

注：国家科技重大专项课题（No. 2017ZX06004004）；国家科技支撑计划项目（No. 2014BAE11B01）；国家科技重大专项课题（No. 2019ZX06002020）；重庆市重点研发计划（No. cstc2017zdcy-zdyfX0079）；国机集团重大科技专项项目（No. SINOMAST-ZDZX-2019-03）

摘要：堆芯出口温度测量传感器用于测量核电站反应堆堆芯相关燃料组件的出口温度，对核电站的安全运行起着至关重要的作用，是核电站安全运行的关键仪控设备。该温度传感器安全等级为 1E 级，质保等级为 QA1 级。由于工作在堆芯环境，需满足高精度、长寿命、耐辐照、抗地震以及 LOCA 试验等要求，技术质量要求极高。本文从温度传感器的关键材料、核心元件、结构以及质量鉴定等方面介绍了压水堆堆芯出口温度传感器的研发进展，详细叙述了重庆材料研究院有限公司相关产品的研发、质量鉴定试验以及试验后产品的性能等内容，为我国该类产品的自主化研制提供了重要参考。

关键词：堆芯出口温度测量传感器；K 型热电偶；压水堆核电站；质量鉴定

中图分类号：TH811 文献标识码：A 文章编号：1006-883X(2020)06-0019-06

收稿日期：2020-03-31

## 压水堆堆芯出口温度测量传感器研制进展

陈洁<sup>1, 2</sup> 黄美良<sup>3</sup> 赵安中<sup>2, 4</sup> 刘敏<sup>1, 2</sup> 郑雅文<sup>1, 2</sup> 冯邻江<sup>1, 2</sup> 王华<sup>1, 2</sup> 陈蜀志<sup>3</sup>

1. 重庆材料研究院有限公司，重庆 400707；2. 国家仪表功能材料工程技术研究中心，重庆 400707；

3. 中广核工程有限公司，深圳 518042；4. 国机集团科学技术研究院有限公司，北京 100050

### 一、引言

核能是清洁能源，我国正大力发展之中。我国在建的民用核电站大都是压水堆型。为监测反应堆运行状态及冷却剂载热状况，压水堆核电站约四分之一堆芯燃料组件出口处设置温度传感器，测量堆芯出口温度分布，通过计算饱和裕度监测堆芯冷却状态<sup>[1-3]</sup>。例如，早期 12 个月焊料的大亚湾核电站中温度传感器测量偏差超过 20℃ 时，将启动 RIC701/702AA 报警<sup>[3]</sup>。

热电偶型温度传感器的测量原理基于热电现象，当温度梯度和电动势梯度共存于导体中时则产生热电效应，当两种不同金属 A 和 B 组成闭合回路，若导体的两个接点处温度不同，回路中将产生温差电动势，即塞贝克效应（Seebeck Effect）。两种金属接触时，因自由电子密度不同，接触面上的电子逐渐扩散至平

衡，而扩散速度与温度成正比，两金属间温差恒定时，电子将持续扩散形成稳定电势<sup>[4-5]</sup>。自 1821 年塞贝克发现热电效应以来，已有 300 多种材料构成热电偶，其中广泛使用的有 40~50 种，其中 8 种热电偶材料已经标准化，如 S 型、T 型、N 型以及 K 型等<sup>[4-9]</sup>。

1957 年荷兰飞利浦公司研制出一种类似于电缆的热电偶，将偶丝、绝缘材料和金属套管三者经旋锻或拉拔而制成可绕的组合体，称之为铠装热电偶<sup>[10]</sup>，广泛应用于航空、航天、能源、化工、机械等各个领域，引起了热电偶材料发展史上的变革。

压水堆堆芯出口温度测量传感器通常采用核级 K 型（NiCr-NiAl）铠装热电偶，配套的附件有接线盒（连接件）、补偿电缆等组成<sup>[11-12]</sup>。传感器安全等级为 1E 级，质保等级为 QA1 级，不仅需满足高精度、长寿命测量要求，还需满足耐辐照、抗地震以及 LOCA 试验等要求。

由于技术质量要求极高，国内民用核电站堆芯出口温度测量传感器全部依赖进口产品。重庆材料研究院有限公司为我国核工程及核设施研制了相关产品。

## 二、堆芯出口温度测量传感器的核心元件

在核反应堆芯领域，上世纪六七十年代国际上开始堆芯温度测量的试验和研究。数十年在核反应堆良好运行的经验表明，K型(NiCr-NiAl)热电偶可以满足核反应堆内抗辐照性能的使用要求。因此目前国内外压水堆堆芯出口温度测量传感器大都采用K型(NiCr-NiAl)铠装热电偶。

### 1、金属套管材料

铠装热电偶电缆的外部金属套管会抑制服役环境对偶丝污染，延长使用寿命。常用外套管材料主要为奥氏体不锈钢、高温合金。普通工业级产品通常按GB/T 14975-2002标准执行，对微量元素含量未做特别要求，不能满足核级应用要求。核级铠装热电偶外套管材料需执行核级标准，如RCC-M标准中要求Co<0.2%，明确限制了Si、P、S、Mo等元素含量。常用不锈钢牌号为核级Z2CND17-12(316L)。

高温合金具有较好的高温抗氧化性和抗硫腐蚀性，常用牌号有Inconel 600、Inconel 690、Inconel 800等。在三代核电技术中，俄罗斯INKOR公司产品采用Inconel 600作为外套管材料，AP1000、CAP1400核电技术中要求使用Inconel 690作为外套管材料。

铠装热电偶在服役期间套管材料中的部分元素会扩散至偶丝表面，引起偶丝成分不均匀，造成电势漂移。因此在选择热电偶金属套管材料，探讨热电偶的电势稳定性时，应结合热电偶丝成分，考虑偶丝与套管间的兼容性，尤其是高温服役环境条件下套管材料对偶丝成分演化的影响。

表1 Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>和MgO物理性能对比

	熔点 (°C)	耐压强度 (MPa)	弯曲强度 (MPa)	热传导率 400°C (W/m·K)	热膨胀系数 20~1000°C (×10 <sup>-6</sup> /°C)	电阻率 (Ω·cm)	
						20°C	500°C
Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	2050	2942	294.2	8.4	8.1	>10 <sup>13</sup>	10 <sup>9</sup>
MgO	2800	637.4	98.1	12.6	13.3	>10 <sup>13</sup>	10 <sup>11</sup>

### 2、绝缘材料

铠装热电偶通常使用金属氧化物作为绝缘材料，如Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>、MgO等。这类氧化物与偶丝有较好的相容性，不易发生化学反应。ASTM E235标准以及我国EJ 660标准均推荐使用高纯Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或MgO，并规定了其纯度以及杂质元素含量，但ASTM E165在杂质元素的种类及含量方面控制要求远高于EJ/T 660。

表1是两种绝缘材料的性能对比<sup>[4,13]</sup>。铠装热电偶长期服役在高温环境中，温度升高时，绝缘材料的原子、分子运动增加，带电离子在电场的作用下产生移动而传递电子，将导致绝缘电阻降低。500°C时MgO电阻率比Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>电阻率高一个数量级<sup>[13]</sup>。MgO与Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>相比，机械强度较低，在制备铠装热电偶时易于拉拔变形，对偶丝表面磨损较小，将减小绝缘材料对偶丝合金的切削作用。

目前国内各核电站的铠装热电偶温度传感器技术规格书中，MgO和Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>均可作为绝缘材料，无明确的限制要求。但热电偶测温时，输出电势信号为毫伏级，因此绝缘性能至关重要。国内铠装热电偶的生产厂家多使用MgO作为绝缘材料，法国公司的堆芯温度探测器采用Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>，俄罗斯INKOR公司产品中的绝缘材料Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>或MgO均常见其使用。然而铠装热电偶的绝缘性能不仅仅取决于绝缘材料的基本物理性能，在制造工艺中，绝缘材料的烧结、结构尺寸控制等工艺均直接影响热电偶温度传感器的绝缘电阻，尤其是高温绝缘性能。

### 3、热电偶丝

K型热电偶成分主要有NiCr-NiSi和NiCr-NiAl两种，但其热电特性相同，且使用同一分度表。我国国内主要生产NiCr-NiSi型热电偶丝，而国外多数使用NiCr-NiAl型，尤其是核反应堆中。我国最新核行业标准

NB/T 20375《核电厂安全重要热电偶温度计》推荐使用K型NiCr-NiAl合金作为热电偶丝。经验表明，镍基材料的热电偶长期在堆内中子辐照仅会造成几摄氏度漂移，可满足核反应堆内抗辐照性能的使用要求。

国内外研究表明，N型热电偶比K

型热电偶在核场应用更有优势。美国 ASTM E235/E235M-2012《核设施或其他高度可靠性设施用 K 型和 N 型矿物绝缘的铠装热电偶标准规范》，该标准增加了 N 型热电偶作为核级铠装热电偶材料。重庆材料研

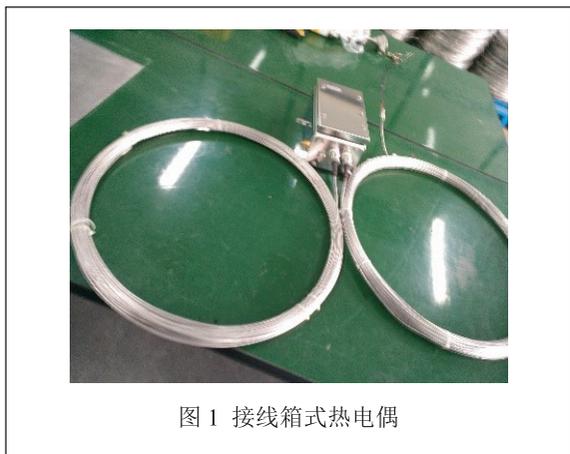


图 1 接线箱式热电偶

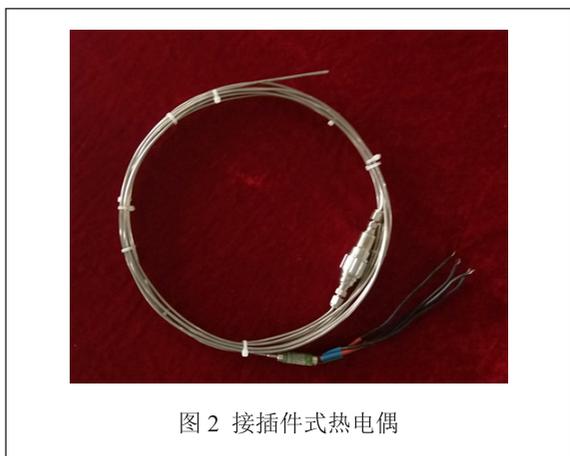


图 2 接插件式热电偶

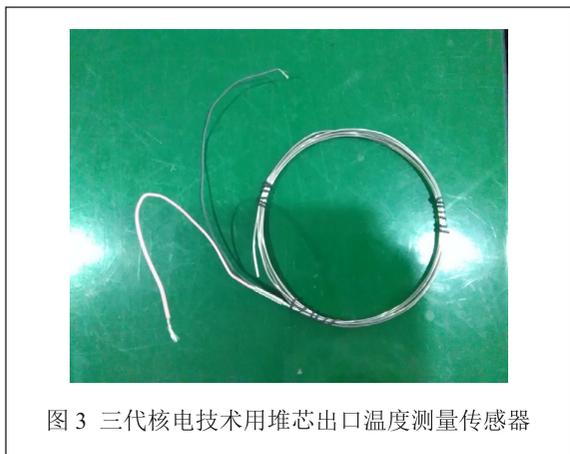


图 3 三代核电技术用堆芯出口温度测量传感器

究院有限公司研制的核级 N 型铠装热电偶已在核工程中获得应用。

### 三、堆芯出口温度测量传感器的结构

#### 1、CPR 核电技术用温度传感器结构

国内在役二代及二代改进型压水堆 CPR 堆芯测量方案采用外径为  $\Phi 3.17\text{mm}$  核级 K 型铠装热电偶作为独立传感器，从堆芯引出至安全壳贯穿件，接入数据处理机柜。连接方式有接线箱式、接插件式两种。

##### (1) 接线箱式铠装热电偶温度传感器

接线箱式铠装热电偶温度传感器由铠装热电偶、铠装补偿线、接线箱等组成。热电偶冷端引线贯穿入接线箱内，与补偿线一端连接密封后，从接线箱内引出后接入电其贯穿件。

##### (2) 接插件式铠装热电偶温度传感器

接插件式铠装热电偶温度传感器由铠装热电偶、密封卡套、接插件、铠装补偿线等组成。密封卡套用于实现铠装热电偶（铠装补偿线）与接插件的密封连接。接插件由外壳材料、绝缘材料、密封垫圈等组成，与接线箱式温度传感器相比，该结构类型插拔方便，可减少人员拆卸时间。目前我国国内 CPR 核电机组以及出口巴基斯坦核电站多采用该类型结构。

#### 2、一体化堆芯温度传感器结构

俄罗斯 VVER、法国 EPR、美国 AP1000 等核电堆型中，堆芯测量系统采用一体化堆芯探测器测量组件，实现在线中子注量率测量以及温度测量等功能，参与反应堆在线保护。随着自主三代核电技术的发展，如“华龙一号”、CAP1400 等核电技术也采用一体化结构，从压力容器顶部引入反应堆内。堆芯温度传感器与中子探测器，或者堆芯温度传感器与水位探测器组件集成装配在内径约为  $\Phi 5.5\text{mm}$  的套管内，组成一体化堆芯探测组件。与二代 CPR 核电技术相比，热电偶外径由  $\Phi 3.17\text{mm}$  减小至  $\Phi 1.6\text{mm}$  以下，对核级铠装热电偶可靠性提出更高要求。

根据“华龙一号”技术要求，重庆材料研究院研制了堆芯出口温度测量传感器与热导式水位探测器集成的一体化探测组件，在综合考虑组件动态响应特性、强度、机械性能、抗振，以及地震环境等因素的基础上，

设计的堆芯出口温度测量传感器采用的核级铠装热电偶为单元件结构，外径约为  $\Phi 1.6\text{mm}$ ，经密封后直接引出信号。

#### 四、堆芯出口温度测量传感器的质量鉴定

由于核电行业的特殊性，对产品的技术成熟度及可靠性要求极高。在应用到核电工程以前，都应按照行业标准规范要求，开展核环境条件质量鉴定试验，以验证其满足技术规范规定的性能要求。

在充分吸收我国核电厂核安全级电气设备开展质量鉴定的两个主要参考标准——GB/T 12727 和 EJ/T 1197 的基础上，依托“华龙一号”堆芯出口温度传感器的研发良好实践，中广核工程有限公司联合重庆材料研究院有限公司，编制了能源行业标准《NB/T 20493-2018 核电厂安全级铠装热电偶质量鉴定》，该

标准在执行 GB/T 12727 要求在鉴定试验的试验项目、试验条件、试验和测试方法、操作和测试步骤以及验收准则等方面进行了详细规定，为核电仪控设备自主化提供重要参考。

#### 五、堆芯出口温度测量传感器的研制进展

目前，我国民用大型核电站的核级温度测量装置大都依赖进口，但进口的核级温度传感器不仅价格昂贵，同时还受到国际关系等原因的诸多制约和限制，非常不利于我国核电事业的自主发展。

重庆材料研究院有限公司在核电业主的支持下，研发了接插件式铠装热电偶温度传感器、接线箱式铠装热电偶温度传感器以及三代“华龙一号”一体化堆芯温度传感器等 3 类工程样机，在国家核安全局见证下，按技术规格书规定的安装接口和结构要求，每类

样机全部按照表 2 的试验顺序完成了质量鉴定试验验证，开展了基准试验（室温绝缘电阻、分度性能）、热老化试验、交变湿热试验、辐照试验、振动老化试验、地震试验、模拟事故工况热力和化学环境试验等一系列鉴定试验验证。

按照 NB/T 20375-2016 中规定的条件和方法进行了热冲击试验。试验过程中，热电偶温度计从温度为  $T_{\min}$  ( $25^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ ) 到温度为  $T_{\max}$  ( $350^{\circ}\text{C} \pm 5^{\circ}\text{C}$ )，在温度为  $T_{\min}$  的恒温槽之间移动 25 个周期循环，试验期间，热电偶电势信号波形变化一致，无信号滞后现象。

热循环试验前后样品  $0^{\circ}\text{C}$  温度漂移最大值  $0.11^{\circ}\text{C}$ ， $100^{\circ}\text{C}$  温度漂移最大值  $0.07^{\circ}\text{C}$ 。辐照试验后，与基准试验相比  $100^{\circ}\text{C}$  分度差值最大为  $-1.059^{\circ}\text{C}$ ， $232^{\circ}\text{C}$  分度差值最大为  $-1.63^{\circ}\text{C}$ ， $370^{\circ}\text{C}$  分度差值最大为  $0.37^{\circ}\text{C}$ ， $419^{\circ}\text{C}$  分度差值最大为  $0.44^{\circ}\text{C}$ ；在全部质量鉴定试验结束后，热电偶  $1100^{\circ}\text{C}$  分度试验的测量精度偏差为  $-1.82^{\circ}\text{C}$ ，仍满足一级精度要求，

表 2 鉴定试验项目

试验类别	试验项目
基准试验	外观检查和机械检查
	介电性能试验
	室温绝缘电阻
	接线检查及电连续性检查
	机械接地阻抗试验
	热电偶分度试验
	热响应时间试验
正常运行环境条件下的极限值试验	电磁兼容试验
试验样件的机械强度试验或耐久性试验	低温高温试验
	热老化试验
	交变湿热试验
	重复性试验（热冲击）
	热循环试验
	辐照试验
事故和事故后环境条件试验	振动老化
	地震试验
	模拟事故工况热力和化学环境试验
评价试验	事故后热力条件下的试验
	热电偶 $1100^{\circ}\text{C}$ 分度试验

绝缘电阻值均大于  $10^8\Omega$ ，各项技术指标满足“华龙一号”技术规格书及国内外相关标准要求。因此，重庆材料研究院研制的堆芯出口温度测量传感器在正常和异常运行条件、设计基准事故期间和事故后特定的运行条件下均能满足规定的功能和性能要求。

2018年9月，国家核安全局批准重庆材料研究院依托“华龙一号”技术要求研发的1E级铠装热电偶产品获得了国家核安全局颁发“民用核安全电气设备设计、制造许可证”，成为国内首个获得三代核电技术该类核级产品设计制造许可证的单位，获得了大型民用反应堆市场准入资格。

2018年11月，“华龙一号”1E级铠装热电偶通过了由中国机械工业联合会组织的科技成果鉴定，认为研制的堆芯出口温度测量核级铠装热电偶已达到国际同类产品先进水平，研发的1E级铠装热电偶将推进我国高性能核仪器仪表自主化，可满足我国三代核电技术自主化建造和实施“走出去”战略的需求。

## 六、结束语

本文总结了核级温度传感器核心元件采用的金属套管、绝缘材料、热电偶丝等材料特性，介绍了我国大型压水堆核电技术用堆芯出口温度传感器的结构形式、质量鉴定以及产品研制进展。

介绍了重庆材料研究院有限公司研发的接插件式铠装热电偶温度传感器、接线箱式铠装热电偶温度传感器以及三代“华龙一号”一体化堆芯温度传感器等3类工程样机。该成果创新性的突破了相关技术难点，经全寿期质量鉴定后，可满足“华龙一号”堆芯出口温度测量传感器技术规格书所要求和质量鉴定要求。产品在正常和异常运行条件、设计基准事故期间和事故后特定的运行条件下均能满足规定的功能和性能要求。

压水堆芯出口温度测量传感器自主化开发取得了阶段性的成功，推进了我国高性能核仪器仪表产业化，可满足我国自主三代核电技术的建造急需。

## 参考文献

[1] 陆彬. 核电站堆芯温度场重构研究[D]. 东南大学,

2016.

[2] 王振营, 孙晨, 吴蓓. CPR1000 核电站堆芯出口冷却剂过冷度测量不确定度评定[J]. 核动力工程, 2015(2):24-27.

[3] 陶书生, 周红, 石俊英. 大亚湾核电站堆芯出口温度测量系统报警定值修改的审评经验[J]. 核安全, 2007(4):32-34.

[4] 黄泽铄. 热电偶原理及其检定[M]. 中国计量出版社, 1993.

[5] 王魁汉. 温度测量实用技术[M]. 机械工业出版社, 2007.

[6] Jie Chen, Xiaodong Peng, Weidong Xie, Anzhong Zhao, Hua Wang. Influence of high dose  $\gamma$  irradiation on the calibration characteristics of type K mineral-insulated metal sheathed thermocouples, *Journal of Alloys and Compounds* 696 (2017) 1046-1052.

[7] Jie Chen, Xiaodong Peng, Weidong Xie, Hua Wang, Anzhong Zhao. The compatibility between thermocouple wires and sheath alloy for small diameter mineral-insulated metal-sheathed (MIMS) thermocouples in long-term aging, *Measurement*. (2018) <https://doi.org/10.1016/j.measurement.2018.07.064>

[8] Scervini M, Rae C. An Improved Nickel Based MIMS Thermocouple for High Temperature Gas Turbine Applications[C]// ASME Turbo Expo 2012: Turbine Technical Conference and Exposition. 2013:775-783.

[9] M. Scervini, C. Rae, The contributions to drift of positive and negative thermoelements in type K bare-wire thermocouples, *Temperature: its measurement and control in science and industry, volume 8: Proceedings of the Ninth International Temperature Symposium*. Vol. 1552. No. 1. AIP Publishing, 2013, 564-569.

[10] 黄泽铄. 热电偶材料的新近发展[J]. 功能材料, 1984(5):3-19.

[11] 高鹏. 核电站反应堆堆芯温度测量K型热电偶的国产化研制[J]. 南方能源建设, 2017, 4(2):132-136.

[12] 孙智超, 孙炯, 朱陈洛, 等. 巴基斯坦核电机组C3/C4堆芯测温用铠装热电偶的研制[J]. 工业仪表与自动化装置, 2017(6):29-32.

[13] 佚名. 测温材料国内外发展概况(下)[J]. 功能材料, 1971(2):23-42.

## The Current Research Situation for In Core Temperature Measurement Thermocouple Sensor of Pressurized Water Reactor

CHEN Jie<sup>1,2</sup>, HUANG Mei-liang<sup>3</sup>, ZHAO An-zhong<sup>2,4</sup>, LIU Min<sup>1,2</sup>, ZHENG Ya-wen<sup>1,2</sup>, FENG Lin-jiang<sup>1,2</sup>, WANG Hua<sup>1,2</sup>, CHEN Shu-zhi<sup>3</sup>

(1. *Chongqing Materials Research Institute Co., Ltd., Chongqing 400707, China*; 2. *National Instrument Functional Materials Engineering Technology Research Center, Chongqing 400707, China*; 3. *China Nuclear Power Engineering Co., Ltd., Shenzhen 518042, China*; 4. *SINOMACH Academy of Science and Technology Co., Ltd., Beijing 100050, China*)

**Abstract:** For nuclear reactors measurements, the monitoring and control of temperature is pertinent to the safe operation of the reactor. The desirable requirement for the temperature sensor is safety class 1E, quality assurance QA1, radiation resistance, Anti-seismic and requirement of LOCA (lost of coolant accident). Since the sensors are installed in the core, it should meet the requirement of high accuracy, long life, irradiation resistance, anti-seismic and the LOCA experiment. In this paper the research and development progress of this temperature sensor are introduced from the view of component, structure and the qualification experiments. This paper also summarizes qualification experiment items and the performance of the thermocouple sensor produced after the tests by chongqing material research institute. The achievement provides an important reference for the independent research of this kind of products in china.

**Key words:** In-core Temperature sensor; K type thermocouple; Pressurized Water Nuclear Reactor; Qualification

## 作者简介

陈洁: 重庆材料研究院有限公司, 高级工程师, 主要从事测温材料及应用研究, 重点围绕我国自主三代核电“华龙一号”、CAP1400等需求, 开展特种温度传感器研发。

通信地址: 重庆市北碚区嘉德大道8号

邮编: 400707

邮箱: nmchen2@163.com

黄美良: 中广核工程有限公司, 高级工程师, 主要从事核电仪器仪表设计及研发。

赵安中: 重庆材料研究院有限公司, 教授级高级工程师, 主要从事功能材料研发及科技管理。

刘敏: 重庆材料研究院有限公司, 主要从事核电传感器市场推广与应用。

郑雅文: 重庆材料研究院有限公司, 工程师, 主要从事核电传感器科技协调。

冯邻江: 重庆材料研究院有限公司, 高级工程师, 主要从事核电液位传感器、加热器等产品研究与开发。

王华: 重庆材料研究院有限公司, 教授级高级工程师, 主要从事航空、航天、核电等领域传感器研究及开发。

陈蜀志: 中广核工程有限公司, 高级工程师, 主要从事核电工艺系统及相关仪表设计与研究。