン「京」向けのチューニングを施し、4,096ノードでピーク性能比31%を達成した。

堀グループでは、マルチスケール構造・連成モデリングを担当した。これは、地震が発生する断層を含む地殻、原子力発電所建屋周辺の地盤、鉄筋コンクリート造の建屋を対象とするもので、Macro-Micro-Analysis (MMA)と名付けたマルチスケール有限要素法を適用し、地殻のキロメートル単位の空間スケールから、建屋のセンチメートル単位の空間スケールを計算するマルチスケール解析を行った。MMAでは、特異摂動解析に基づくことで、数理的に厳密なマルチスケール解析を行った。また、波動問題に特有の数値分散に対処するため、MMAでは粒子離散化手法に基づく離散化を採用した。さらにMMAでは、億単位の次元のマトリクス方程式を高速に解くため、独自の前処理を施した共役勾配法の開発も行い、実装している。

中島グループでは、耐力シミュレーションシステムの構築、および地震時の炉内核熱振動解析および気液二相熱流動解析を可能とするためのコードの開発およびシミュレーションを担当した。耐力シミュレーションシステムの構築では、マルチスケール構造モデリングおよびマルチスケール連成モデリングの連携を実現するために二つの開発を行った。一つは、異なる計算機あるいは大規模並列計算機のノード間で実行されるマルチスケール・シミュレーションコード間のデータ変換機能を実現するグリッド機能の開発である。もう一つは、異なるスケールや物理を有するシミュレーションコード間のデータの受け渡しを実現する連成データ変換機能の開発である。また、核熱連成振動解析では、地震時の炉心発熱シミュレーションを行うためにコードを改造し、炉心での熱発生と流動の相互フィードバック効果による中性子束と流動の振動状態の安定性(核熱水力安定性)およびシステ

ム熱水力挙動を解析的に評価した。熱流動解析では、3次元熱流動解析技術の高度化を図り、炉内構造物等の変形時の大規模な熱流動シミュレーションを可能とした。これらの研究開発を通して、炉特性に対する地震の影響を初めて定量的に示すことができた。

河合グループでは、堀グループおよび折田グループと連携をとりながら、地震動および地盤に関するデータの収集・整理を行い、地震動および地盤に関するデータの提供を進めた。

酒井グループでは、大規模数値シミュレーション技術の高度化のため、複雑な物理現象を適切にモデル化し、解析結果の妥当性を実験により確認する研究を進めた。原子力発電プラント全体解析を実施する上で、従来の解析モデルで十分考慮されていない、建屋(コンクリート)と機器(鋼構造)の接合箇所に着目した力学実験を行い、非線形振動応答挙動を把握するとともに検証データを取得し、ADVENTURE_Solidを用いたシミュレーション解析により解析精度を確認した。

折田グループでは、代表的なBWR-5型プラントの諸元に基づき、原子炉建屋、原子炉格納容器、原子炉圧力容器、炉内構造物等の解析用デジタルデータを作成し、それらをマルチフィジックス解析用データとして提供した。解析用データの作成にあたっては、燃料集合体を詳細にモデル化し、原子炉圧力容器地震応答解析の結果を取り込み、熱流動解析と連成(マルチフィジックス解析)することを可能とし、また、3次元FEM解析モデルでは表現が困難だった冷却材(炉水)の影響を表現できるよう、冷却材FEMモデルは流体解析との連成を可能なものとした。さらに、地質・地盤のデジタルデータの作成に資する実プラントデータの公開・提示、他のグループが実施するマルチスケール・マルチフィジックス解析の結果に対して実務的な観点からの評価、耐震シミュレーションへのフィードバックを行った。

4. 事後評価結果

4-1. 研究の達成状況及び得られた研究成果(論文・口頭発表等の外部発表、特許の取得状況等を含む)

当初目標とした直下型地震による地震発生から地殻を伝搬し、建屋に至るまでの地震動の波動解析、地震動による建屋・原子炉容器・炉内構造機器に至る地震応答解析、炉容器や冷却材の流体構造連成解析などの一連のマルチスケール・マルチフィジックス領域の大規模シミュレーションシステムをほぼ完成させたことは、目標を十分達成したと高く評価できる。本研究は、研究代表者が開発してきたADVENTUREを始めとするプログラムを統合して原子力発電プラントの地震耐力予測を行うシミュレータを開発し、これを用いてBWR-5型プラントの諸元に基づく入力データからシミュレーションを実施する等、喫緊の問題に対応したもので、学術、技術上有為で、かつ社会に貢献できる成果を上げている点も評価できる。

当初計画では想定されていなかった新たな展開として、2011年3月11日の東日本大震災以降、本研究の重要性が一層認識されたと理解する。地震発生直後の原子炉の状況が、本研究成果である地震応答解析及び流体構造連成解析により精度よく再現できるならば、是非解析を進めるべきである。実際に進めるには、データ入手の困難さ等、種々の障害があることは予想されるが、未だ実施していないということで、新たな展開で成果が得られたとは今の段階では言えない。今、この分野は国民から大いに期待されていることを考えると、少し歯がゆく感じられ、何とか開発した成果を早く世の中の人に示してやろうという気概を持って、是非解析を進めていただきたい。もう一つの新たな展開として、「京」への実装を行い、4,096ノードで実行性能31%を達成したことは、望ましい成果であった。

外部発表に関しては、チームの大きさと比して、原著論文が和文誌27件、欧文誌21件というのは少ないと言わざるを得ない。しかし、本課題の目標は計算プログラムの開発であり、そちらの方では十分な成果が得られたので、論文発表については良しとしたい。招待講演の国内会議4件、国際会議17件も多いとは言えないが、同様に良しとしたい。本課題はプログラム開発の色彩が濃く、論文発表に手が回りかねた面もあると推察できるので、今後の更なる発表に期待したい。一方、国内・国外でワークショップを開催し、また、海外の会合においてオーガナイズドセッション等も実施しており評価できる。また、本研究の社会的な重要性が増していることから、社会リテラシーに通じる学術成果もあればさらに良かったように思われる。例えば、成果や研究内容を新聞等の媒

体で発表し、一般の人の認知度を高め、研究に対する支持を得ることが望まれた。

知的財産権の出願および活用に向けた取り組みについては、特許出願は研究戦略によるので一概に評価は出来ないが、実用できる成果は得ており、開発したプログラム等は公開されている点は評価できる。

研究の進め方については、地震波伝搬、建屋の構造解析、原子炉内の構造連成解析、核熱振動など、異なる分野の研究チームが連携して、広い分野に亘る横断的研究を発散しないように取り纏めて本研究を適切に遂行したことは、体制面においても研究代表者のリーダーシップにおいても適切であったと評価出来る。シミュレーションに関しては各グループの連携は十分に図られており、さらに、実験グループや、データ提供グループとの連携も十分に行われている。吉村グループのみならず地震研の堀グループ、JAEA の中島グループも同様に大きな成果を上げた。研究費の執行状況は各グループに適正に配分されたと評価できる。

4-2. 研究成果の科学技術や社会へのインパクト、戦略目標への貢献

研究成果の科学的・技術的インパクト、国内外の類似研究と比較したレベルや重要度に関しては、本研究のような地震動解析から建屋・原子炉内部までの一連のシミュレーションシステムは世界でも初めてのものであり、かつ、マルチスケール・マルチフィジックス応用として、世界でも最大クラスの構造解析用超大規模シミュレーションシステムということで、その技術的なインパクト及び重要度は十分に高いと言える。また、実用問題においてこれだけ大規模な解析が行える基礎となっている ADVENTURE 関連の基幹アルゴリズム(連成を含む)は、ソフトの完成度とも相まって、国際計算力学連合(IACM)関連の計算力学のトップの国際会議において Plenary Lecture に頻繁に取り上げられ、国際的に認知されるようになってきており、国際的にも十分高いレベルの成果であると言える。このように、統合という観点からはユニークである一方、個別手法の独創性に価値観を置く海外研究に切り込むには、要素技術を更に磨く必要があり、今後に期待したい。

戦略目標に向けての貢献、成果の社会的なインパクトの見通しとしては、マルチスケール・マルチフィジックス分野の応用と大規模シミュレーションシステムという観点では、システムは当初目標通りほぼ完成し、戦略目標への貢献は大きいものがある。また、東日本大震災以降、本研究は社会的な重要度がさらに増したと考えられ、発電プラントの耐震耐力評価に寄与できるという点で社会への貢献度は大きい。本シミュレーションシステムは、**3.11 東日本大震災における原子力事故を再び引き起こさないようにする術を科学的に与えるポテンシャルを有しており、また、本研究課題は否応なく社会と密接に関わるものなので、その真価は今後明らかになると思われる。**

今後、研究成果のさらなる展開が期待できるかについては、本研究の成果は、実際場で使われなければ最終的な成果とは言えない。本研究の地震動解析は直下型を想定しているが、さらに今後想定される東海・東南海地震などの海溝型地震にも適用範囲を広げ、このような巨大地震に対する耐力予測が出来れば、成果の大きな展開が期待できる。また、東日本大震災直後の原子炉機器損傷の有無については、本研究成果により推測することが出来るはずであり、実際に行ってみることを期待する。本研究では、津波による影響については想定していなかったが、津波による影響についても、研究を発展させる必要がある。これらが可能となれば、設置済み原子炉の耐性予測や、さらに福島原子力発電所にも適用することにより、今後の福島原子力発電所の事故処理対策にも貢献することが出来る可能性があると考えられる。

その他特記すべき事項としては、中間評価でも同様のことを述べたが、このタイプの研究の評価はその研究成果がどのように使われるかによって大きく異なる点に注意する必要がある。もし、(1)この種の研究が真に原子力発電プラントの耐震力を予測して、国や国民にプラントの安全性に関する正しい情報を提供しようとするものであれば、その研究は大いに評価できる。しかし、もし、(2)プラントの安全性に関して、国や電力会社が住民を説得する根拠としてそれが使われるのであれば、それは問題があるといわなければならない。福島

の原子力発電所の災害で原子力発電所の安全性に関する根本的な疑問が投げかけられている現時点において、この視点を欠いたいかなる研究も意味をなさないことを銘記しておいていただきたい。

また、①今後も原子力関係の研究は、廃炉や核燃料サイクルの検討等、多くの課題がある。従って研究者の養成も重要な課題であることから、ぜひ、多くの学生が当該分野の研究に参加するように、普及啓発活動にも注力をお願いする。②各事故調査委員会で議論が分かれている、福島第一原子力発電所1号炉において、地震によって機器の損傷が発生したか否かについて、本研究の成果を用いて行う技術的な検証は、今後の原子力発電所の再開等における検討に技術的な根拠を与えるものであることから、早急な研究の進展を望む。

4-3. 総合的評価

本研究は、マルチスケール・マルチフィジックスシミュレーション現象の高精度な解を求める技術開発という点では、手法そのものは従来からの改良・高度化ではあるものの、大規模化・超並列化を図り、世界的にも初めての試みである地震動解析と連動させて原子炉の耐性評価を行うシステムを完成させ、また、世界的にも類を見ない超大規模な構造解析を可能としたことは、本研究領域の目標を達成し、十分な成果が得られていると高く評価できる。地震の地盤と建屋の連成シミュレーションコード MMA、建屋と原子炉容器の連成シミュレーションコード ADVENTURE2、原子炉内部の材料-流体-熱特性の解析コード (TRAC-BF1/SKETCH-INS および ACE-3D)を統合するコード体系の完成のみならず、地盤や建屋と機器の接合部の関するデータ取得という、ハード面の研究グループとの連携を密にして行った研究であることも、その評価を高めている。当然のことながら、この成果は第一歩であり、現実の原子力発電所で要求される過酷な安全性に対する科学的評価に耐えていくためには、信頼性に関して残されている個々の課題を解決し、更なる改良・高度化を図る不断の努力が求められるであろう。現実の問題を取り扱うためには計算力学の統合は必須であるが、同時に困難なテーマでもある。本研究はその先鞭をつけた意欲的研究としても高く評価したい。

本研究開始直前と実施中の2度にわたって、原子力発電所が大規模な地震に襲われ、本研究の重要性が十分認識されたが、本研究の場合は、成果が実際場で使われなければ、成果は無かったに等しい。今後は更なる改良・高度化を図るとともに、原子炉の耐性評価、福島原子力発電所の地震直後の機器解析等、実際場で使われることを大いに期待したい。