

文章编号 : 0258-0926(2015)03-0129-06; doi: 10.13832/j. jnpe. 2015.03.0129

# 非能动安全系统应用于聚变-裂变混合能源堆的可行性研究

喻章程, 解衡

清华大学核能与新能源技术研究院, 北京, 100084

**摘要:** 将非能动安全系统应用于聚变-裂变混合能源堆, 使用 RELAP5 对混合能源堆包层、一回路系统、部分二回路系统和非能动安全系统进行建模, 对主冷却剂泵卡转子事故和冷管段小破口失水事故进行瞬态计算和分析研究。计算结果显示, 该非能动安全系统能够满足选取的 3 种反应堆事故的安全要求, 验证非能动安全系统应用于聚变-裂变混合能源堆的可行性。非能动余热排出系统热交换器的面积增大后, 能有效地导出包层衰变热; 增大堆芯补水箱的容积对增大反应堆安全裕度有明显效果。

**关键词:** 聚变-裂变混合能源堆; 非能动安全系统; RELAP5; 安全分析

**中图分类号:** TM623.9 **文献标志码:** A

## Feasibility Study on Application of Passive Safety System in Fusion-Fission Hybrid Energy Reactor

Yu Zhangcheng, Xie Heng

Institute of Nuclear and New Energy Technology, Tsinghua University, Beijing, 100084, China

**Abstract:** The passive safety system was applied to the fusion-fission hybrid energy reactor and a RELAP5 model was developed to represent the primary loop, partial secondary loop and the passive safety system components. The transient calculation and research were conducted for stuck pump accident, the SBLOCA on cold leg. The results indicate that the passive safety system can ensure the safety of fusion-fission hybrid energy reactor in the selected reactor accidents and it is feasible to apply the passive safety system to fusion-fission hybrid energy reactor. The decay heat can be exported effectively while the flow area of the heat exchanger of the PRHRs was optimized. Increasing the volume of CMT is of great significance for the reactor safety margin.

**Key words:** Fusion-fission hybrid energy reactor, Passive safety system, RELAP5, Safety analysis

### 0 引言

在实现聚变能商用之前, 聚变-裂变混合堆可作为利用聚变能的一种途径。聚变-裂变混合堆根据聚变反应富中子贫能量, 而裂变反应贫中子富能量的特点, 利用聚变中子源驱动装有核裂变燃料的次临界包层, 实现生产能量、生产核燃料、处理核废料等潜在功能<sup>[1-2]</sup>。

### 1 聚变-裂变混合能源堆概述

本文的研究对象是基于国际热核聚变实验堆 (ITER) 装置的聚变-裂变混合能源堆, 采用文献 [3] 提出的堆芯物理模型和其计算得出的物理数据。包层示意图和包层由内向外的截面如图 1、2 所示。

本文将非能动安全系统应用于聚变-裂变混

收稿日期: 2015-01-17; 修回日期: 2015-05-04

基金项目: 国际热核聚变实验堆 (ITER) 计划专项 (2012GB106006)

作者简介: 喻章程 (1988—), 男, 硕士研究生, 现主要从事核电站安全分析和研究

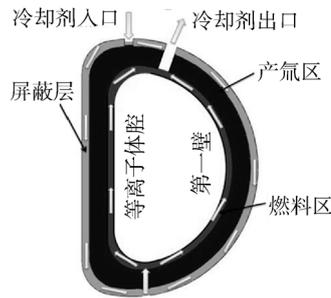


图 1 聚变-裂变混合堆包层示意图

Fig.1 Schematic Diagram of Blanket of Fusion-Fission Reactor

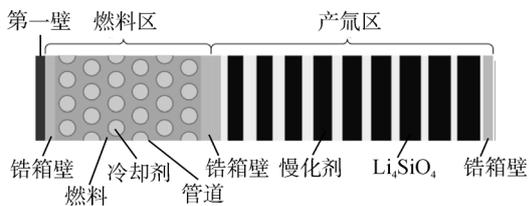


图 2 包层由内向外的截面

Fig. 2 Cross Section of Blanket

合能源堆，并选取主冷却剂泵卡转子事故、冷管道小破口失水事故（LOCA）进行分析，验证其可行性。非能动安全系统示意图，如图 3 所示。

## 2 RELAP5 安全分析模型

对聚变-裂变混合能源堆包层、一回路系统、部分二回路系统以及非能动安全系统进行 RELAP5 建模<sup>[4-6]</sup>。系统模型主要包括：包层、2 台蒸汽发生器（SG）、4 台主泵、2 个安注箱（ACC）、2 个堆芯补水水箱（CMT）、1 个安全壳内置换料水箱（IRWST）、4 级自动卸压系统（ADS）、非能动余热排出系统（PRHRS）和 1 台稳压器。

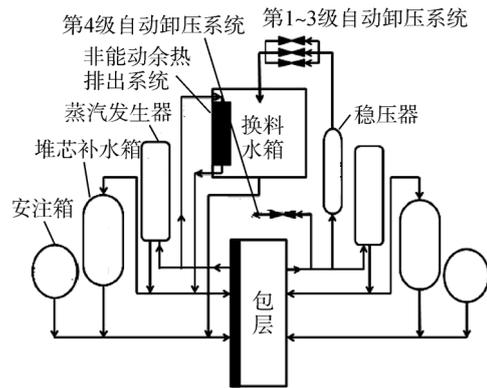


图 3 非能动安全系统示意图

Fig. 3 Schematic Diagram of Passive Safety System

系统节点图如图 4 所示<sup>[7]</sup>。

## 3 主冷却剂泵卡转子事故分析

聚变-裂变混合能源堆的主冷却剂泵卡转子事故（简称卡泵事故）中，反应堆一回路环路 2 中的 1 台冷却剂泵由于故障突然卡死，而其他 3 台冷却剂泵是正常的。这种情况下，环路 2 的冷却剂流量会瞬间减小，甚至发生倒流，而另一环路的流量是正常的，之后会由于环路 2 的低流量信号触发反应堆停堆。

根据 RELAP5 的计算结果，表 1 给出了卡泵事故的时间序列。

发生卡泵事故后，一回路系统中的冷却剂流量会瞬间减小，冷管低流量信号触发反应堆停堆。由于冷却剂流量的减小，在事故后的前几秒内，一回路系统的压力会在 4 s 上升达到峰值 16.35 MPa；之后由于反应堆停堆功率迅速降低，压力

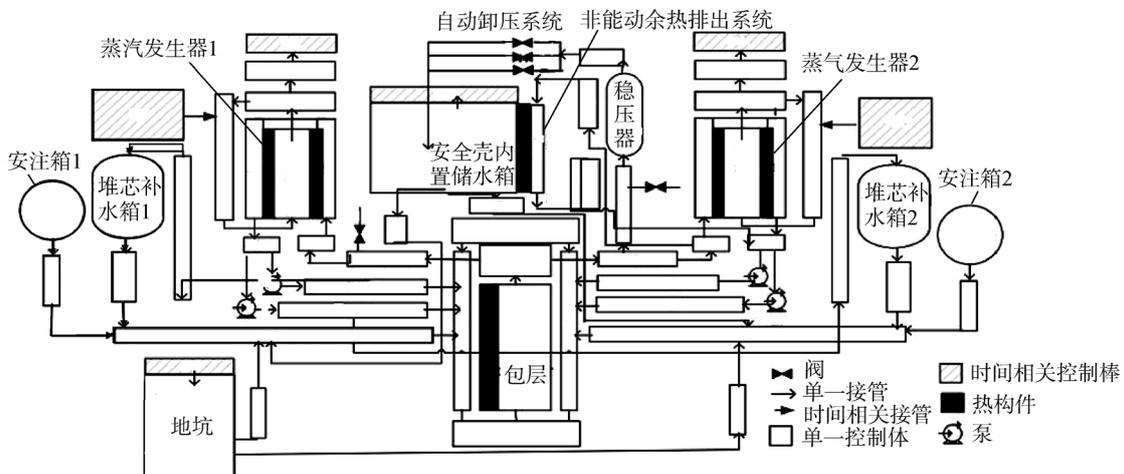


图 4 系统节点图

Fig. 4 System Nodalization Graph

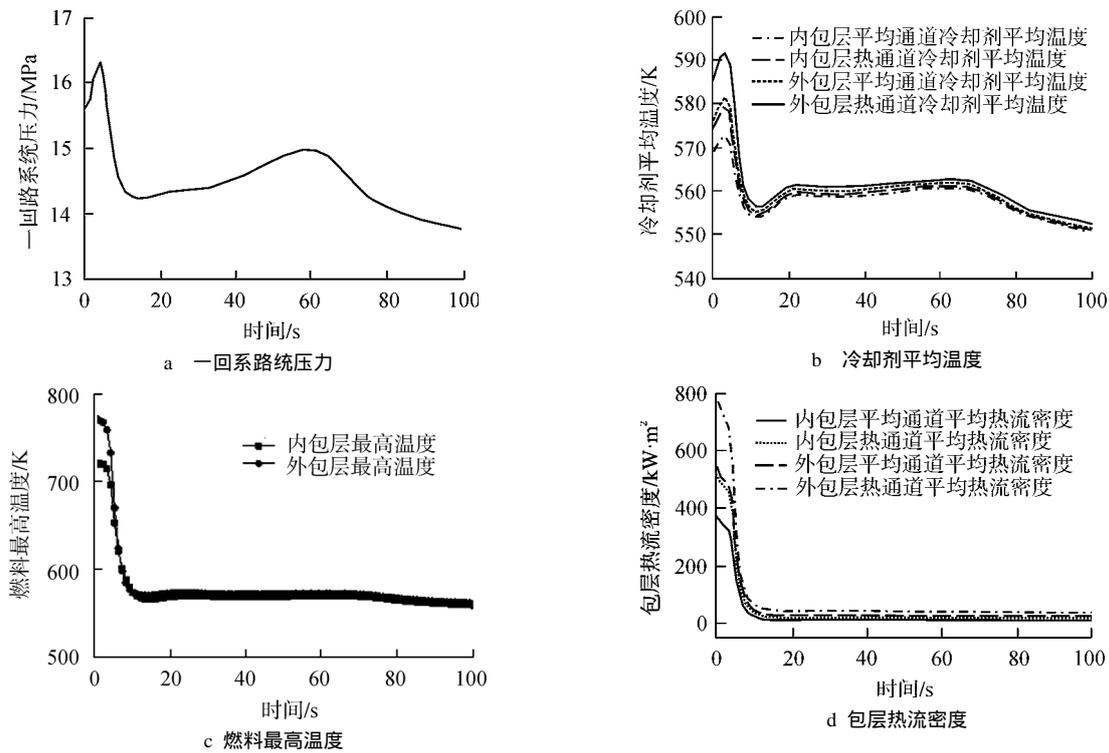


图 5 卡泵事故中系统主要参数的变化

Fig. 5 Main Parameters of Primary System in Stuck Pump Accident

表 1 卡泵事故时间序列

Table 1 Accident Sequences of Stuck Pump Accident

事故序列	时间/s
停堆	1.5
汽轮机惰转	1.6
主给水隔离	134.4
主泵惰转	139.4
PRHRS 启动	144.4

也会下降。一回路系统中的冷却剂平均温度变化趋势与压力变化趋势相同，在 3 s 时，外包层热通道中的冷却剂平均温度上升到一个峰值，约 591.4 K，之后冷却剂平均温度开始下降。在卡泵事故中，由于燃料 U-10Zr 具有良好的导热性能，其最高温度是下降的，并不会出现峰值温度。燃料表面不允许发生沸腾是反应堆热工设计中的一个重要准则，计算结果显示卡泵事故瞬态中内外包层各个冷却剂通道中的热流密度是下降的，并且燃料表面没有发生沸腾临界。卡泵事故中，系统的这些主要参数的变化如图 5 所示。

事故后 144.4 s，PRHRS 启动，与一回路系统形成一个自然循环，热管中的冷却剂经过 PRHRS 的进口流经 PRHRS 热交换器，与 IRWST 中的低

温水进行热交换，再流回一回路系统。初步设计中 PRHRS 热交换器的换热功率与衰变热的比较如图 6 所示。可以看到，PRHRS 换热功率是低于衰变热的，表明该 PRHRS 并不能有效地导出包层的衰变热。为了改善 PRHRS 的换热，将 PRHRS 热交换器的总流通面积增大 10 倍，其换热情况如图 7 所示。可以看到，PRHRS 启动后，逐渐建立自然循环，PRHRS 的换热功率逐渐增大，直至与衰变热相匹配，换热情况得到很大改善。

#### 4 冷管段小破口失水事故分析

聚变-裂变混合能源堆热管段的管道流通面

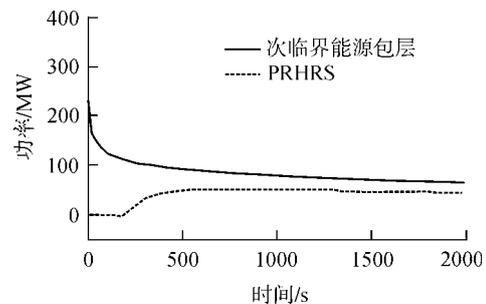


图 6 PRHRS 增大换热面积前的换热情况

Fig. 6 Heat Transfer of PRHRS before Increasing Heat Exchange Area

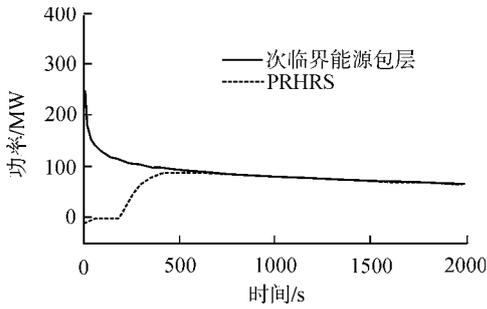


图 7 PRHRS 增大换热面积后的换热情况

Fig. 7 Heat Transfer of PRHRS after Increasing Heat Exchange Area

积是 5.27 平方英尺 (1 平方英尺=0.0929 m<sup>2</sup>)，冷管段的管道流通面积是 2.64 平方英尺。分别用 RELAP5 模拟计算了 2 英寸 (1 英寸=0.0254 m)、4 英寸、10 英寸等效直径冷管段小破口失水事故。越靠近次临界能源包层其所产生的事故后果越严重，故将破口位置设置在远离 SG 而靠近包层处，位于其中一个环路的冷管段与包层的结合处。根据非能动安全系统的安全设计，发生破口之后，一回路系统的压力快速下降，同时产生一系列的信号触发反应堆停堆、汽轮机惰转和专设安全设施动作。

根据 RELAP5 模拟的计算结果，2 英寸、4 英寸和 10 英寸冷管段小破口 LOCA 的时间序列如表 3 所示。

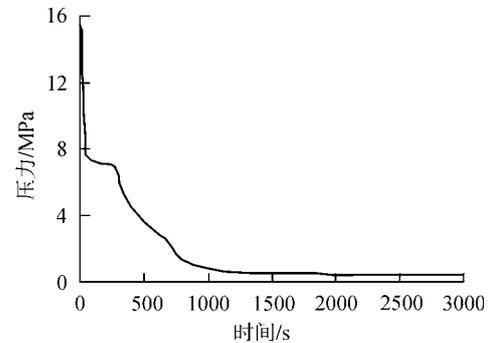
在这些小破口 LOCA 中，一回路系统会经历喷放、自然循环、ADS 泄压和长期冷却 4 个阶段。一回路系统的压力会在喷放阶段迅速降低，之后形成一个压力值略高于二次侧压力的压力平台，

表 3 冷管段小破口事故时间序列

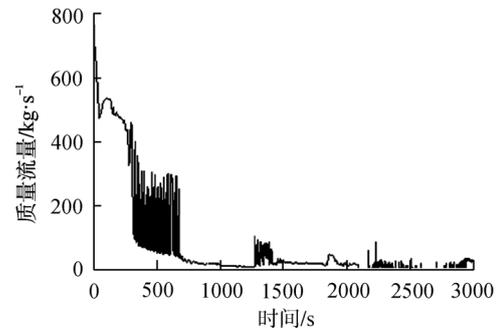
Table 3 Accident Sequences of SBLOCA on Cold Leg

事故序列	2 英寸破口/s	4 英寸破口/s	10 英寸破口/s
破口开始	0	0	0
停堆	59.1	2.2	1.6
“S”信号	66.2	20.7	8.8
主泵惰转	81.2	35.7	23.8
CMT 排水开始	86.2	40.7	28.8
PRHRS 启动	86.2	40.7	28.9
ACC 安注开始	1103.0	375.0	93.0
ADS-1 开始	1478.5	660.7	596.6
ADS-2 开始	1538.5	720.7	656.6
ADS-3 开始	1658.5	840.7	776.6
ADS-4 开始	2584.6	1796.3	—
ACC 排空	2181.0	1350.0	1608.0
CMT 排空	2752.0	2059.0	—
IRWST 安注开始	2702.0	1886.0	726.0

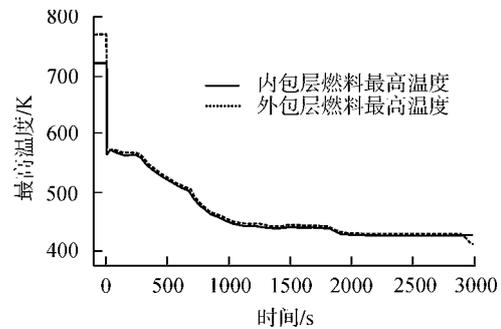
并且破口尺寸越小，这个压力平台越明显。自然循环阶段，压力下降速度有所减慢，当 ADS 泄压阀打开之后，压力又开始迅速下降，直到 IRWST 开始注入冷却水，反应堆进入长期冷却阶段。次临界能源包层中的坍塌液位主要取决于破口处冷却剂的丧失速率和安注系统的安注流量。在所分析的 3 种小破口 LOCA 中，包层的坍塌液位最小值和包层冷却剂通道中各处的液相份额均能保证燃料区被冷却剂覆盖，没有出现燃料区完全裸露的情况。由于燃料 U-10Zr 良好的导热性能，在整个小破口瞬态过程中，燃料的最高温度一直下降，没有出现燃料温度超温的情况。以 4 英寸小破口事故为例，一回路的压力、破口处的质量流量以及燃料的最高温度等参数的变化如图 8 所示。计算得到内外包层的坍塌液位约为 3 m。



a 一回路系统压力



b 破口质量流量



c 燃料最高温度

图 8 4 英寸冷管段小破口事故中主要参数的变化  
Fig. 8 Main Parameters in 4 Inch SBLOCA on Cold Leg

小破口 LOCA 事故发生后，控制系统会产生一系列信号，触发非能动安全系统动作，并且破口尺寸越小，瞬态过程进行越慢，非能动安全系统响应动作的时间也会越晚。在事故初期，主要依靠 SG 和 PRHRS 导出次临界能源包层的衰变热，随着瞬态过程的深入，安注系统的安注流量将取代 SG 和 PRHRS 对导出衰变热起主要作用。在一回路系统高压阶段，CMT 会先启动，提供一段较长时间的安注流量。当一回路系统的压力低于 4.83 MPa 时，ACC 开始注入低温水，其维持的时间短，但流量大。由于 ACC 与 CMT 共用 1 根直接注入管线，在 ACC 安注期间，CMT 的流量会明显减小，ACC 排空之后，CMT 的流量又开始上升。当一回路系统的压力降到接近安全壳内环境压力时，IRWST 隔离阀打开，开始注入低温水，意味着小破口瞬态过程结束，长期冷却阶段开始。以 4 英寸小破口 LOCA 事故为例，非能动安全系统的响应及安注情况如图 9 所示。

从小破口 LOCA 事故中坍塌液位的变化趋势，可以发现 ACC 排空之后，由于 CMT 水装量的不足，导致坍塌液位达到一个最低值。为了增大坍塌液位的最小值，增大安全裕度，有 2 种思路增加 IRWST 安注之前的安注流量：增大 ACC 的容积，期望在 CMT 大流量安注之前使次临界能源包层能有一个很高的坍塌液位；增大 CMT 的容积，使在 ACC 排空之后仍然能有很大的安注流量。

本文讨论了将 ACC 和 CMT 容积初步设计值增大 2 倍这两种情形下坍塌液位的变化情况。计算结果表明，将 ACC 容积增大 2 倍后，坍塌液位最小值仍约为 3 m，改善并不明显，主要是因为此时 ACC 中的低温水更多地通过破口流失了；而将 CMT 容积增大 2 倍后，坍塌液位最小值约为 5 m，得到很大改善。

### 5 结论

本文利用系统分析程序 RELAP5 建立了聚变-裂变混合能源堆模型，包括次临界能源包层、一回路系统、部分二回路系统以及非能动安全系统（PRHRS、CMT、ACC、ADS、IRWST），并进行了模型校验，表明该 RELAP5 模型是合理可靠的。

为验证非能动安全系统应用于聚变-裂变混

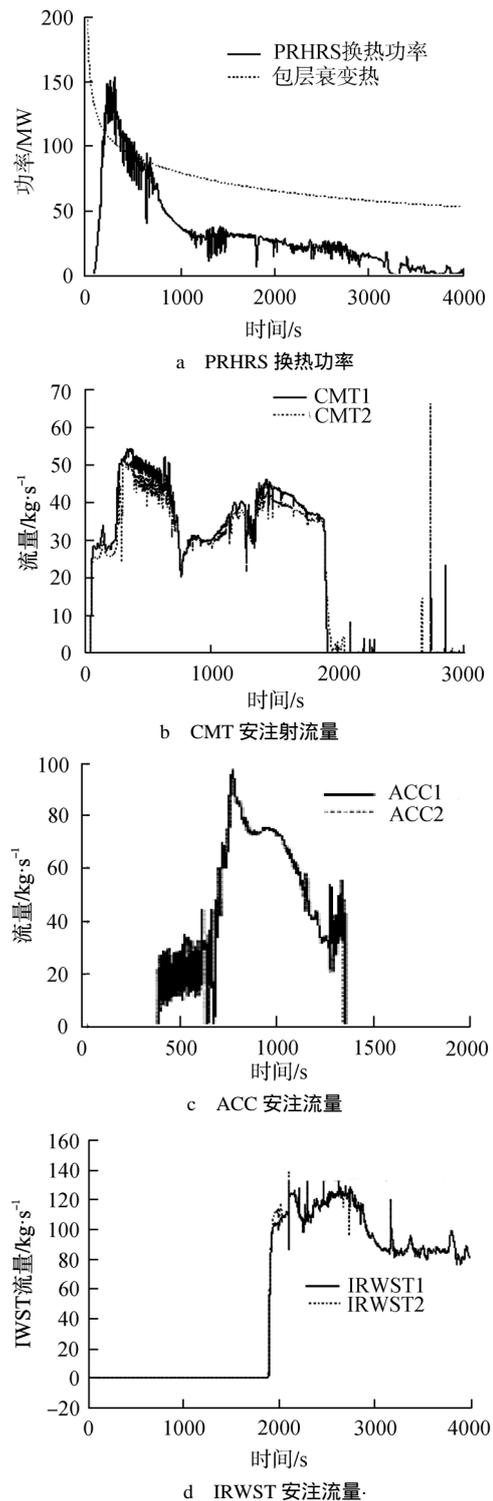


图 9 4 英寸冷管段小破口事故中非能动系统响应及安注情况

Fig. 9 Response and Safety Injection in 4 Inch SBLOCA on Cold Leg

合能源堆的可行性，选取了 2 种比较严重且典型的反应堆安全事故进行分析研究：主冷却剂泵卡

转子事故和冷管段小破口 LOCA 事故。结果表明,该非能动安全系统能够满足选取的 2 种反应堆事故的安全要求,验证了非能动安全系统应用于聚变-裂变混合能源堆的可行性。同时为了使 PRHRS 的排热能力与包层衰变热匹配,合理增大了 PRHRS 热交换器的换热面积。为了增大反应堆的安全裕度,优化了 CMT 和 ACC 的容积,其中增大 CMT 的容积对于增大安全裕度效果明显。

参考文献:

- [1] 邱励俭. 聚变能及其应用[M]. 北京: 科学出版社, 2008.
- [2] 师学明, 彭先觉. 混合能源堆包层中子学初步概念设计[J]. 核动力工程, 2010, 31(4): 5-7.
- [3] 马纪敏. 次临界能源堆物理与安全问题研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2012.
- [4] 郭海兵. 次临界能源包层热工水力设计及物理-热工耦合研究[D]. 北京: 清华大学博士学位论文, 2012.
- [5] Yang J, Wang W W, Qiu S Z, et al. Simulation and analysis on 10-inch cold leg small break LOCA for AP1000[J]. Annals of Nuclear Energy, 2012, 46(1): 81-89.
- [6] 朱继洲, 奚树人, 单建强, 等. 核反应堆安全分析[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 2004.
- [7] Xie Heng, He Shuangji. The SCDAP/RE LAP5 3.2 model of AP1000 on SBLOCA[J]. Progress in Nuclear Energy, 2012, 61(1): 102-107.

(责任编辑: 张祚豪)