

# The Design and Development of Safety Injection System on Floating Pressurized Water Reactor

Bin Lei, Siliang Liu, Yong Zhou, Jiange Liu

Wuhan Second Ship Design and Research Institute, Wuhan Hubei  
Email: 84155332@qq.com

Received: Jun. 23<sup>rd</sup>, 2017; accepted: Jul. 2<sup>nd</sup>, 2017; published: Jul. 5<sup>th</sup>, 2017

---

## Abstract

This paper mainly introduces the practical application of engineering and development state of floating pressurized water reactor, investigates design scheme of safety injection system of overseas floating pressurized water reactor, analyzes design and layout features of safety injection system and demonstrates security advantage and engineering feasibility of passive technology on floating pressurized water reactor. Results shows: active and passive combination technology is being used on safety injection system of floating pressurized water reactor, which can greatly improve the security, reliability and economy of the safety injection system. It is recommended to use the combination of active and passive design on safety injection system of floating pressurized water reactor.

## Keywords

Floating Pressurized Water Reactor, Safety Injection System, Active, Passive, Safety

---

# 浮动式压水堆安全注射系统的发展与设计概述

雷 斌, 刘斯亮, 周 勇, 刘建阁

武汉第二船舶设计研究所, 湖北 武汉  
Email: 84155332@qq.com

收稿日期: 2017年6月23日; 录用日期: 2017年7月2日; 发布日期: 2017年7月5日

---

## 摘 要

文中简述了浮动式压水堆的工程实际应用情况及发展状态, 重点调研了国外浮动式压水堆安全注射系统

文章引用: 雷斌, 刘斯亮, 周勇, 刘建阁. 浮动式压水堆安全注射系统的发展与设计概述[J]. 核科学与技术, 2017, 5(3): 116-124. <https://doi.org/10.12677/nst.2017.53016>

的设计方案,分析了安全注射系统的设计与布置特点,论证了浮动式压水堆安全注射系统采用非能动技术的安全优势和工程可行性。结果表明:浮动式压水堆采用能动与非能动相结合的安全注射系统设计方案,可大幅度提高系统的安全性、可靠性、经济性,推荐浮动式压水堆采用能动和非能动相结合的安全注射系统设计方案。

## 关键词

浮动式压水堆,安全注射系统,能动,非能动,安全性

Copyright © 2017 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

## 1. 引言

浮动式压水堆主要应用于核潜艇、核动力航母、核商船等船用核动力装置。海洋核动力平台作为新型的浮动式压水堆,它集电、热、淡化水供应为一体,将核动力技术与船舶技术相结合,兼有核能和分布式能源的优点,能以经济、安全、稳定的方式为舰船或商船提供推进动力,为近岸孤立海岛或偏远岛屿输送电力能源,为海上油气田能源开采供应能源[1]。在提供持续能源供应的同时,浮动式压水堆采用专设安全设施满足核安全设计要求,以减轻事故对人员或环境的危害。这其中,作为专设安全设施关键系统之一的安全注射系统被设计用来保证在反应堆发生失水事故工况下堆芯的安全性。

本文调研了浮动式压水堆的应用发展状态,分析了其安全注射系统的设计特点,论证了浮动式压水堆安全注射系统采用非能动技术的安全优势和工程可行性。

## 2. 浮动式压水堆的工程应用历史

浮动式压水堆具有核燃料体积小、可长期不需要燃料补给、燃料在燃烧过程中不需要氧、压水堆技术成熟及海洋环境适应性好等优势。由于这些优势,从上世纪 50 年代到 60 年代,世界上核能技术发达国家相继进行了民用浮动式压水堆的工程应用开发。其中,俄罗斯于 1959 年建成世界上第一艘核动力破冰船“列宁号”(1989 年退役,运行 30 年),美国于 1962 年建成核动力客货船“萨瓦娜号”(1970 年退役,运行 8 年),德国于 1968 年建成核动力矿石运输船“奥托汉号”(1979 年退役,运行 11 年),日本于 1974 年建成核动力实验船“陆奥号”(1974 年实验期间发生过放射性泄漏事故,1990 年改造后又进行功率提升实验,随后进行过 4 次实验航海,最终于 1995 年退役)。

世界浮动式压水堆核商船发展情况如图 1 所示[2]。

## 3. 浮动式压水堆安全注射系统调研

### 3.1. 西德 NCS-80 号核商船安全注射系统设计方案分析

NCS-80 是西德的 80,000 马力核动力集装箱船,采用先进的一体化压水堆作为主推进装置,反应堆热功率为 220 MW。在失水事故下热量导出主要由压力释放系统、应急注射系统和安全壳外热量导出系统组成。应急注射系统和热量导出系统共有 4 套(见图 2)。它们是各自独立的,并具有独立的电力供应。每个注射系统的额定注射流量为 48 kg/s (7.2 MPa 压头)。这些系统设计方案均考虑了多样性、多重性和单一故障原则[3]。

### 3.2. 日本“陆奥”号安全注射系统设计方案分析

“陆奥”号是日本首座核动力商船，反应堆热功率为 36 MWt，采用两环路回路型压水堆核动力装置。其应急堆芯冷却系统包括应急堆芯注水系统及安全壳喷淋系统(见图 3)。其安全注射系统主要由补水泵、应急衰变热除去泵、应急堆芯注水泵等设备组成，采用的是能动注射措施，确保堆芯的安全[4]，应急堆芯冷却系统具体组成见表 1 所示。

安全注射系统分为高压安全注射分系统和低、中压安全注射系统两个主要部分，如图 4 所示。其中，高压安全注射分系统的功能由补水泵来完成，当发生小破口失水事故时，稳压器水位和压力缓慢降低，一旦低于规定值，则启动补水泵将来自补水系统的补水注入反应堆冷却剂系统。此时是在反应堆冷却剂系统高压下注水，因此为高压安注阶段。

中、低压安全注射系统由应急注水箱和应急衰变热除去泵、一次屏蔽水箱和应急堆芯注水泵、疏水泵(或排污泵)和热交换器以及各自相应的管道、阀门三大部分组成。在发生中破口或大破口失水事故时[5]，冷却剂外泄速度较快，稳压器的水位和压力迅速降低，此时投入高压安全注射系统进行注水已经无法补偿冷却剂的泄漏，则启动应急衰变热除去泵将应急注水箱的水注入反应堆冷却剂系统。如果压力降低很快，低于低压安全注射压力整定值时，则应急堆芯注水泵启动，将屏蔽水箱的水注入反应堆冷却剂系统。

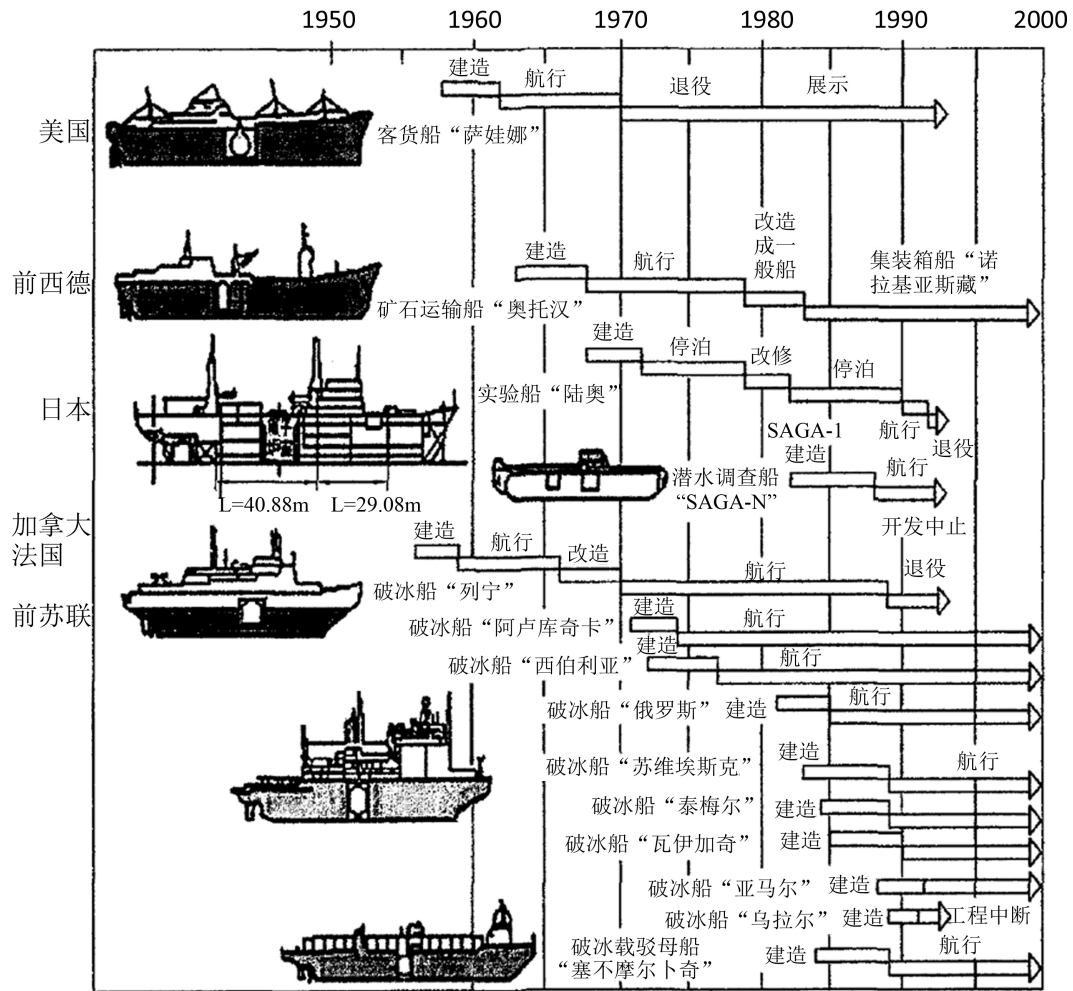
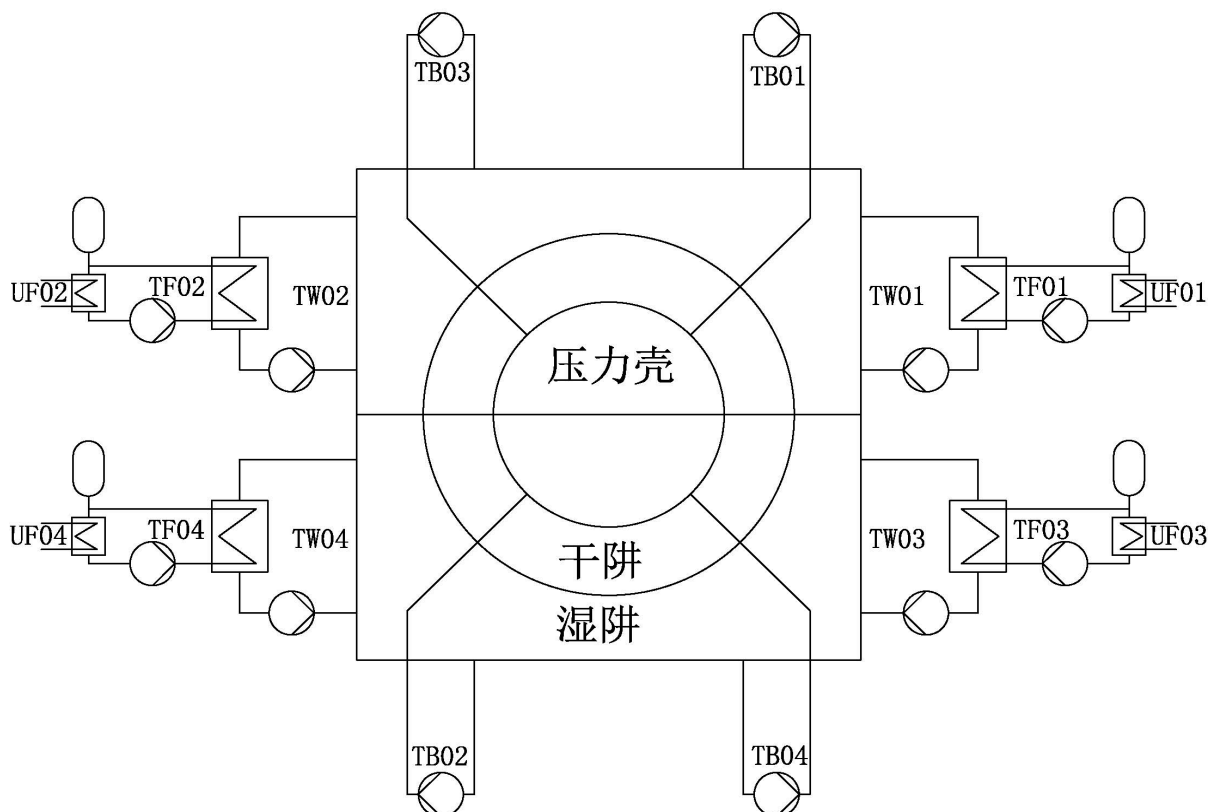


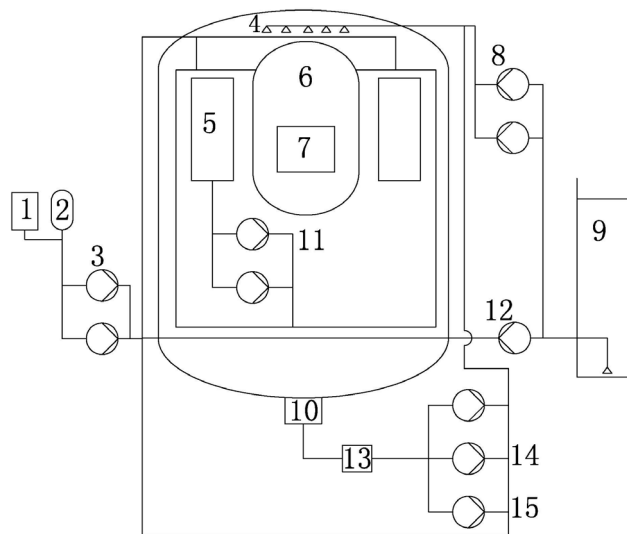
Figure 1. Development of nuclear merchant ships on floating pressurized water reactor  
图 1. 世界浮动式压水堆核商船发展情况



(图注: TB-应急注射, TF-中间冷却, TW-湿阱冷却, UF-海水冷却)

Figure 2. Schematic diagram of safety cooling system on NCS-80

图 2. NCS-80 安全冷却系统原理图



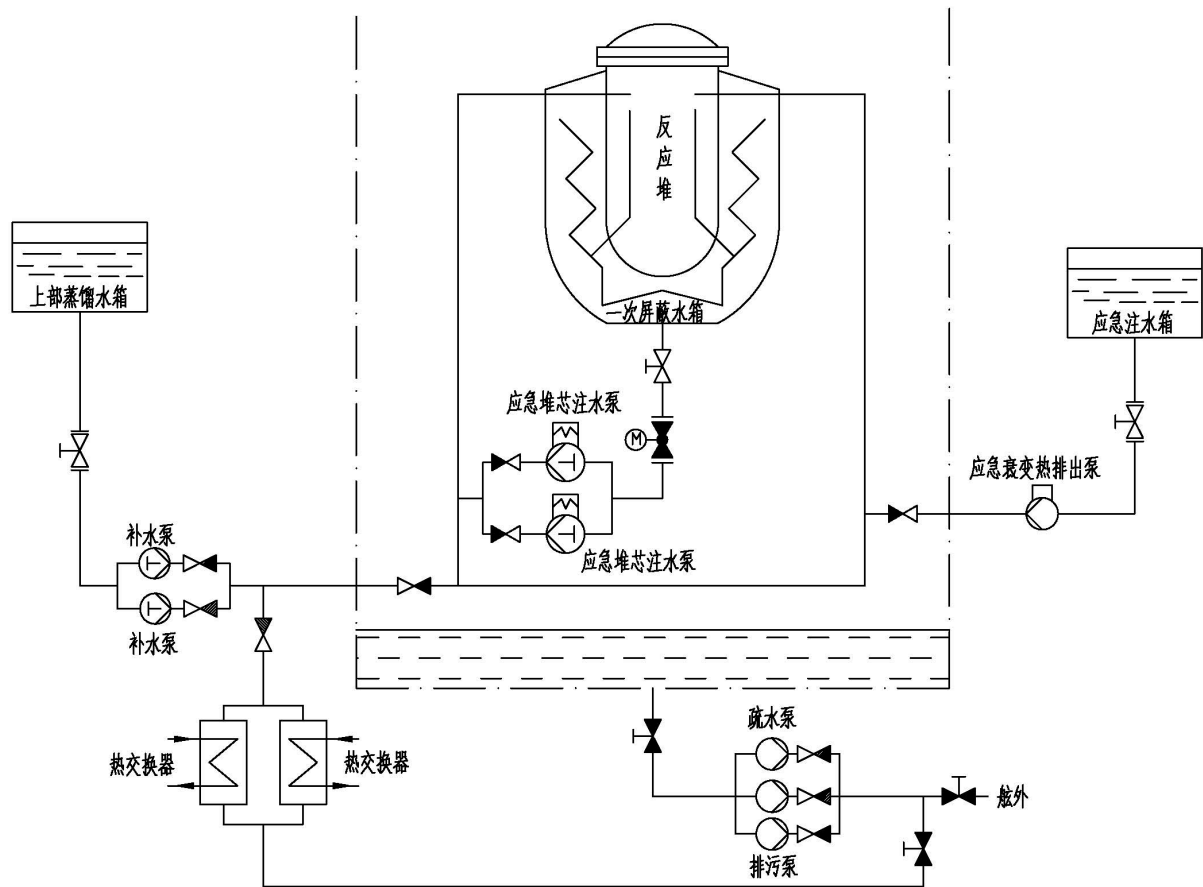
(图注: 1.上部蒸馏水箱; 2.除气器; 3.补水泵; 4.安全壳喷淋系统; 5.一次屏蔽水箱; 6.压力壳; 7.堆芯; 8.安全壳喷淋泵; 9.应急水箱; 10.取样水箱; 11.应急注水泵; 12.应急衰变热导出泵; 13.再循环热交换器; 14.排水泵; 15.取样泵)

Figure 3. Schematic diagram of emergency core cooling system on Mutsu

图 3. “陆奥”号应急堆芯注射系统原理图

**Table 1.** Composition of emergency core cooling system on Mutsu  
**表 1.** “陆奥”号应急堆芯冷却系统的组成

系统	泵		水箱
	名称	规格	
应急堆芯注水系统	补水泵	2 台活塞式 6 m <sup>3</sup> /h; 680 m	除气器及蒸馏水箱 35 m <sup>3</sup>
	应急衰变热导出泵	1 台活塞式 36 m <sup>3</sup> /h; 680 m	应急水箱 100 m <sup>3</sup>
	应急堆芯注水泵	2 台卧式离心泵 100 m <sup>3</sup> /h; 45 m	一次屏蔽水箱
安全壳喷淋系统	安全壳喷淋泵	2 台卧式离心泵 20 m <sup>3</sup> /h; 150 m	应急水箱



**Figure 4.** Schematic diagram of safety injection system on Mutsu

**图 4.** 日本“陆奥”号安全注射系统原理图

如果应急注水箱和一次屏蔽水箱的水都已用完，但反应堆还需要进行安全注射时，可启动疏水泵(或排污泵)将堆舱舱底水抽出，经热交换器冷却后注入反应堆冷却剂系统，此时为再循环注射阶段，可以维持长时间[6]。

### 3.3. 北方航线号原子破冰船安全注射系统设计方案分析

俄罗斯北方航线号原子破冰船的安全系统包括如下系统：反应堆控制和保护系统；余热排出系统；安全注射系统；安全壳抑压系统；安全壳通风系统；安全壳隔离系统及一回路超压保护系统。

当发生小破口失水事故，可通过两台补水泵向反应堆冷却剂系统补水；当发生大破口失水事故，可

通过启动两台高压电动泵分别从两台特殊水箱抽取水源, 如果任何一台高压电动泵不能投入运行, 则立即启动备用高压电动泵, 通过独立的管线, 向反应堆堆芯注射冷却水; 当压力降至 3.0 MPa 以下时, 启动备用给水泵, 通过抽取蒸馏水箱中的冷却水进行再淹没; 当两台特殊水箱中的水被耗尽后, 启动特制疏水泵从鼓泡水箱抽水进行临时堆芯冷却[7]。其原理流程图如图 5 所示。

### 3.4. KLT-40S 安全注射系统设计分析

俄罗斯的“罗蒙诺索夫”号(KLT-40S)采用双堆布置、模块化设计思想, 单堆热功率为 150 MWt, 其主冷却剂系统采用紧凑式布置设计, 反应堆、蒸汽发生器及主泵通过短管嘴连接, 在设计上消除了大破口事故。在专设安全设施方面, 采用了能动和非能动相结合的安全系统配置方案(见图 6)。

KLT-40S 的安全注射系统主要由能动高压安注系统(补水系统提供)、非能动中压安注系统(安注箱)、能动低压安注系统(低压安注泵和储水箱)等子系统和设备组成[8]。

当反应堆冷却剂系统发生失水事故, 反应堆冷却剂系统压力降至安注箱蓄压以下时, 安注箱中贮存的冷却水在氮气压力的作用下, 自动注入堆芯; 当反应堆冷却剂系统压力降至两台低压给水泵启动压力时, 同时启动两台给水泵, 抽取两台安注储水箱中的水进行注射; 当安注储水箱中的水快完时, 转入再循环注射阶段, 通过两台再循环泵抽取安全壳底部淹没水, 经两台再循环冷却器冷却后, 实施注射。其原理流程图见图 7 所示。

### 3.5. 安全注射系统调研综合分析

表 2 给出了上述核商船的安全注射系统主要设备和参数配置数据。

从表 1 和表 2 数据可得出以下结论:

1) 浮动堆的高压安全注射系统均采用能动注射方式, 由于船舶空间限制, 一般均采用补水系统的补水泵承担高压安注功能, 从而应对小破口失水事故;

2) 浮动堆的中压安全注射系统可以选择性地采用能动或非能动的注射方案, 早期的浮动堆均采用能动的中压安注系统(如: NCS-80、陆奥号、北方航线号), 近期的一般多采用非能动的安注箱设计方案以

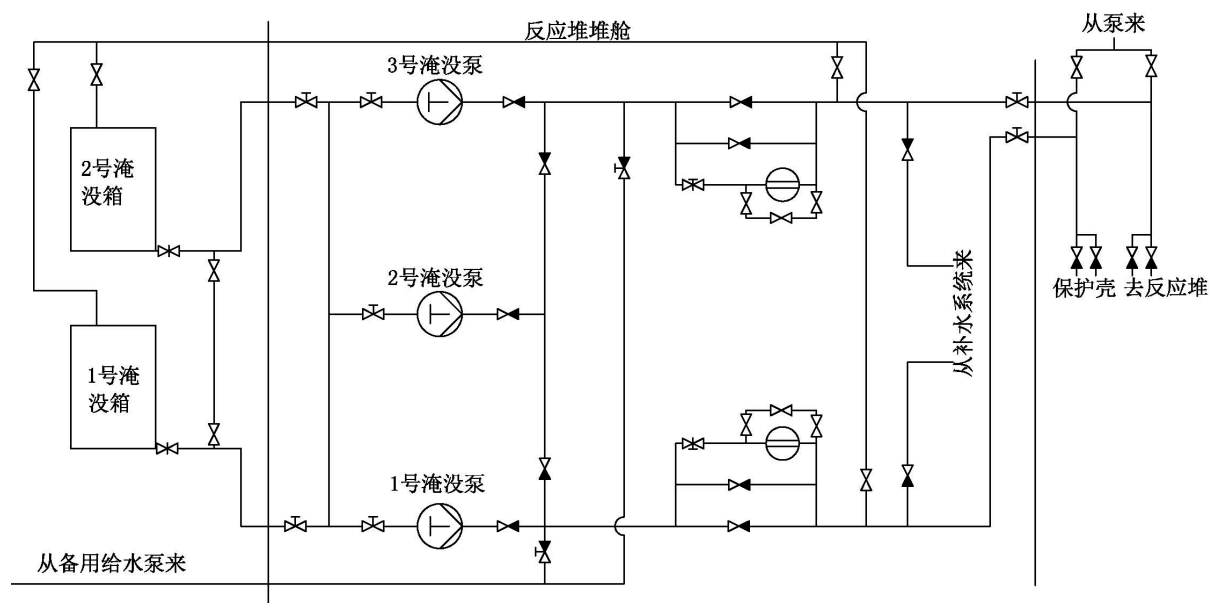


Figure 5. Schematic diagram of safety injection system on northern line atomic icebreaker

图 5. 北方航线号原子破冰船安全注射系统原理图



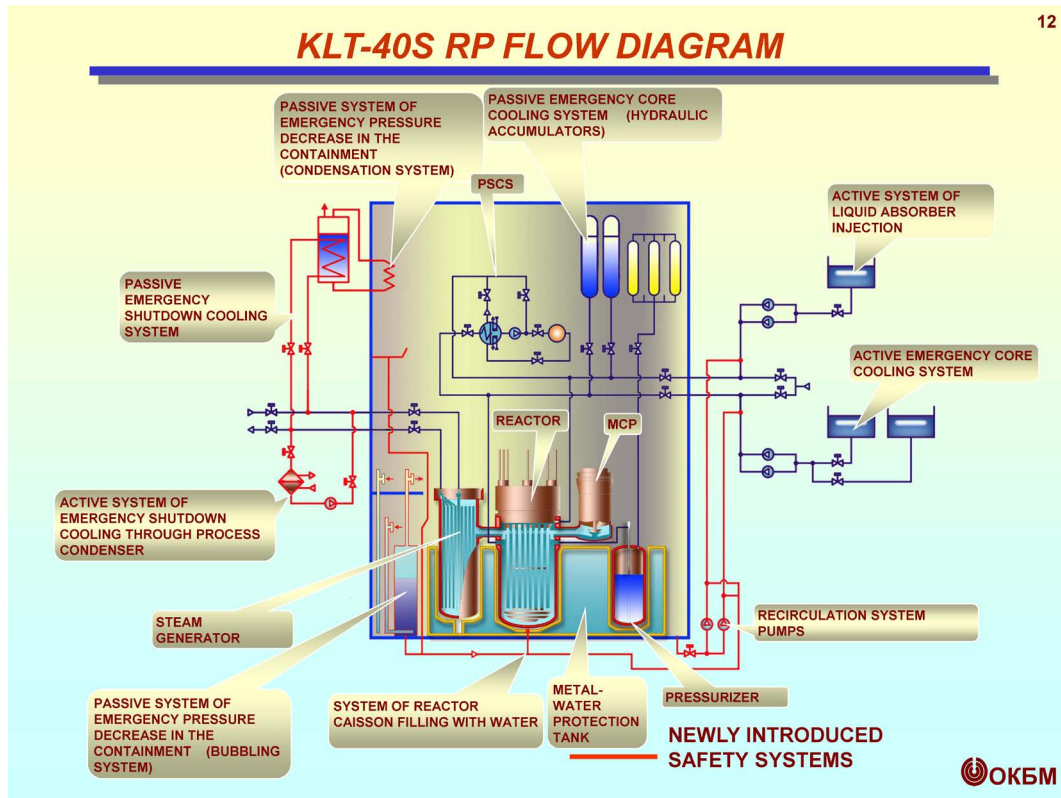
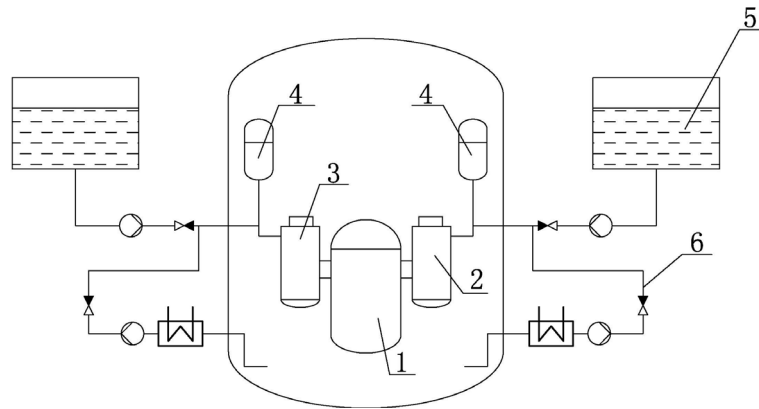


Figure 6. Configuration of special safety system on KLT-40S

图 6. KLT-40S 专设安全系统配置



(图注: 1.反应堆, 2.蒸汽发生器, 3.主泵, 4.安注箱, 5.安注储水箱, 6.再循环系统)

Figure 7. Schematic diagram of safety injection system on KLT-40S

图 7. KLT-40S 安全注射系统原理图

应对中、大破口失水事故，如：KLT-40S；

3) 浮动堆的低压安全注射系统均采用能动注射方式，低压安注泵均采用独立配置方案，并设置大容积的低压安注水箱，同时一次屏蔽水和安全壳地坑过滤水也被作为低压安注的水源，从而应对中大破口失水事故，进行堆芯的短期和长期堆芯冷却。

随着近年来反应堆固有安全设计概念的提出，非能动安全注射系统概念设计陆续被提出，因此，浮动堆采用能动和非能动相结合的安全注射系统设计方案是当前发展的主要趋势[9]。

**Table 2.** Statistical comparison of safety injection system configuration on foreign merchant ships  
**表 2.** 国外主要核商船安全注射系统配置情况统计比较

名称	西德 NCS-80	“陆奥”号	北方航线号原子破冰船	KLT-40S
高压安注	4 台应急注射泵； 流量 48 kg/s； 压头 7.2 MPa	2 台活塞式补水泵；流 量 6 m <sup>3</sup> /h；水源来自 蒸馏水箱及除气器 35 m <sup>3</sup>	2 台补水泵；流量 1.2 m <sup>3</sup> /h； 扬程 24.5 MPa；水源来自补水箱 及装有液体吸收剂的水箱	2 台应急堆芯注水泵； 水源来自应急堆芯冷却系统 注水箱总容积 20 m <sup>3</sup>
中压安注	4 台应急注射泵 (与高压安注共用)； 流量 48 kg/s；压头 7.2 MPa	1 台活塞式应急衰变热 导出泵；流量 36 m <sup>3</sup> /h； 水源来自应急水箱 100 m <sup>3</sup>	3 台高压电动泵(2 用 1 备)； 流量 20 m <sup>3</sup> /h；扬程 10 MPa； 水源来自 2 台特殊水箱总容积 25 m <sup>3</sup>	2 台非能动安注箱； 单台水容积为 4 m <sup>3</sup>
低压安注	4 台应急注射泵 (与高压安注共用)； 流量 48 kg/s；压头 7.2 MPa	2 台卧式离心泵，流 量 100 m <sup>3</sup> /h；水 源来自一次屏蔽水箱	1 台备用给水泵； 流量 32 m <sup>3</sup> /h；扬程 3.5 MPa； 水源来自蒸馏水箱 100 m <sup>3</sup>	2 台再循环注射泵

#### 4. 浮动堆非能动安全注射系统配置方案分析

安全注射系统的功能是当反应堆冷却剂压力边界管道或设备发生破损而引起冷却剂泄漏事故时，向反应堆芯注入冷却水，以冷却堆芯并保持堆芯完整性。安全注射系统一般由高压安全注射分系统、中压安全注射分系统、低压安全注射分系统等组成。它们根据事故引起的反应堆冷却剂系统的降压情况，在不同的压力下分别投运。浮动堆采用非能动安全注射系统配置方案分析如下所述。

1) 能动高压安注子系统选择思考。如果采用非能动高压安全注射系统，可以参考 AP1000 堆芯补水箱设计方案，这就需要设置具有应急补水和硼化功能的堆芯补水箱，设置气动隔离阀及相应的信号控制、可靠电源等设备，将堆芯补水箱上下两端连接在主管道或反应堆压力容器上不同压力位置，维持堆芯补水箱上下两侧压力，其优势在于提高了固有安全性，缺点在于增加了管道和开孔的数量，相对船用堆增加了复杂性；也可以采用高压气瓶维持堆芯补水箱上部气空间压力，系统简单但却需要增加维持堆芯补水箱压力的氮气瓶、气体压缩机等设备，增加船体重量；因此，浮动堆高压安全注射系统设计方案推荐采用国外已经应用的成熟工程方案，即采用能动方式，并由补水系统的补水泵提供动力。

2) 非能动中压安注子系统选择思考。如果采用非能动中压安全注射系统，可以参考陆上核电站、KLT-40S 设计方案，需要的设备主要有：中压安注箱、止回阀、电动阀及相连接的安注管道，安注箱的压力通过加压的氮气瓶来维持，系统简单、设备成熟、工程应用广泛。非能动中压安全注射利用安注箱内一定压力的氮气自动完成，在事故情况下，反应堆冷却剂系统压力下降到低于安注箱的氮气压力时，两只串联的止回阀开启，冷却水靠氮气压力注入反应堆冷却剂系统。因此，浮动堆中压安全注射系统设计方案推荐采用国内外成熟工程方案，即采用非能动方式，由加压氮气提供安注动力。

3) 能动低压安注系统选择思考。在一些先进的一体化压水堆设计[10]有非能动的低压安注系统设计方案(NuScale)，此方案通过反应堆压力容器外、安全壳内空间的蒸汽和水压差作用将冷却水注入反应堆压力容器，系统配置简单，自然循环能力强，可以大幅度提升反应堆的安全性和可靠性，但不一定适合分散式或紧凑式布置的浮动式压水堆。也可以采用高位放置的大容积储水箱来执行非能动低压安注功能，但需要在反应堆主冷却剂系统中配置多级自动卸压系统以确保低压安注水可以注入反应堆，系统虽然简单、安全，但需要设计较大的空间来贮存高位水源，影响船舶总体重量和重心。因此，浮动堆低压安全注射系统设计方案推荐采用国外已经应用的成熟工程方案，即采用能动方式，并由能动的低压安注泵提供动力。

浮动式压水堆的安全注射系统设计需要遵循浮动式核动力平台总体设计思路及相关核安全准则，借鉴国外核商船工程实践应用经验，采用成熟技术，考虑船舶空间紧凑特点和需求来进行系统设计[11]。



## 5. 结论

非能动安全系统在浮动堆核动力装置中得到了广泛应用, 对于提高反应堆的固有安全性、减小发生核事故的概率发挥了积极的作用, 采用非能动安全系统是船舶核动力装置、海洋核动力平台技术发展的一个重要趋势, 是提高安全性的一个重要可行手段。

从船舶总体设计出发, 要求核动力装置尽量体积小、重量轻、系统配置简单、设备简化。而非能动技术的应用可以简化系统配置、减少设备数量, 满足船舶总体的设计要求。

综上所述, 浮动式压水堆安全注射系统的设计思路已经逐渐由早期的能动技术逐渐发展为当前的能动与非能动相结合的设计思路。

本文调研分析结论可以为浮动堆安全注射系统的设计提供参考。

## 参考文献 (References)

- [1] Innovative Small and Medium Sized Reactors: Design Features, Safety Approaches and Trends. IAEA-TECDOC-1451, 2005.
- [2] 汪胜国. 世界核动力船研究开发的现状[J]. 国外核动力, 2008(5): 1-10.
- [3] 西德 NCS-80 反应堆失水事故的安全分析[J]. 国外舰船, 1981(5): 28-32.
- [4] 核船“陆奥”号反应堆失水事故的安全分析[J]. 国外舰船, 1981(5): 22-28.
- [5] Pawluczyk, M., Mazgaj, P. and Gurgacz, S. (2016) Loss of Coolant Accident in Pressurized Water Reactor. Prediction of a 6-Inch Cold Leg Break with Relap5 and Cathare 2. *Procedia Engineering*, **157**, 333-340. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2016.08.374>
- [6] 庞凤阁, 彭敏俊. 船舶核动力装置[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2000.
- [7] 罗琦, 柴长岭, 等译. 北方航线号原子破冰船安全分析报告. 1995.
- [8] 杨学宁, 编译. 俄罗斯舰船核动力装置研制发展历程. 2006.
- [9] 张丹, 邱志方. 海洋民用核动力安全设计综述[J]. 第一届全国小型堆安全监管研讨会, 2016(11): 231-240.
- [10] Passive Safety Design Option for SMRS. IAEA Nuclear Energy Series Report, 2008.
- [11] 孙玉伟, 严新平. 民用船舶的核动力选择[J]. 中国船检, 2010(4): 70-74.

期刊投稿者将享受如下服务:

1. 投稿前咨询服务 (QQ、微信、邮箱皆可)
2. 为您匹配最合适的期刊
3. 24 小时以内解答您的所有疑问
4. 友好的在线投稿界面
5. 专业的同行评审
6. 知网检索
7. 全网络覆盖式推广您的研究

投稿请点击: <http://www.hanspub.org/Submission.aspx>

期刊邮箱: [nst@hanspub.org](mailto:nst@hanspub.org)