

851096

50313

40122

核电站水力学译文集



50313

40122

水利电力部
交通部

南京水利科学研究院

编辑者：南京水利科学研究院技术情报研究室
(南京虎踞关34号)

出版者：南京水利科学研究院
(南京广州路223号)

印刷者：海军医学专科学校印刷厂
出版日期：1988年4月

编 者 的 话

自1954年世界上第一座核电站问世以来到今年7月底为止，全世界正在运行的核电站有407座，目前核能发电量占世界总发电量的16%。

根据我国国情，在大力发展水电、火电事业的同时有重点、有步骤地发展核电事业也是适宜的。它可以作为我国能源的一种必要的补充，可解决那些工业比较发达、而常规能源又很短缺的东南沿海地区的能源不足问题。

目前，我国的浙江秦山核电站和广东大亚湾核电站正在建设中。为了使有关人员更好地了解和掌握这方面的知识，尤其是了解有关核电站水力学方面的最新研究成果，我们收集了有关国外资料，翻译出版了这本核电站水力学译文集。本集主要收集了与核电站水力学有关的内水循环问题（包括阀门水力学，蒸汽发生器供水管道中水锤的预防、蒸汽发生器管道中的两相流、气—液流体输移模型等），外水循环冷却问题（包括取、排水位置的布置等）以及测量仪器等方面的文章。

由于我们对核能发电这门学科还比较陌生，译文中难免会出现这样或那样的缺点和错误，请读者批评指正。

参加翻译工作的有：张永祿、石朝辉、杨立信、刘永红、秦福珍、张筱琴、胡苏萍等。

参加校核工作的有：王正泉、~~郑建珊~~、焦文生、齐兴河、常克强、唐仁楠、钱莺莺、王亚平等。

编辑出版工作由刘永红、杨立信担任。

目 录

原子能水力学研究的现状与展望·····	和田 明 (日本)	(1)
核电站阀门热工水力学·····	Dirse W. Sallet (美国)	(16)
与核电站外水循环冷却有关的水力学问题·····	Y. Coeffe, B. Manoha (法国)	(45)
压水堆的评价和应用·····	B. E. Boyack, T. D. Knight (美国)	(61)
原子反应堆内使用的差动热电偶水位计的研制·····	荒 克之, 森本 茂 (日本)	(72)
火电站和核电站调节阀中水流扭转对空蚀的影响·····	Зубков Н. П. (苏联)	(79)
压水堆蒸汽发生器供水管道中的水锤·····	B. Gonnet (法国)	(83)
压水堆蒸汽发生器水锤事故的预防和减轻·····	J. T. Han, N. Andexcon (美国)	(90)
压水堆蒸汽发生器中的两相流问题		
——低负荷时的过渡状态·····	J. P. Hennebicq (法国)	(96)
环形气-水流中流体质量输移的研究·····	William D. Hinkle, Henri Fenech (美国)	(102)
压水反应堆内冷却剂流研究新成果·····	G. Uerych, E. Weler (西德)	(116)

原子能水力学研究的现状与展望

和田 明

引 言

原子能水力学研究课题涉及发电反应堆内热流动、放射性废物处理对策等多范围的跨学科领域,就土木技术领域而言,这也是一种新的研究开发项目。在本文中,对以代替石油能源为目标的原子能发电,尤其是在快中子增殖反应堆(FBR)方面,把有效利用铀列为重点,介绍了与快中子增殖反应堆有关的各种问题,并从水力学观点就水工模型和数学模型研究的现状和今后展望作介绍。

一、作为能源的原子能

去年以来,由于石油价格下降和供需缓和,从能源形势来看,其紧迫感虽略有减弱。然而,从日本能源供给结构薄弱这点来看,基本上没有什么变化。由这点考虑的能源危机,与其说能源供给紧迫,不如说存在着供给力减小更现实些。为了解决这一问题,必须积极进行代替石油的能源技术的研究开发。鉴于这种情况,在我国(日本)能源多样化的政策下,正以原子能作为重点能源进行开发。

原子能发电的优越性在于从少量的铀和钚的原子中可以提取大量的能量。然而,以现在实用化的轻水堆为重点的发电反应堆是以铀235为主要燃料。铀235在天然中仅占0.7%,剩余的99.3%是不能燃烧的铀238。为此,只用以往的轻水堆,是不能充分发挥原子能发电的优越性。考虑到世界上铀储量是有限的,则有必要进一步有效利用铀资源,以便适应将来的电力需要。因此,在所考虑到的能更有效的利用铀的原子反应堆,是现在受到注意的快中子增殖反应堆。现在,世界上原子能发电是处在由轻水堆型移向快中子增殖反应堆型的过渡阶段,各国正在进行许多研究开发。

不仅是原子能发电,凡是从国外引进技术都要致力于改进,这是日本历来的路线,并正在引起排外反应。虽然支付了引进的费用,但不能说完成了技术立国的责任。日本的快中子增殖反应堆的研制是以动力炉核燃料事业团为中心,依靠本国技术进行自主开发的,尤其是关于环型反应堆,1977年完成试验反应堆“常阳”(10万KWt),再过若干年后将完成目标型——原型反应堆“凤凰”(30万KWt)。此外,将来以完成实用反应堆为目标的验证反应堆的设计,通过研究正在开展。这是因为新的能源开发,如只等待在国外研制,并依靠其技术而且要受该国国情左右,这种方式是不许可的。还有,依靠本国力量研制,即使发生故障也容易处理,所以从安全方面考虑也是非常有利的。

中央电力研究所自1980年以来就致力于槽型快中子增殖反应堆的研究,各学科专家从本专业着手,正在进行大型项目的研究。这项研究,有主要的原子反应堆制造厂家参加。关于

快中子增殖反应堆的研制,是在合作优先于竞争的考虑下进行的,要求各厂家分担研究,协调进行开发研究。

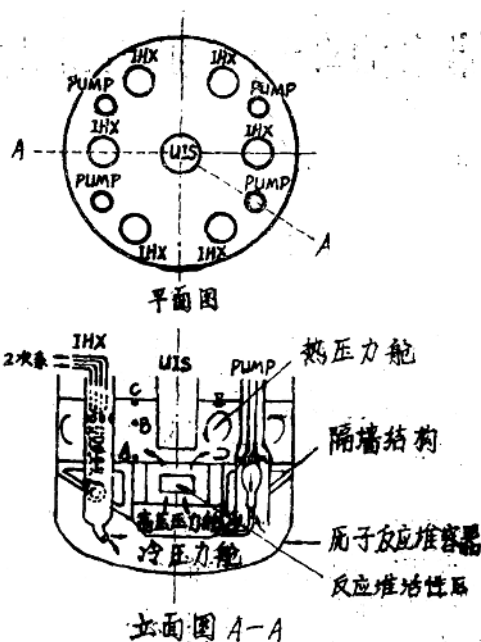


图1 槽型快中子增殖反应堆概念图

二、快中子增殖反应堆的基本形式和水力学问题^{(1),(2)}

快中子增殖反应堆有环型和槽型两种形式。环型反应堆是将反应堆、泵以及中间热交换器各自独立地装在容器内,彼此用长配管将它们连成环状,是一回避大型建筑物的反应堆。一次回路系统是由薄壁大口径管组成。为避免由高温钠引起的热应力,要求多取弯曲配管等柔软结构,所以,关于这些配管流动动力振动对策、抗震设计是很重要的。所谓槽型反应堆是着眼于使用无压力钠,在大型槽中装上机器,并将钠集中在一处,并可减少配管的反应堆。两者各有特点。

特别是槽型反应堆,如图1所示,反应堆中心由核分裂生产的热量将随冷却材料排出,由于要使达到高温的冷却材料进行充分混合,故通过反应堆喷向介于上部建筑物之间的高温舱室。而后,流入中间热交换器内,在那里热量传送给二次回路系统。通过中间热交换器变成低温的冷却材料,再向冷却舱室喷出,经充分混合,由泵再次送入反应堆高压舱室。如此反复,反应堆活性区产生的热量从二次回路系统传送给蒸汽系统,并通过涡轮进行发电。

伴随反应堆容器内高温钠流动所产生的问题有:由于冷却材料的温度骤变引起反应堆容器壁和内部机器的热冲击,以及设备控制方面的要求,要预测从反应堆容器内流出的冷却材料的温度变化;即当反应堆由于某种原因而停转时,从反应堆活性区流出的钠的温度(500℃左右)就骤然下降,冷却材料从高温钠中流出。为此,反应堆容器内就发生分层现象,由于其界面的变化,一方面要考虑对反应堆容器内各种机器或反应堆容器壁施加剧烈

的热冲击, 同时也要考虑, 从反应堆容器内流出的钠温度变化将影响整个设备的运转, 为此, 有必要正确掌握这种现象。

三、热流动试验的相似准则^{3)~6)}

(1) 现象的再现性

反应堆内的混合、对流现象主要特点是由强制对流和温度变化引起的浮力或重力引起惯性效应的相互作用。在研究这种流动时, 现象相似性方面会出现很大困难, 在研究大型实际工程时, 要想定量掌握各种现象, 其方法是很少的。

在考虑用数学模型时, 需要Navier Stokes方程式和热量守恒式的联立解, 根据情况, 需要研制合适的紊流模型和解析方法。此时, 浮力或重力效果将使数学模型更复杂。最近, 随着计算机的进展, 数学方法要比物理方法更为频繁使用, 并有可能获得热流体问题的高精度解。然而, 在应用数学方法时, 还限于对象形状比较单纯的情况, 而形状复杂的情况和发生强烈非线性性质的流动时, 可同时采用数学方法和水力学试验方法来解决。

水力学试验的物理方法, 在本质上比数学模型具有独特的魅力。这是因为在物理模型中, 复杂的几何学容易导入, 且令人烦恼的现象的非线性性质问题也比较少, 只是在模拟热和水流相互关连的现象时, 应在与实际对象进行对比下进行。为此, 在预先探讨相似准则时, 在其实用范围内准备探讨再现性是不可欠的。

为了探讨热流动试验的相似准则, 在温度变化的非压缩流体的质量、运动量以及热量守恒定律方面, 如果用代表长度的 L 、代表流速的 U 、代表温度差的 ΔT 以及代表密度的 p 进行无因次化, 则为下式:

$$\text{连续方程式: } \partial u_i / \partial x_i = 0 \quad (1)$$

运动方程式:

$$\begin{aligned} & \frac{\partial u_i}{\partial t} + u_j \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \\ &= -\frac{1}{F_r^2} \left(\frac{\partial \eta}{\partial x_i} \right)_{i=1,2} - \frac{\partial p}{\partial x_i} + \frac{1}{R_e} \frac{\partial^2 u_i}{\partial x_i^2} - \frac{\delta_{3i}}{F_r^2} \end{aligned} \quad (2)$$

能量方程式:

$$\frac{\partial T}{\partial t} + u_j \frac{\partial T}{\partial x_j} = \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 T}{\partial x_j^2} \quad (3)$$

当 u_i —流速成分, η : 水位, T : 温度, p : 分为静水压力 p_0 和偏差压力 p 时, 在运动方程式的 x 、 y 成分的右边加上 $(-1/F_r^2) (\partial \eta / \partial x_i)$ 。

在Boussinesq的近似范围内($\delta \rho / \rho \ll 1$), 模型和实机的热、流动满足相似条件的无因次参数, 由上式得知如下:

$$\text{雷诺数: } R_e = \frac{U \cdot L}{\nu}$$

内部弗劳德数:

$$F_i = \frac{U}{\sqrt{\frac{g \Delta \rho}{\rho} \cdot L}}$$

贝克勒数: $P_e = \frac{U \cdot L}{\chi}$

弗劳德数: $F_r = \frac{U}{\sqrt{g \cdot L}}$

式中, ν —流体的动粘性系数, g —重力加速度, $\Delta\rho$ — ρ 在流体中对应点的密度差, χ —流体的热扩散系数。

因此, 在处理伴随密度变化的水流时, 如果能使这些无因次参数全都一致, 则有可能通过试验使实机中的热流动现象相似复演。探讨反应堆内热流动问题的水工模型, 可分为三个范畴。

(2) 强制对流场水流的情况

由于弗劳德数非常大, 可以做为流动和温度分布无关进行讨论。在额定输出运转时, 主容器内的流体雷诺数一般比较大, 此种情况存在于不受 R_e 数影响的范围。因此, 采用物理模型, 按三维几何学的配置, 可以如实表现流况。可用普通水进行水力学试验。模型比尺按整体模型缩小时是取 $1/15 \sim 1/10$ 左右, 局部模型时是 $1/2 \sim 1$ 。关于这个问题一般是采用气泡、羽毛和染料等进行可见化观测以及使用激光多普勒流速仪对局部水流进行测量。试验时取

$$\hat{R}_e = R_{em}/R_{ep} = 1$$

是少有的。式中: m 、 p 代表模型、实机。 $\wedge$ 符号为试验和实机值之比。试验探讨了由于雷诺数的偏差所产生的影响, 试验结果证明: 如果 $\hat{R}_e = 1/100$ 以下, 模型的流况将受到影响。

(3) 热过渡时的情况

这里, 快速过渡现象成了问题。在探讨几分钟内温度的急剧变化问题时, (3)式左边的移流项可能在很大程度上支配温度变化。此时, 右边值非常小。即导热率对过渡的温度变化没有很大的影响。此种情况的模型可考虑用淡水、盐水模型和用冷水、温水两种模型。采用和实机相同的流体进行试验时, 在无因次参数中, 下列关系必须成立, 即使 F_r 数一致时,

$$\hat{U} = \sqrt{\hat{L}}, \text{ 为使 } R_e \text{ 数和 } P_e \text{ 数两者都一致时, } \hat{U} = 1/\hat{L}, \text{ 进而, 为使 } F_r \text{ 数一致时,}$$

$$\hat{U} = \sqrt{\hat{\varepsilon} \hat{L}}. \text{ 另外, 如果 } \hat{\varepsilon} = 1, \text{ 则 } \hat{U} = \sqrt{\hat{L}}, \text{ 并能使 } F_r \text{ 数和 } F_i \text{ 数都与实机一致。}$$

这样, 试验时如使用和实体相同的流体, 在4个无因次参数中, 只能使 F_r 数和 F_i 数与实机一致($\hat{\varepsilon} = 1$)或 R_e 数和 P_e 数与实机相一致。然而, F_r 数是与运动方程式中水面坡降有关的参数。除水面坡降影响较大外, 与方程式中的其它项相比可以忽略不计。反应堆内热流动试验, 如果不以液面变化为对象, 也可忽略不计。

在中央电力研究所和三菱重工业公司共同研究实施的 $1/10$ 模型试验中, 探讨的热流动条件列于表1。在以往研究中得知, 关于 R_e 数, 如果是 $R_e \geq 10^4$, 水流无本质区别, 但务必考

虑要满足该条件进行试验。关于表中的 P_r 数, 模型值约比实机大十倍左右但两者都在非常大的 P_r 数范围内, 故可认为在温度场不产生本质上差异³⁾。

根据上述情况, 在进行过渡现象试验时, 着重于成层化现象, 故有必要在使 F_r 数相一致 ($R_e > 10^4$) 时进行试验。

表1 实机和1/10模型试验之间的无因次数和流量的比较

项 目	机 械 设 备	1/10 模 型 试 验
额 定 运 行 时	流量(Q) (m ³ /h)	6.55×10^4 (100%)
	F_r 数 (-)	0.383
	R_e 数 (-)	2.35×10^7
	P_r 数 (-)	1.08×10^5
	流速 (v) (m/s)	2.128
降 流 低 量 成 时 本 完 成	流量(Q) (m ³ /h)	5.99×10^3 (9.5%)
	R_i 数 (-)	30.33
	R_e 数 (-)	1.77×10^6
	P_r 数 (-)	9.03×10^3
	流速 (v) (m/s)	0.194

在进行与热流动现象有关的水工试验时, 保持大雷诺数, 对实机现象的复演是尤为重要的一个条件。表1的情况, $\hat{R}_e = 1/190$, 在使用比尺为 $\frac{1}{15}$ 超级设备进行试验中, 确定 $\hat{R}_e = 1/200$ ⁴⁾, 当使用值比该值略低时, 水流复演就有变差的危险性。

上述相似性是根据中央电力研究所进行的参数对成层化现象影响的研究确定的⁴⁾。试验是将反应堆活性区出口、上部结构和中间热交换器吸入口分别简化, 成圆筒二维形状的试验段, 在额定运转时和热过渡时(流量一定, 温度变化为在2秒钟内从60℃变为10℃)进行的。作为试验条件实施了两种情况, 一种是将反应堆出口的喷流 R_i 数, 在大致相同条件3.5~4.1时, 使 R_e 数在 $(6 \sim 27) \times 10^3$ 范围内变化以及在充分大的 R_e 数 $(12 \sim 25) \times 10^3$ 条件下, 使 R_i 数在0.5~13.8内变化, 就 R_e 数、 R_i 数对反应堆内热流动进行了探讨。

可以认为在额定运转时, 反应堆内的流动形态在试验采用的 R_e 数范围内几乎没有变化。此外, 关于热过渡时的成层界面的上升特性, 当 $R_e > 10^4$ 时, 界面的上升速度和温度梯度固定不变, 几乎不受 R_e 数影响, 界面的上升速度在很大程度上是依赖 R_i 数, 显示出 R_i 数越大, 界面上升速度越小的趋势(参看图2和图3)。在本次试验中, 没有探讨 P_r 数的影响。在实际原子反应堆中, 如考虑能用导热率好的液体钠, 为了能进一步正确的掌握实机反应堆的热流动现象则有必要解释清楚水和钠的物性不同对现象的影响, 现在这个比较研究正处于准备阶段。

(4) 导热率优越的自然循环情况

此时, P_r 数和 F_r 数都小, 这是因为流体在停滞区, 槽内流动是微弱的且几乎没有变化。所以, 在水工试验时, 使 P_r 数和 F_r 数两个无因次参数一致是不可欠缺的。为解决此问

题,虽考虑使用液体金属,但由于技术上的困难至今仍未解决。

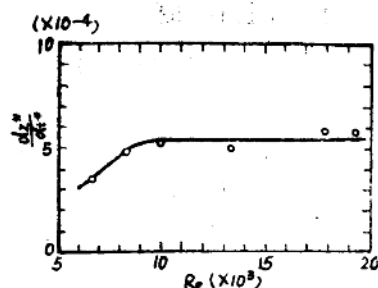
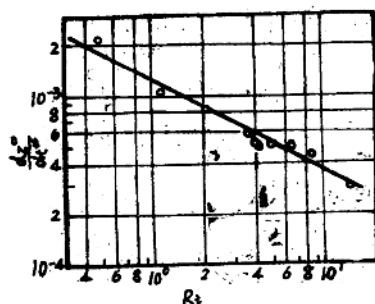


图2 成层界面无因次上升速度和 Re 数之间的关系



$Ri = \Delta \rho \cdot g \cdot D / \rho v^2$: 反应堆出口部位的 Ri 数

$\Delta \rho$: 在热过渡前后条件下, 高、低温时反应堆喷流密度差

D : 反应堆出口部位的直径

v : 喷流速度

图3 成层界面无因次上升速度和 Ri 数之间的关系

4. 热流动解析方法

近年来,随着电子计算机的迅速发展,层流和紊流的数值计算越发增多。数值计算主要采用涡度,流函数,或使用通常所用的变数,可应用于稳定流和非稳定流问题。在紊流的处理上,想出了许多模型,从简单模型开始到最近大量使用的二次方程式紊流模型等。

最初阶段的紊流模型是采用雷诺方程式。例如,对二维定常均匀流的雷诺方程式,采用涡动活性模型 $-\rho u'v' = \rho \nu_T \cdot (\partial u_1 / \partial x_2)$, 可写成下式:

$$U \frac{\partial U}{\partial x} + V \frac{\partial U}{\partial y} = \frac{\partial}{\partial y} \left\{ (v + \nu_T) \frac{\partial U}{\partial y} \right\}$$

混合距离模型,必须规定长度比尺 l 。涡粘性 ν_T ($\nu_e = \nu + \nu_T$) 和涡扩散系数 K_T ($K_e = K + K_T$) 可写成下式:

$$\nu_T = l^2 \left(\left| \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \right| + \left| \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right| \right) \cdot f(Ri) \quad (4)$$

同样,也获得 K_T 式。式中, $f(Ri)$ 是为控制强稳定成层流中紊动按经验确定的函数。

该模型(零方程式)缺乏普遍性,为了改进这点,研制了许多计算方法,并获得了一些满意结果。提出了在雷诺方程式上加一个辅助式的一次方程式模型,进一步地加一个辅助式的二次方程式模型。对前者情况有必要根据水流结构改变 l , 后者是将常数和试验比较后,

通过调节一般就能使用。然而,这种模型依赖于紊流粘性的概念,对急剧变化的流动没有充分保证。

因此,笔者认为,作为模型化的新方向系抛弃紊流粘性的假定,直接求解 $\overline{\mu_i' \mu_j'}$ 和 $\overline{\mu_i' T'}$ 等输移方程式将是今后紊流计算的主要课题。将该模型应用于实际中比较麻烦,需要化劳力,看来,在现阶段选择 $k-\varepsilon$, $k-\sigma$ 模型是妥当的。

a) $k-\varepsilon$ 模型

在这种模型中,二个紊流量中一个采用紊流动能 k ,另一个采用能量逸散率 ε 。

涡粘性系数、涡扩散系数,采用因次分析,由以下的Prandtl-Kolmogorov式给定:

$$\sigma_T K_T = \nu_T = c_\mu (k^2/\varepsilon) \quad (5)$$

式中: σ_T (紊流普兰德特数) 和 c_μ 为经验常数,

$$k = \frac{1}{2} \overline{u_i' u_i'}, \quad \varepsilon = \nu \left(\sqrt{\frac{\partial u_i'}{\partial x_j} \frac{\partial u_j'}{\partial x_i}} \right)。$$

k 方程式的模型可由下式给出:

$$\frac{\partial k}{\partial t} + u_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_k} \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) + P + G - \varepsilon \quad (6)$$

式中,

$$P = \nu_T \frac{\partial u_i}{\partial x_j} \left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right), \quad G = -K_T \beta g \frac{\partial T}{\partial z}$$

式中, β 为体积膨胀系数

ε 式模型系随浮力效果的表现方法不同而异。据Esposito和Hauguel的经验将含温度变化项的项按如下形式写出:

$$\frac{\partial \varepsilon}{\partial t} + u_i \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} = \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{\nu_T}{\sigma_\varepsilon} \frac{\partial \varepsilon}{\partial x_i} \right) + (\varepsilon/k) (c_{\varepsilon 1} \cdot P - c_{\varepsilon 2} \cdot \varepsilon + c_{\varepsilon 3} G) \quad (7)$$

表 2

c_μ	$c_\mu T$	σ_k	σ_ε	$c_{\varepsilon 1}$	$c_{\varepsilon 2}$	$c_{\varepsilon 3}$
0.09	0.09	1.0	1.3	1.44	1.92	$\partial T/\partial z < 0$ 时, 为 1 $\partial T/\partial z > 0$ 时, 为 0

常数可按表 2 所示值的组合使用。

作为壁面切线速度 u_t 的边界条件, 设:

$$\nu_o \cdot (\partial u_t / \partial n) = u_*^2$$

n 表示壁面和垂直方向。 u_* 是在靠近壁的格子内, 假定对数速度分布后便可进行计算。

关于表 2 所示 $c_{\varepsilon 3}$ 值的可靠性, 有Viollet的研究⁸⁾。以图 4 作为探讨对象的水平成层流的模型。稳定成层流时 ($T_2 > T_1$), 设 $c_{\varepsilon 3} = 0$ 时, 显示出解析结果和试验结果一致的情况 (参看图 5)。在不稳定成层流 ($T_2 < T_1$) 时, 显示出 $c_{\varepsilon 3} = 1$ 情况比 $c_{\varepsilon 3} = 0$ 的情况更接近于试验结果。

b) k- σ 模型

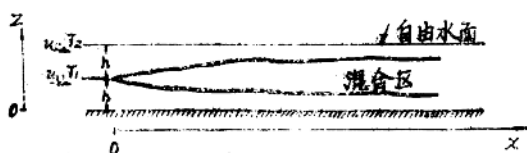


图 4 成层流的概念图

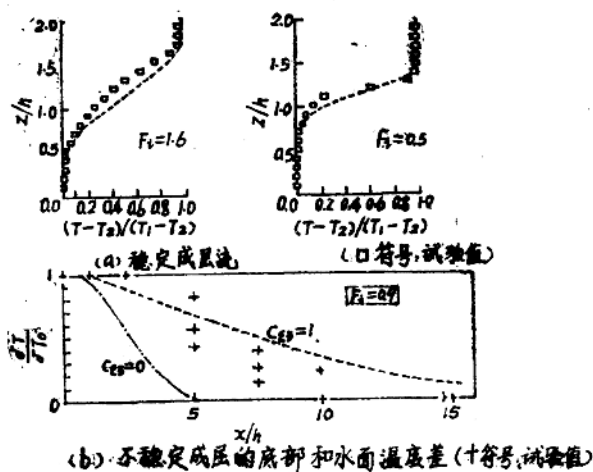


图 5 分析结果和试验结果之比较

方程组采用k式和紊流粘性系数 σ ，以下表示k- σ 模型中所采用的基础式（连续式和式(1)相同）。

运动方程式：

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + U_i \frac{\partial U_i}{\partial x_i} = \frac{\partial P}{\partial x_i} + \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ (\sigma + \nu) \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right) \right\} - \delta_{ij} \cdot g_j \quad (8)$$

紊流动能式：

$$\frac{\partial k}{\partial t} + U_i \frac{\partial k}{\partial x_i} = \frac{1}{2} \sigma \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \sigma \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \alpha \frac{(2k)^2}{\sigma} \quad (9)$$

紊流粘性系数式：

$$\begin{aligned} \frac{\partial \sigma}{\partial t} + U_i \frac{\partial \sigma}{\partial x_i} = & \frac{\sigma^2}{4k} \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_i} + \frac{\partial U_i}{\partial x_i} \right)^2 + \frac{\sigma}{k} \cdot \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\Gamma \sigma \frac{\partial k}{\partial x_i} \right) - \frac{\sigma^3}{k^2} \frac{\partial}{\partial x_i} \left\{ \Gamma_1 k \right. \\ & \left. \frac{\partial}{\partial x_i} \left(\frac{k}{\sigma} \right) \right\} - 4\alpha_1 k \end{aligned} \quad (10)$$

式中， U_i 时间平均流速

$$P_i = (p/\rho) - (2/3) k$$

P: 流体压力

若使用 k 、 σ ，雷诺应力则为下式：

$$-u_i u_j = \sigma \left(\frac{\partial U_i}{\partial x_j} + \frac{\partial U_j}{\partial x_i} \right) - \frac{2}{3} (k) \quad (11)$$

通过和试验结果之比较，各常数可给出如下数值：

$$\Gamma = 1.5, \quad \Gamma_1 = 0.75, \quad \alpha = 0.045, \quad \alpha_1 = (1/4) \alpha$$

k - σ 模型，用试验确定的常数是 3 个和少于其它模型 (k - ϵ 模型确定常数是 5 个)，这是它的一个特点。

关于该模型的适用性，系按二维缝隙式水槽内由底部壁面喷流引起的环流的紊流计测结果 (用多普勒流速仪量测) 和分析结果的比较进行探讨的 (参看图 6) ⁹⁾

分析壁面边界条件，系以切向流速滑动为自由滑动条件，对边界层和由边界层发生的紊动可忽略不计。此外，在流出口的流速分布和 k 以及 σ 的分布根据试验所得结果进行确定。其结果是，平均流速分布如图 7 所示，流速坡降大的剪切流段和环流的回流部分也和试验结果很一致。然而，在舱室底面附近，试验中可以看到因受壁面糙率影响形成边界层，但在数学模型中，由于上述的假定条件存在差异，紊流量，最大值和试验值虽然很一致，但其分布也到可看到有若干差异，不过从定性上可看作是一致的。

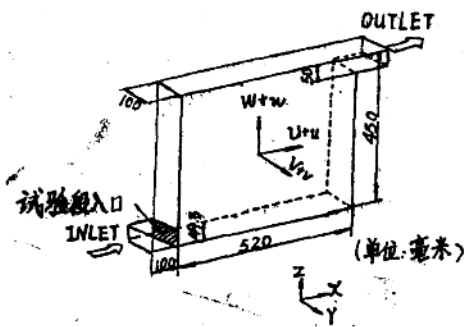


图6 试验水槽概图

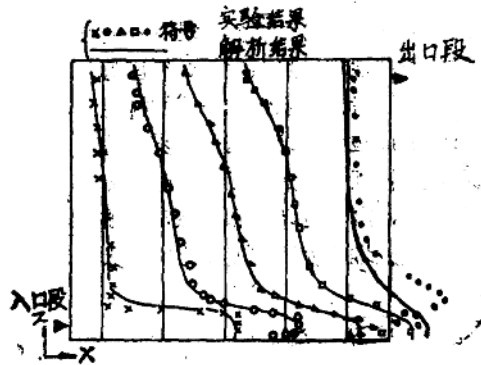


图7 平均流速分布的比较

五、水工、数学模型在快中子增殖反应堆中的应用研究

本节介绍热流动问题的水工模型和数学模型的应用实例，同时还述及到这些方法对实机的适用性以及存在的问题。

(1) 压力舱室内的热流动问题

由于压力舱室内的流动是紊流，故根据在分子扩散系数上增加涡动粘性、扩散系数 ν_T ， K_T 方程组的分析结果与用压力舱室缩小模型的热过渡时的试验结果进行比较研究。并研讨报导了涡动粘性、涡动扩散模型的可靠性¹⁰⁾。

在原型反应堆 $\frac{1}{15}$ 比尺的模型，用水进行试验。试验条件如图 8 所示，在热过渡时，流入

的流体温度约31℃，急剧下降，并假定流入量减少为初期流量的10%。数学模型采用二维圆柱坐标。因此，三个出口喷嘴是当作柱状缝隙(设在舱室的壁面上)进行模拟的，在动量式、能量式中系将粘性项、扩散项分别设为 $v + v_r, K + K_r$ 时，将基础式进行无因次化并使用涡度和流动函数的变数。即将 V_0 设为初始的压力舱室入口流速， R 为压力舱室半径，则无因次时间可定义为 $\tau = tV_0/R$ ，无因次温度 $\theta = (T - T_i)/(T_0 - T_i)$ 。式中， T_i 和 T_0 分别为舱室的初始压力温度和自动断电时的最终压力舱室温度。

此时，涡度方程式中含有雷诺数 $R_* = V_0 R / (\nu + \nu_r)$ ，在能量式中所含的贝格勒数 $P_* = V_0 R / (R + R_r)$ 。 R_* 、 P_* 分别为动量和热的涡扩散系数的函数，即由试验数据确定的参数。在通常的压力舱室内，根据分子粘性系数的雷诺数， $R_* = V_0 R / \nu > 10^5$ ，处于非常紊乱的状态。因此， R_* 、 P_* 的值比按分子粘性系数的值小。此外，还报导过，当 R_* 、 P_* 参数不变，而将其数值变动二位左右，压力舱室内的流动也没有大的差异。同时还确定了此种情况，即使各个值在200~10⁴范围内变化，试验结果和计算结果似乎也没有差别。因此， R_* 、 P_* 与其用来考虑物理意义，还不如单独作为参数考虑好，采用 $R_* = P_* = 10^3$ 值。图8表示出口喷嘴温度的过渡状态。可以看出流态和温度计算结果与水工试验都非常一致。根据该结果，虽不能断定将上述简化的模型可应用于所有的边界形状和紊动现象，但表明了它可作为压力舱室的水工设计的一种手段使用。

另一方面，中央电力研究所和三菱重工业公司共同实施的槽型高速增殖可行性研究也采用了整体缩小模型(1/10比尺)和数学模型，为掌握热流动现象而展开了水工试验和三维数学模型的研究³⁾。热流动解析模型系以平均值作为对象的方程组，对粘性系数和扩散系数，仅考虑了分子粘性和导热系数。计算坐标系如图9所示，以反应堆中心轴为基准的 $R-\theta-z$ 系统，采用了考虑对象性的 $\frac{1}{4}$ 扇形模型。将压力舱室内的水流紊流区的滑动条件作为边界条件。自由液面边界与结构壁面边界一样。

通过比较证明，定额运转时的流态计算结果与水工模型试验结果非常一致，但是，在网络系统中，由于将IHX和泵按扇形模型化，故两机器之间的流速有些差别，另外因数值粘性之故，反应堆的喷流广度要比试验大。

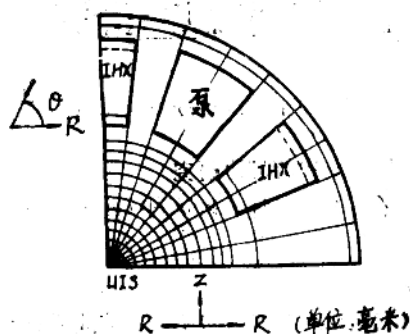


图9 数学模型网络系统

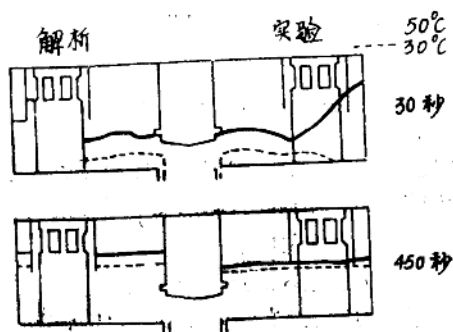


图10 过渡时的压力舱室内的温度分布

作为热过渡条件的流入流量，从初始的100%在17.5秒内下降到10%，以后固定不变，温度从初始50℃在7.5秒内下降到17.3℃，以后固定不变。图10为试验和分析的温度分布之

比较。

虽然试验结果的成层化现象比分析结果严重,但两者是比较一致的,为了减少这一差异,从排除数值粘性误差观点出发,有必要将网络分割得非常细。在目前,很难实现急剧的温度变化或温度分布。然而,利用紊流粘性模型模拟成层化现象是有可能的,且过渡现象的总趋势可以充分复演。

其次,在法国的超非尼克斯的两个超级设备反应堆内热流动研究中,应用了 1/8 比尺的水工模型和紊流模型,探讨了各个方法的特性¹¹⁾。

水工试验使用淡盐水,应用内部弗劳德数定律,探讨定额运转时以及热过渡时的热流动现象。作为数学模型可采用三维或二维编码。在三维计算中,系将具有 $\frac{1}{2}$ 个泵和 1 个中间热交换器的 $\frac{1}{8}$ 压力舱室部分作为对象,采用 $k-\epsilon$ 模型。在二维计算中,采用柱形座标系统,并就中间热交换器入口段的流入,用连续方程式的 Sink 项进行评价。

图11表示热过渡时反应堆出口、中间热交换器入口段和反应堆内 A、B、C 点(参照图 1)的温度随时间变化,看来,三者是一致的。

根据上述结果可以认为,要提高分析技术,提高水工模型的灵活性。这是因为水工模型对复杂形状的热流动的问题是依然有效的。此外,在进行热流动力设计时还显示出能充分灵活运用二维模型。为进一步提高精确度,可考虑应用三维模型。为此,在谋求进一步提高紊流模型化精确度的同时,还要探讨壁面更适当的边界条件的设定方法,这就必须提高计算机编制细网络的能力。

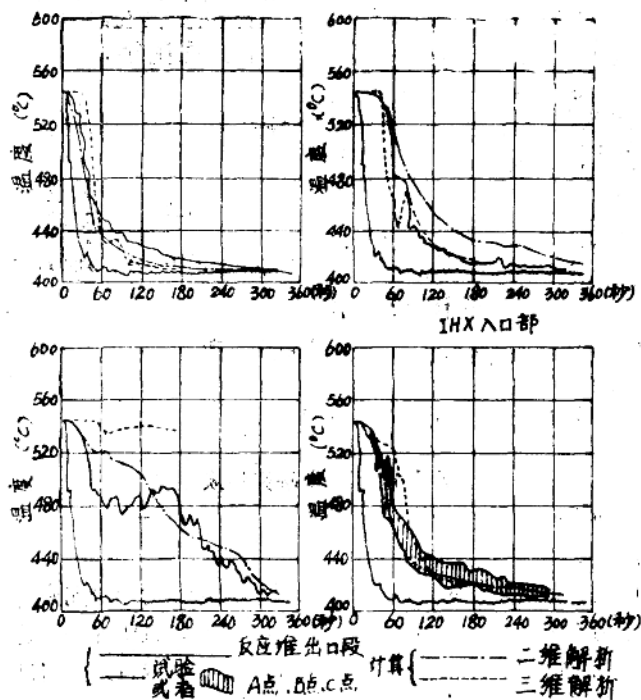


图11 热过渡时反应堆内温度变化¹¹⁾ (点的配置参照图1)

(2) 二次回路环形管的热过渡问题⁸⁾

在槽型反应堆的二次回路钠环形管中, 热过渡时随着流量减少, 温度将发生急剧变化。由于管内将出现成层, 故有必要对热应力进行评价。图12示出的用作研究对象的U字管直径一厘米, 管内平均流速0.15米/秒用以预测发生170℃温度变化时的管内热流动现象。用 $\frac{1}{4}$ 比尺模型所得的水工试验结果和分析结果的比较如图12所示。数学模型采用二维曲线坐标系。在紊流计算中, c_{μ} , $c_{\epsilon T}$ 固定不变, 采用涡粘性 $k-\epsilon$ 模型, 常数 $c_{\epsilon 3}$ 按如下设定:

$$c_{\epsilon 3} = 0 \quad (G < 0), \quad c_{\epsilon 3} = 1 \quad (G > 0)$$

上游一侧的边界条件是, 固定速度 u_0 、温度和试验条件相同, 取: $k = 3 \times 10^{-3} u_0^2$, $\epsilon = 6.75 \times 10^{-4} (u_0^3/D)$ (D : 管径) 图12示出了计算的速度、温度场以及壁面的温度计算值和试验值, 两者非常一致, 但对于下游垂直管内的混合, 认为计算值比试验值小得多。这是因为在二维模型的曲线段不能表现三维副流的缘故。对于这个问题, 采用紊流粘性模型时, 要正确表现环形管的垂直部分的混合过程将是不合适的, 所以有时绝对需要紊流模型。

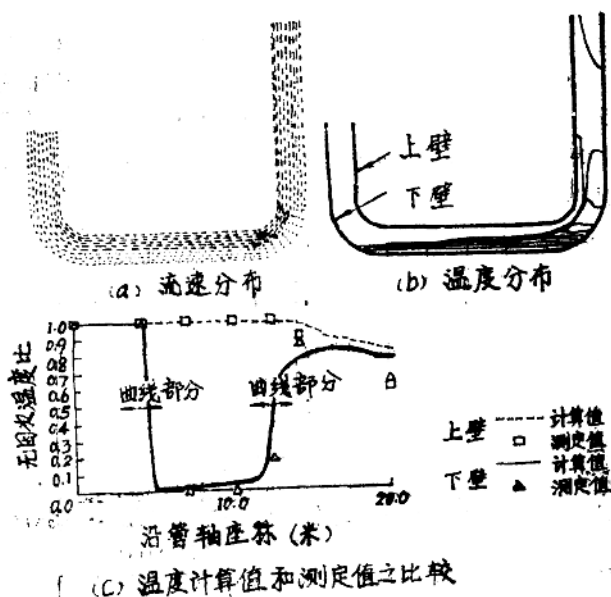


图12 热过渡时的流速和温度场⁸⁾ ($T = 150s$)

六、原子能水力学研究的展望

(1) 国际水力学协会的动向

a) 设立工作组

在具有世界性的快中子增殖反应堆的研究开发中, 国际水力学研究协会 (IAHR) 在7年前设立了原子能水力学委员会, 开始对原子能水力学进行调查研究。在委员会的工作报告中指出: 在制定原子能发电的设计计划时, 有必要对流体力学进行充分探讨。为推进研究开发原子能水力学问题的适当的解决方法, 在定期交换情报方面取得了一致意见。为此, 确定创设下述二个工作组:

第一工作组 (WG1): 快中子增殖反应堆的热流体问题

第二工作组 (WG2) 提高原子能水力学的水流模型精度

1979年9月以来, 委员会第一工作组进行了8次聚会。

b) 快中子增殖反应堆的热流体问题

第一工作组的第一次专家会议于1981年10月在麻省理工学院召开。该会议将原子反应堆内的环流、成层化问题以及燃料集合体内的热流体问题列为重点进行了探讨。为了掌握反应堆内热流动特性, 在水工模型中使用了钠、水、空气等流体, 一方面有效地进行了利用各自特征的试验, 同时也集中力量以提高温度、压力和流速的测定技术及精确度。此外, 就计算编码的研制现状和成果作了介绍。并认为今后应用实际成套设备验证热流动计算编码将是一项重要的探讨内容。继而, 1984年7月在美国华盛顿州召开了专家会议, 就原子反应堆堆芯、压力舱室和管内导热流动有关的最近成果进行了情报交换。

(c) 提高水流模型的精确度

根据第二次会议的内容, 各国实际情况虽有差异, 在可以看出, 他们正专心致力于应用水工模型、数学模型等弄清与原子能水力学有关的各种问题。尤其引人注目的有二点, 其一是介绍了在以往的有限差分法上增加有限单元法的一种新的有限解析方法, 其二是为提高水流的模型精确度力求应用紊流模型。

(2) 紊流模型的实用化

至今虽提出了许多紊流模型, 但目前的现况是, 对于0, 1, 2方程式紊流模型的各个模型, 有关什么样的问题宜应用哪种模型在见解上的统一、评定标准还不清楚。这些紊流模型中包含着许多经验常数。在技术计算中其理想是在一组常数中能高精度地计算紊流现象。为此, 则应以模型准确表示热流动特性的本质为前提。实际上, 应用这些模型虽能获得满意结果, 但计算结果的精确度未必高。此外, 在建立模型时也包含许多假定, 不能保证式中的常数是适当的。在具体解析时经常烦人的问题是应该怎样选定合适的常数。

因此, 今后有必要对各模型的有效性、界限以及经验常数进行设定, 谋求分析方法的展开, 且要根据目的建造紊流分析模型。

国际水力学研究协会的聚会就紊流模型的有效性和问题进行了议论。聚会中所提出的紊流模型和以往的大致相同, 会上集中对边界条件的设定方法、方程组所包含的常数的可靠性以及壁附近边界层流动的见解等问题进行了议论。所得结论是, 紊流模型可以说是不全面的, 在现阶段, 紊流方程式是只适合于小比尺水力学问题的方程组, 关于将紊流模型应用于热流动分析上, 日本要比欧美各国迟一步, 同时也深感到, 设计安全度高的原子能机器, 将是今后应尽快探讨的课题。

(3) 非线性对流项的处理方法

对流和运动量方程式的非线性移流项的处理方法是流体力学数值分析时常常纠缠不清的内容之一, 也是在分析原子反应堆内热流动时一个令人烦恼的问题。一般而言, 对流和运动量方程式解法有多种, 今后必须将非线性项的移流项差分解的精确度评价, 对实际现象的适用性以及所需的计算时间等列为重点进行探讨。在国际水力学研究协会, 第二工作组会议提出的移流项的差分表示法, 对有限差分法, 重点放在高阶的风上差分法, 特性曲线法和Lax-Wendroff法等的使用, 对有限单元法重点放在Galerkin法和特性曲线法的使用。会议中介绍了如下二、三个议题: 关于非线性项的处理方法, 无论采用怎样的差分方法也没有