

ASME V&Vの紹介と予測の問題

東京大学
越塚誠一

計算結果の信頼性の重要性

- 産業においてシミュレーションが有用であるためには計算結果の信頼性の確保が重要
 - 品質保証の一環
 - シミュレーションの特徴を踏まえた方法論が必要

V&V (Verification and Validation)

(1) ASME Guide におけるV&V

(2) ISO 9001におけるV&V

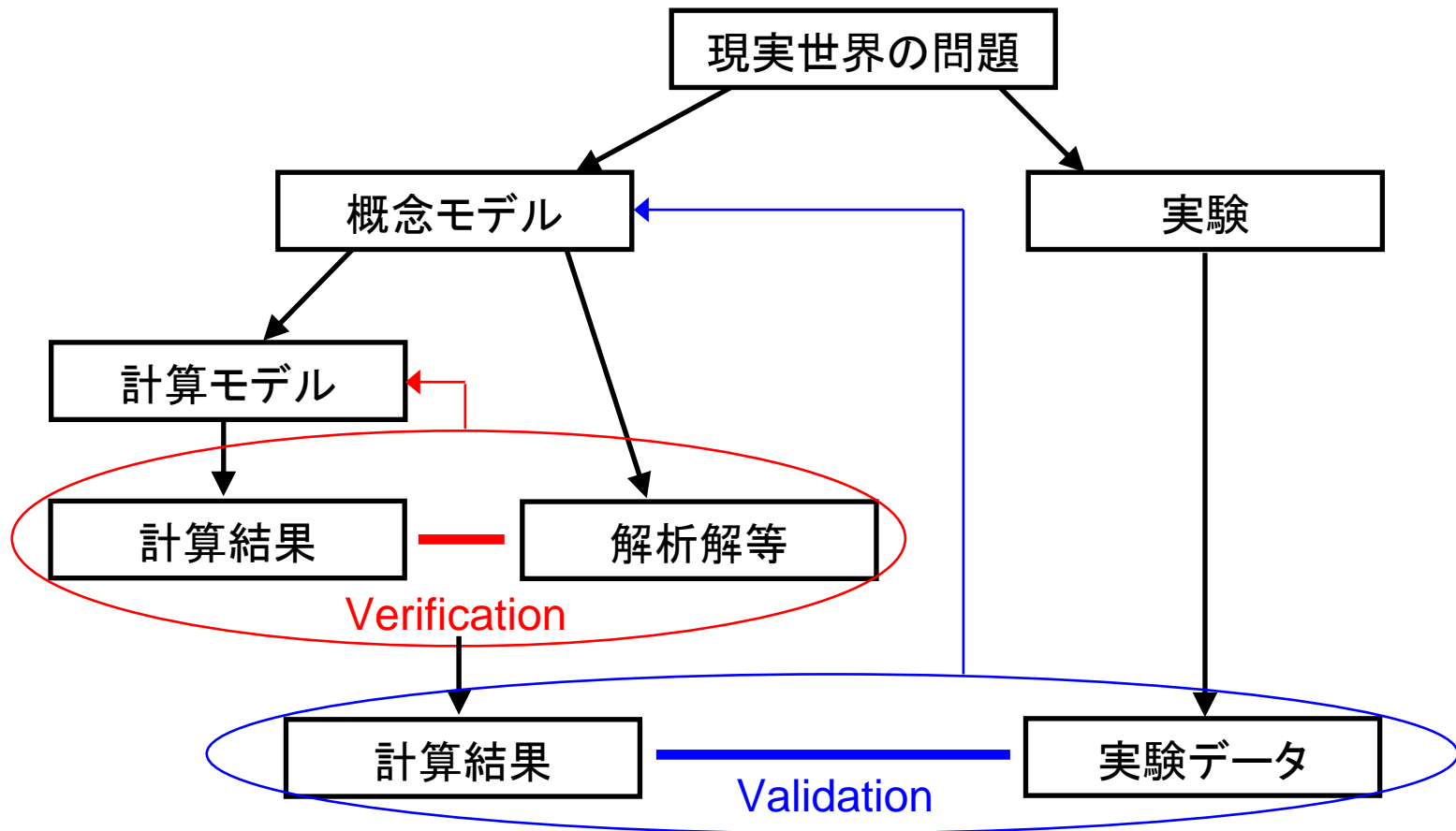
原子力分野における計算結果の信頼性

- 原子力プラントの設置許可申請時の安全解析
 - 高度なシミュレーションのニーズ
 - 計算精度に対する高い信頼性の要求(保守性)
 - 保守的解析から、最適解析＋統計誤差へ移行しつつある
- シミュレーション適用の広がり
 - 設計、建設、検査、保守での利用
 - 計算ミスなどのトラブルの発生
- 商用コードの普及
 - シミュレーションのブラックボックス化
 - 解析技術者の技量

Verification & Validation (米国)

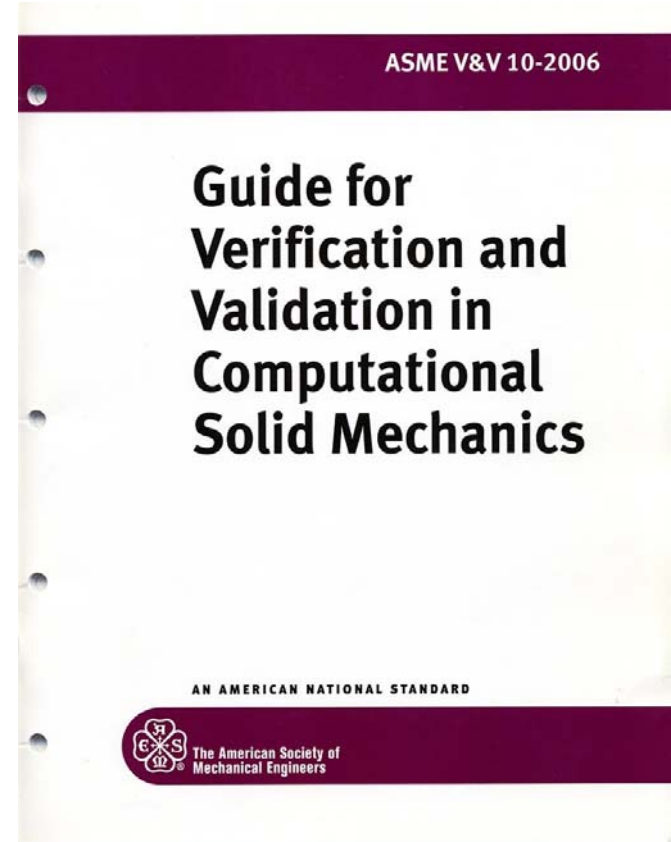
- ANS, 1987(R1998), Guidelines for the Verification and Validation of Scientific and Engineering Computer Programs for the Nuclear Industry, ANS-10.4-1987
- U.S.DoD, 1996(2003), "DoD Modeling and Simulation (M&S) Verification, Validation, and Accreditation (VV&A)," DoD Instruction 5000.61, Defense of Modeling and Simulation Office
- AIAA, 1998, Guide for the Verification and Validation of **Computational Fluid Dynamics** Simulations, AIAA G-077-1998, American Institute of Aeronautics and Astronautics
- ASME, 2006, Guide for Verification and Validation in **Computational Solid Mechanics**, ASME V&V 10-2006, American Society of Mechanical Engineers
- ASME, 2009, **Standard** for Verification and Validation in **Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer**, ASME V&V 20-2009, American Society of Mechanical Engineers

V&Vの概要



ASME V&V 10-2006

- **verification**: 計算が数学モデルを正しく表現しているかどうかを決める過程
- **validation**: 使用に対して実世界の物理現象を正しく表現しているかどうかを決める過程



Verification (検証)

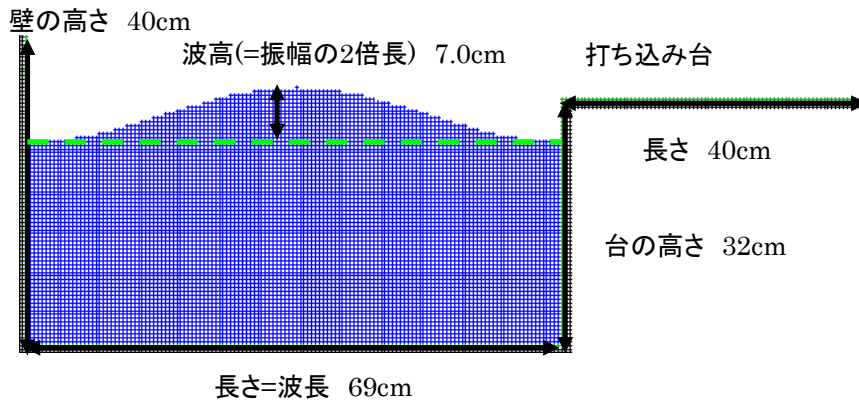
- 数学モデル(支配方程式)を離散化して計算した結果が、定量的にどのくらい正しいかを評価する。
 - 空間解像度の収束
 - 時間解像度の収束
 - 反復解法の収束
 - 品質管理的なミス(入力ミス、コードのバグ)
- 解析解、信頼できる高精度の数値解、などとの定量的な比較

Validation (妥当性確認)

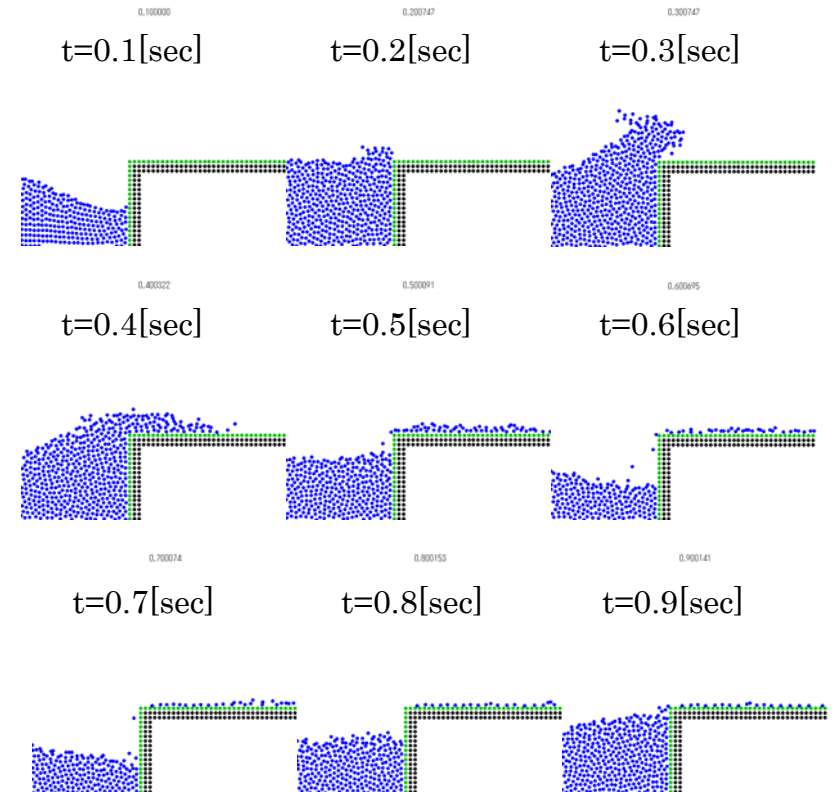
- 概念モデルが、実現象に対して定量的にどのくらい正しいかを評価する。
 - 実験との定量的な比較
 - 複雑なシステムでは、階層構造で実施される。
 - 単純な現象 → 複合した現象
 - Verificationされた計算に対して実施する。

打ち込み水の2次元計算(粒子法)

計算条件

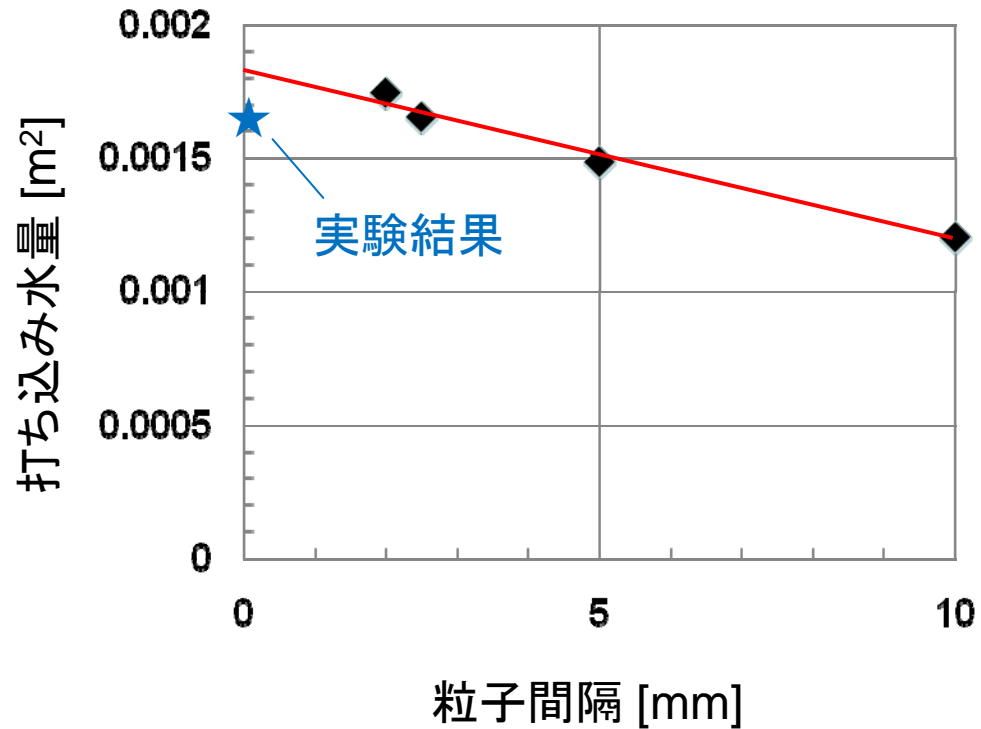
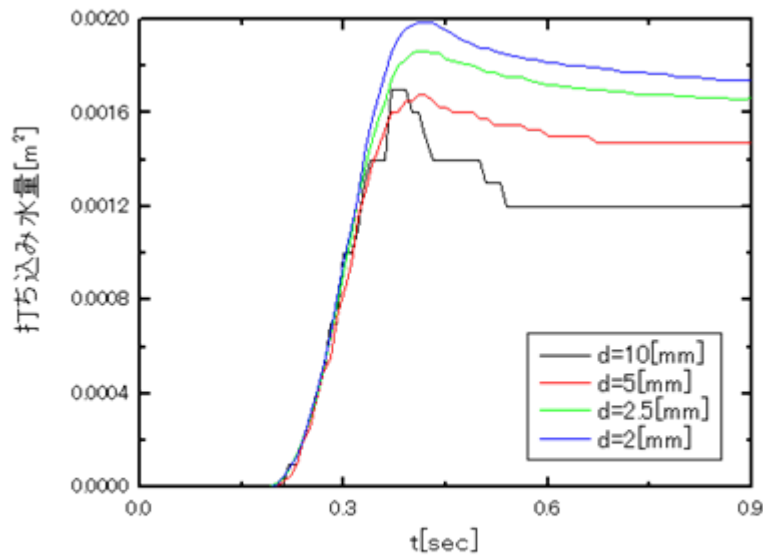


計算結果

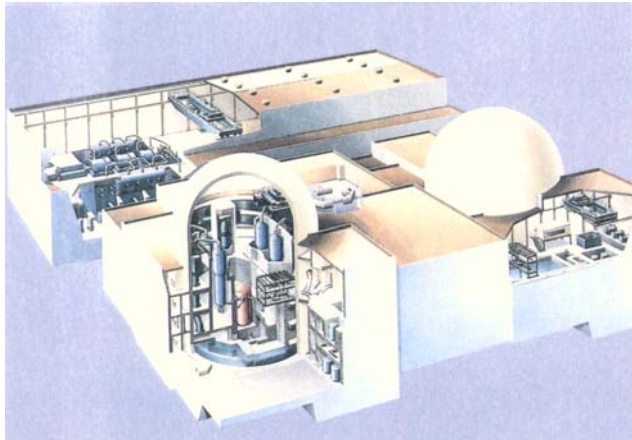


空間解像度の収束

粒子間距離 d	粒子数	計算時間
10 [mm]	2588	3分半
5 [mm]	9307	50分強
2.5 [mm]	35164	12時間半
2 [mm]	54169	32時間



原子カプルのシステム解析



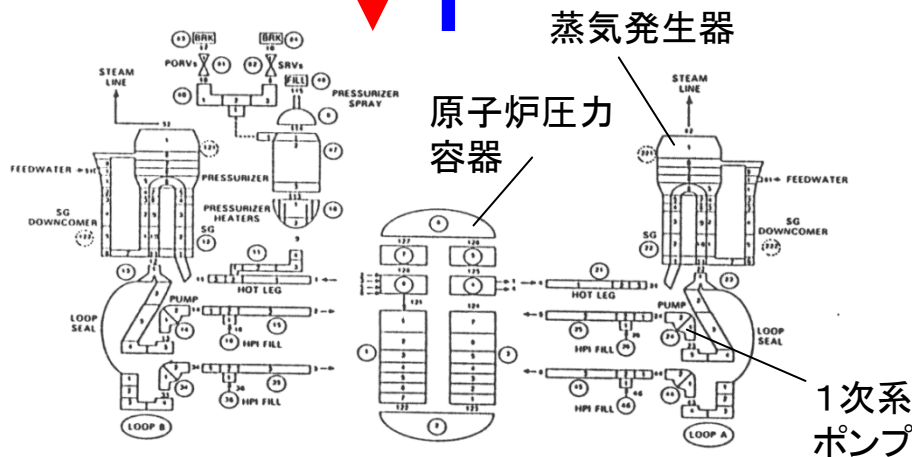
原子カプルの

敦賀3、4号炉(PWR)

モデリング



シミュレーション



システム解析コードにおけるモデル

- ・配管や機器をセルで近似
- ・セルの接続によってシステムをモデル化

冷却材喪失事故に関する安全解析

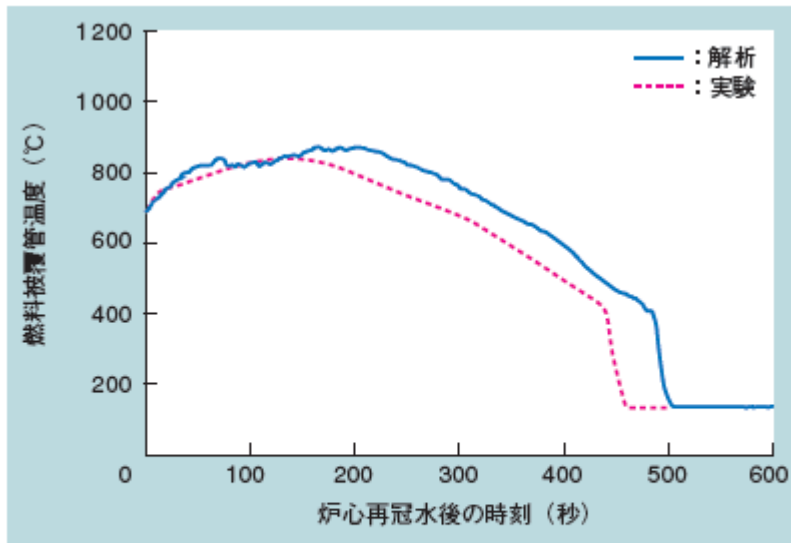


図3 MCOBRA/TRAC コードによる CCTF 試験解析例
炉心の最高出力領域において燃料被覆管最高温度は、
解析結果が試験結果を上回っている。

モデル実験との比較によるvalidation

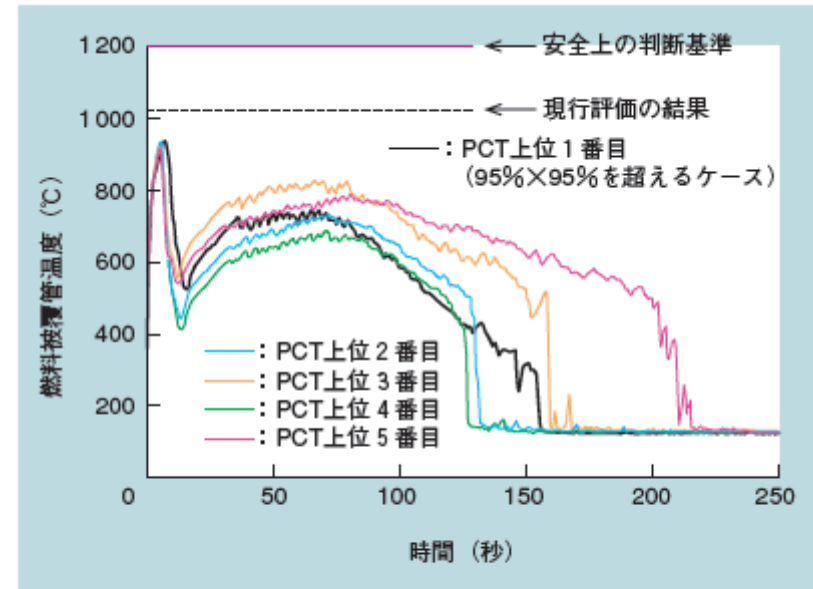
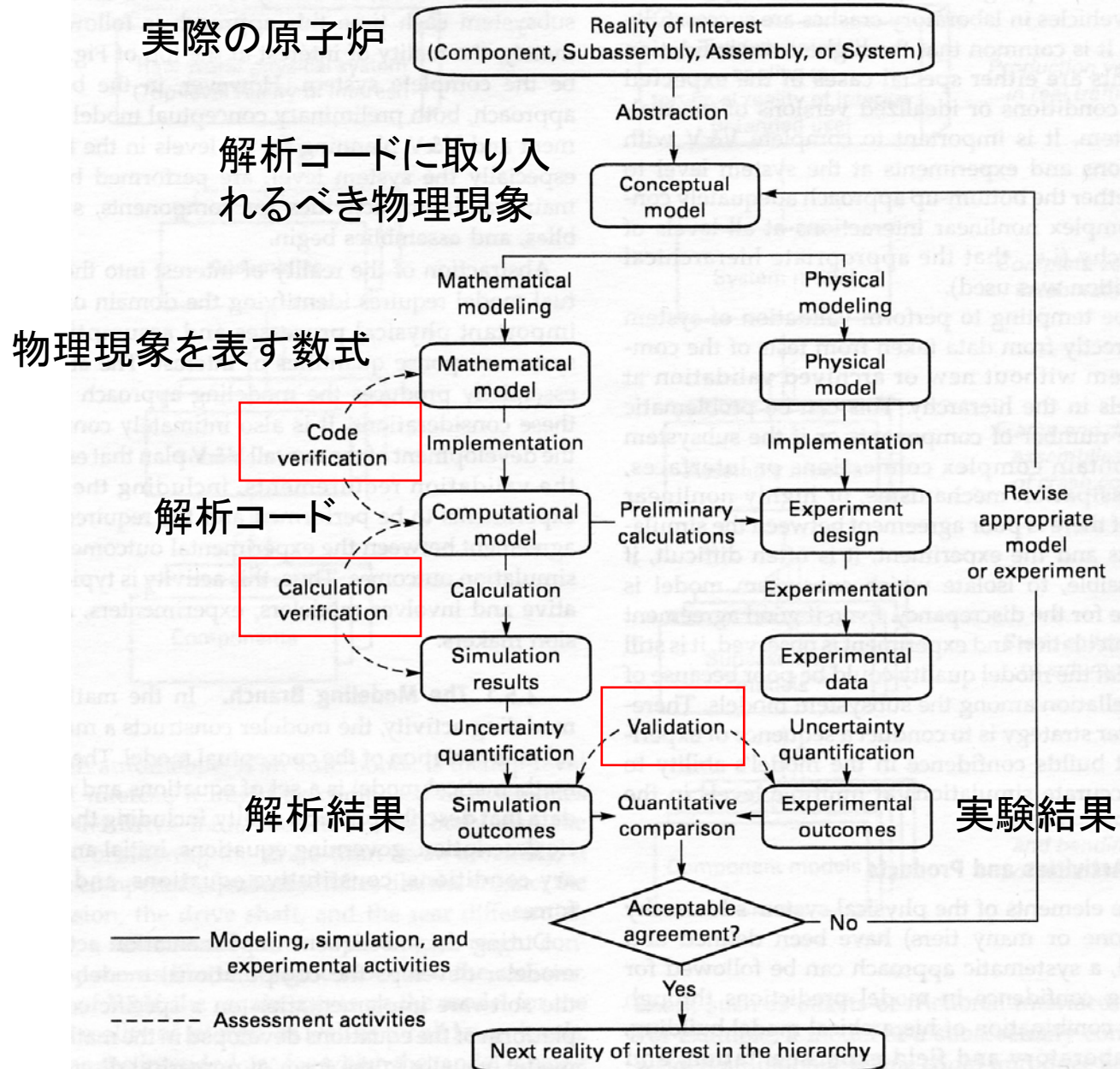


図4 順序統計法による計算結果例
燃料被覆管温度（最高値が上位1番目から5番目まで
のケース）の時間変化である。

実炉の解析

Fig. 4 V&V Activities and Products



コード開発の流れ

Fig. 5 Path From Conceptual Model
Computational Model

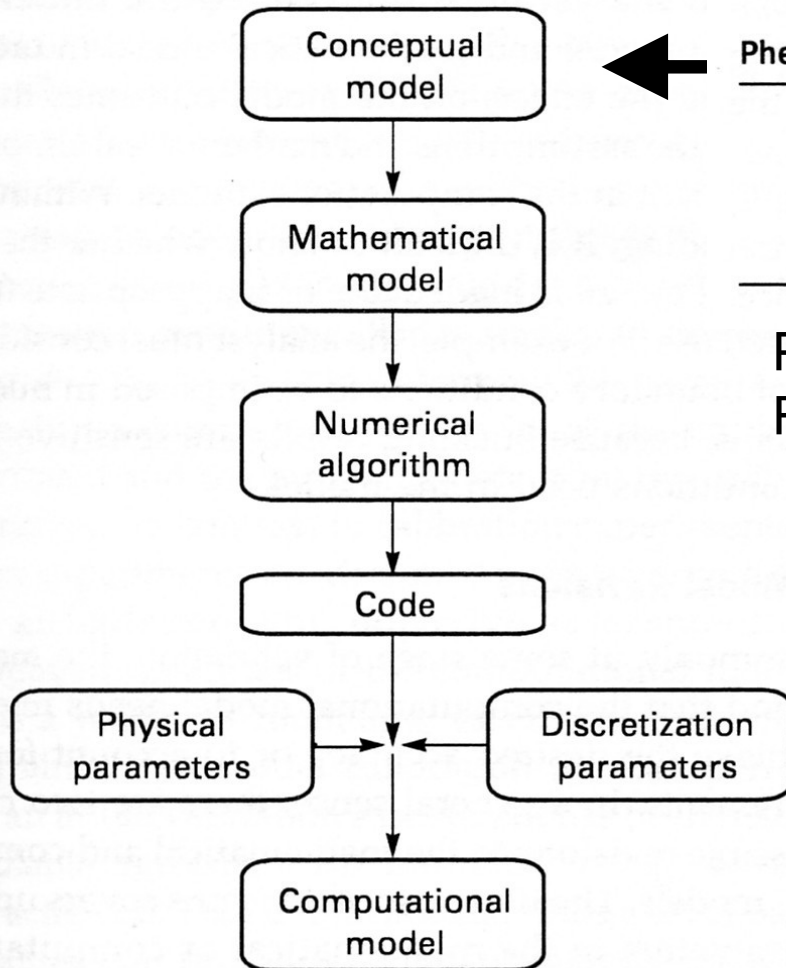


Table 1 PIRT Example

Phenomenon	Type of Phenomenon	Importance to Response of Interest	Level of Confidence in Model
A	Interface	High	Medium
B	Plasticity	Medium	High
C	Loads	Medium	Low
D	Fracture	Low	Low

PIRT (Phenomena Identification and Ranking Table)

- Conceptual Modelの作成に有用
- V&V計画の作成に有用

PIRTは原子力分野から生まれた概念
統計的安全評価手法にも用いられている

学会の動き(国内)

- 日本計算工学会において「シミュレーションの品質・信頼性に関する調査・研究」研究分科会(HQC研究分科会)が始まる。
 - 海外および国内の動向の調査
 - 方法論を確立するために取り組むべき課題の提言
 - ISO9001、NAFEMS
- 日本原子力学会
 - 計算結果評価法研究専門委員会 (2002-2005)
 - 2008春の大会企画セッション「計算結果の信頼性」
 - 標準委員会に学会標準を検討するタスク(2009)
 - 研究専門委員会設立に向けて申請(2010.4予定)
 - ASME V&V、分野横断(核・熱流動・構造)

ASME V&V Committee

- V&V Verification and Validation in Computational Modeling and Simulation
- V&V 10 Verification and Validation in Computational Solid Mechanics
- V&V 20 Verification and Validation in Computational Fluid Dynamics and Heat Transfer
- V&V 30 Verification and Validation of System Analysis and Computational Fluid Dynamics Software for Nuclear Applications

シミュレーション結果の予測可能性

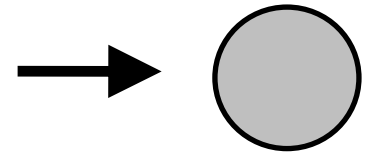
- V&Vによって計算精度が保証される範囲は、妥当性確認された範囲である。シミュレーションはその範囲外の現象を予測できない。
 - 科学や技術の法則は、これまでの経験則であって、真理が証明されているわけではない。



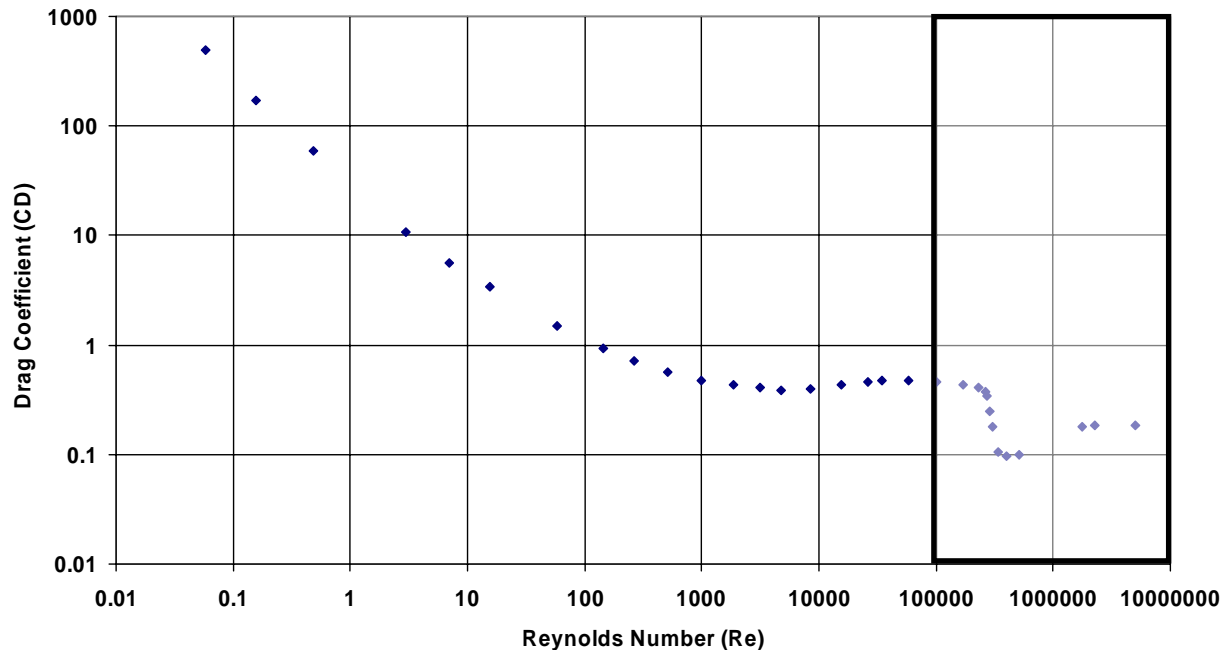
- AIAA V&V: PredictionにV&Vは使えない。
- ASME V&V: V&VがPredictionを確からしくするための取るべき手段である。

外挿に対する懐疑

- 球の抗力係数は、 $1,000 < Re < 100,000$ でほぼ一定。
- $Re = 200,000$ 付近で急激に低下。



Drag Coefficient vs. Reynolds Number for a Sphere



Re < 100,000の妥当性確認では、Re > 100,000の値を予測できない。

内挿なら良いのか？

- タンク内の液面振動
 - 共鳴周波数で液面振動が極端に大きくなる。

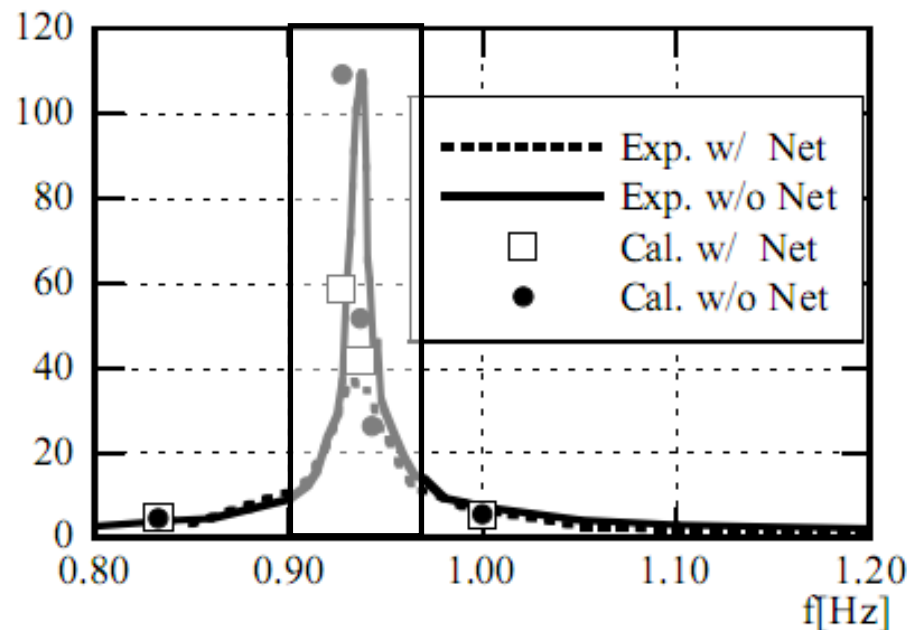


図-4 加振振動数と波高の関係

どびとびの加振動周波数による妥当性確認では、共振を見逃してしまう可能性がある。(内挿も必ずしも正当ではない)

AIAA Guide (1998)

- Executive Summaryにおいて
 - In the context of V&V, the meaning of the word "prediction" is restricted from its general usage to consider the history of validation activities with the CFD model. Prediction is defined as the use of CFD model to foretell the state of a physical system under conditions for which the CFD model has not been validated. Viewed in this light, it becomes clear that the V&V processes do not directly make claims about the accuracy of predictions

帰納的推論を論理的に正当化 することはできない

- 今日の朝は東から日が昇った。
- 昨日の朝は東から日が昇った。
- おとといの朝は東から日が昇った。

：

この事実をいくら集めても、「明日も東から日が昇る」という命題が正しいことを証明できない。

科学的な法則はこうした帰納的な法則であり、次にその法則が適用できることを論理的に保証できない。

相対主義と反証主義

相対主義

- 科学の理論は帰納的推論に基づいていて、正しいことを証明できない。
- 科学と迷信は区別できない。
- 科学が迷信を迫害するのは不当である。



- 反証可能性によって区別できる(Popper)
 - 昨日、東京都文京区で、降雨があった。(反証可能)
 - 目に見えない雷神が、昨日、東京都文京区に来て雨を降らせた。(反証不可能)
 - 反証から生き延びることで仮説は補強(corroborate)される

反証主義 (Falsificationism)

科学的な態度

- 科学的な予測は合理的かつ定量的でなければならない。
- 理論から導かれる予測よりも実験事実が優先されなければならない。
- 科学的な予測には、帰納と演繹の両方の論理が使われ、それぞれ検証と妥当性確認によって確からしさを支持できる。

定量性

- 2009年11月2日の日出(東京)は6:04と予測し合っていた。
- 2009年11月1日の日出(東京)は6:03と予測し合っていた。
- 2009年10月31日の日出(東京)は6:02と予測し合っていた。

:

国立天文台Webより

「2009年11月3日の日出(東京)は6:05と予測する」

論理的には、定性的な予想と同様に帰納的推論が含まれていることに変わりはない。(同様に正しさは証明できない)

定量的な予測と、その妥当性確認を積み重ねることが、predictionを確からしくするための科学的な態度である。

ASME V&V 10 Guide (2006)

- Introductionの最後の段落
 - The truth of a scientific theory, or of a prediction made from the theory, cannot be proven in the sense of deductive logic. However, scientific theories and subsequent predictions can and should be tested for trustworthiness by the accumulation of evidence. The evidence collected, corroborative or not, should be organized systematically through the processes of computational model V&V.

Guide に関する議論

USNCCMパネルセッション, San Francisco, 2007

- 会場より、「predictionには必ず extrapolation が伴う。(V&Vではpredictionはできないのではないか)」
- 会場より、「具体的なFEMでは、Conceptual Model, Mathematical Model, Numerical Modelが切り離せない」。
- パネリスト(著者)より、「V&Vはコストがかかる(検証のための実験データ取得など)。これを正当化する論拠としてGuideを使いたい」。

まとめ

- シミュレーションの信頼性確保の方法論としてV&V(Verification and Validation)が注目され、急速に広まりつつある。
- V&Vの技術基準は米国と欧州が先行しているが、日本でも日本原子力学会と日本計算工学会が取り組んでいる。
- V&Vがpredictionのために取るべき方法論である、とするASME V&V 10の主張は、科学技術における伝統的な態度に合致している。