

教室模拟器

核反应堆模拟器——用户友好的教育方法

AURORA BADULESCU 和 ROBERT LYON

以计算机为基础的工具，正在成为培训计划的基本组成部分。近年来，核工业界在提供更加广泛的、以利用核反应堆模拟器为基础的教育和培训服务方面已经取得重大进展。

IAEA 正在通过自己的计划，主持开发在个人电脑上运行的核反应堆模拟器，模拟一系列堆型对运行与事故工况的响应。这些模拟器为参与核能教学课题的高校教授和工程师提供了培训工具，同时也直接提供给有意增加自己对该课题的理解的学生、初级工程师，以及高级工程师和科学家。机构安排这些模拟程序和培训材料的供应或开发，发起培训班和讲习班，并分发文件和计算机程序。

1997 年以来，已经在奥地利维也纳、埃及、沙特阿拉伯、大韩民国和意大利举办过 10 期 IAEA 讲习班。总共

向来自 42 个国家的 181 名以上的参加者提供了培训，并分发了模拟器。

模拟器培训使参加者能够非常熟练地运行模拟程序。显然，把有关反应堆物理学和控制的讲座和用模拟器考查这方面知识的机会结合起来，在保持参加者的兴趣和传授关于各种反应堆系统的操作特征的知识方面，是极其有效的。在若干情况下，模拟器正在或即将被纳入国家高校教学大纲或国家培训班。

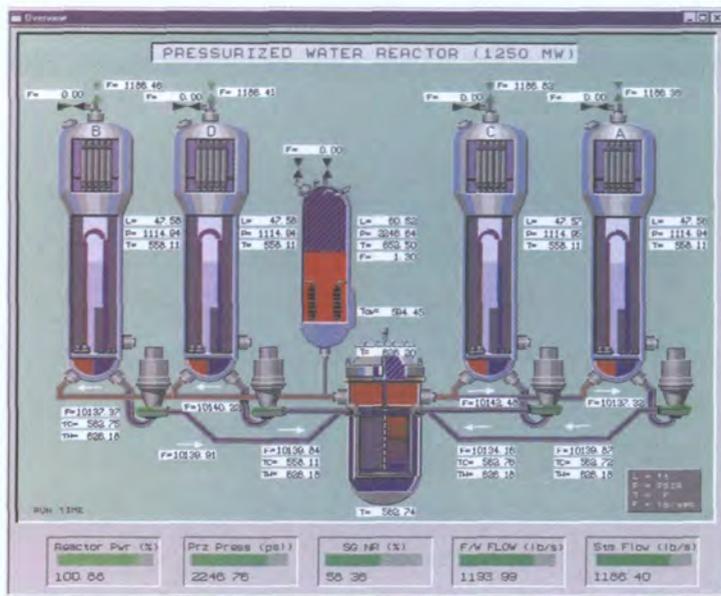
本文介绍 IAEA 主持开发的模拟程序。现有 4 种不同的程序，适用于不同堆型，包括压水堆 (PWR)、沸水堆 (BWR) 和重水堆 (HWR)。这些模拟程序的应用，限于提供所选定动力堆系统类型的通常响应特性。它们并不是为用于诸如设计、安全评价、许可证申请或运行者培训等电站特定目的而开

发的。

以教室为基础的先进反应堆示范器 (CARD) 这是一套由加拿大航空电子有限公司 (CAE) 开发的核动力堆模拟器，简称 CARD。它由 PWR、BWR 和 HWR 模拟器构成，在一般的个人电脑上运行。这些模拟器以基本原理为基础，模拟到分立部件层面。控制逻辑以堆原理图为基础，并包括堆液压回路的动态模型。已用设计数据和设备数据对这些模拟器进行全面校准。

CARD 模拟器用彩色图形显示堆芯通量、温度和空泡等数据，并显示泵和阀等装置的状况。这 3 个反应堆模型每个都被称为“CARD”。CARD 包被用作示范器而非培训模拟器。尽管 CARD 中使用的模型是

Badulescu 女士和 Lyon 先生是 IAEA 核能司核动力处职员。



CAE 先进全尺寸模拟器的子模型,但这个包已被简化成仅能示范从核蒸汽供应系统看到堆的一般行为所需的必要软件,同时模拟这一系统的所有边界,以提供整体动态响应。

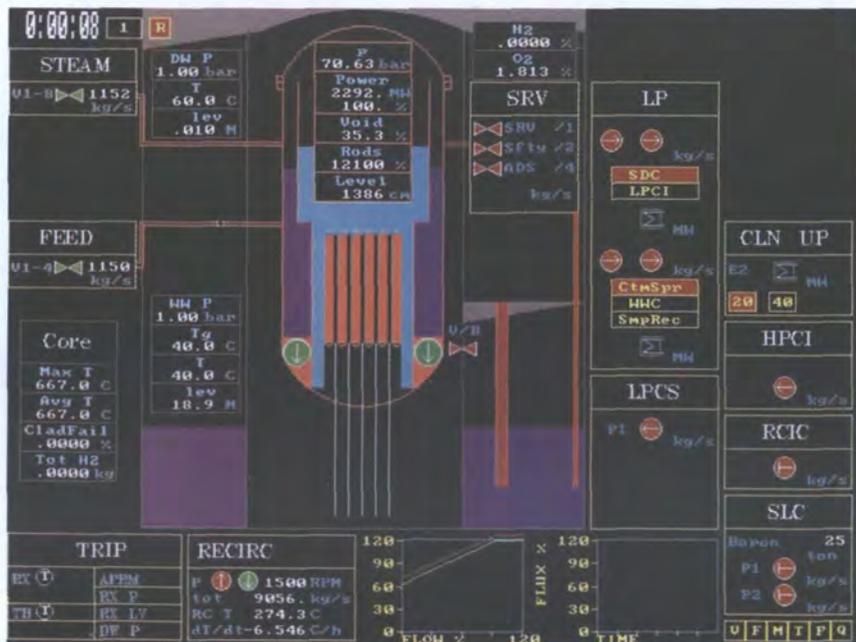
这些示范装置的特点是使用 CAE 热工水力模型和反应堆模型。示范装置由反应堆和反应堆冷却剂系统的完整中子和热工水力模型组成。与邻近系统的界面都被模拟,以提供真实的反馈。示

范器用一个用户友好的图形人机界面来处理输入,插入误操作,并显示各系统的行为。

PWR 的反应堆冷却剂回路的图形屏幕显示,由并连到反应堆压力容器的 4 个热传递回路组成。每个回路包括 1 台反应堆冷却剂泵和 1 个蒸汽发生器。该系统包括 1 个稳压器、1 个稳压器卸压箱、互连管线、阀门和运行控制必需的仪器仪表(见照片)。

先进反应堆模拟器 该模拟器由美国微模拟技术公司开发,在一般的个人电脑上运行。它模拟 600 MWe 范围内的 PWR、BWR 和 HWR。对 PWR 型式而言,模拟器包括西方设计的带垂直倒 U 形弯管蒸汽发生器的堆,如前苏联设计的带水平蒸汽发生器的堆,以及带非能动安全设施的下一代 PWR。

该模拟器实时或加速运行,覆盖核蒸汽供应系统、安全壳、控制系统和安全系统。能够选择故障和参数,以模拟每种堆型相关的正常和异

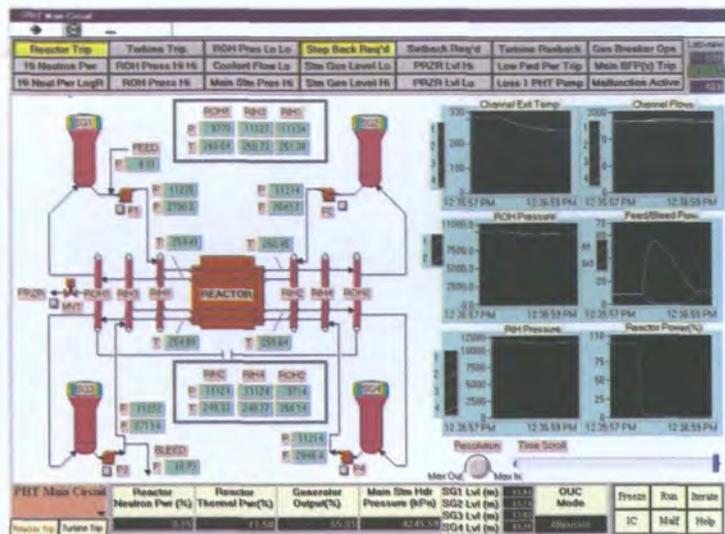


照片:上图是用于教室培训的先进反应堆示范器中使用的压水堆冷却剂回路的计算机显示画面。左图是沸水堆先进反应堆模拟器的计算机显示屏幕,这种模拟器在通常的个人电脑上运行。

常设计基准工况。还能模拟设计基准之外的工况。

显示器将可控制系统显示为一些小的画面，而主要部件则以图像示出。稳压器和蒸汽管线的电动卸压调和安全阀、稳压器喷淋阀和加热器、主蒸汽隔离阀、汽轮机旁路（蒸汽排放）阀、给水阀和反应堆冷却剂泵等部件都得到显示。它们的状况以彩色显示，操作人员可用鼠标选定目标实施动作（例如，按1个按钮、启动1台泵）加以控制。仅在输入误操作值、设定新的初始条件或输入数据趋势的范围值时，才需要使用键盘。控制棒位置和动作都得到显示。管线破裂在破裂位置以闪光显示，泄漏流量以数字显示。

典型运行的第一步是选择一套与各种功率、流量、寿期等条件相应的初始条件。运行中，模拟器动态地显示反应堆工况，并且操作员能够启动覆盖反应堆安全分析报告（和某些情况下超出报告范围）的所有类别的误操作。每个故障的严重性、延迟和线性时间都被输入。操作员能够保护性地使汽轮机停机或反应堆停堆，并能控制显示器中的阀或泵的状态，使之接通（断开）或发生部分故障。例如，操作员能够越过应急堆芯冷却系统泵的自动启动而采用人工控制。



根据每种反应堆的安全分析报告导出的一套故障及其严重性（如破裂尺寸）已编入程序，并且可以加以选择。典型的故障包括：冷却剂丧失；蒸汽管线破裂；给水丧失；以及断流。

反应堆保护系统和安全设施启动系统的状况也得到显示。反应堆在超出任何反应堆保护系统设定值的条件下将自动实现保护停堆。相应的信号将变成红色，并将插入所有的控制棒。

随着模拟的进行，可在屏幕上的“趋势”图中观察输出变量。模拟结束时，能够打印出上述的图。操作员能够选择将计算出的瞬态参数写入输出文件，以便进行详细的模拟后分析。

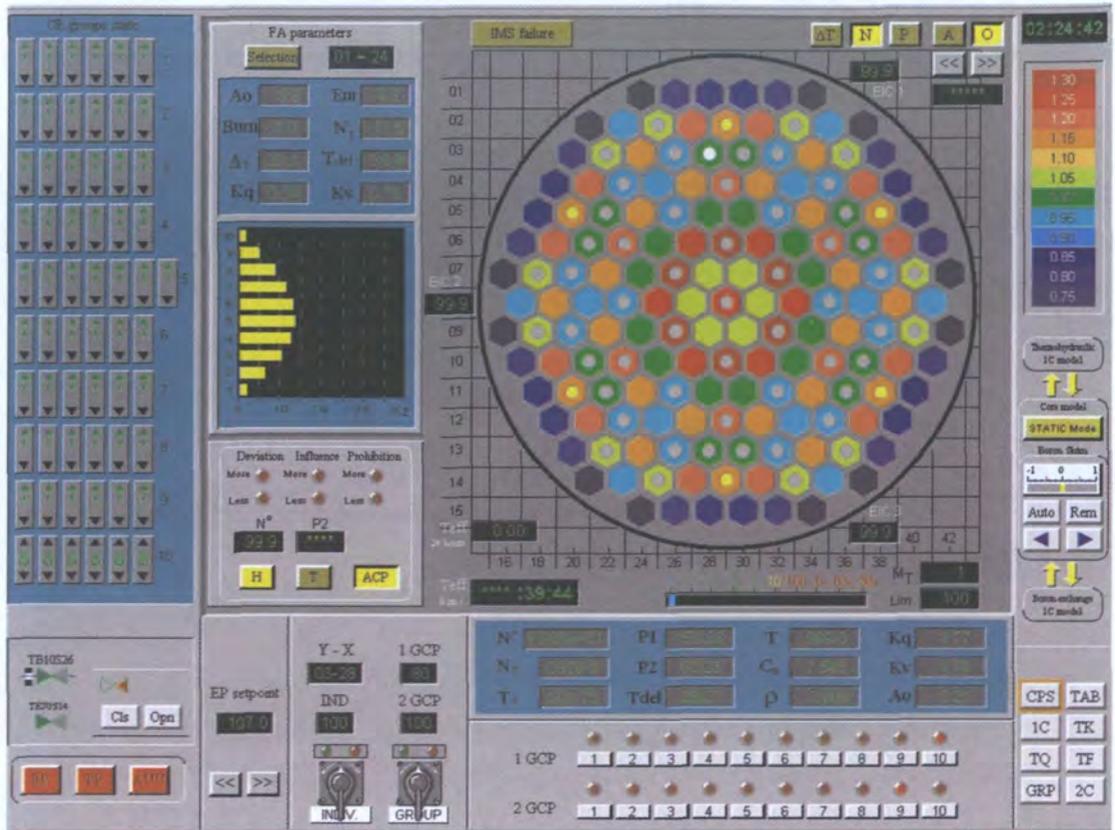
CANDU-9 小型反应堆模拟器 该模拟器由仙后技术有限公司开发，有16个互

动式显示屏，显示反应堆的各大系统、子系统和控制与安全系统。每个屏幕都在显示画面的顶部和底部标明堆的21项报警信号和通报信号、模拟器状况、堆重大事件和参数。用户和模拟器之间的交互作用通过监视器、鼠标和显示器联合进行。控制板仪器仪表和控制装置，如按钮和手动开关，以固定格式的图显示，通过为响应用户输入而设的专门弹出菜单和对话框进行操作。

该模拟器采用的方法是以目标为导向，对反应堆正常运行工况和很多故障工况做出响应。

当反应堆概观得到显示时，热传输主回路、压力和存量控制系统显示为单独回

照片：Candu-9 小型反应堆模拟器的计算机显示画面。



路。4台蒸汽发生器一一被模拟。反应性控制有单独的显示屏,显示极限控制图和处于反应堆调节系统控制下的3个反应性控制装置的状况。

所有被模拟系统、单位功率调节器、堆通报信号系统和所有主要系统功能的计算机控制之间全部可以不断地交互作用。

VVER-1000 小型计算机模拟器 这种模拟器由莫斯科国家工程物理研究院反应堆部开发。其工作分为3个主要阶段:模拟阶段的准备(配置),模拟器的运行,以

及模拟结果的直观化和分析。该模拟器有8个显示主要技术系统的显示屏,可模拟正常工况和涉及安全系统响应和设备故障的异常工况。

该模拟器基于一个综合软件包,后者具有涵盖模拟全套装置的开发和运行的一套广泛功能。该系统具有以下功能:以定制的格式存储和显示工作文件;自如地运行其他部件;配置模拟过程的方法简便;以及存储目标文件。

燃料以三维模拟,并为堆芯冷却剂提供均匀热工水

力学模型。中子动力学模型能够以比实时快30 000倍的速度运行,这对于研究燃料燃耗和氙过程非常有用。

另一个特点是有硼调节器模型。它对于长时期人工调节硼浓度非常有用。还可以在模拟器中断开堆调节系统,并以人工模式运行。

模拟器还提供一套监测程序,以评价学员使用模拟器的结果。 □

照片:VVER-1000小型计算机模拟器的计算机显示画面。