

(12) 按照专利合作条约所公布的国际申请

(19) 世界知识产权组织
国际局



(43) 国际公布日
2009 年 2 月 12 日 (12.02.2009)

(10) 国际公布号
WO 2009/018757 A1

(51) 国际专利分类号:
G21C 17/104 (2006.01)

(21) 国际申请号: PCT/CN2008/071821

(22) 国际申请日: 2008 年 7 月 30 日 (30.07.2008)

(25) 申请语言: 中文

(26) 公布语言: 中文

(30) 优先权:
200710094001.7
2007 年 8 月 3 日 (03.08.2007) CN

(74) 代理人: 上海光华专利事务所(J.Z.M.C PATENT AND TRADEMARK LAW OFFICE); 中国上海市杨浦区国定路335号5022室余明伟, Shanghai 200433 (CN)。

(81) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的国家保护): AE, AG, AL, AM, AO, AT, AU, AZ, BA, BB, BG, BH, BR, BW, BY, BZ, CA, CH, CN, CO, CR, CU, CZ, DE, DK, DM, DO, DZ, EC, EE, EG, ES, FI, GB, GD, GE, GH, GM, GT, HN, HR, HU, ID, IL, IN, IS, JP, KE, KG, KM, KN, KP, KR, KZ, LA, LC, LK, LR, LS, LT, LU, LY, MA, MD, ME, MG, MK, MN, MW, MX, MY, MZ, NA, NG, NI, NO, NZ, OM, PG, PH, PL, PT, RO, RS, RU, SC, SD, SE, SG, SK, SL, SM, ST, SV, SY, TJ, TM, TN, TR, TT, TZ, UA, UG, US, UZ, VC, VN, ZA, ZM, ZW。

(84) 指定国 (除另有指明, 要求每一种可提供的地区保护): ARIPO (BW, GH, GM, KE, LS, MW, MZ, NA, SD, SL, SZ, TZ, UG, ZM, ZW), 欧亚 (AM, AZ, BY, KG, KZ, MD, RU, TJ, TM), 欧洲 (AT, BE, BG, CH, CY, CZ, DE, DK, EE, ES, FI, FR, GB, GR, HR, HU, IE, IS, IT, LT, LU, LV, MC, MT, NL, NO, PL, PT, RO, SE, SI, SK, TR), OAPI (BF, BJ, CF, CG, CI, CM, GA, GN, GQ, GW, ML, MR, NE, SN, TD, TG)。

本国际公布:
— 包括国际检索报告。

(71) 申请人及

(72) 发明人: 盛春燕(SHENG, Chunyan) [CN/CN]; 中国浙江省海盐县海盐县核电南苑6-2-510, Zhejiang 314300 (CN)。

(72) 发明人; 及

(75) 发明人/申请人 (仅对美国): 蔡光明(CAI, Guangming) [CN/CN]; 中国福建省宁德市宁德核电有限公司蔡光明, Fujian 355200 (CN)。

(54) Title: REACTOR REACTIVITY MEASURING METHOD

(54) 发明名称: 动态响应反应性测量法

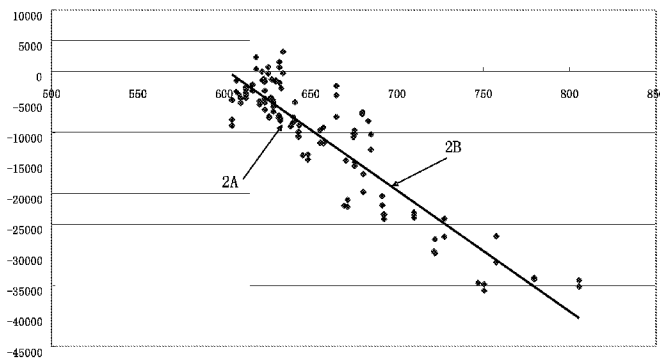


图 2 / Fig. 2

(57) Abstract: A method is provided for measuring reactor reactivity, comprising the following steps of acquiring a set of measuring data I_{RPN} of a neutron flux level of dynamic response; an inverse dynamic calculation for measuring data I_{RPN} of the neutron flux level based upon the point core kinetics equation, and gaining a reactivity ρ_m ; linear fitting $\rho_m(I_{RPN}-\gamma_0)=f(I_{RPN})$ of I_{RPN} dynamic response data after reactivity keeping a constant state. The slope is reactivity ρ .

[见续页]

WO 2009/018757 A1



(57) 摘要:

一种反应堆反应性测量方法，包括获得一组动态响应的中子通量水平测量数据 I_{RPN} ；根据点堆动力学方程对中子通量水平测量数据 I_{RPN} 进行逆动态计算，计算得到反应性 ρ_m ；将反应性处于常数状态后的 I_{RPN} 动态响应数据，做 $\rho_m (I_{RPN} - \gamma_0) = f(I_{RPN})$ 拟合直线，其斜率就是反应性 ρ 。

动态响应反应性测量法

技术领域

本发明涉及核反应堆的反应性测量，利用该方法可以获得反应堆反应性或有效增殖系数。

背景技术

现有的核反应堆的反应性测量采用点堆动力学方程求解反应性或有效增殖系数，又称逆动态法，点堆动力学方程如下：

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\rho - \beta_{eff}}{l} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i(t) + S \quad (1)$$

$$\frac{dC_i(t)}{dt} = \frac{\beta_{ieff}}{l} n(t) - \lambda_i C_i(t) \quad (2)$$

其中：

$n(t)$ 是与时间相关的中子密度；

ρ 是堆芯的反应性；

β_{ieff} 是第 i 组有效缓发中子份额；

β_{eff} 是有效缓发中子份额，且 $\beta_{eff} = \sum_{i=1}^6 \beta_{ieff}$ ；对于重水堆， $\beta_{eff} = \sum_{i=1}^{15} \beta_{ieff}$ ；

λ_i 是第 i 组缓发中子先驱核的衰变常数；

$C_i(t)$ 是第 i 组先驱核密度；对于重水堆，缓发中子先驱核用 15 组；

l 为瞬发中子平均代时间；

S 是外中子源。

反应性仪（或反应性仪计算程序）是通过求解点堆动力学方程，得到反应堆的反应性，即逆动态法。

上述逆动态法是目前反应堆反应性测量工具反应性仪所广泛采用反应性测量方法。但由于缺少测量方法确定外中子源 S 和伽马电流 γ ，因此该方法一般要求在临界附近、中子通量在一定的水平（一般的压水堆要求中间量程电流在 $10^{-8}A$ 以上）以上才能保证测量精度。

此外，周期法也是广泛使用的反应堆反应性测量方法。但是该方法也要求在临界附近、中子通量水平在可忽略外中子源 S 的水平以上、被测量反应性不能太大等要求，才能保证测量精度。

发明内容

本发明的目的在于提供一种动态响应反应性测量法，其测量原理如下：

将点堆动力学方程式（1）、（2）中的 $\lambda_i C_i$ 项消去，则有

$$\frac{dn}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} = \frac{\rho}{l} n + S \quad (3)$$

堆外核测系统的信号 I_{RPN} 除了包含由中子产生的信号之外，还包含了 γ 产生的噪声及测量系统的噪声。这里将 γ 产生的噪声与测量系统的噪声统称为 γ 噪声，则

$$I_{RPN} = n + \gamma \quad (4)$$

在用反应性仪（或程序）计算反应性过程中，令 $S = S_0$ ， $\gamma = \gamma_0$ （ S_0 、 γ_0 为常数）， $n = I_{RPN} - \gamma_0$ ，由此测量得到的反应性为 ρ_m ，则式（3）变为：

$$\frac{d(I_{RPN} - \gamma_0)}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} = \frac{dI_{RPN}}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} = \frac{\rho_m}{l} (I_{RPN} - \gamma_0) + S_0 \quad (5)$$

将式（4）代入式（3）左边

$$\frac{dn}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} = \frac{dI_{RPN}}{dt} - \frac{d\gamma}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} \quad (6)$$

设 γ 为常数，则上式变为

$$\frac{dn}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} = \frac{dI_{RPN}}{dt} + \frac{dC(t)}{dt} \quad (7)$$

则，根据式（3）、（5）、（7），有

$$\frac{\rho}{l} n + S = \frac{\rho_m}{l} (I_{RPN} - \gamma_0) + S_0 \quad (8)$$

将式（4）代入上式，则就得到了已经包含外中子源效应与伽马电流反馈修正的反应性测量公式

$$\rho_m (I_{RPN} - \gamma_0) = \rho I_{RPN} + (Sl - S_0 l - \rho \gamma) \quad (9)$$

在用反应性仪（或程序）计算反应性过程中，由于缺少方法测量，一般忽略 S 、 γ 的数据。即在反应性计算中令 $S_0 = 0$ ， $\gamma_0 = 0$ ，则上式变为

$$\rho_m I_{RPN} = \rho I_{RPN} + (Sl - \rho \gamma) \quad (10)$$

根据式（9），当 ρ 为常数，则 $\rho_m (I_{RPN} - \gamma_0) = f(I_{RPN})$ 为线性函数，其斜率就是反应性 ρ 。

公式推导过程中，只做了 γ 为常数的假设；另外还需要 ρ 为常数的要求。因此该方法要

求在零功率多普勒发热点以下，才能用来准确测量反应性 ρ 。

本发明提供的动态响应反应性测量法，包括以下步骤：

步骤一、根据上述原理，一组稳态的测量数据是无法处理得到反应性的（ I_{RPN} 为常数或 $\rho_m=0$ ）。如果反应堆开始处于稳态，这需要一个反应性扰动，以获得一组动态响应的中子通量水平测量数据 I_{RPN} 。需要指出的是，这个反应性扰动的速度不能太慢，否则扰动结束后动态响应也基本上结束了。一般反应堆可以通过移动控制棒得到所需要的结果，即连续插入或抽出控制棒，然后保持棒位不变。当棒位不变时，反应性扰动结束。也可以通过移动燃料组件或者移动反射层等方式实现。

同时根据点堆动力学方程对中子通量水平测量数据 I_{RPN} 进行逆动态计算，（令 $S=S_0$, $\gamma=\gamma_0$, $n=I_{RPN}-\gamma_0$ ），计算得到反应性 ρ_m 。

最后将反应性处于常数状态后的 I_{RPN} 动态响应数据（使中子通量水平在零功率多普勒发热点以下），根据式（9）做 $\rho_m(I_{RPN} - \gamma_0) = f(I_{RPN})$ 拟合直线，其斜率就是反应性 ρ 。

本发明提供的动态响应反应性测量法基于成熟的逆动态法，由于已经考虑了外中子源 S 和 γ 电流，因此对反应堆的临界状态、中子通量水平都没有要求。不但在临界状态下可以提高反应性的测量精度，而且即使在次临界状态下也可以测量得到次临界度。测量出的反应性已经考虑了外中子源 S 和 γ 噪声的影响，因此测量精度高。可以适用于各种堆型，反应性测量速度快、精度高，可操作性好、数据处理简单。

由于动态响应反应性测量法可以在次临界状态下进行反应性测量；因此，可以把原来需要在反应堆临界后进行的反应堆物理试验移到临界前进行，这样就减少了占用大修关键路径的时间，提高了核电厂的经济效益；

在达临界过程中，传统的方法是采用倒计数率法来达临界的。倒计数率法只能预计临界点，而无法得到堆芯的反应性（或次临界度）。而如果在提棒达临界过程中用传统的倒计数率法再结合应用动态响应反应性测量法，就可以确定堆芯的反应性（或次临界度），从而使反应堆达临界过程更安全、更快捷。

附图说明

图 1 为次临界下插棒后源量程探测器响应曲线；

图 2 为 $\rho_m I_{RPN} = f(I_{RPN})$ 拟合直线（ $\gamma_0=0$ ）。

具体实施方式

步骤一、根据实际需要，给反应堆一个较快的反应性扰动，以获得一组动态响应的中子通量水平测量数据 I_{RPN} 。

步骤二、根据点堆动力学方程对中子通量水平测量数据 I_{RPN} 进行逆动态计算（令 $S=S_0$ ， $\gamma=\gamma_0$ ， $n=I_{RPN}-\gamma_0$ ），计算得到反应性 ρ_m 。

步骤三、将反应性处于常数状态后的 I_{RPN} 动态响应数据，根据式（9）做 $\rho_m(I_{RPN} - \gamma_0) = f(I_{RPN})$ 拟合直线，其斜率就是反应性 ρ 。

图 1 为次临界下插棒后源量程探测器响应曲线。其中左边的纵坐标为反应性，单位为 pcm（ $1\text{pcm}=1\times 10^{-5}$ ）；右边的纵坐标为控制棒棒位，单位为步；右边的纵坐标也代表源量程（SRC）计数率，单位为 CPS。A 是中子通量水平测量曲线；B 是未经 S、 γ 修正计算的反应性 ρ_m （即令 $n=I_{RPN}$ ， $S=0$ ）；C 是控制棒棒位。

图 2 是 $\rho_m I_{RPN} = f(I_{RPN})$ 拟合直线（ $\gamma_0=0$ ）。其中，2A 是测量数据，2B 是测量数据的拟合直线。

次临界状态下的反应性（次临界度）测量一直是反应堆反应性测量的难点。为了说明动态响应反应性测量法的优点，以次临界状态下的反应性测量为例说明本发明。

步骤一、根据上述原理，一组稳态的测量数据是无法处理得到反应性的，即 I_{RPN} 为常数或 $\rho_m=0$ 。因此反应堆以较快的速度插入控制棒，实现较快的反应性扰动，然后保持棒位不变。在这期间没有其它反应性引入。同时为了获得更好的处理结果，最好能保持 2 分钟以上，以获得一组动态响应的中子通量水平测量数据 I_{RPN} ，并使中子通量水平在零功率多普勒发热点以下的数据最好也能有 2 分钟以上。如图 1 所示的次临界下插棒后中子通量水平动态响应曲线 A，C 是控制棒棒位。

步骤二、根据点堆动力学方程对中子通量水平测量数据 I_{RPN} 进行逆动态计算（令 $S=0$ ， $\gamma_0=0$ ， $n=I_{RPN}$ ），计算得到反应性 ρ_m ，如图 1 中的曲线 B。

步骤三、将反应性处于常数状态后的 I_{RPN} 动态响应数据（中子通量水平在零功率多普勒发热点以下），如图 1 中的 A，根据式（10）做 $\rho_m I_{RPN} = f(I_{RPN})$ 拟合直线，得到的拟合直线方程为 $y = -197.95x + 119113$ 。即反应堆的反应性 ρ 为 -197.95 pcm （ $1\text{pcm}=1\times 10^{-5}$ ），如图 2 中的 2B。

本发明基于逆动态的动态响应反应性测量法，通过简单的数学处理就可以得到反应堆的反应性（或次临界度），而且考虑了外中子源与伽马电流的影响。该方法除了能提高临界状态

附近的反应性测量精度之外，而且反应堆在次临界状态下也能进行反应性（或次临界度）测量。

权 利 要 求

1、一种反应堆反应性测量方法，其特征在于包括以下步骤：

步骤一、获得一组动态响应的中子通量水平测量数据 I_{RPN} ；

步骤二、令 $S=S_0$ ， $\gamma=\gamma_0$ ， $n=I_{RPN}-\gamma_0$ ，根据点堆动力学方程对中子通量水平测量数据 I_{RPN} 进行逆动态计算，计算得到反应性 ρ_m ；其中， S 为外中子源， γ 为伽马噪声；

步骤三、将反应性处于常数状态后的 I_{RPN} 动态响应数据，根据下式做 $\rho_m(I_{RPN} - \gamma_0) = f(I_{RPN})$ 拟合直线，其斜率为反应性 ρ ，

$$\rho_m(I_{RPN} - \gamma_0) = \rho I_{RPN} + (S l - S_0 l - \rho \gamma)。$$

2、根据权利要求 1 所述的反应堆反应性测量方法，其特征在于：所述步骤一中通过给反应堆一个较快的反应性扰动，以获得一组动态响应的中子通量水平测量数据 I_{RPN} 。

3、根据权利要求 1 所述的反应堆反应性测量方法，其特征在于：所述步骤三中将反应性处于常数状态后的 I_{RPN} 动态响应数据做 $\rho_m(I_{RPN} - \gamma_0) = f(I_{RPN})$ 拟合直线，是在反应堆中子通量水平在零功率多普勒发热点以下进行。

4、根据权利要求 1 所述的反应堆反应性测量方法，其特征在于：所述步骤一中给反应堆一个反应性扰动的方式为，连续插入或抽出控制棒，然后保持棒位不变。

5、根据权利要求 1 所述的反应堆反应性测量方法，其特征在于：所述步骤一中给反应堆一个反应性扰动的方式为，连续移动燃料组件或者移动反射层，然后保持其位置不变。

6、根据权利要求 4 或 5 所述的反应堆反应性测量方法，其特征在于：所述保持反应性不变的时间至少为 2 分钟。

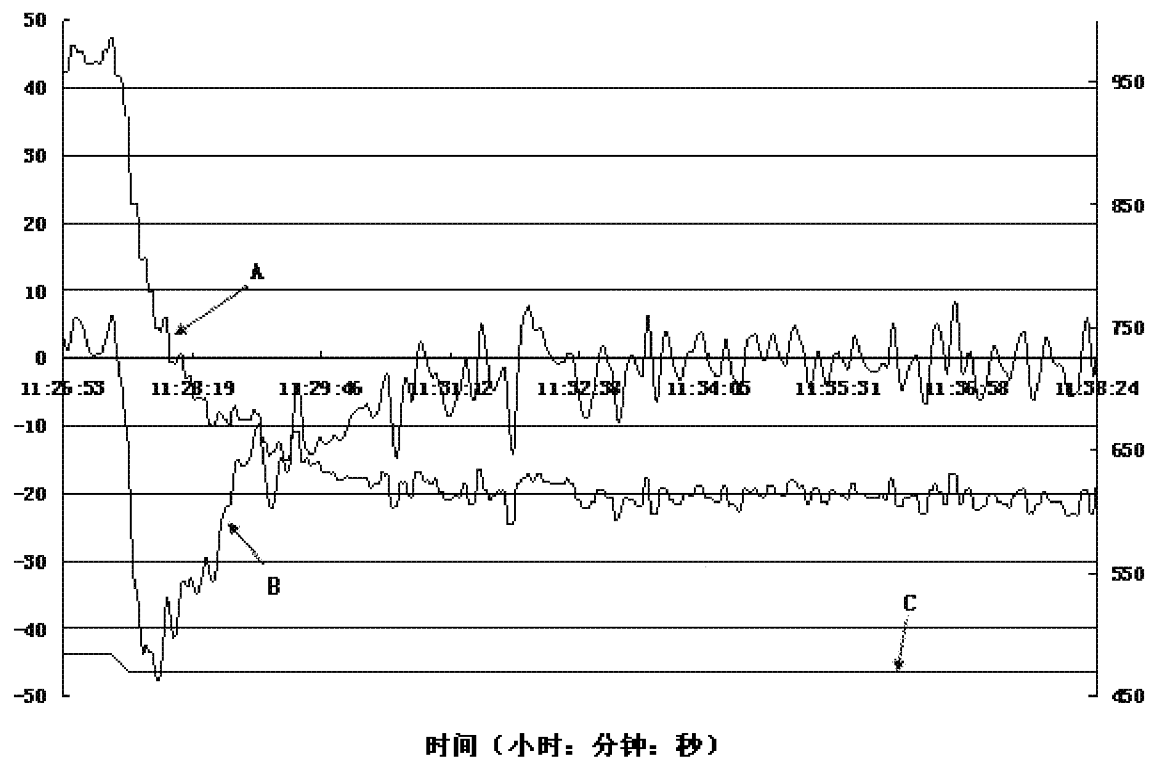


图 1

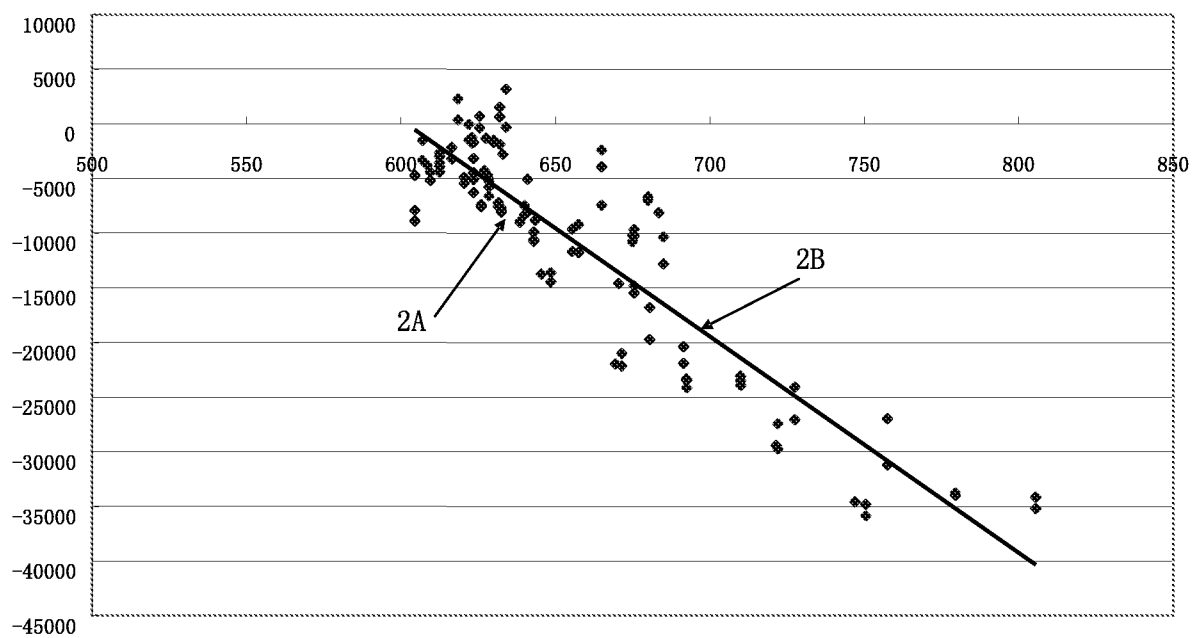


图 2

INTERNATIONAL SEARCH REPORT

International application No.

PCT/CN2008/071821

A. CLASSIFICATION OF SUBJECT MATTER

G21C17/104(2006.01)i

According to International Patent Classification (IPC) or to both national classification and IPC

B. FIELDS SEARCHED

Minimum documentation searched (classification system followed by classification symbols)

IPC : G21C17

Documentation searched other than minimum documentation to the extent that such documents are included in the fields searched

Electronic data base consulted during the international search (name of data base and, where practicable, search terms used)

CNPAT, WPI, EPODOC, PAJ, CNKI: reactivity, neutron flux, point core, dynamic

C. DOCUMENTS CONSIDERED TO BE RELEVANT

Category*	Citation of document, with indication, where appropriate, of the relevant passages	Relevant to claim No.
PX	CN101105986A(GUANGMING CAI et al.),16 Jan.2008(16.01.2008),see the claims 1-6,page 4,line 2-13,figure 2.	1-6
E	CN101252026A(GUANGMING CAI et al.),27 Aug.2008(27.08.2008),see the claims 1-5,page 2,line 2-24, page 4,line 15-23,figure 2.	1-6
A	US6181759B1(Westinghouse Electric Company LLC),30 Jun.2001(30.06.2001), see the whole document.	1-6
A	US6801593B2(Westinghouse Electric Company LLC),05 Oct.2004(05.10.2004), see the whole document.	1-6
A	JP2004-279338A(TOSHIBA KK et al.),07 Oct.2004(07.10.2004), see the whole document.	1-6
A	Wang Meijun, Determination of Reactivity by Inverse Kinetics Method, NUCLEAR POWER ENGINEERING, Jun 1983, vol. 4, No. 3, pages 82-90.	1-6

☐ Further documents are listed in the continuation of Box C.☒ See patent family annex.

* Special categories of cited documents:	"T" later document published after the international filing date or priority date and not in conflict with the application but cited to understand the principle or theory underlying the invention
"A" document defining the general state of the art which is not considered to be of particular relevance	"X" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered novel or cannot be considered to involve an inventive step when the document is taken alone
"E" earlier application or patent but published on or after the international filing date	"Y" document of particular relevance; the claimed invention cannot be considered to involve an inventive step when the document is combined with one or more other such documents, such combination being obvious to a person skilled in the art
"L" document which may throw doubts on priority claim (S) or which is cited to establish the publication date of another citation or other special reason (as specified)	"&"document member of the same patent family
"O" document referring to an oral disclosure, use, exhibition or other means	
"P" document published prior to the international filing date but later than the priority date claimed	

Date of the actual completion of the international search

19 Oct.2008 (19.10.2008)

Date of mailing of the international search report

06 Nov. 2008 (06.11.2008)

Name and mailing address of the ISA/CN
The State Intellectual Property Office, the P.R.China
6 Xitucheng Rd., Jimen Bridge, Haidian District, Beijing, China
100088

Facsimile No. 86-10-62019451

Facsimile No.

Authorized officer

DU,Jiangfeng

Telephone No. (86-10)62085536

INTERNATIONAL SEARCH REPORT
Information on patent family members

International application No.

PCT/CN2008/071821

Patent Documents referred in the Report	Publication Date	Patent Family	Publication Date
CN101105986A	16.01.2008	None	None
CN101252026A	27.08.2008	None	None
US6181759B1	30.06.2001	EP1071098A1	24.01.2001
		EP1071098B1	22.12.2004
		DE60016843E	27.01.2005
		DE60016843T	01.12.2005
US6801593B2	05.10.2004	EP1422723A1	26.05.2001
		US2004101082A1	27.05.2004
		JP2004170427A	17.06.2004
		JP4078291B2	23.04.2008
JP2004-279338A	07.10.2004	None	None

国际检索报告

国际申请号
PCT/CN2008/071821

A. 主题的分类

G21C17/104(2006.01)i

按照国际专利分类表(IPC)或者同时按照国家分类和 IPC 两种分类

B. 检索领域

检索的最低限度文献(标明分类系统和分类号)

IPC: G21C17

包含在检索领域中的除最低限度文献以外的检索文献

在国际检索时查阅的电子数据库(数据库的名称, 和使用的检索词(如使用)) CNPAT,WPI,EPODOC,PAJ,CNKI:
反应性, 中子通量, 点堆, 动态, reactivity, neutron flux, point core, dynamic

C. 相关文件

类 型*	引用文件, 必要时, 指明相关段落	相关的权利要求
PX	CN101105986A (蔡光明 等), 16.1 月 2008 (16.01.2008), 权利要求 1—6、说明书第 4 页第 2—13 行、图 2。	1—6
E	CN101252026A (蔡光明 等), 27.8 月 2008 (27.08.2008), 权利要求 1—5、说明书第 2 页第 2—24 行, 第 4 页第 15—23 行、图 2。	1—6
A	US6181759B1 (Westinghouse Electric Company LLC), 30.6 月 2001 (30.06.2001), 全文	1—6
A	US6801593B2 (Westinghouse Electric Company LLC), 05.10 月 2004 (05.10.2004), 全文	1—6
A	JP2004-279338A (TOSHIBA KK et al.), 07.10 月 2004 (07.10.2004), 全文	1—6
A	王湄君, 用逆动态方法确定反应堆的反应性, 核动力工程, 1983 年 6 月, 第 4 卷, 第 3 期, 第 82—90 页。	1—6

☐ 其余文件在 C 栏的续页中列出。

☒ 见同族专利附件。

* 引用文件的具体类型:

“A” 认为不特别相关的表示了现有技术一般状态的文件

“E” 在国际申请日的当天或之后公布的在先申请或专利

“L” 可能对优先权要求构成怀疑的文件, 或为确定另一篇引用文件的公布日而引用的或者因其他特殊理由而引用的文件

“O” 涉及口头公开、使用、展览或其他方式公开的文件

“P” 公布日先于国际申请日但迟于所要求的优先权日的文件

“T” 在申请日或优先权日之后公布, 与申请不相抵触, 但为了理解发明之理论或原理的在后文件

“X” 特别相关的文件, 单独考虑该文件, 认定要求保护的发明不是新颖的或不具有创造性

“Y” 特别相关的文件, 当该文件与另一篇或者多篇该类文件结合并且这种结合对于本领域技术人员为显而易见时, 要求保护的发明不具有创造性

“&” 同族专利的文件

国际检索实际完成的日期

19.10 月 2008 (19.10.2008)

国际检索报告邮寄日期

06.11 月 2008 (06.11.2008)

中华人民共和国国家知识产权局(ISA/CN)

中国北京市海淀区蓟门桥西土城路 6 号 100088

传真号: (86-10)62019451

受权官员

杜江峰

电话号码: (86-10) 62085536

国际检索报告
关于同族专利的信息

国际申请号
PCT/CN2008/071821

检索报告中引用的 专利文件	公布日期	同族专利	公布日期
CN101105986A	16.01.2008	无	无
CN101252026A	27.08.2008	无	无
US6181759B1	30.06.2001	EP1071098A1	24.01.2001
		EP1071098B1	22.12.2004
		DE60016843E	27.01.2005
		DE60016843T	01.12.2005
US6801593B2	05.10.2004	EP1422723A1	26.05.2001
		US2004101082A1	27.05.2004
		JP2004170427A	17.06.2004
		JP4078291B2	23.04.2008
JP2004-279338A	07.10.2004	无	无