

企画セッション | 部会・連絡会セッション：計算科学技術部会

📅 2021年9月10日(金) 13:00 ~ 14:30 | 🏢 G会場

[3G_PL] 原子力における仮想空間の活用

座長：鈴木 喜雄 (JAEA)

[3G_PL01] バーチャル原子炉実習の紹介

*若林 源一郎¹ (1. 近畿大)

[3G_PL02] 過酷事故解析コードSAMPSONの最新動向

*茶木 雅夫¹ (1. エネ総研)

[3G_PL03] デジタルツインにおけるV&V

*越塚 誠一¹ (1. 東大)

計算科学技術部会セッション

原子力における仮想空間の活用

Utilization of the virtual space in a nuclear field

(1) バーチャル原子炉実習の紹介

(1) Introduction of the Virtual Reactor Workshop

*若林 源一郎

近畿大学

1. はじめに

近畿大学原子炉（UTR-KINKI）は熱出力 1 ワットの教育訓練用原子炉であり、原子力を専門とする学生だけでなく、理科教員を対象とした研修会や、国内外の技術者等の研修にも広く活用されている。このうち学生実習については、参加学生の旅費を継続的に確保する仕組みがなく、希望する学生が確実に実習に参加できないため、学生を送り出す大学側も実習を単位化できないことが長年の課題となっていた。さらに近年、原子力規制の強化によって施設への立入人数が厳しく制限されるようになり、原子炉の教育利用の機会が制限されつつあった。そこでこれらの問題を克服するため、TV 会議システムを活用した原子炉遠隔実習システムの整備を計画した。令和元年度の文部科学省・国際原子力人材育成イニシアティブ事業に提案したところ幸いにも採択されたので、早速整備を開始したところ、同年度末から新型コロナウイルスの感染拡大が始まり、図らずもオンライン実習が大活躍することになった。

2. 原子炉遠隔実習システム

原子炉の制御コンソールから、制御棒位置や核計装の検出器出力等、実習に必要な運転パラメータ信号を取り出し、LabVIEW を用いて PC 上に表示するバーチャルコンソール (VC) を製作した (図 1)。この画面を TV 会議システムの画面共有機能を使って遠隔地の PC と共有する。当初の計画では、近畿大学での実習に参加した学生のフォローアップとして、遠隔地の教室に集まった学生に対して現地で教員が VC 画面を見せながら実習指導をすることを想定していたが、新型コロナウイルス感染拡大のため、実習全体をオンライン開催することになり、参加者は自宅から各自の PC で参加する形式となった。そのため VC 画面だけでなく、原子炉の各所に設置した複数のカメラからの実況映像も交え、原子炉制御室から実習指導を行った。これまでに学生実習、理科教員対象の研修会、オンライン原子炉見学会を行った。

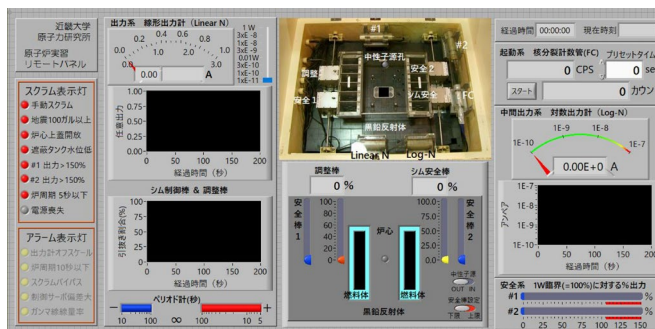


図 1 バーチャルコンソールの画面

画面を見せながら実習指導をすることを想定していたが、新型コロナウイルス感染拡大のため、実習全体をオンライン開催することになり、参加者は自宅から各自の PC で参加する形式となった。そのため VC 画面だけでなく、原子炉の各所に設置した複数のカメラからの実況映像も交え、原子炉制御室から実習指導を行った。これまでに学生実習、理科教員対象の研修会、オンライン原子炉見学会を行った。

3. おわりに

実物の原子炉施設における経験を遠隔実習で完全に代替することはできないが、従来からの課題を解決する手段としてはコロナウィルス終息後も活用できるのではないかと考えている。また、限られたマシンタイムの中で原子炉実習を効率的に提供したり、参加学生の教育効果を高めるために遠隔実習を活用できる可能性もある。今後もコロナ禍における代替実習だけでなく、その後を見据えて活用法を考えていきたい。

謝辞

VC の構築及びオンライン研修会の実施に当たっては、摂南大学名誉教授の山本淳治先生にご指導、ご尽力いただきました。ここに感謝申し上げます。

*Genichiro Wakabayashi

Kindai Univ.

計算科学技術部会セッション

原子力における仮想空間の活用

Utilization of the virtual space in a nuclear field

(2) 過酷事故解析コード SAMPSON の最新動向

(2) Latest trends in severe accident analysis code, SAMPSON

*茶木 雅夫¹, 木野 千晶¹, 手塚 健一¹¹エネ総研

1. はじめに

過酷事故時の原子力発電所内の詳細な状況の把握は事前、事後ともに一般に困難である。一方で、解析技術を活用し、過酷事故時の状況を出来るだけ詳細に仮想空間的に可視化することで事故防止や事故進展緩和、事故時のマネジメントに役立つ可能性がある。本報では過酷事故解析コード SAMPSON の最新動向を中心に今後の展望について紹介する。

2. 安全解析の概要と SAMPSON の位置づけ

原子力発電所の安全解析では燃料集合体の限界出力予測のための液膜、液滴といったミクロスケールの詳細解析がある一方で、RELAP や TRAC といった過渡事象や設計基準事故の解析用の空間スケールの大きいシステムコードもある。過酷事故時は燃料や圧力容器、さらに格納容器の破損等も想定する必要があり、MAAP, MELCOR といったコードが代表的である。SAMPSON は後者の過酷事故解析コードに属する。原子力技術の導入経緯から安全解析全般で米国由来のコードが多い中、SAMPSON は数少ない国産コードである。

2-1. SAMPSON の開発経緯と特長

1993 年から通商産業省（当時）の委託事業「IMPACT」として 10 年計画で開発された。その後も福島第一原子力発電所の事故進展、デブリ分布把握を目的とした国プロ等で高度化され、現在も開発を継続中である。SAMPSON は原子力施設内の過酷事故事象を、他の解析コードに比べ、可能な限り物理現象を正確に解析可能とすることを目指して開発されたコードである。また、空間分解能的にも詳細な解析が可能である。国産コードであるため、ソースコードへのアクセスが容易で、海外の過酷事故解析コードと比較して、コードの改良が容易という利点を有する。

2-2. SAMPSON の最近の解析事例

エネ総研は OECD/NEA プロジェクト ARC-F（福島第一原子力発電所の原子炉建屋および格納容器内情報の分析）に参画中である。SAMPSON は ARC-F の前身プロジェクトである BSAF プロジェクト[1]の結果を受けて物理モデル・解析安定性・速度・使いやすさを改良し続けており、現在は SAMPSON2.0 を用いて 1F 事故解析を実施している。その結果[2]の一例を図 1 に示す。

また、JAEA で開発された燃料集合体内

を詳細に解析可能なコード（JUPITER）[3]との連成解析技術を開発している。図 2 に SAMPSON/JUPITER 連成解析を Phebus 試験[4]解析に適用した例を示す。JUPITER による燃料集合体内の詳細な解析結果を反映しつつ、炉心を含む RPV/PCV/建屋全体を SAMPSON で解析することで、従来は困難であった炉心内の熔融進展を、4 次元空間(3 次元空間+時間)で可視化することも可能となる。

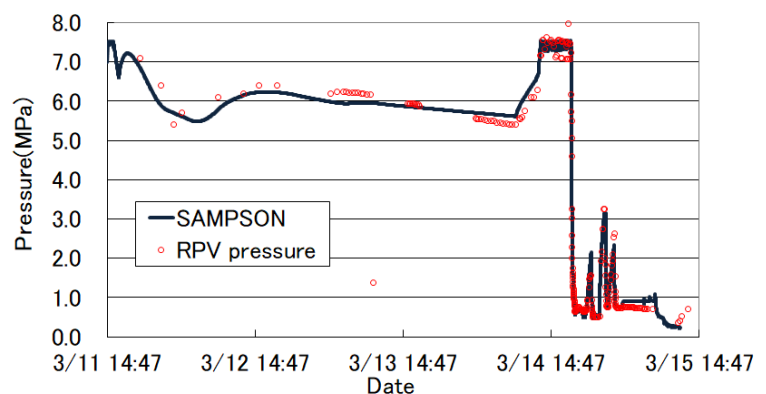


Fig.1 SAMPSON による 1F2 解析結果

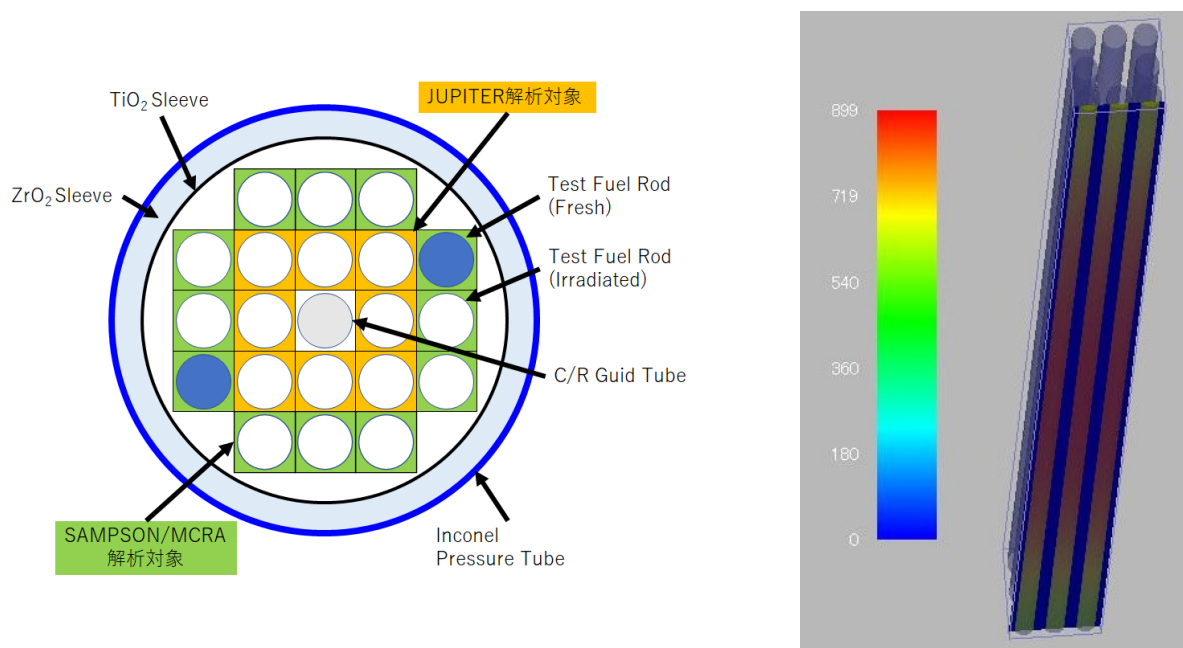


Fig.2 (a) Phebus 試験体系と SAMPSON/JUPITER 解析対象 Fig.2 (b) JUPITER で評価された燃料棒温度

3. SAMPSON の今後の開発方針

上述の通り、SAMPSON は過酷事故解析コードとしての詳細解析・メッシュの細分化や CFD も含めた連成解析等により更に長所を伸ばすことが可能である。一方で、SAMPSON は多額の公的資金を使って開発してきた経緯があり、広く、多くの方に公益目的で利用される形で普及を進める必要があり、内部で使用されている計算手法・相関式も幅広く、合理的な開発が重要である。そこで、2021 年 3 月より国内有識者で構成される委員により客観的で透明性のあるレビューを受けつつ最先端知見を積極的に導入するため、SAMPSON 開発運用普及委員会を立ち上げた。

SAMPSON のようなシステムコードの開発には様々な機関との連携も重要である。上記委員会等を通じてエネ総研は引き続き SAMPSON の開発を積極的に継続していく予定である。

- [1] OECD/NEA, Benchmark Study of the Accident at the Fukushima Daiichi Nuclear Power Plant Phase1 Summary Report, NEA/CSNI/R (2015)18, (2016).
- [2] 手塚 健一, その他 2 名, 日本原子力学会 2021 年春の年会, 1A04, (2021).
- [3] S. Yamashita, et al., "A numerical simulation method for molten material behavior in nuclear reactors", *Nucl. Eng. and Design*, vol. 322, pp. 301-312, (2017).
- [4] Jacquemain D., Burdon S., Bramaeker A., et al., FPT1 Final Report (Final Version), IRSN/DRS/SEA/PEPF report SEA1/100, IP/00/479, (2000).

*Masao Chaki¹, Chiaki Kino¹ and Kenichi Tezuka¹

¹The Institute of Applied Energy

計算科学技術部会セッション

原子力における仮想空間の活用

Utilization of the virtual space in a nuclear field

(3) デジタルツインにおける V&V

(3) V&V for Digital Twins

*越塚 誠一

東京大学

1. Society5.0 におけるデジタルツインの位置づけ

Society5.0 とは、日本政府の第5期科学技術基本計画において提唱された我が国が目指すべき未来社会の姿であり、サイバー空間（仮想空間）とフィジカル空間（現実空間）を高度に融合させたシステムにより、経済発展と社会的課題の解決を両立させる人間中心の社会である[1]。

Society5.0 では現実であるフィジカル空間のデータに基づいてコンピュータの中のサイバー空間にモデルを構築し、サイバー空間でのシミュレーションを通じてフィジカル空間に新たな価値をもたらす。こうしたシステムをサイバー・フィジカル・システム(CPS)あるいはデジタルツインと呼ぶ。ドイツ政府の提唱するインダストリー4.0 においても、ものづくりを主な対象としてサイバー・フィジカル・システム(CPS)あるいはデジタルツインの導入が展望されている[2]。

科学技術振興機構の報告書[3]に記載されているものづくりにおけるデジタルツインに、V&V を描き加えたものを図1に示す。様々な工学分野における現実の製品は、研究開発、設計、製造、保守という過程を経て利用される。こうしたそれぞれの過程に対応してサイバー空間にモデルを構築する。フィジカル空間にそっくりのモデルをサイバー空間に作り上げるため、デジタルツイン（デジタルの双子）と呼ばれる。デジタルツインが構築されると、サイバー空間におけるシミュレーションによって、フィジカル空間の製品の挙動を予測することができるようになる。特に、工学製品を製造した後の保守の過程においてもサイバー空間にモデルを構築することが想定されており、保守に関する様々なデータを、センサーを用いて計測してサイバー空間に取り込むことにより、高度な保守を実現することが目指されている。工学製品は顧客によって様々な使い方があり得るので、Society5.0 における人間中心の考え方に対応するためには、保守に対してもデジタルツインを構築するというのが重要である。

原子力発電所においては、これまで設計において様々な事故解析が行われ、安全な原子力発電所が建設されてきた。デジタルツインの考え方を導入すれば、従来の設計の過程における事故解析だけでなく、運転開始後においてもプラントのシミュレーションが行われるとともに、プラントの現状に関する計測データがそこに活用されることが考えられる。そして、トラブルが発生した場合に、計測データからトラブルの原因を予測したり、考えられる対応策の実施前にシミュレーションを行ってその影響を事前に検討したり、さらには対応策そのものが提案されるようにまでなれば理想的なデジタルツインが構築できたとと言えるであろう。

2. デジタルツインにおける V&V の役割

デジタルツインが有効に機能するためには、サイバー空間に構築されたモデルがフィジカル空間の現実を適切に表現できていなければならない。すなわち、サイバー空間でのシミュレーション結果の信頼性が確保されていなければならない。V&V (Verification and Validation, 検証と妥当性確認) は、シミュレーションの信頼性を高めるための方法論である[4]。Verification (検証) はシミュレーション結果がモデルの正しい結果となっているかを定量的に確認することであり、Validation (妥当性確認) はモデルが現実を正しく表しているかを定量的に確認することである。特に Validation は現実の挙動とシミュレーションの結果を突き合わせる作業であり、これを地道に繰り返すことでモデルの信頼性を高めることができると考える。

*Seiichi Koshizuka

The Univ. of Tokyo

工学シミュレーションに対する V&V の標準的な手順は、技術規格として日本原子力学会[5]、米国機械学会[6]等において作成されている。こうした規格では、構造計算、熱流動計算、核計算などシミュレーションに関わる広い分野に共通して適用することができる基本的な考え方が示されている。

米国機械学会からは 2018 年に医療分野の V&V の規格が発刊された[7]。そこでは意思決定と V&V の関係が記載されている。モデルの影響と意思決定の重要性をそれぞれ 3 段階で評価してマトリックスを作成し、モデルのリスクを導出する。同様な手順は NASA の規格[8]にも記載されている（ただし 5 段階評価）。たとえば、モデルの影響が大きく、かつ意思決定の重要性が大きい場合は、リスクが最大になる。この導出されたリスクから、V&V をどこまで慎重に行うべきかが決定される。リスクが最大の場合には、不確かさの統計量の定量化まで行わなければならないとされている。反対の視点からは次のように言うこともできる。V&V によって得られるのはシミュレーション結果の持つ不確かさである。不確かさとはリスクであるから、品質マネジメントの観点からは、意思決定にはシミュレーション結果だけでなく V&V によって得られる不確かさも考慮しなければならない。このように、最近の V&V の規格では意思決定と V&V の関係が記述される傾向が見られる。原子力分野におけるグレーデッドアプローチの考え方と対応していると考えられる。

参考文献

- [1] https://www8.cao.go.jp/cstp/society5_0/
- [2] 岩本晃一, "インダストリー4.0 ドイツ第4次産業革命が与えるインパクト", B&T ブックス (2015).
- [3] 科学技術振興機構, "戦略プロポーザル 革新的デジタルツイン ～ものづくりの未来を担う複合現象モデリングとその先進設計・製造基盤技術確立～", CRDS-FY2017-SP-01 (2017).
- [4] 白鳥正樹, 越塚誠一, 吉田有一郎, 中村均, 堀田亮年, 高野直樹, "工学シミュレーションの品質保証と V&V", 丸善出版 (2013).
- [5] 日本原子力学会, "シミュレーションの信頼性確保に関するガイドライン" AESJ-SC-A008:2015 (2015).
- [6] American Society of Mechanical Engineers, "Guide for Verification and Validation in Computational Solid Mechanics," ASME V&V 10-2006 (2006).
- [7] American Society of Mechanical Engineers, "Assessing Credibility of Computational Modeling Through Verification and Validation: Application to Medical Devices," ASME V&V 40-2018 (2018).
- [8] National Aeronautics and Space Administration, "Standard for Models and Simulations," NASA-STD-8009A (2016).

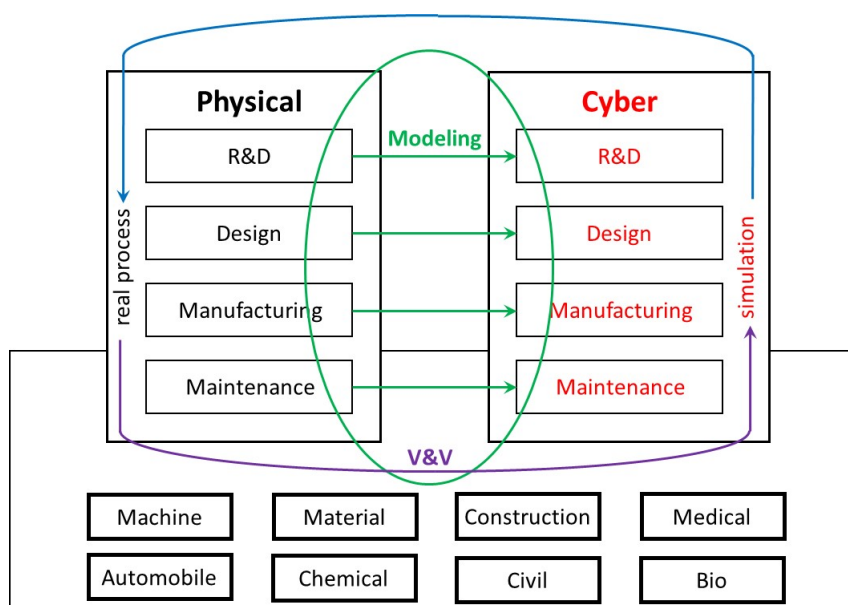


図1 ものづくりのためのデジタルツインにおけるモデリングと V&V の関係

