

《压水堆核电厂一回路冷却剂加锌指南》编制说明

（征求意见稿）

一、工作简况

1、任务来源

《压水堆核电厂一回路冷却剂加锌指南》由三门核电有限公司主编，起草于2019年10月。2020年5月20日与中国核能行业协会完成该项目合同签订。根据工作计划安排，2021年6月30日前完成标准发布。

2、主要工作过程

2.1 总体过程

本标准的制定过程主要分为前期准备、征求意见稿编写阶段、送审稿编写阶段和报批稿编写阶段。

2.2 前期准备（2019年5月-2019年12月）

该阶段主要任务是成立标准编制小组，明确分工要求、分解工作任务、开展文件收集和调研分析、确定标准编制的进度控制等要求。

明确责任分工后，各成员单位按计划开展调研和文件收集工作，主要围绕三门核电、山东核电的加锌数据和经验进行收集和分析，同时学习、消化国外电站的加锌经验。

根据前期工作成果，结合核电标准体系制定要求，将本标准的最初框架结构设置为：前言、目次、范围、规范性引用文件、术语和定义、加锌设备、醋酸锌技术规范 and 锌浓度控制、加锌注意事项、加锌操作、取样分析、锌浓度异常处理和附录。2019年11月28日-29日通过了中国核能行业标准立项审查会，根据会上专家意见，将原名称《压水核电厂一回路加锌标准》改为《压水堆核电厂一回路冷却剂加锌指南》。

2.3 征求意见稿编写（2020年1月-2020年9月）

编制组总结三门和山东核电的加锌经验，结合国外加锌电站的运行经验，充分考虑我国核电现状和未来发展，起草了本标准的工作组讨论稿。2020年5月12日、5月27日召开了《压水堆核电厂一回路冷却剂加锌指南》工作组讨论稿的研讨会。参编人员对工作组讨论稿进行了充分的讨论，提出应增加和完善加锌机理、加锌前评估、加锌效果评估等方面的内容，对标准的结构进一步

优化。同时还对标准的具体细节提出了修改意见，如明确加锌流量设置，明确加锌溶液箱溶液浓度配制策略等。将标准的框架结构优化后，设置为：目次、前言、范围、规范性引用文件、术语和定义、加锌的机理、加锌前评估和数据采集、加锌装置和醋酸锌技术规范、加锌执行、加锌注意事项、加锌效果评估。参编人员一致通过本标准工作组讨论稿，形成本标准征求意见稿初稿。

2020年6月17日，召开《压水堆核电厂一回路冷却剂加锌指南》征求意见前专家咨询会，会上专家建议一致认可本标准编制的必要性，在细节方面还要继续优化，比如章节结构设置、专业术语等要满足标准编写规范要求。根据专家审查意见，对征求意见稿进行修订，如增加4.0章节总则的描述、将原5.0章节加锌前评估和数据采集分为两个章节、增加规范性引用文件、修订术语和定义格式等，标准最终的框架结构为：目次、前言、引言、范围、规范性引用文件、术语和定义、总则、加锌前评估、数据采集、加锌装置、醋酸锌技术规范和安全防护、加锌执行、加锌注意事项、加锌效果评估共11个章节。

2.4 送审稿编写（2020年10月-2021年6月）

完成征求意见稿公示后，标准编制组将根据专家审查意见，召开编写组内部讨论会，落实专家意见，并重新分工对征求意见稿进行修改和完善，按要求形成并提交送审稿。

3、主要参加单位和工作组成员及其所作的工作等

	参编单位	编制人员	职务/职称	开展工作
1.	三门核电有限公司	孟宪波、范赏	工程师	编制、全文
2.	三门核电有限公司	姜磊	高工	校核、全文
3.	三门核电有限公司	吴旭东、侯涛	高工	审核、全文
4.	山东核电有限公司	张嘉康、阙良生	高工	审核、全文
5.	上海核工程研究设计院有限公司	桂璐廷	高工	审核、全文
6.	中核核电运行管理有限公司	王森	高工	审核、全文
7.	苏州热工研究院	林根仙	高工	审核、全文

二、标准编制原则和主要内容

1、标准编制原则

本着科学性和可行性的原则制定本标准。

（1）科学性

AP1000 机组作为国内唯一加锌的堆型，完整经历了热态功能试验、装料后启动、首循环运行及首次大修加锌应用的全过程，在三门核电和山东核电 4 台机组积累了大量的加锌数据和加锌经验。除了对 AP1000 机组一回路加锌应用经验和数据进行总结和分析，编制组同时还借鉴了国外 40 多个电站的加锌经验和数据（包括和 AP1000 机组一样，国际上第一台从热态功能试验期间开始加锌的电站），为标准制定的科学性奠定基础。

除了 AP1000 机组，标准编制组还调研了我国在运和在建电站一回路设计情况，与国际加锌电站进行对比，通过对比分析表明已运营核电站 87%（41/47）具备加锌条件，在建 11 台核电站全部可以从热态功能试验期间就开始加锌。

（2）实用性

本标准规定了压水堆核电厂一回路冷却剂加锌的全过程，包括加锌准备前的评估，加锌过程如加锌设备、醋酸锌化学品技术规范、注意事项、热态功能试验和功率运行阶段锌浓度控制、加锌速度、取样要求、注锌箱溶液配制浓度、异常工况处理等内容，具有很强的指导性和可执行性，使一回路冷却剂加锌技术应用更加科学、合理，有效降低堆芯沉积带来的安全风险。本标准同时减少了加锌过程的主观性、随意性，体现科学性和可操作性，规范核电行业一回路冷却剂加锌技术的应用，在确保安全的前提下，进一步实现辐射剂量 ALARA 原则目标。

2、标准主要内容的依据

本团体标准的格式遵从 GB/T 1.1-2009 的要求。本团体标准中的主要设计要求和参数指标体现最新的研究成果，符合目前国内压水堆核电厂法律、法规和监管要求。

本标准共分 11 章。

第一章为范围

本标准适用于指导压水堆核电厂热态功能试验和功率运行期间一回路加锌应用。

第二章为规范性引用文件，为本标准引用的参考文献。

第三章为术语和定义。

第四章为总则。介绍加锌应用过程的总体原则。

第五章为加锌前评估。介绍了加锌前需要对燃料可靠性、系统材料相容性进行评估，对化学控制的影响、硼浓度稀释、反应性管理和树脂的影响进行评估，对最终安全分析报告、技术规格书的影响进行分析。

第六章：数据采集。对于非首循环开始加锌的机组，加锌前 1-2 循环，收集冷却剂中的铁、镍以及放射性核素等数据；收集加锌前和加锌后机组固定位置的辐射场测量数据，以评估加锌效果；收集加锌过程锌的平均浓度、暴露量等以评估加锌效果。

第七章为加锌装置。根据实际使用经验，对锌溶液箱材质、体积、锌溶液的浓度等提出相关建议和要求；对加锌泵的流速和流量调节精度，以及加锌位置选择提出相关建议和要求。

第八章为醋酸锌技术规范和安全防护。使用贫化醋酸锌可以减少醋酸锌中的 ^{64}Zn ，避免 ^{64}Zn 在堆芯活化生成 ^{65}Zn ，形成新的辐射源，因此为降低辐射场为目的加锌电站，都会选择贫化锌。醋酸锌安全防护参照醋酸锌化学品安全说明书制定。

第九章为加锌执行。介绍了加锌的前提条件、醋酸锌溶液配制、热态功能试验和装料后锌浓度控制、加锌速度调节、取样、分析和锌浓度异常处理的相关内容。9.1 节介绍了加锌前提条件，因为余热排出系统退出以后，一回路建立了稳定化学控制条件。且在高温下，铁和镍的溶解度下降，系统对锌的吸收速度增大，因此选择在余热排出系统退出后开始加锌。对于非首循环加锌的电站，建议在当前循环的中后期开始加锌，因为此时硼浓度降低，硼的沉积和浓缩效应小，减少对 CIPS 的影响。加锌前提条件中镍和硅的限值，来源于高负荷堆芯试验数据。当镍超过 $6\mu\text{g/L}$ 或硅超过 $1000\mu\text{g/L}$ ，腐蚀产物或积垢在堆芯沉积的风险会增加。实际执行时可征求燃料供应商意见，若燃料供应商无明确意见，可参照本标准执行。9.2 节介绍了醋酸锌溶液的配制。醋酸锌容易水解，形成沉淀物，因此为避免其在溶液箱中沉积，在倒入锌溶液箱前应先溶解。锌配制目标浓度为 $100\text{--}5000\text{mg/L}$ 根据实际经验未发生沉积现象。9.3 节介绍了锌浓度控制。根据 AP1000 机组热态功能试验运行经验，热态功能试验期间推荐锌浓度控制范围为 $20\text{--}100\mu\text{g/L}$ 。主要依据为热态功能试验期间一回路堆芯没有装料，不存在高浓度锌在燃料表面沉积的风险；且热态功能试验时间较

短，需要在短时间内形成致密的氧化膜，高浓度锌可以促进材料表面对锌的吸收速度，提高成膜钝化效果，也能降低首循环堆芯外辐射场。但由于醋酸锌成本较高，如果浓度过高，将会被一回路净化床去除，起不到应有的效果。因此综合评估材料表面对锌的吸收速度以及净化床对锌的去除效率，确定热态功能试验期间锌浓度控制范围为 20-100 $\mu\text{g/L}$ 。热态功能试验结束后，对堆芯试块进行分析，表面已经形成致密的氧化膜，说明浓度范围设定合理。在热态功能试验期间采用和功率运行期间一样的化学控制策略，可以有效保护形成的含锌氧化膜。因此热态功能试验期间氢气和 pHt 的化学控制应该和功率运行期间的要求类似。装料后锌浓度控制要求区分为首循环开始加锌和非首循环加锌。首循环开始加锌机组，腐蚀产物沉积风险低，根据三门和山东核电的加锌经验，5-15 $\mu\text{g/L}$ 的锌浓度足以降低一回路的辐射场。对于非首循环开始加锌的机组，加锌可能导致腐蚀产物释放的风险升高，因此制定目标锌浓度应谨慎，缓慢提高锌浓度目标值。电站应当根据各自的堆芯的设计情况，确定最终的锌浓度。根据试验结果，为了保证堆芯表面沉积物不影响燃料性能，实际锌浓度控制范围可依据燃料供应商或者设计院评估，若燃料供应商或者设计院无明确意见，可参照本标准执行。9.4 节介绍了加锌速度如何设置，根据三门和山东核电在热态功能试验期间的加锌经验，规定热态功能试验加锌速度和预计持续的时间。对于功率运行期间加锌速度的设定，应根据确定的上限值和净化流量进行估算，缓慢提高加锌速度。9.5 节介绍锌浓度、腐蚀产物和放射性核素的取样分析频率。主要基于锌浓度变化趋势以及其浓度变化对系统的影响确定。9.6 节介绍了各个电站应建立 $\mu\text{g/L}$ 级别的锌、铁、镍浓度的分析方法。主要依据为锌浓度控制在 $\mu\text{g/L}$ 范围，且功率运行期间铁和镍的浓度很低，基本在仪器检出限附近，因此只有 $\mu\text{g/L}$ 级别的分析方法，才能准确反映锌、镍、铁金属离子的真实浓度。9.7 节介绍了锌浓度异常处理。介绍了在机组功率波动时应采取的措施，在锌浓度高于上限值和低于下限值应采取的措施。依据为一回路系统设计功能以及三门和山东核电的运行经验数据。基于系统设计，当锌浓度异常时，可以通过中断或调整加锌速度以及增加净化床流量，将锌浓度恢复至正常范围。

第十章为加锌注意事项。介绍了取样时注意事项以及一回路冷却剂化学控制的注意事项。根据三门核电和山东核电实际经验，为保证取样具备代表性，应维持取样管线的连续流量，规定取样流速和样品的冲洗时间。根据高负荷堆芯试验数据，当镍超过 $6\mu\text{g/L}$ 或硅超过 $1000\mu\text{g/L}$ ，腐蚀产物在堆芯沉积的风险会增加。实际执行时可征求燃料供应商意见，若燃料供应商无明确意见，可参照本标准执行。因为锌同腐蚀产物、活性硅容易在高负荷堆芯上沉积，因此在化学控制中应避免沉积现象的发生。

第十一章为加锌效果评估。推荐在执行加锌后的每个大修对相同位置执行接触剂量率和伽马谱分析，对加锌的效果进行评价。推荐统计每个大修期间腐蚀产物的去除量，建立每个循环的去除量数据，用以评估加锌对腐蚀产物量的影响。同时推荐电站根据自身条件，执行燃料检查，检查项目一般为目视检查、氧化层厚度测量、腐蚀产物采样分析。其中燃料包壳表面的腐蚀产物采样分析国内还未建立相应的采样工具和方法，但在国外电站已得到普遍应用，且国内部分电站已经开始做相关调研。鉴于腐蚀产物采样分析可以直观分析锌对燃料沉积物的影响，且可能成为未来的发展趋势，因此将其作为一种推荐的检查方法。

3、解决的主要问题

压水堆核电站一回路加锌可以降低堆芯外辐射场，减少大修剂量。当前，压水堆核电站一回路加锌技术在国际上非常流行，截止 2017 年，国际上加锌的机组超过 100 台，占比超过 35%，且逐年呈上升趋势。但是在国内只有三门核电和山东核电在执行加锌技术，三门和山东核电首循环大修剂量远远小于同行电站，再次证明了加锌技术对降低辐射场的作用。当前国内同行电站也对加锌技术的应用产生浓厚的兴趣，部分电站、科研院所等也正在开展或计划开展加锌应用方面的评估，但由于没有有效的运行数据及指导文件，尤其是缺少对热态功能试验及首循环就开始加锌的运行经验，从首循环就开始加锌的经验在国际上也几乎为空白。因此加锌相关工作进展缓慢，或多数都停留在实验室试验阶段。

结合国内电站需求及痛点，本标准在总结国内 4 台加锌机组从热态功能试验到首次大修经验的基础上，对压水堆电站加锌技术应用的每个环节给出了明确的要求和建议，可以指导各个电站开展加锌技术应用工作。

三、主要试验（或验证）情况

1. 热态功能试验

三门和山东核电作为国际上第二家在热态功能试验期间加锌的电站，参照本标准中的相关要求执行加锌应用。热态功能试验结束后，对试验期间堆芯试块进行比对分析。分析结果表明，和不加锌的电站相比较，加锌电站的试块外层形成更加致密稳定的氧化膜。

在热态功能试验中也验证了标准中加锌设备、锌浓度设定、加锌速度等的运行工况，并对加锌数据进行分析总结，从经济性、可执行性、设备可靠性等方面进行适当优化，形成标准中的指标值。

2. 首循环启动试验

首循环启动期间，三门和山东海阳核电参照本标准中的相关要求和建议，开展加锌应用。大修期间，氧化运行峰值仅为同行电站的 50%，设备表面的剂量率是其他电站 1/2—1/3。

四、标准中涉及专利的情况

本标准不涉及专利问题。

五、预期达到的社会效益、对产业发展的作用等情况

本标准填补了国内压水堆电站加锌应用的空白，为加锌技术在国内电站推广奠定基础，有力推动行业加锌技术的应用和发展，有效降低了核电从业人员的辐射剂量水平。

六、与国际、国外对比情况

反应堆冷却系统的化学控制和《核电水化学控制》标准无冲突。

目前国际上无加锌相关标准，国际上加锌电站主要依据导则、参考文件或设计方建议开展加锌工作，各电站差异性也较大。加锌技术当前在国际上是流行趋势，其对辐射场降低的益处也越来越明显，随着未来更多的电站采用加锌技术，在总结加锌经验的基础上，加锌标准中的相关细节也将逐步完善。

七、在标准体系中的位置，与现行相关法律、法规、规章及标准，特别是强制性标准的协调性

本标准与现行相关法律、法规、规章及相关标准协调一致。

八、重大分歧意见的处理经过和依据

无。

九、标准性质的建议说明

建议本标准的性质为团体标准。

十、贯彻标准的要求和措施建议

标准发布后，三门核电将配合中国核能行业协会组织行业召开标准宣贯会，开展培训活动，促进该标准更好的贯彻实施。

十一、废止现行相关标准的建议

无。

十二、其他应予说明的事项

无。