

Current Research Status and Progress of Nuclear Energy Virtual Reactor in China and Abroad

Yuanlei He, Xiaoyan Li, Yong Wang

Shanghai Nuclear Engineering Research & Design Institute, Shanghai
Email: heyuanlei@snerdi.com.cn

Received: Mar. 30th, 2015; accepted: Apr. 18th, 2015; published: Apr. 27th, 2015

Copyright © 2015 by authors and Hans Publishers Inc.
This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY).
<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

Abstract

The latest progress in the field of nuclear energy advanced modeling & simulation is introduced in this paper, in which the meaning of the nuclear virtual reactor or numerical nuclear reactor is reviewed. A detailed research and introduction about nuclear virtual reactor programs in the United State and Europe, such as CASL, NEAMS and NURESIM are addressed. Based on the research, the key technology and challenge of developing a nuclear virtual reactor are summarized, which can give the support to the further study of the nuclear virtual reactor.

Keywords

Nuclear Virtual Reactor, CASL, NEAMS, NURESIM, Digital Plant

核能数值反应堆国内外研究现状及进展

何元雷, 李小燕, 王 勇

上海核工程研究设计院, 上海
Email: heyuanlei@snerdi.com.cn

收稿日期: 2015年3月30日; 录用日期: 2015年4月18日; 发布日期: 2015年4月27日

摘要

本文介绍了核能先进仿真建模领域的最新进展及数值反应堆的概念，对美国及欧洲针对核能数值反应堆的相关研发项目如CASL、NEAMS、NURESIM等进行了详细的调研，对项目的研究内容、研究方法等进行了阐述，结合国内外的情况，总结了核能数值反应堆发展的关键技术和挑战，可为我国开展核能数值反应堆研究提供技术支持。

关键词

数值反应堆，CASL，NEAMS，NURESIM，数字化电厂

1. 数值反应堆概述

核能领域科研人员利用建模和仿真方式研究核能技术已有很长一段历史，早在上世纪 70 年代就已经开始利用计算程序为现有反应堆申请执照了。核能工程技术、数值计算能力以及可视化技术的发展进步，使科学家对核能系统研究时，可以采用传统不能做到的方法。目前核能领域科研人员正在研究一套新的仿真工具，即核能数值反应堆技术，来预测、仿真和分析核电站的运行特性、可靠性及经济性。这种新的工具可以使科研人员以一种全新的方法去研究反应堆从燃料芯块的材料特性到全厂系统级的运行特性等不同尺度的性能。核能数值反应堆技术是一种基于高速的并行计算技术，利用多物理、多尺度耦合技术，集成并优化各专业物理程序，在超大规模的高性能计算机环境中，预测模拟核反应堆全生命周期内各种特性的先进数值仿真技术[1]。数值反应堆技术通过建立一个可预测的虚拟数值反应堆集成环境，可以进行物理、热工、燃料、结构等多专业高精度计算分析，实现多专业耦合协同设计，能够综合模拟、预测真实反应堆从设计、制造、运行到退役等全生命周期内反应堆的各种性能、参数等特征。数值反应堆技术是基于当今高性能计算、基础科学及软件发展而产生的新一代先进数值仿真建模技术，各国科研人员已开始投入大量资源进行相关研究工作[2]。

2. 国际研究现状

2.1. 美国相关研究

为了重塑美国在核能研发领域的领导力，美国能源部(DOE)核能办公室于 2010 年成立了核能先进仿真建模中心(A DOE Energy Innovation Hub for Modeling and Simulation of Nuclear Reactors)以发展核能数值仿真技术。先进仿真建模中心旨在成为与曼哈顿工程(核武器)、MIT 林肯实验室(雷达)、AT&T 贝尔实验室(晶体管)等具有同样影响力的创新中心[3]。创新中心在发展核能数值仿真技术领域资助了轻水堆先进仿真联盟(CASL)和核能先进仿真与建模(NEAMS)两个项目。这两个项目是目前美国针对核能仿真及数值反应堆研发领域最新进展的代表。

2.1.1. CASL 项目

CASL 项目是美国能源部核能办公室于 2010 年通过公开竞标，组织成立的用于营运核能仿真与建模创新中心的团队。该团队由橡树岭牵头的 4 个国家实验室，麻省理工为代表的 3 所大学及多个核工业企业及组织组成[4]。创新中心将利用仿真与建模的方法完成下列关键目标来实现其改善现有核能运营的目的[5]：

- 在工程设计、分析中利用顶级计算能力实现提升反应堆功率，延长寿命，提高燃耗的目标；
- 用高精度的方法(如利用中子输运和 CFD 替代扩散理论和子通道方法)，为工程分析开发一个高度集成的、多物理耦合的仿真建模环境；
- 通过在 CASL 项目中直接使用先进的建模仿真方法来培养和培训反应堆工程师；
- 用具有预测功能的工具替代之前基于经验的设计和分析工具，以此提升基础科学能力；
- 结合不确定性量化(UQ)方法，并将其作为开发具有预测功能的数值反应堆工具的重要基础；
- 使 NRC 能够借助并利用 CASL 的数值反应堆工具支持执照申请及认证工作。

CASL 将发展一套先进的仿真建模能力来开发一个可预测轻水堆特性的仿真环境——虚拟反应堆(VR) [6]。VR 的仿真环境将融合科学的模型、丰富的工程经验和先进的数值计算方法及计算机科学等基础，并将其仿真结果与正在运行的压水堆数据进行验证和不确定性量化(UQ)。在美国能源部的支持下 VR 将把现有的系统和安全分析工具与最先进的燃料性能、中子动力学、热工水力和结构性能模块进行耦合，该项工作将在当前顶级的计算机和先进的平台架构上完成。

为开发虚拟反应堆，CALS 项目将重点研究先进模型应用(AMA)，虚拟反应堆的集成(VRI)，模型和数值方法(MNM)，材料性能和优化(MPO)，不确定性量化和验证(VUQ)等 5 个关键技术领域。

AMA 是上述关键问题及全范围验证等应用的主要接口。AMA 将开发一套功能需求，优先提供建模需求及评估能力为虚拟反应堆提供指导[7]；VRI 主要负责在软件框架下开发一套 VR 工具来集成其他关键技术领域开发的模型、方法和数据[8]；MNM 将提升现有的并促进开发新的基础建模能力。这些建模能力可为中子物理及热工水力开发一套先进的算法，同时能与大规模并行求解环境进行集成。MNM 的主要使命是交付一套辐射传输和热工水力组件，这些组件能够满足 VR 严格的物理模型和数值算法的要求[9] [10]；MPO 主要为燃料、燃料包壳和材料结构开发优化的材料性能模型，对燃料和材料的失效进行更好地预测。MPO 进行的科学工作将减少对相关实验的依赖[11] [12]；VUQ 对 VR 模型和集成系统的不确定性量化及验证对仿真建模在真实反应堆中的应用非常关键。运行和安全裕量测定的改善将会直接提升反应堆功率，并延长其寿命。VUQ 提出的方法将会显著地提升核电分析的先进性并支持从整体试验向小尺度分项试验整合的方向转变[13]。

2.1.2. NEAMS 项目

NEAMS 是美国能源部核能办公室在 CASL 项目后，成立的另一个核能先进仿真与建模项目，旨在为先进反应堆及核燃料循环系统的分析和设计开发一套具有预测功能的计算机分析程序。通过利用先进的计算方法开发一套加快核能技术开发和应用的仿真工具包，提升核能的安全性、经济型及资源利用的高效性。NEAMS 工具包将能够模拟先进反应堆系统在试验装置中看不到的现象。开发一套从燃料芯块到电厂级的仿真能力，以预测一系列核反应堆的运行安全及特性。由于钠冷快堆具有充裕的高质量数据供验证使用，初期项目将主要应用于钠冷快堆技术，如条件允许，也会应用到其他堆型[14] [15]。

为了提升实用性及研发效率，NEAMS 项目将重点开发了两个不同级别(不同尺度)的产品系列(图 1)，燃料级产品线(FPL)和反应堆系统级产品线(RPL)。FPL 重点研究组成燃料及燃料包壳的材料性质。RPL 则重点开发一个设计工具来研究整个反应堆系统。这些工具为真实现象提供模型和代码，通过耦合 FPL 和 RPL，可提供一个全新的高精度解决问题的方法。因此 NEAMS 将为设计者提供一个从燃料到电厂都具有预测功能的仿真工具包[16]-[18]。

FPL 将利用多种尺度规模的方法进行机理描述。如用 BISON 代码进行工程尺度的仿真可以通过辐照下用 MARMOT 的中尺度(晶粒尺度)规模的微观结构演化仿真来支撑。同理，中尺度的模拟可以通过基础材料在原子尺度下的仿真参数作支撑。通过这样的方法可实现前所未有的预测能力[19]。

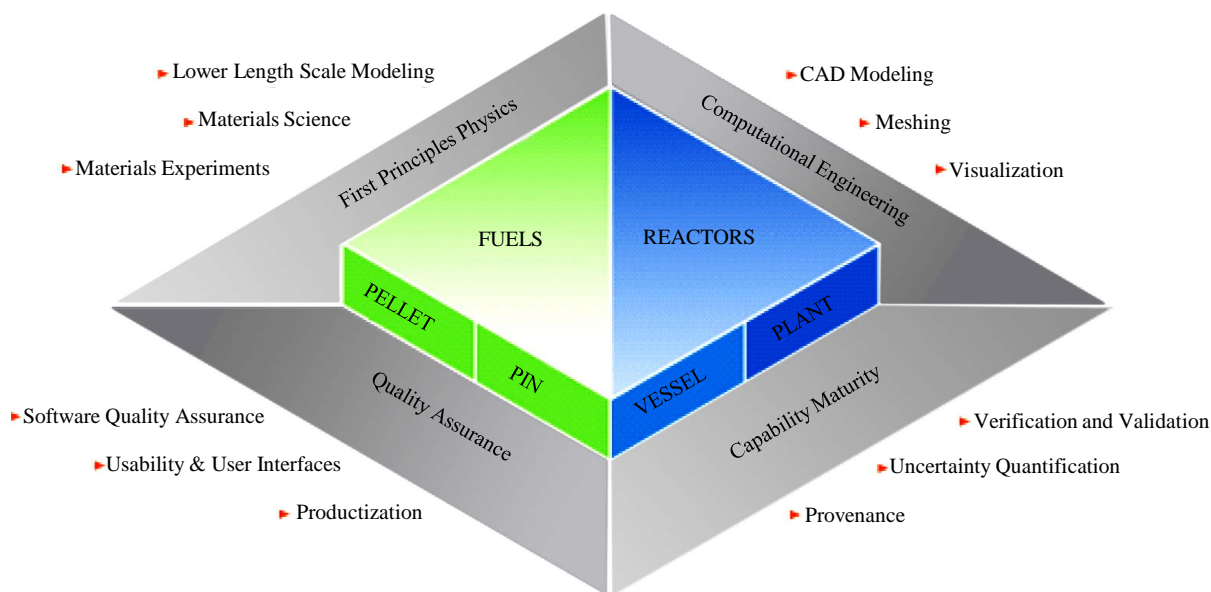


Figure 1. Two modular product lines of NEAMS

图 1. NEAMS 两个模块化产品系列

PRL 将采用多尺度方法来支持其软件工具的可预测性。多物理场分析集成技术将原本独立的现象连接起来。而多尺度集成又将不同范围及尺度的现象连接。这种结构耦合可以让高精度的三维流体动力学仿真系统代替粗糙的一维电厂模型。使用高性能的计算方法及增强的模块化方法可让电厂模型比现在可接受的仿真工具运行速度更快。

2.2. 欧洲 NURESIM、NURISP、NURESAFE 系列项目

欧洲国家发展核能数值反应堆技术的主要代表项目是 NURESIM 系列项目。NURESIM 系列项目是由德国、法国等 13 个欧洲国家和 20 多个组织联合支持的项目，旨在建立一个供欧洲核反应堆仿真通用的参考平台，该项目属于欧洲核能技术平台可持续发展(SNETP)战略规划的部分内容。NURESIM 平台系列项目的发展路线如图 2 所示，分为早期阶段、NURESIM 项目阶段、NURISP 项目阶段、NURESAFE 及 NURE-NEXT 等阶段[20]。

2.2.1. 早期阶段

在 NURESIM 系列项目早期阶段(2000 年~2004 年)，EUROFASTNET 分析了当时热工水力软件的发展水平，鉴别出当时模型和程序的局限性，根据当时核工业界提供的相关信息，优先梳理了 44 项工业需求，并以此为基础开展了详细的科学研究。

2.2.2. NURESIM 项目

NURESIM (2005 年~2008 年)在 EUROFASTNET 项目热工水力程序研究的基础上拓展到堆芯物理，多物理场耦合，敏感性及不确定性分析，平台集成等领域。作为集成项目，NURESIM 的主要目标是建立欧洲的集成平台原型，证实 NURESIM 计划方法的可行性。NURESIM 平台通过更新并集成最先进的堆芯物理，热工水力、燃料模块为真实物理现象提供了一个准确的仿真平台，其具有多尺度，多物理场的特征，特别是在提升反应堆安全性方面耦合了堆芯物理和热工水力模型。使用通用的数据结构和接口功能使不同程序和求解器之间的耦合变的很容易。为了用户使用性更友好，平台通过一个开放源代码的 SALOME 软件提供了前处理、后处理以及监视等功能[21]。NURESIM 项目包括堆芯物理、热工水力、

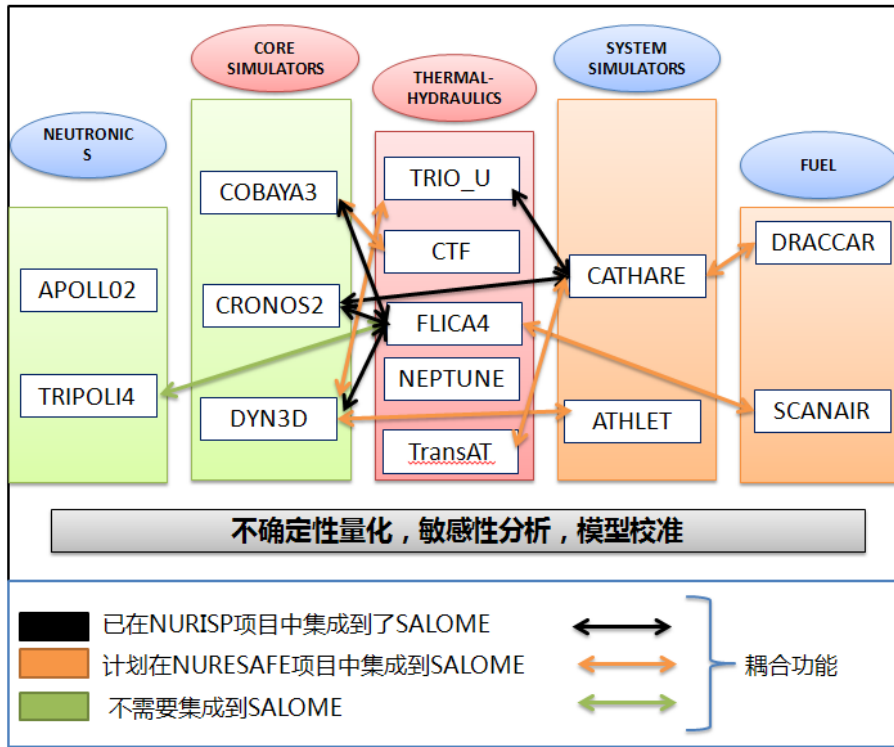


Figure 3. The platform architecture of NURESIM

图 3. NURESIM 平台架构

对数字化电厂的定义及内容虽各有不同，但主要是以三维数字电厂为核心展开的工程、设计、研发、管理及建造的协同设计和一体化流程设计。各核电单位针对数字化电厂的建设已有较深入的研究和基础。如中广核工程公司“智能电站”建设，国家核电上海核工程研究设计院的“数字化电厂”建设等。但针对数值反应堆领域的研发，各单位还处于前期调研和规划阶段。上海核工院根据美国、欧洲的发展情况，结合数字化电厂的建设，初步确立了数值反应堆的发展规划。中国核动力院及哈尔滨工程大学也针对美国 CASL 等项目做了前期的调研和研发计划。总之，国内部分企业和高校都对国际数值反应堆技术发展进行了前期的调研，但实质的研究开发还处于初期阶段。企业及高校应联合投入更多的资源进行开发，争取在新一轮的核能研发领域赶上欧美发达国家的步伐。

4. 关键技术及挑战

传统的仿真技术通常可以基于简化假设，多个同时相互作用的物理过程的发生可以通过非耦合(独立)或松弛耦合(轻度相关)的仿真过程被保守地仿真。这种方法已经适用于核能行业并将继续支持反应堆的安全运行和核燃料可靠性能研究。而核能数值反应堆则是建立在先进的数值计算方法及多物理，多尺度耦合技术基础上的先进仿真建模技术。国内外研究经验表明开发核能数值反应堆的关键技术主要包括：

大规模、高性能的并行数值计算技术：多层尺度的细节仿真计算及多物理集成计算需要高性能计算(HPC)平台提供高速、并行的计算环境作为支撑。

具有多物理耦合的仿真集成环境或平台：多尺度、多物理专业软件的集成需开发一个统一的集成环境和架构，形成标准的接口。

超精细、强耦合、高度复杂的多物理模型的研究和开发：可预测仿真功能的实现需要对各物理模型分析的代码及工具进行适应性修改或重构，使之能够被集成到统一的集成平台或仿真环境，同时还要满

足更高精度的要求。

反应堆设计和运行中涉及的基础科学的发展：如反应堆工程、材料、化工、流体力学等基础科学的发展。

5. 结论

设计开发一个新的核反应堆通常是一个漫长、耗费巨大的过程，主要原因是在新电厂建立之前必须要做大量的实验并建立原型反应堆进行示范运行。随着具有可预测性仿真功能的数值反应堆的发展成熟，将会大大减少相关试验，缩短开发周期、降低研发成本，从而综合提升核电站的成熟性、经济性和可靠性。可以预想，核能数值反应堆技术将会成为下一代核能研发的重要工具。

参考文献 (References)

- [1] Turinsky, P.J. (2012) Advances in multi-physics and high performance computing in support of nuclear reactor power system modeling and simulation. *Nuclear Engineering and Technology*, **44**, 103.
- [2] Weber, D.P., Sofu, T., Pfeiffer, P.A., Yang, W.S., et al. (2004) The numerical nuclear reactor for high fidelity integrated simulation of neutronic, thermal-hydraulic and thermo mechanical phenomena-project overview. *The Physics of Fuel Cycles and Advanced Nuclear Systems: Global Development*, Chicago, 25-29 April 2004, 13-20.
- [3] Energy innovation hub for modeling and simulation (2011). http://www.casl.gov/docs/Energy_Innovation_Hub_for_Modeling_and_Simulation.pdf
- [4] Lewis, A.A. and Weigand, G.G. (2011) Virtual Office, Community, and Computing (VOCC): Designing an energy science hub collaboration system. *Lecture Notes in Computer Science*, **6776**, 425-434.
- [5] CASL (2011) CASL project summary. http://web.ornl.gov/sci/nsed/docs/CASL_Project_Summary.pdf
- [6] CASL. Virtual environment for reactor application. <http://www.casl.gov/docs/CASL-U-2013-042-001.pdf>
- [7] CASL. Advanced modeling applications. <http://www.casl.gov/AMA.shtml>
- [8] CASL. Physics integration (PHI). <http://www.casl.gov/PHI.shtml>
- [9] CASL. Radiation transport methods (RTM). <http://www.casl.gov/RTM.shtml>
- [10] CASL. Thermal hydraulics methods (THM). <http://www.casl.gov/THM.shtml>
- [11] CASL. Materials performance and optimization (MPO). <http://www.casl.gov/MPO.shtml>
- [12] Rashid, J.Y.R., Yagnik, S.K. and Montgomery, R.O. (2011) Light water reactor fuel performance modeling and multi-dimensional simulation. *JOM*, **63**, 81-88.
- [13] CASL. Validation and uncertainty quantification (VUQ). <http://www.casl.gov/VUQ.shtml>
- [14] NEAMS executive program plan. <http://energy.gov/ne/downloads/nuclear-energy-advanced-modeling-and-simulation-neams-program-plan>
- [15] Advanced modeling & simulation. <http://energy.gov/ne/nuclear-reactor-technologies>
- [16] Predictive simulation. <http://energy.gov/ne/advanced-modeling-simulation/predictive-simulation>
- [17] Advanced nuclear reactors. <http://energy.gov/ne/advanced-modeling-simulation/advanced-nuclear-reactors>
- [18] NEAMS quarterly report for October-December 2013. <http://energy.gov/ne/downloads/neams-quarterly-report-october-december-2013>
- [19] Nuclear-fuels. <http://energy.gov/ne/advanced-modeling-simulation/nuclear-fuels>
- [20] NURESIM final activity report (FAR). <http://www.nuresim.com/www/nurisp/index.-.php?art=31>
- [21] SOLOME. The open source integration platform for numerical simulation. <http://www.salomeplatform.org/>
- [22] NURISP overview. <http://www.nuresim.com/-www/nurisp/index.php?art=31>
- [23] NURESAFE_D1_11_Project_Presentation_v1_2. <http://www.nuresafe.eu/index.php?-art=31>