

Hydrogen Risk Control Measures for Sanmen NPP

Jiaqi Yuan

CNNC Sanmen NPP Co. Ltd., Taizhou
Email: yuanjq@smnpc.com.cn

Received: Jun. 9th, 2014; revised: Jul. 1st, 2014; accepted: Jul. 10th, 2014

Copyright © 2014 by author 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

Abstract

Failure of containment cooling induces inert containment environment after initial event and results in coexistence of containment overpressure challenge and hydrogen challenge, which is a containment in severe challenge status. After Fukushima accident, assessment of hydrogen risk under containment in severe challenge status according to Sanmen SAMG in operation is needed. Effect of SCG-2 and SCG-3 from SAMG is investigated; the result shows that establishing of containment cooling does depressurize the containment but inerting environment is broken and high hydrogen risk is observed. The preferred means in SAMG does not reduce hydrogen inventory, and thus do not mitigate hydrogen risk fundamentally.

Keywords

SAMG, Containment Severe Challenge, Hydrogen Risk

三门核电厂氢气风险控制措施研究

袁嘉琪

中核三门核电有限公司, 台州
Email: yuanjq@smnpc.com.cn

收稿日期: 2014年6月9日; 修回日期: 2014年7月1日; 录用日期: 2014年7月10日

摘要

安全壳冷却失效导致严重事故后安全壳处于严重威胁状态, 超压风险和氢气风险并存。结合电厂严重事

故管理导则, 研究安全壳严重威胁状态下的氢气风险控制。根据严重事故管理导则在安全壳严重威胁状态下执行SCG-2“恢复安全壳冷却”和SCG-3“控制安全壳氢气风险”中的严重事故管理措施。研究发现降低安全壳压力的同时破坏了安全壳内的惰化环境, 导致较高的氢气风险, 如不采取减少氢气装量的措施, 则无法真正消除氢气风险。

关键词

严重事故管理导则, 安全壳严重威胁, 氢气风险

1. 引言

核电厂发生严重事故情况下堆芯得不到充分冷却, 压力容器内的燃料包壳在高温下发生锆水反应生成大量氢气, 堆芯熔毁并坍塌至下腔室。随着事故的发展, 堆芯熔融物会熔穿压力容器, 下落至堆腔中, 与堆腔混凝土发生反应产生更多氢气。大量氢气在安全壳中积聚达到一定浓度后发生燃烧甚至爆炸, 将严重威胁安全壳完整性。福岛事故发生后, 核电厂氢气安全问题受到了重点关注[1], 2012年国家核安全局明确提出力争实现从设计上实际消除大量放射性物质释放的可能性[2], 对我国核电厂安全提出了更高的要求。各国核电厂对于严重事故的缓解控制主要采取实施严重事故管理措施的方式, 并且开展了大量的严重事故管理措施效果评估及研究[3]。

以三门核电厂为分析对象, 结合电厂现行严重事故管理导则(SAMG), 对安全壳严重威胁状态下的氢气风险控制措施进行研究。

2. 严重事故管理导则

SAMG 中的严重威胁导则(SCGs)用于指导缓解安全屏障的严重威胁, 当严重威胁状态树(SCST)的参数超过其设定值时必须马上执行 SCGs 策略, 以及时缓解裂变产物边界破裂的威胁, 诊断流程见图 1。在 SCG 的制定过程中考虑了策略的负面效应, 最佳策略即为造成最小负面效应的策略在规程中优先级较高。

三门核电 SAMG 中提供了判断氢气风险的方法(如图 2), 假设安全壳内空气、水蒸气和氢气混合均匀, 并且此时的氢气为湿氢气[4]。根据三门核电厂核岛厂房基础底板混凝土物性, 选取图中玄武岩曲线作为安全壳氢气威胁的判断曲线。读取仪表显示的安全壳氢气浓度和安全壳压力描点作图得到安全壳状态点, 根据安全壳状态点所处的位置区域内来判断安全壳氢气风险。

3. 严重事故分析

使用一体化安全分析程序, 基于电厂设计参数[5], 针对严重事故进程及安全壳响应的计算分析建立了三门核电厂分析模型, 该模型包括主系统模型、专设安全设施模型和安全壳模型。事故分析中假设蒸汽发生器隔间主管道热段发生 2 英寸破口, 丧失专设安全设施, 丧失非能动安全壳冷却系统(PCS), 堆芯熔毁后发生压力容器熔穿, 进而发生堆芯熔融物与混凝土相互作用(MCCI)。

3.1. 事故进程

事故序列进程如表 1 所示, 压力容器内部共计产生氢气 437 kg (如图 3)。压力容器下封头在 55,100 s (15.3 h)发生失效发生 MCCI, 产生更多氢气, 在 90,700 s (25.2 h)时达到 100%活性区锆水反应产氢量 788 kg。

3.2. 安全壳严重威胁

图 4 显示了事故进程中安全壳上部空间中的氢气浓度变化。由于 PCS 失效, 事故进程中氢气浓度并

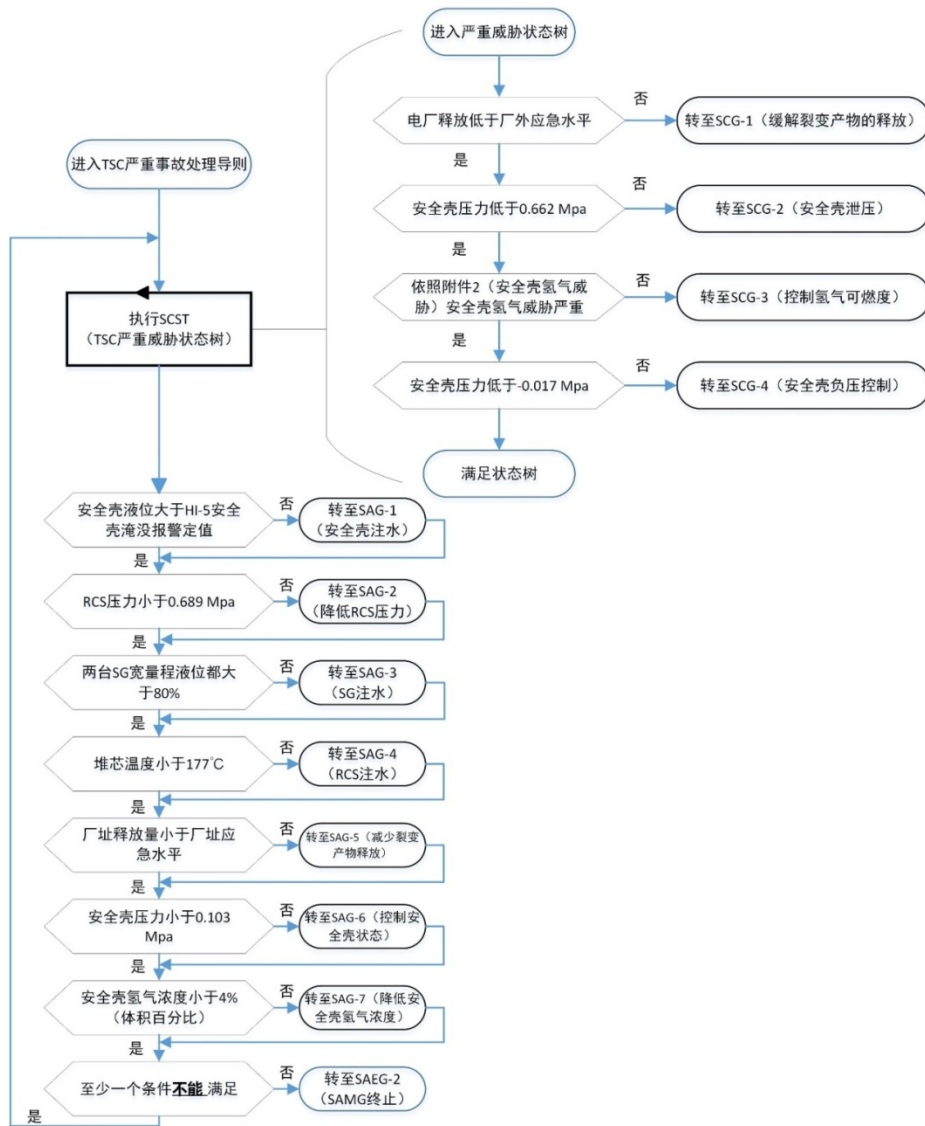


Figure 1. Diagnostic flow chart
图 1. 诊断流程图

不高,安全壳上部空间的氢气风险处于燃烧区的边缘(如图 5)。事故发生后安全壳压力不断上升,在 173,300 s (48.1 h)时达到 5% 概率失效压力 0.831 MPa,安全壳发生超压失效(如图 6)。

该事故序列的特点在于事故进程中产生了大量氢气,由于丧失 PCS,事故发生后不久安全壳便进入惰化环境,点火器无法消除氢气,使得大量氢气积聚在安全壳中。事故中后期出现安全壳超压风险和安安全壳氢气风险并发的不利局面。

4. 氢气风险控制

在密闭的钢制安全壳内压力变化的同时会影响氢气浓度的变化。作为裂变产物安全屏障受到严重威胁和挑战的几项关键性参数,安全壳压力和氢气浓度必须持续不断地进行监视。

当堆芯出口温度超过 649°C 时进入 SAMG 规程,根据严重威胁状态树(SCST)及诊断流程图(DFC)依次监测核电厂重要参数,并根据 SAMG 的建议实施严重事故缓解措施。其中,当安全壳压力超过 0.762 MPa

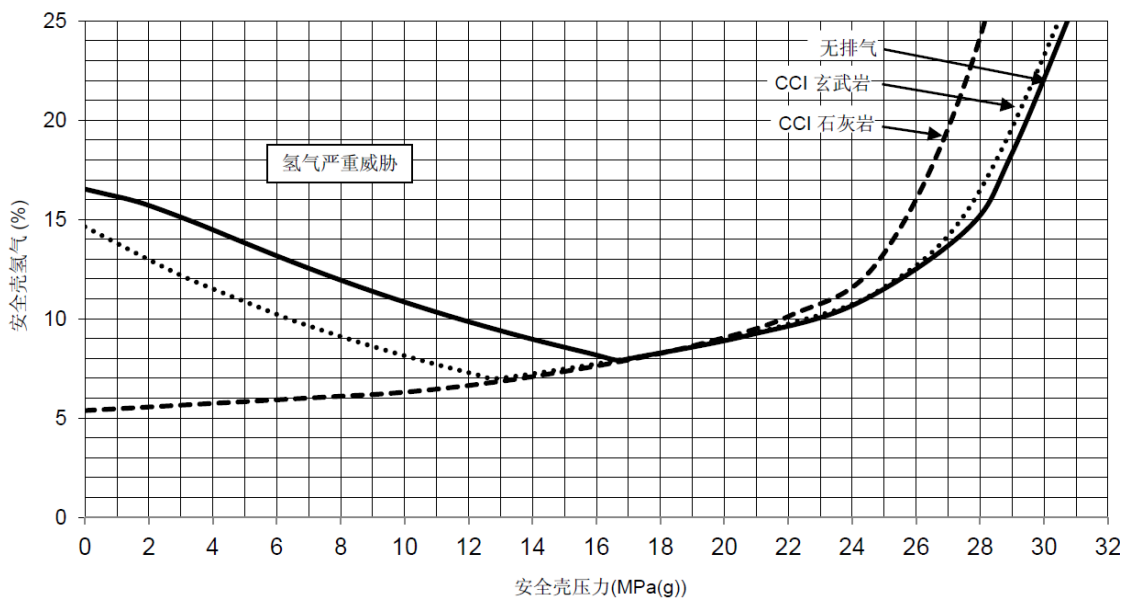


Figure 2. Containment severe challenge based on wet hydrogen measurement
图 2. 湿氢气的安全壳严重威胁

Table 1. Key process of accident
表 1. 事故进程

事件	时间/s
主管道热段 2 英寸破口	0
堆芯裸露	2080
堆芯开始熔化	2930
堆芯开始坍塌	4700
压力容器内主要产氢过程结束	7220
压力容器熔穿	55,100/15.3h
达到 100%活性段锆水反应产氢量	90,700/25.2h
安全壳超压失效	173,300/48.1h

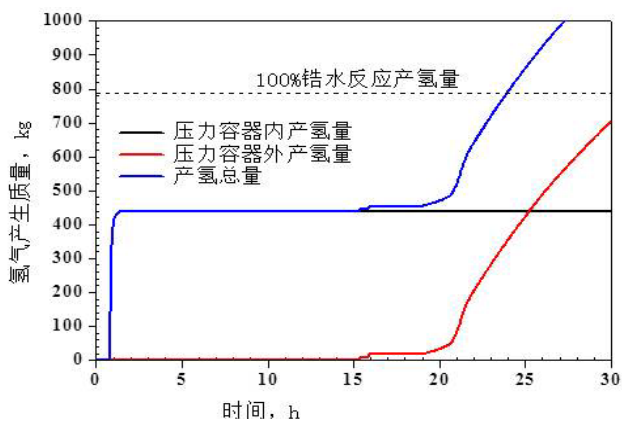


Figure 3. Hydrogen generation
图 3. 总产氢量

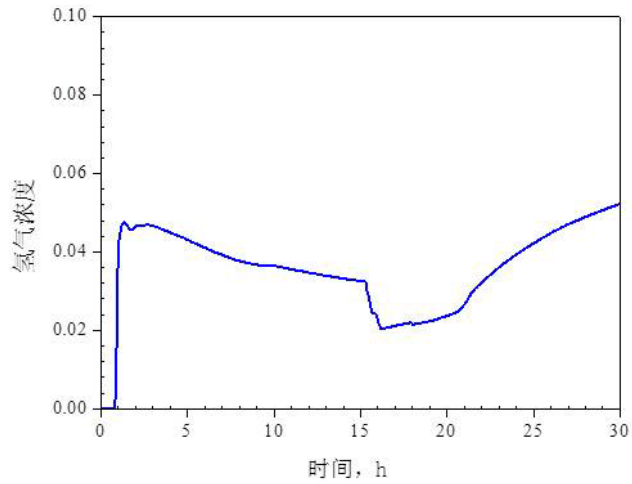


Figure 4. Hydrogen concentration in containment compartment
图 4. 安全壳隔间氢气浓度

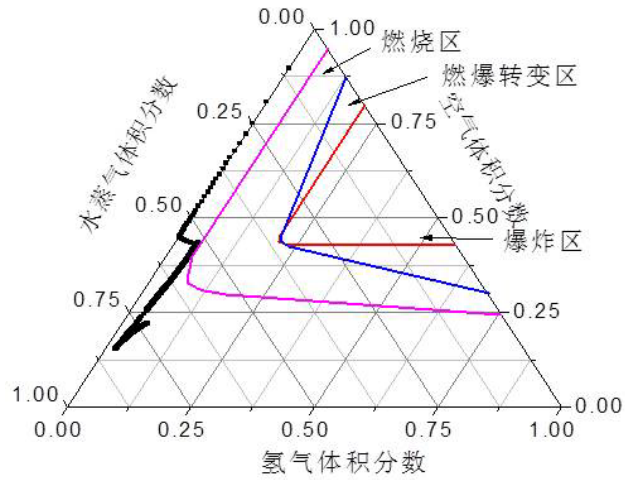


Figure 5. Hydrogen risk in containment upper volume
图 5. 安全壳上部空间氢气风险

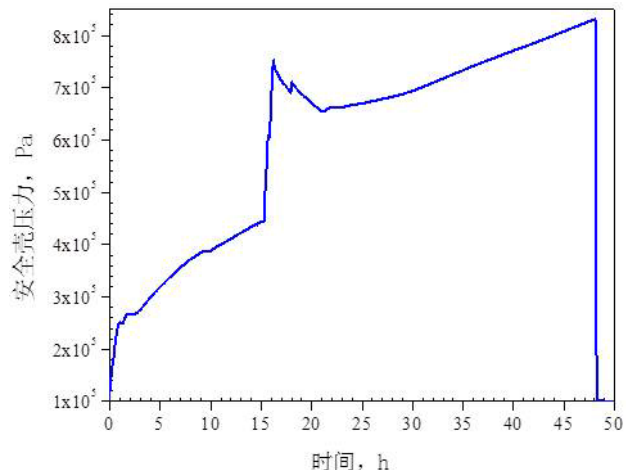


Figure 6. Containment pressure
图 6. 安全壳压力

时, 进入 SCG-2, 建议采取安全壳冷却、安全壳喷淋、安全壳排气等方式控制并降低安全壳压力。当根据 SCST 中给出的判断条件发现存在氢气严重威胁时进入 SCG-3, 建议采取停止安全壳冷却、停止安全壳喷淋等方式对安全壳进行加压, 维持安全壳惰化环境, 防止氢气发生大规模快速燃烧, 或采取安全壳排气方式排出部分氢气。

SCG-2 建议在执行安全壳降压时优先考虑恢复 PCS 冷却功能, 随着 PCS 冷却功能的恢复安全壳内的惰化环境被破坏, 氢气浓度上升, 依据 SCST 的氢气风险判断准则进入 SCG-3 (如图 7), 而 SCG-3 建议在执行氢气风险控制时优先考虑停止或减少 PCS 冷却能力以维持安全壳惰化环境。依次执行 SCG-2 和 SCG-3 则会反复恢复、停止 PCS, 安全壳压力随之降低升高反复变化(如图 8), 安全壳超压失效风险和氢气风险交替威胁。推荐的严重事故管理措施没有减少安全壳内的氢气装量, 没有从根本上消除氢气风险(如图 9)。

5. 结论

丧失安全壳冷却将会导致安全壳处于惰化环境, 点火器无法消除氢气[6]。大量氢气积聚在安全壳中

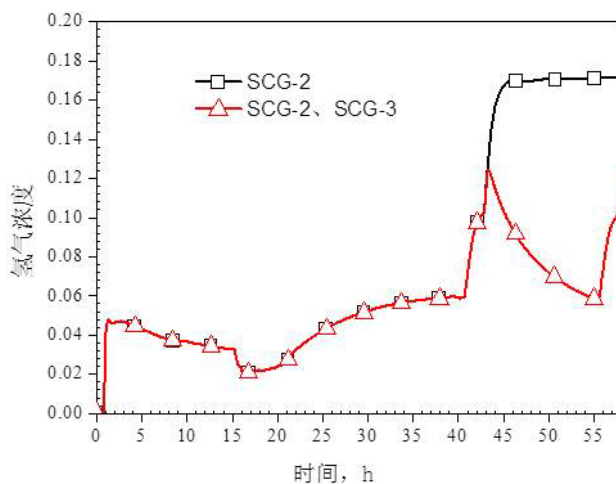


Figure 7. Hydrogen concentration in containment upper volume (SAMG)
图 7. 安全壳上部空间氢气浓度(SAMG)

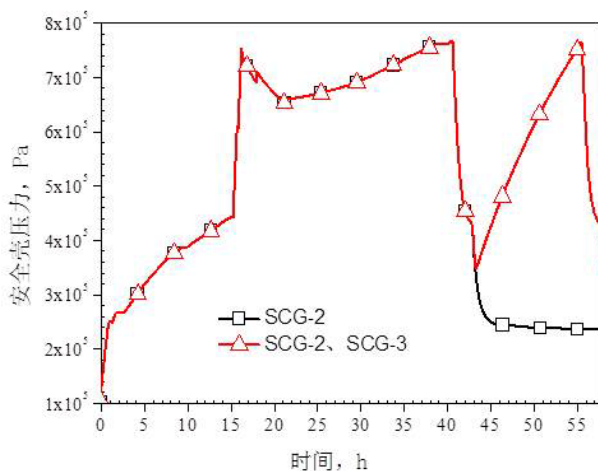


Figure 8. Containment pressure (SCG-2, SCG-3)
图 8. 安全壳压力(SCG-2、SCG-3)

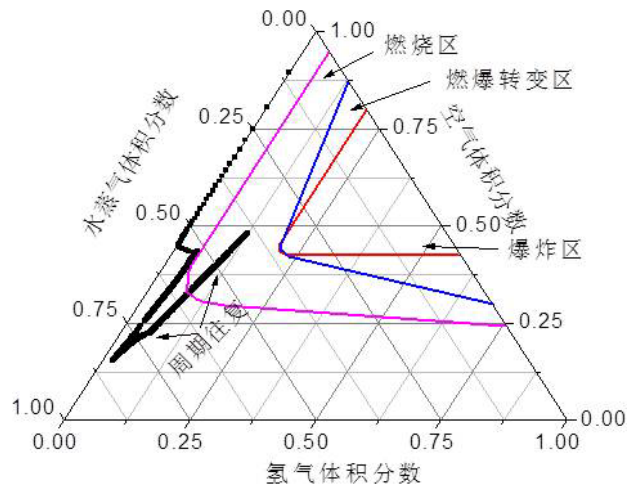


Figure 9. Hydrogen risk in containment upper volume (SCG-2, SCG-3)
图 9. 安全壳上部空间氢气风险(SCG-2、SCG-3)

导致事故中后期会发生安全壳超压风险和氢气风险并存的安全壳严重威胁状态。执行电厂的 SAMG，使用 PCS 来缓解严重事故威胁时，并未减少安全壳内氢气装量，建议在判断同时出现安全壳超压风险和氢气风险时可以优先考虑 SAMG 中安全壳排气的措施。

参考文献 (References)

- [1] US.NRC (2011) Recommendations for enhancing reactor safety in the 21th century. US. Nuclear Regulatory Commission, Rockville, Maryland.
- [2] 国家核安全局 (2011) 核安全与放射性污染防治“十二五”规划及 2020 年远景目标. 国家核安全局, 北京.
- [3] Ang, M.L., Peers, K., Kersting, E., Fassmann, W., Tuomisto, H., Lundstrom, P., Helle, M., Gustavsson, V. and Jacobsson, P. (2001) The development and demonstration of integrated models for the evaluation of severe accident management strategies—SAMEM. *Nuclear Engineering and Design*, **209**, 223-231.
- [4] 三门核电 (2013) TSC 严重威胁状态树(1-OP-GJP-513). 三门核电, 台州.
- [5] Westinghouse Electric Co. LLC. (2011) AP1000 design control document, Revision 19. Westinghouse Electric Co. LLC, Butler County, Pennsylvania.
- [6] 石雪垚, 詹经祥, 刘建平 (2012) 严重事故管理导则中的氢气风险判断及事故模拟分析. *核动力工程*, **S1**, 104-106.