

# 中核集团在严重事故管理中的 工作实践和计划

黄代顺  
中国核动力研究设计院 设计所

2020年7月7日



- SAMG与EDMG导则开发
- 严重事故管理的实施
- 严重事故管理设计研究
- 思考与展望



## □ SAMG/EDMG作用



● 填补EOP与EP之间的空白

● 提升电厂管理严重事故的能力

## □ 国内外SAM发展

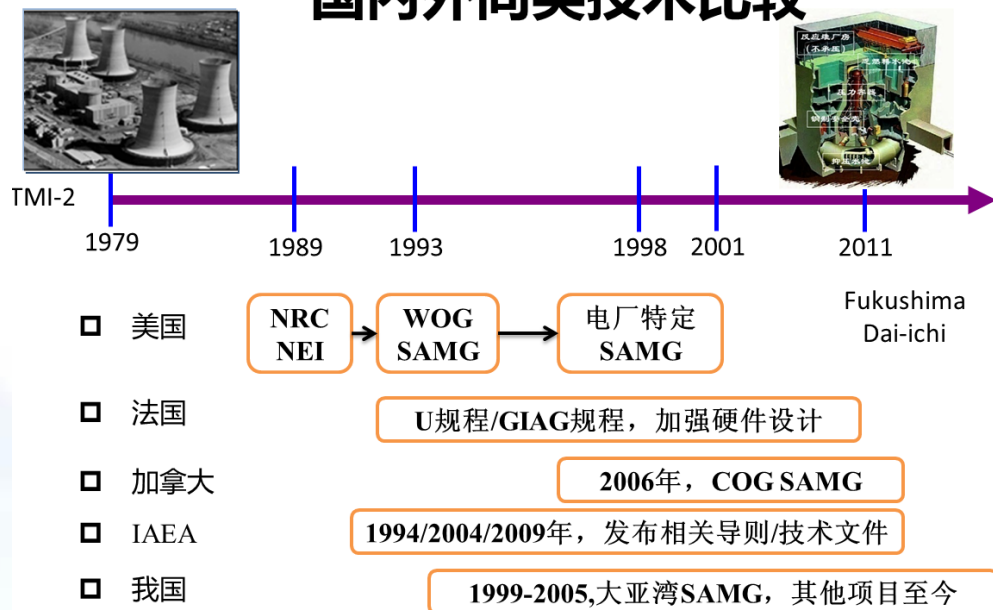
### ➤ 各国严重事故管理导则/规程

- 美国SAMG
- 法国U规程和GIAG
- 英国SOI8
- 德国AM手册
- 瑞士CEOG AMG
- ...

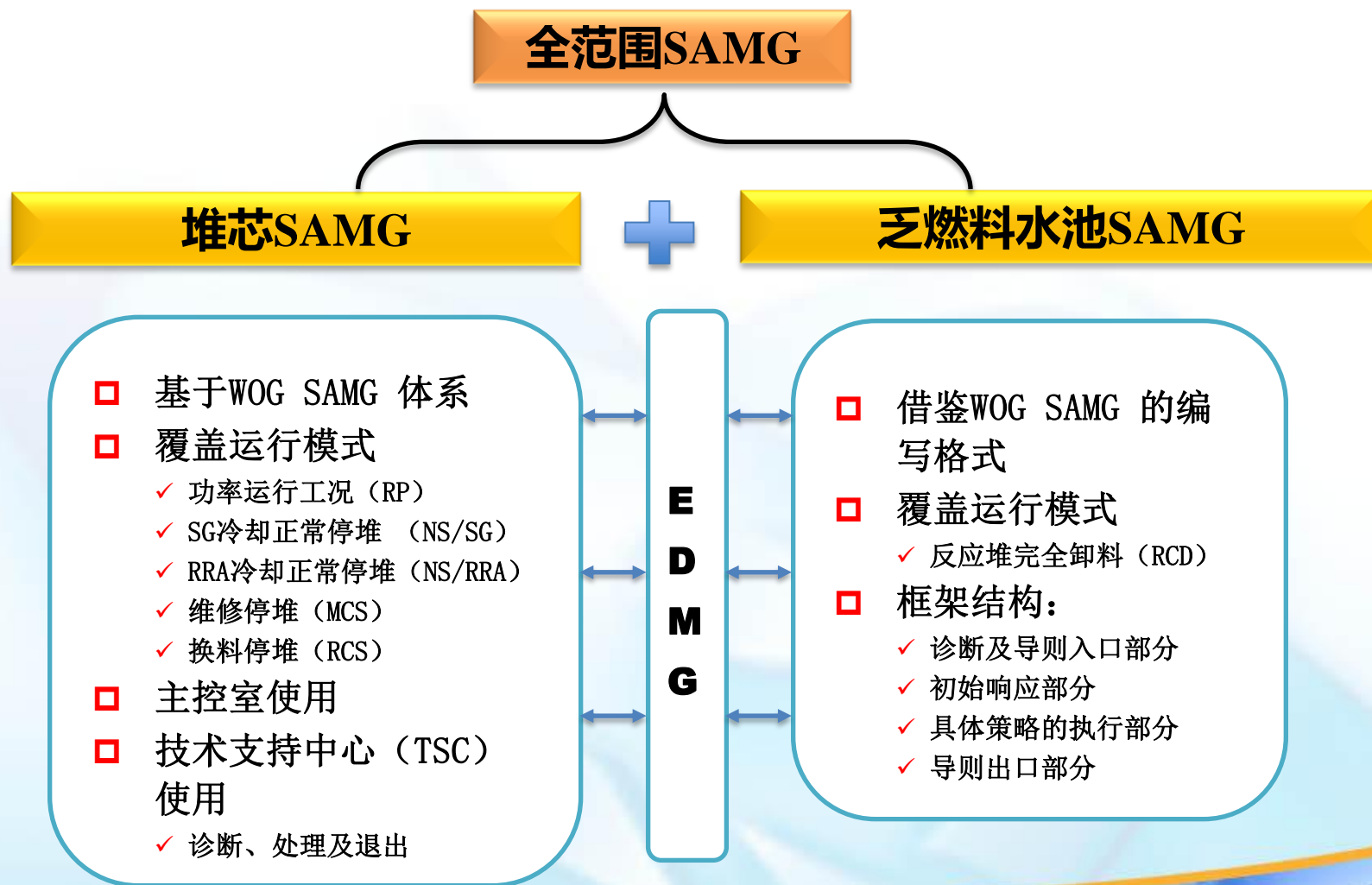
### ➤ 美国WOG SAMG

- WOG SAMG是西屋公司所设计的通用性严重事故管理导则。
- 由于在严重事故发生时其现象不确定，而且电厂的状态也随时在改变，具有很大的不确定性，所以对于严重事故的管理并不写成程序而是以导则的形式
- 导则为TSC在严重事故发生时提供一套思考决策模式，用于选择对电厂最好或冲击最小应对策略，稳定电厂状态、减小放射性释放

## 国内外同类技术比较

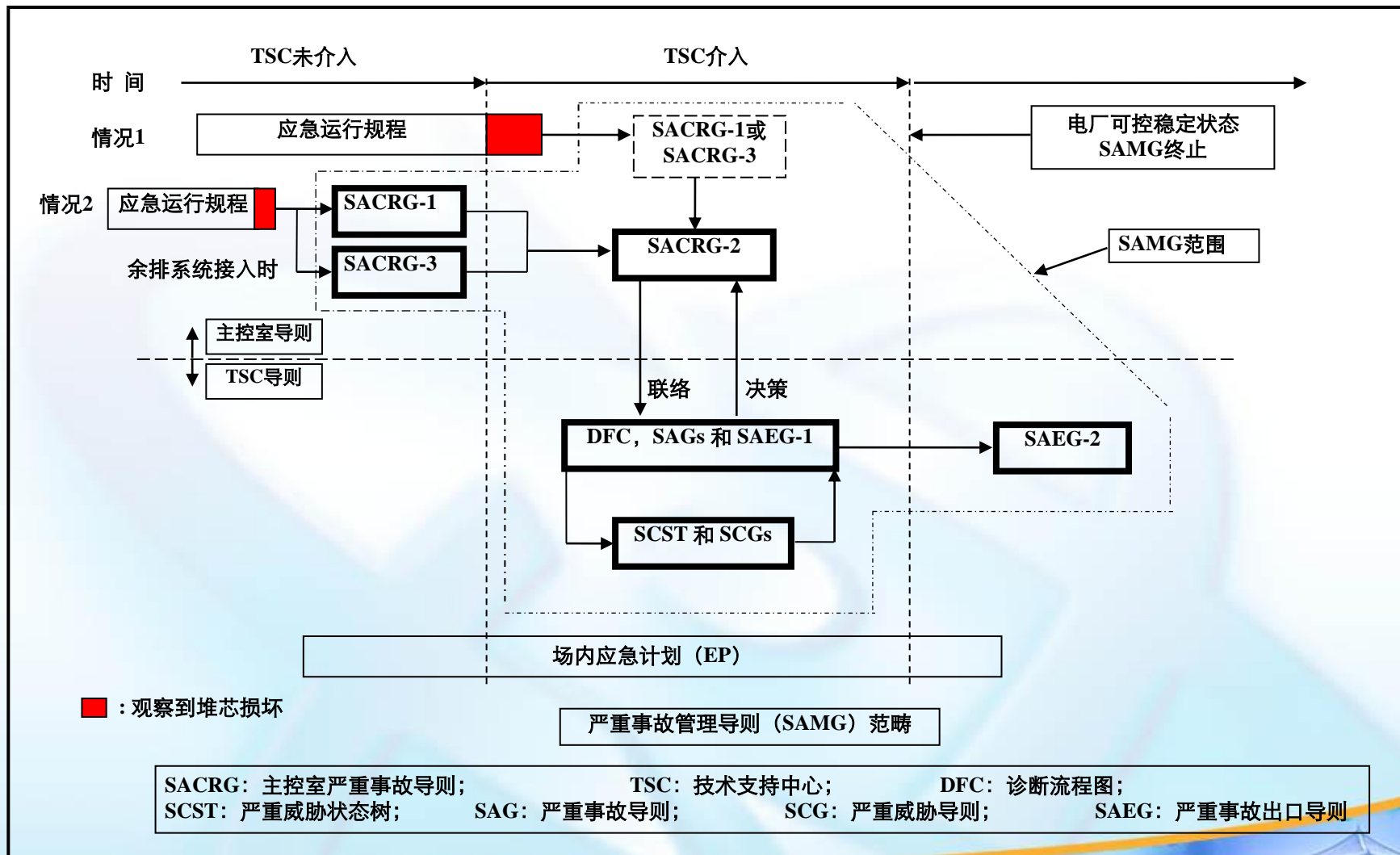


## □ SAMG体系





## □ 堆芯SAMG框架



## □ 堆芯SAMG入口

### ➤ 压力容器顶盖关闭时

- 堆芯出口温度  $> 650\text{ }^{\circ}\text{C}$ ,
- 且堆芯冷却行动失败、堆芯出口温度没有下降趋势时

### ➤ 压力容器顶盖开启时

- 安全壳内辐射剂量率  $>$  停堆后安全壳剂量随时间的变化值



## □ 乏池SAMG入口和退出条件

### ➤ 乏燃料水池SAMG入口条件

- 乏燃料水池水位  $< LX$ ,
- 或者燃料厂房放射性  $> RX$

福岛后设计改进

### ➤ 乏燃料水池SAMG退出条件

- 稳定的乏燃料水池水位被重新建立
- 且场区放射性释放  $<$  场区应急水平





## □ EDMG开发意义

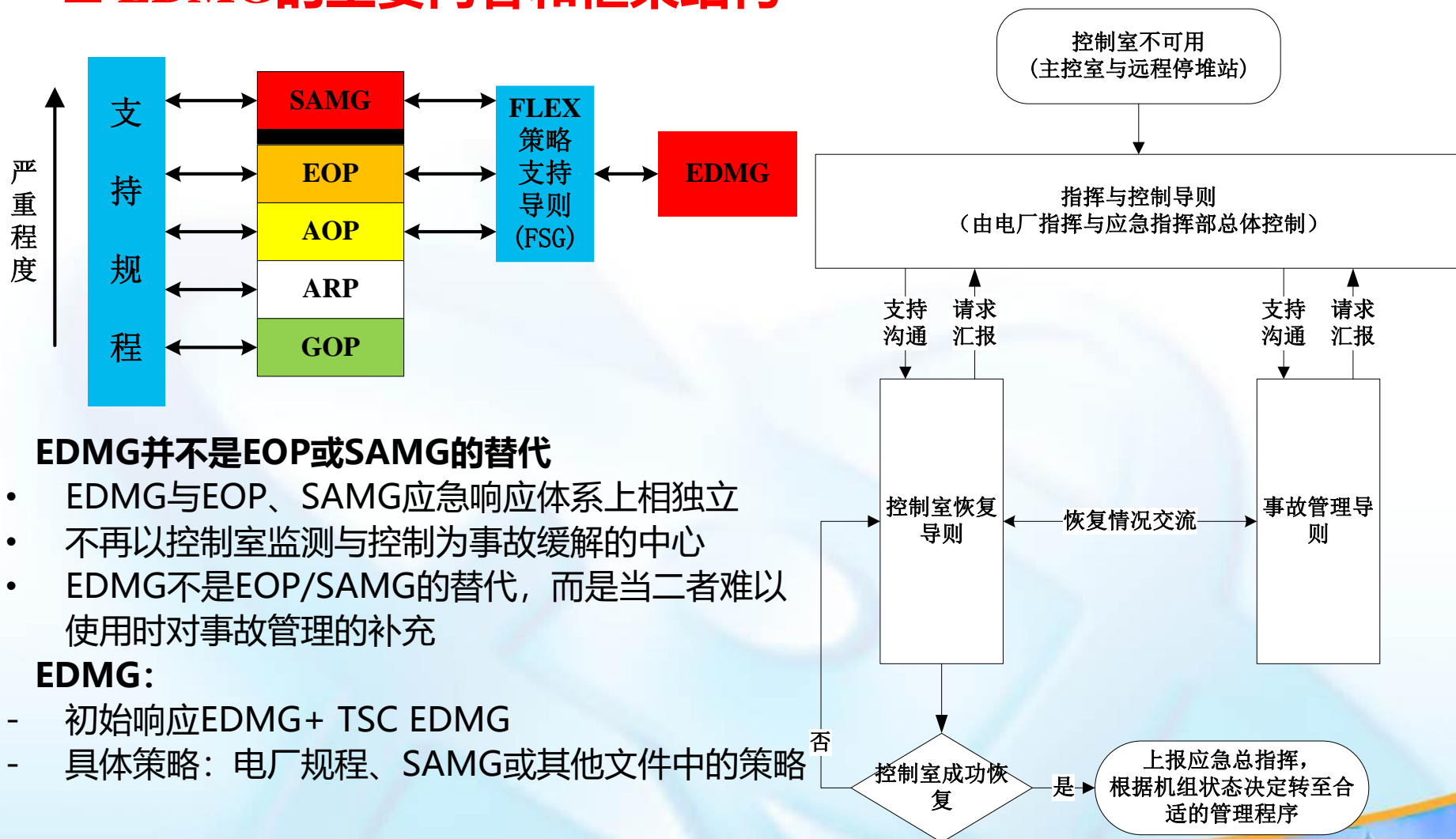
**大范围损伤工况特点：**由极端外部事件导致的控制室受损，正常的应急指挥与控制可能受损

**现有管理不足以应对大范围损伤：**EOP与SAMG的覆盖范围之外；EP应急体系与资源可能受损

**EDMG的目的：**协助大范围损伤工况的应急响应；完善事故管理体系；增强纵深防御能力



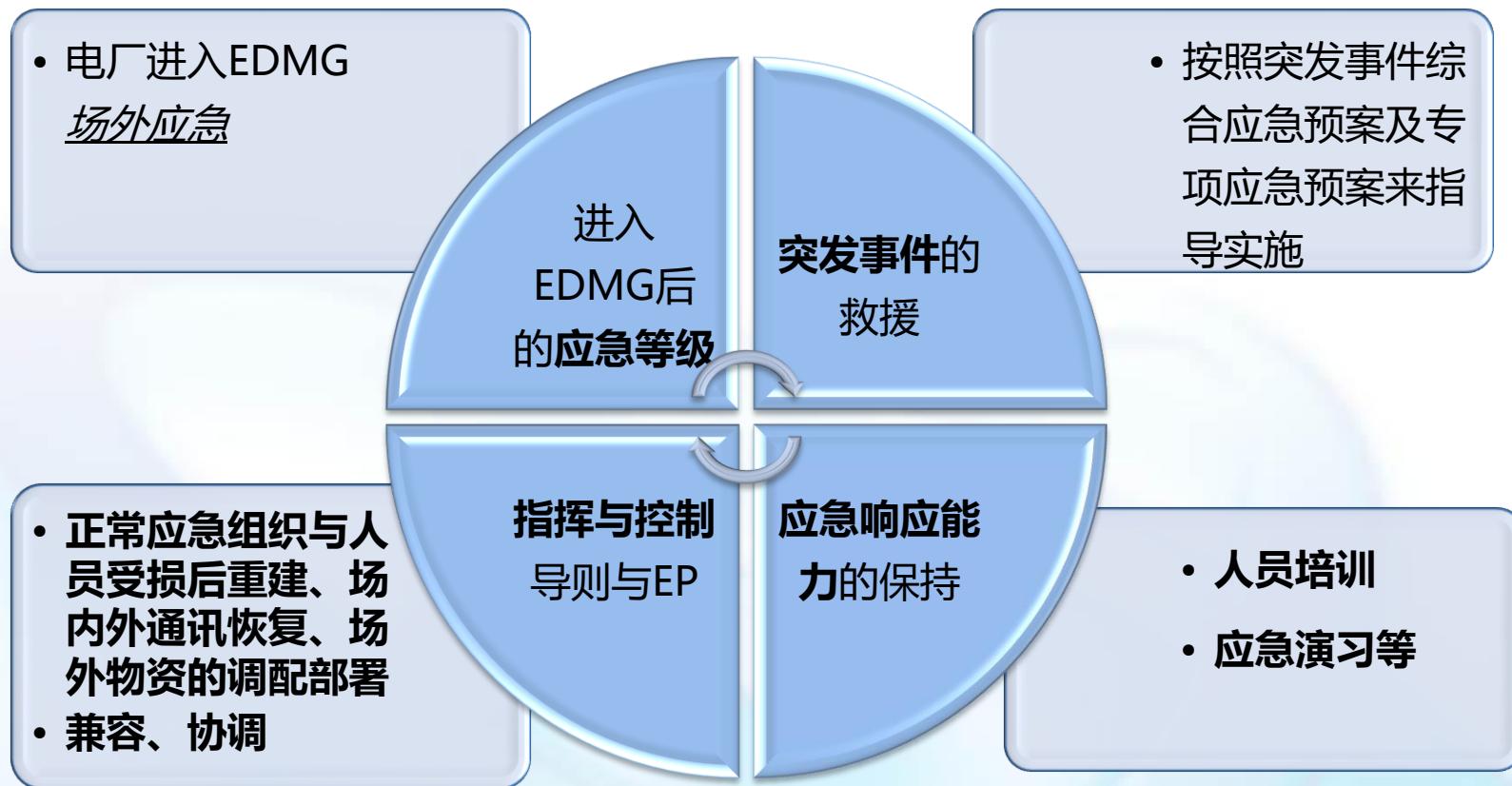
## EDMG的主要内容和框架结构



- **EDMG并不是EOP或SAMG的替代**
  - EDMG与EOP、SAMG应急响应体系上相独立
  - 不再以控制室监测与控制为事故缓解的中心
  - EDMG不是EOP/SAMG的替代, 而是当二者难以使用时对事故管理的补充
- **EDMG:**
  - 初始响应EDMG+ TSC EDMG
  - 具体策略: 电厂规程、SAMG或其他文件中的策略

## EDMG的框架结构

# EDMG导则开发



## 工作内容

功率运行工况SAMG

停堆工况SAMG

乏池SAMG

EDMG ★

## 具体应用

- 秦山第二核电厂1.2.3.4号机组
- 田湾1.2.3.4号机组
- 福清1.2.3.4号机组
- 方家山1.2机组★
- 海南昌江 1.2 号机组
- 田湾5.6号机组★
- 福清5.6号机组★
- 卡拉奇1.2号机组
- 漳州1.2号机组★
- 三门1.2 号机组★



- SAMG电厂实施流程
- 用于严重事故管理的设备
- 人员可达性
- 专家支持系统
- 培训和演练





## □ SAMG电厂实施流程

### 1. 配备相关TSC、现场操作等人员

- ✓ 严重事故管理人员的配置和流程设计必须考虑多机组和多堆型同时发生严重事故的情况

### 2. 现场执行导则(EI或操作单)编制和验证

### 3. 管理程序编制和流程梳理

### 4. 与EOP和EP接口管理

- ✓ 修改EOP，增加从EOP向SAMG切换的条件；从EOP向SAMG切换的动作应便于运行人员在应急条件下的执行
- ✓ 修改EP：增加在严重事故情况下相应各类应急人员或应急专业组的职责、人力需求、流程等描述；增加严重事故管理的描述；增加严重事故管理相关人员资质要求。

### 5. 严重事故相关设备储存和管理

### 6. 严重事故管理相关变更和导则优化管理

EI/1, 严重事故管理操作单		版次: 1	页: 3/97
		GL/0/SAMG/EI/1	

### 1 目的

进入严重事故管理后,技术支持小组根据收集的数据对机组状态做出分析评价,给出决策建议后汇报上级应急指挥部门,上级批准后,由主控室人员和现场人员执行具体的操作。根据本规程中操作单进行严重事故情况下的缓解操作,为主控和现场人员操作提供执行指导。

### 2 适用范围

本程序适用于泰山第二核电厂 1、2 号机组。

### 3 注意事项

- 可以根据机组当时情况对操作单进行适当的临时修改;
- 遵守防人因守则,遵守操作规范;
- 注意现场工作环境,注意辐射防护,避免操作风险;
- 本程序中涉及操作单由技术支持小组组长或其上级应急指挥部门做出决策,由运行人员执行,操作单上的批准人为当班值班长。

### 4 操作单清单

序号	操作单编号	适用导则	操作单名称
1	GL/0/SAMG/EI/1-1	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 001 PO 向 SG1 注水
2	GL/0/SAMG/EI/1-2	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 001 PO 向 SG2 注水
3	GL/0/SAMG/EI/1-3	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 002 PO 向 SG1 注水
4	GL/0/SAMG/EI/1-4	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 002 PO 向 SG2 注水
5	GL/0/SAMG/EI/1-5	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 003 PO 向 SG1 注水
6	GL/0/SAMG/EI/1-6	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 003 PO 向 SG2 注水
7	GL/0/SAMG/EI/1-7	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 004 PO 向 SG1 注水
8	GL/0/SAMG/EI/1-8	GL/0/SAMG/SAG/1	用 ASG 004 PO 向 SG2 注水
9	GL/0/SAMG/EI/1-9	GL/0/SAMG/SAG/1	用 APA 102 PO 向 SG1 注水
10	GL/0/SAMG/EI/1-10	GL/0/SAMG/SAG/1	用 APA 102 PO 向 SG2 注水
11	GL/0/SAMG/EI/1-11	GL/0/SAMG/SAG/1	用 APA 202 PO 向 SG1 注水
12	GL/0/SAMG/EI/1-12	GL/0/SAMG/SAG/1	用 APA 202 PO 向 SG2 注水
13	GL/0/SAMG/EI/1-13	GL/0/SAMG/SAG/1	用 APA 302 PO 向 SG1 注水
14	GL/0/SAMG/EI/1-14	GL/0/SAMG/SAG/1	用 APA 302 PO 向 SG2 注水
15	GL/0/SAMG/EI/1-15	GL/0/SAMG/SAG/1	用 JFP001 或 002PO 向 SG1 或 SG2 注水
16	GL/0/SAMG/EI/1-16	GL/0/SAMG/SAG/1	用移动设备向 SG1 或 SG2 注水
17	GL/0/SAMG/EI/1-17	GL/0/SAMG/SAG/1	ASG 水箱补水
18	GL/0/SAMG/EI/1-18	GL/0/SAMG/SAG/1	ADG 水箱补水

## 严重事故管理操作单



## □ 用于严重事故管理的设备

- ✓ 严重事故专用设备、仪表：
  - 经试验论证或理论分析，对于相关的时间窗口需求，能够满足严重事故环境条件下的使用要求
- ✓ 严重事故下可能用到的设备、仪表
  - 经过设计基准事故环境鉴定试验的设备，其性能具有很高的概率可在假想严重事故和要求的时间内执行其功能
  - 相关设备可在较高可信度下用于缓解严重事故后果
- ✓ 管理、维护和演练确保在需要的时候能够有效（时间、路径、人员、制度、程序...）



1. SAMG中使用的严重事故管理策略，得到严重事故下人员操作清单
2. 确定完成相关操作时的人员路径
3. 对所确定的人员路径进行现场走访确认
4. 确定严重事故下完成相关操作时人员经历的环境条件
5. 分析严重事故下所需操作的人员可达性，并评价其对严重事故管理的影响



## 严重事故下人员可达性

### 严重事故下人员路径的环境条件

- 根据路径中放射性管道的分布情况并结合辐射防护分区图以及路径所需人员时间综合考虑放射性环境条件
- 根据路径中高能管道的分布情况确定可能的高温高压环境实际路径中的障碍情况

### 严重事故下人员可达性对SAM的影响

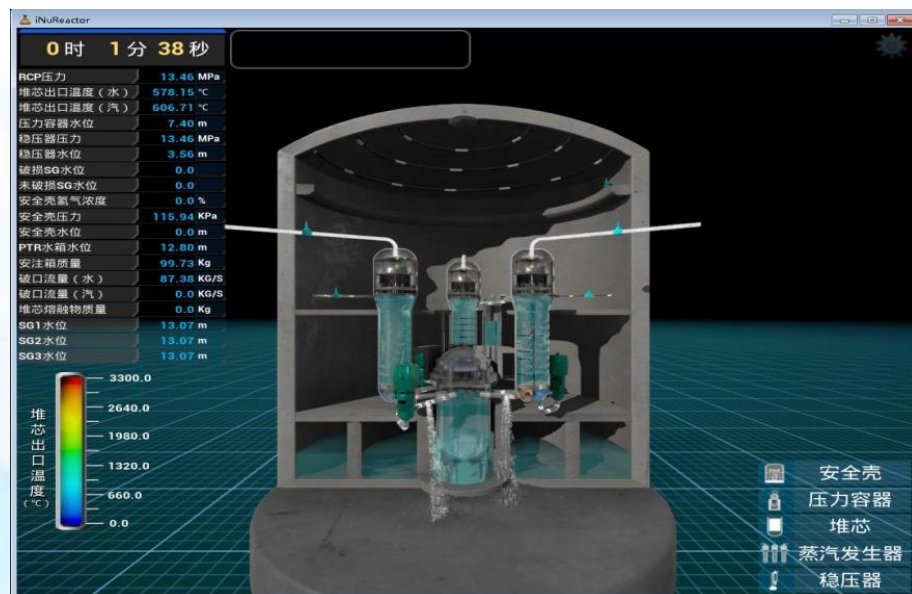
- 根据人员路径的环境条件分析给出严重事故下的可达性；对于严重事故下人员不可达的重要操作，分析其对严重事故管理的影响，并寻找可能的替代操作

序号	严重事故管理所需操作
1	使用 RCS 快速卸压阀对 RCS 卸压
2	使用稳压器安全阀对 RCS 卸压
3	使用高位排气阀对 RCS 卸压
4	使用稳压器辅助喷淋对 RCS 降压
5	使用 RCV 下泄降低 RCP 压力
6	使用 RHR 对 RCS 降压
7	使用 TSA 排放对 RCS 和 SG 降压
8	使用 TSC 下泄对 RCS 和 SG 降压
9	使用 PRS 对 RCS 降压
10	使用 CIS 向反应堆堆腔注水
11	使用含硼水/不含硼水向 IRWST 补水
12	对非能动堆腔注水箱补水
13	使用主给水泵/辅助给水泵/启动给水泵向 SG 注水
14	使用二回路应急补水泵向 SG 注水
15	使用二回路应急补水泵向辅助给水箱注水
16	使用凝结水泵向辅助给水箱注水
17	使用 WCD/FWD 向辅助给水箱注水
18	使用安注泵（中压、低压）向 RCS 注水
19	使用安注泵经 H4 管线向 RCS 注水
20	使用安注泵经 H4 管线向安全壳喷淋
21	使用上充泵向 RCS 注水
22	使用硼注泵向 RCS 注水
23	使用一回路应急补水泵向 RCS 注水
24	使用水压试验泵向 RCS 注水
25	使用含硼/不含硼水向容积控制箱补水
26	向硼酸贮存箱（BAT）补水
27	重启反应堆冷却剂泵
28	使用安全壳喷淋洗涤裂变产物及维持安全壳完整性
29	使用 CFE 保持安全壳完整性
30	使用 VMO 减小裂变产物释放
31	使用 CAV（环形通风系统）减小裂变产物释放
32	使用 PCS 控制安全壳温度压力维持安全壳完整性
33	使用 CCV/CPV/RRV 控制安全壳温度压力
34	使用 CAM 排气降低安全壳内氢气威胁
35	使用 RND 向安注箱供气将氮气排入安全壳维持安全壳压力
36	使用 WAP 向安全壳排入压缩空气维持安全壳压力

## 严重事故管理操作

## □ 专家支持系统

- 开发网络版、支持实时干预并且人机交互更友好的专家支持系统
- 实现系统状态实时监测、智能SAMG及预测分析子系统



## 专家支持系统



## 专家支持系统

### ■ 实时监测

可视化的操作界面

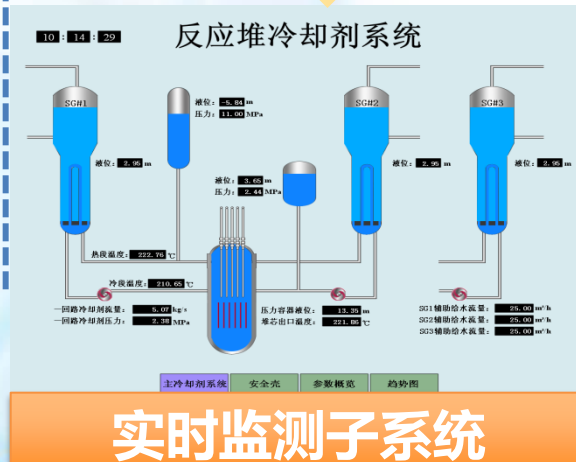
从电厂PI/EM系统中采集数据

对电厂/模拟机状态动态监测

对电厂关键参数进行显示

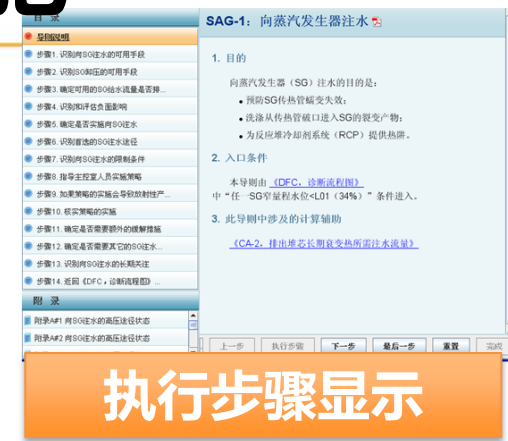
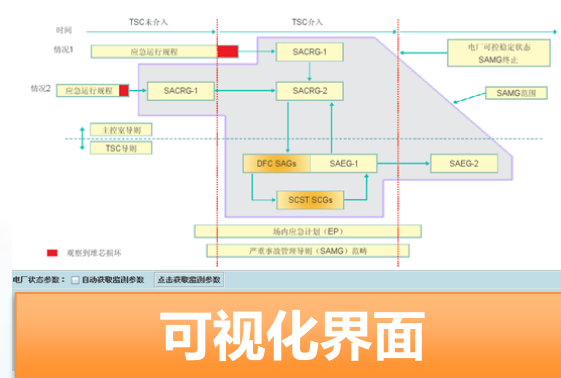
参数曲线可调整

将数据供给智能SAMG系统



## 专家支持系统

### 智能专家支持系统



可视化的操作界面

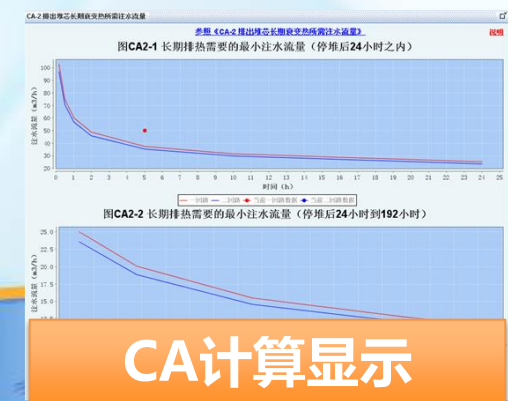
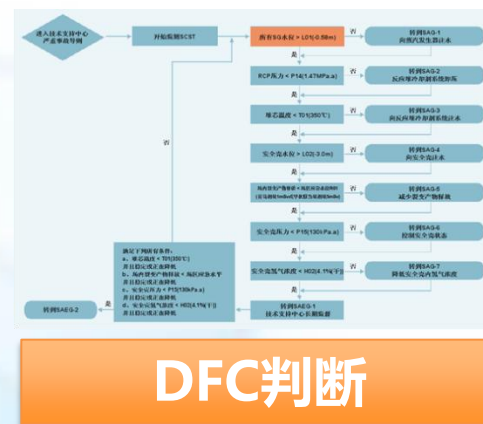
对SAMG电子化显示执行步骤

手动输入或自动采集参数

根据参数对严重事故进行判断

在系统界面中以颜色等方式显示

CA具备智能化计算显示功能





## 专家支持系统

### 预测分析

可视化的操作界面

严重事故的进程计算分析

调取、演示典型事故场景

自定义事故场景，实时干预

暂停、停止、加速、减速等功能

三维仿真显示

### 自定义事故场景支持演习



### 辅助实际的严重事故情景的决策



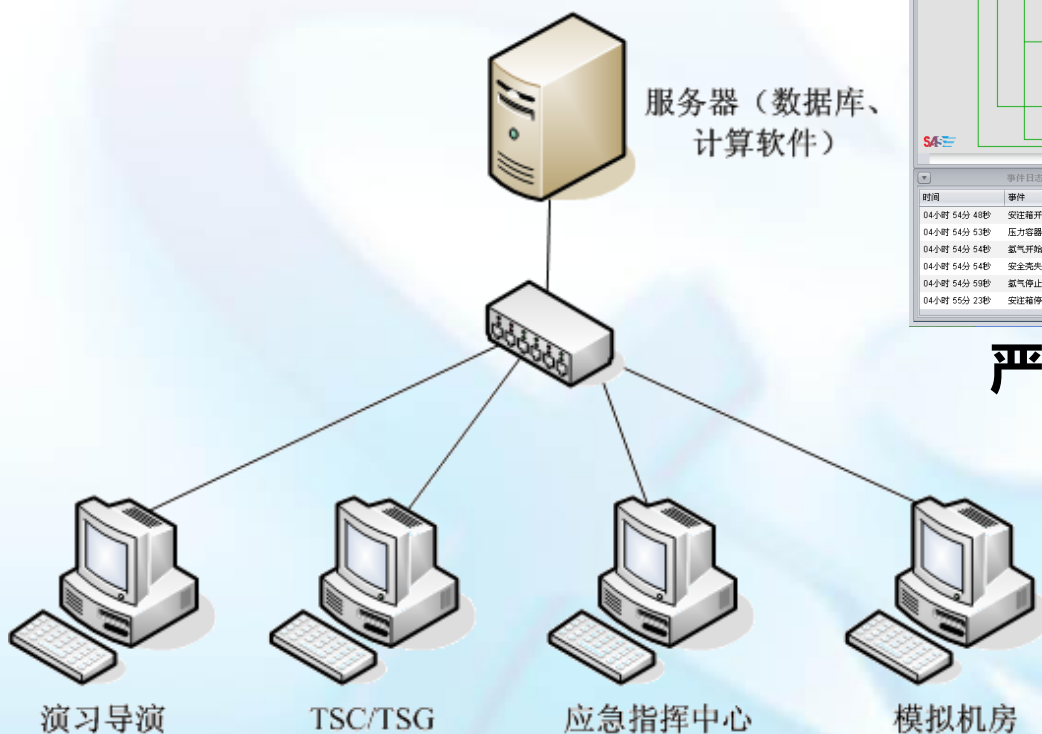
### 严重事故管理培训演练需求



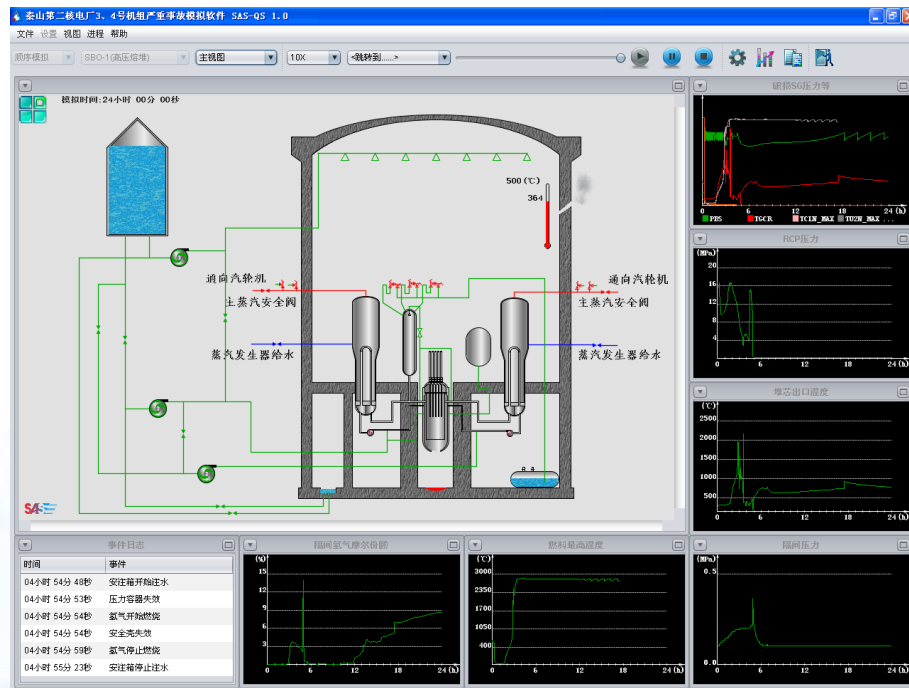
## 专家支持系统

### 应用情况

1. 全面覆盖秦山厂区全部九台机组
2. 覆盖田湾1.2.3.4号机组



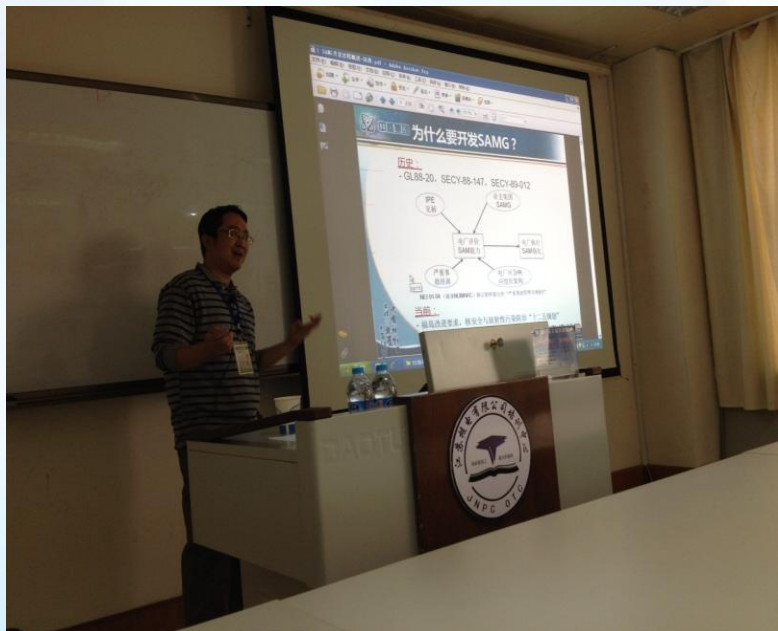
## 严重事故专家支持系统物理架构



## 严重事故专家支持系统操作界面

## □ 理论培训

- 严重事故基础理论、SAMG导则
- SAMG应急管理相关程序





## □ 培训类别

- ✓ **总体培训：**培训内容包括严重事故的基础知识，SAMG的基本概念和原则
- ✓ **运行控制组及其他持照人员培训：**培训内容除第一类培训内容外还包括SAMG中的主控室部分的使用此外还包括第三类的培训的大部分内容
- ✓ **TSC组培训：**培训内容除第一、二类培训内容外还包括SAMG中的TSC部分的使用

**SAMG相关岗位人员需要定期培训**



## □ 演习、演练

- **严重事故演习演练包括：单项演习、综合演习。**
  - 单项演习是目的在于验证、评价和提高严重事故管理应急响应人员的具体操作技能与响应能力的演习。
  - 综合演习是场内或场外应急组织的全部或部分按照预定的演习情景协同进行的演习，以检验、评价应急组织的综合响应能力。
- **演习结束后，对演习过程进行总结**



移动泵演习



演习总结会

## □ 演习、演练

### 中核集团设计人员参与严重事故应急演练：

- ✓ 提供导则使用技术支持
- ✓ 提供严重事故序列进程合理性技术支持
- ✓ 搜集演习过程中对导则使用的经验反馈，总结

以进一步优化改进现有导则



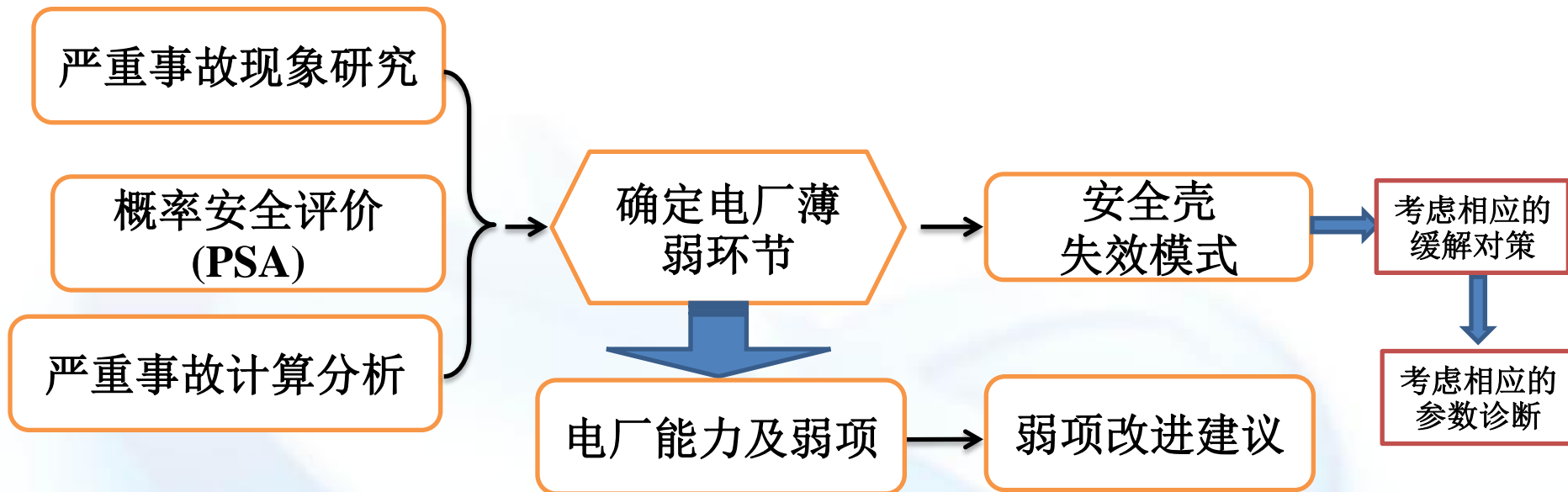
全厂失电后的主控室



运行控制组人员操作设备



## □ 研究与设计总体思路



### 严重事故薄弱环节

- 高压熔喷现象
- 压力容器内蒸汽爆炸
- 压力容器外蒸汽爆炸
- 氢气燃烧及爆炸
- 堆芯熔融物与混凝土作用
- 衰变热引起的安全壳升温升压
- ...

### 严重事故缓解措施

- 一回路快速卸压措施
- 压力容器外冷却措施
- 安全壳消氢措施
- 非能动安全壳热量导出措施
- 安全壳过滤排放措施
- 双层安全壳
- 移动设备的设置
- ...

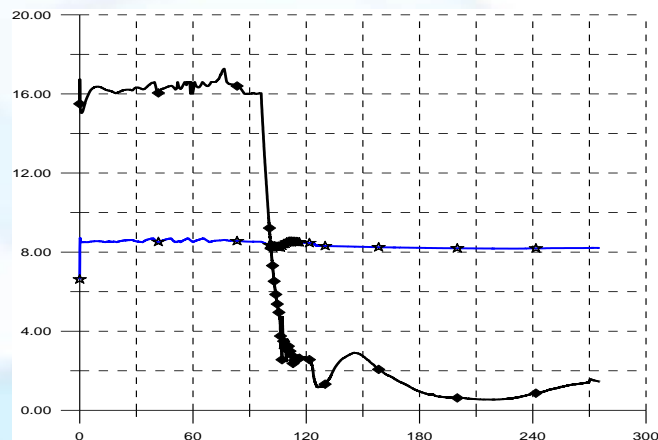
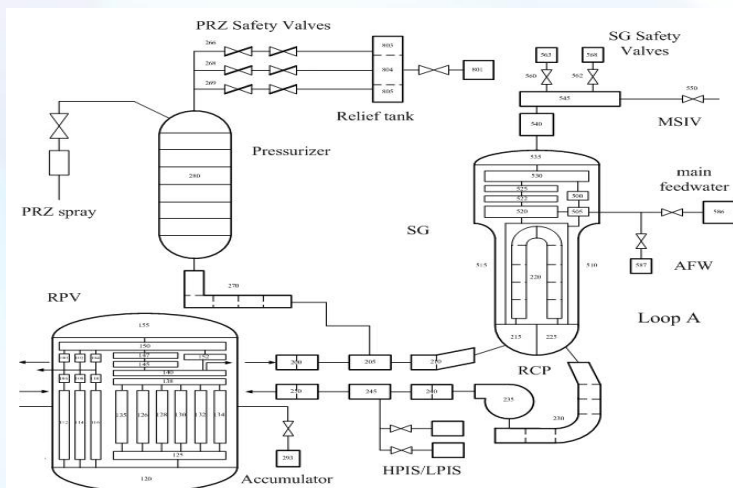
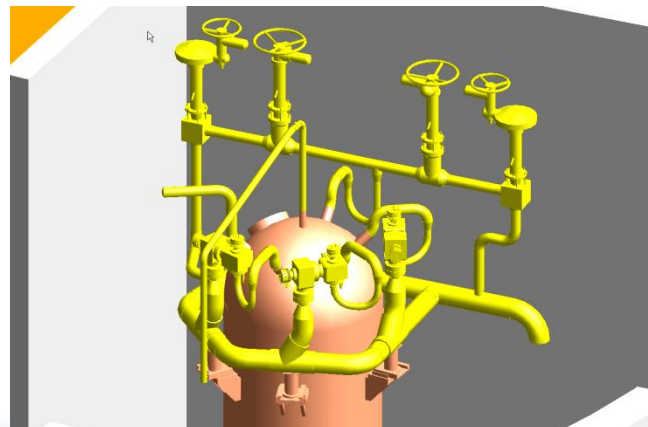
## 严重事故措施设计

### 一回路快速卸压系统

M310: 稳压器安全阀

ACP1000: 快速卸压系统

AP1000: 自动卸压系统



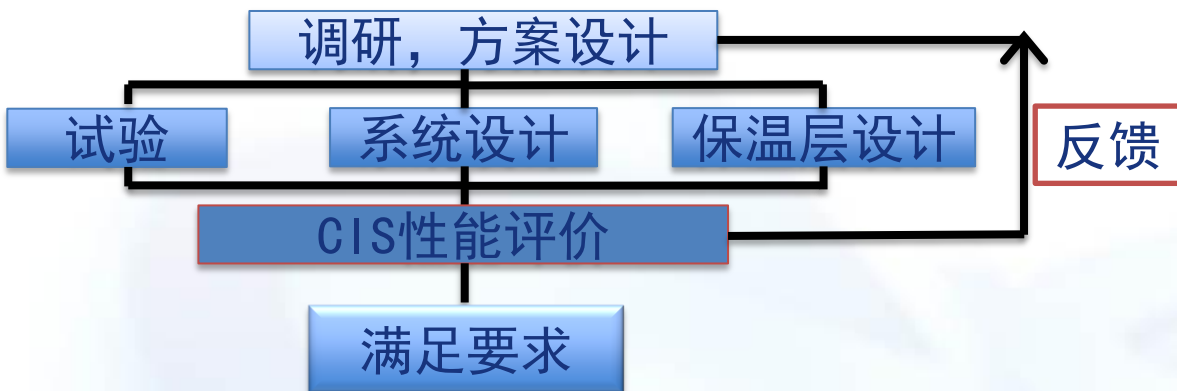
SCDAP/RELAP5模型节点图

一、二回路压力响应

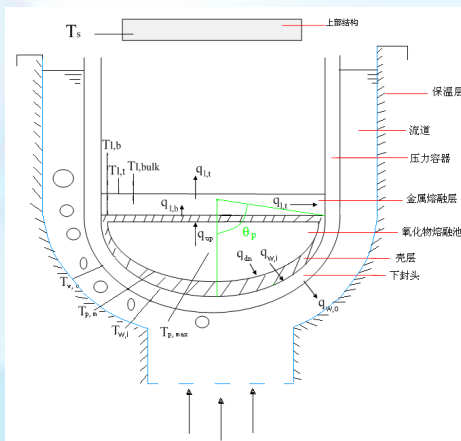
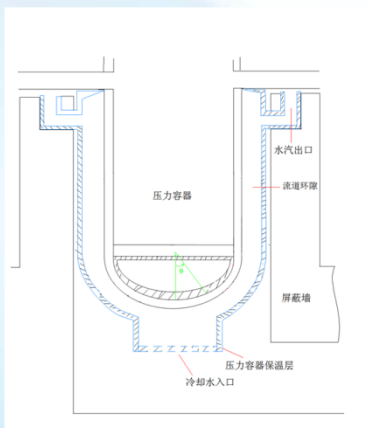


## 严重事故措施设计

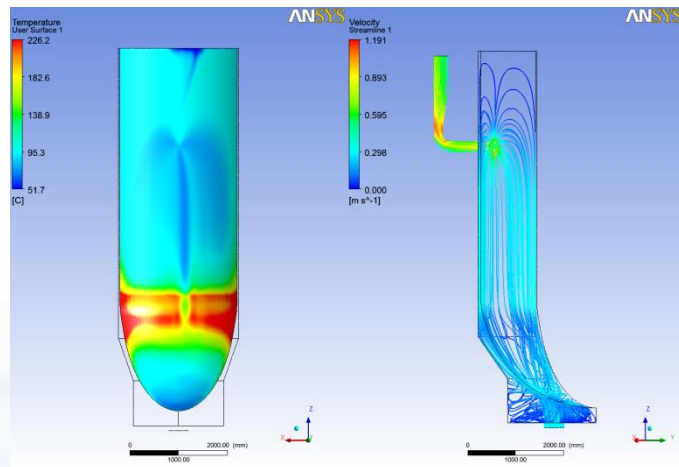
### 堆腔注水冷却系统 (CIS/IVR)



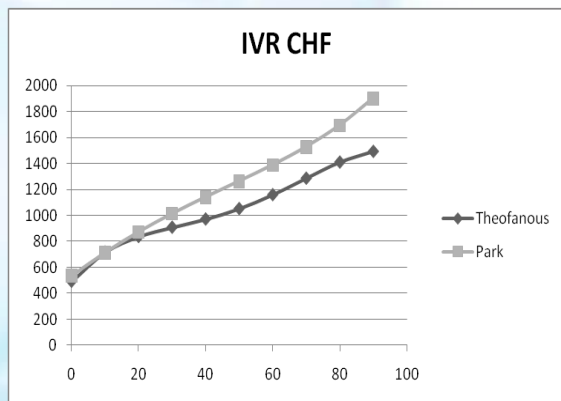
### 堆腔注水冷却系统有效性评价流程



### 有效性评价

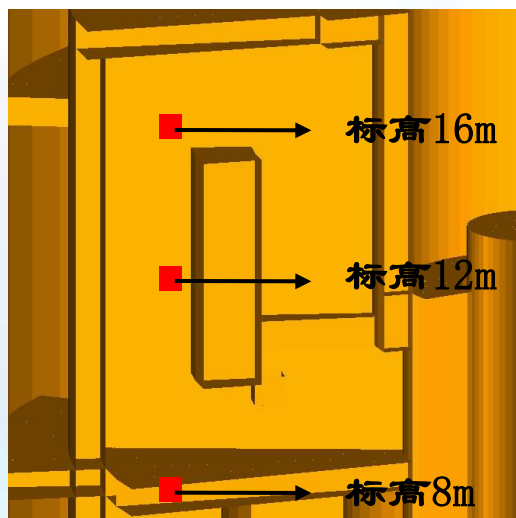


### 3D流道优化分析

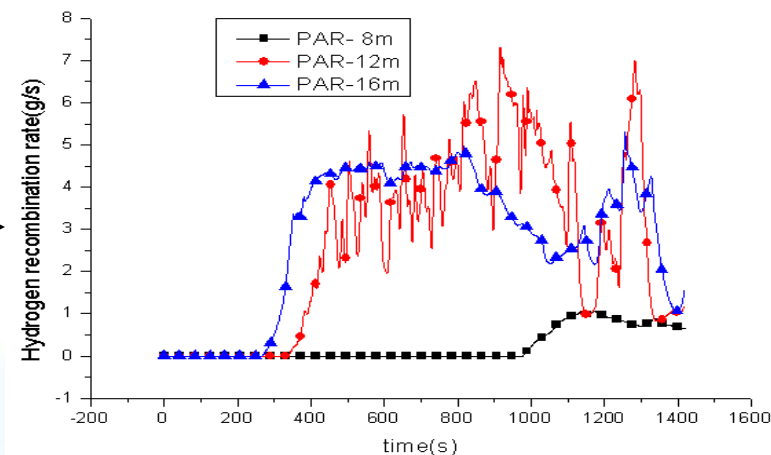


## 严重事故措施设计

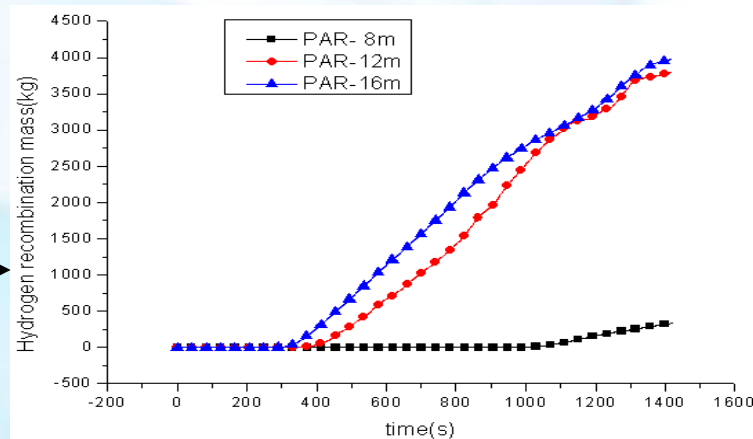
### 非能动氢气复合器



PAR布置位置示意图



PAR在不同位置的消氢速率



不同位置的消氢质量

## □ 严重事故措施设计

### ■ 双层安全壳

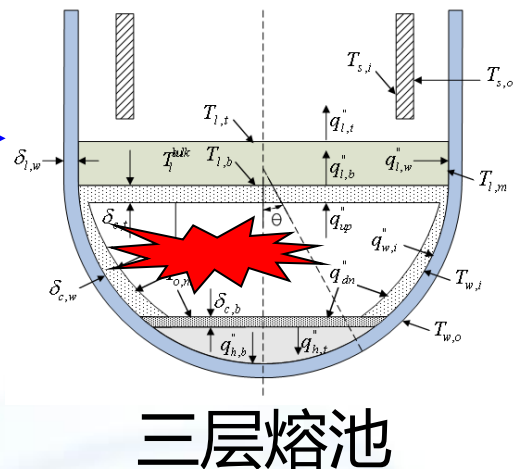
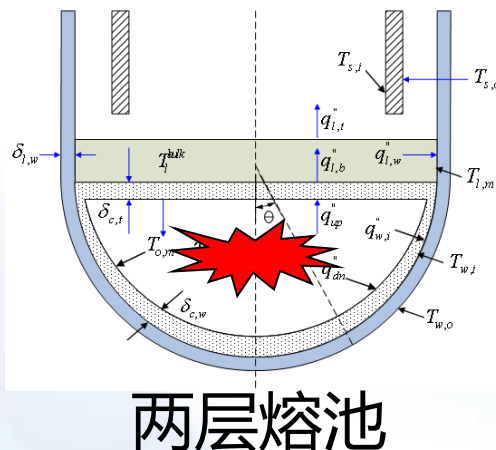
- ✓ 双层安全壳设计技术研究
- ✓ 非能动安全壳热量导出系统设计
- ✓ 双层安全壳（机械）贯穿件研制
- ✓ 双层安全壳的人员、设备闸门设计
- ✓ 双层安全壳60年设计寿期分析技术研究
- ✓ 核岛厂房抗商用大飞机撞击设计技术研究
- ✓ 安全壳过滤排放系统设计技术及试验研究





## 严重事故相关理论研究

### 熔池行为研究

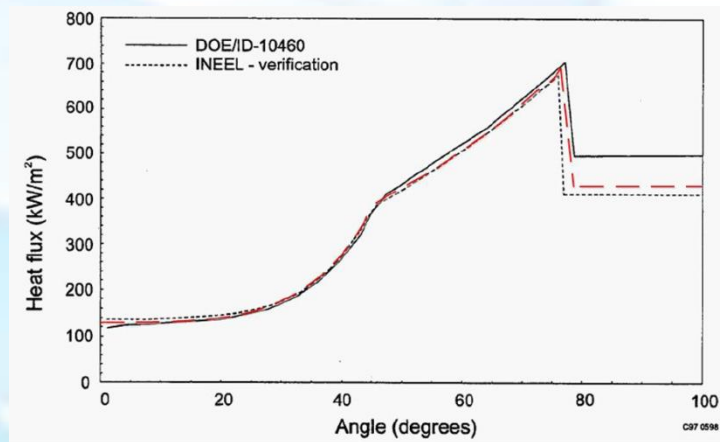


CISER程序

### 分析评价流程



### IVR有效性分析流程



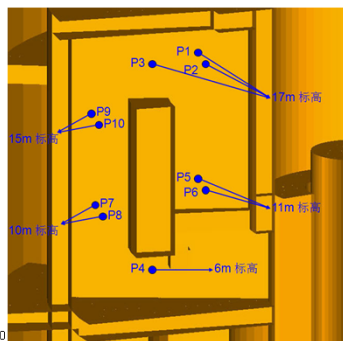
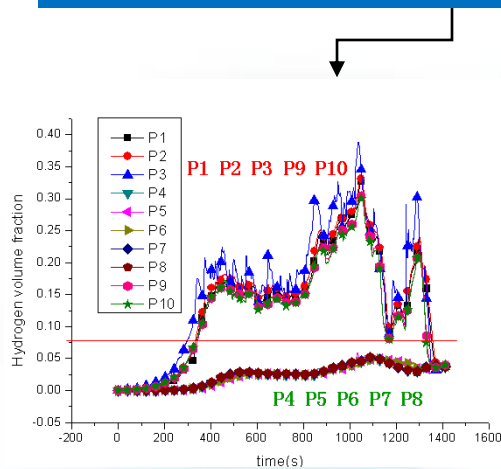
### IVR外壁面CHF



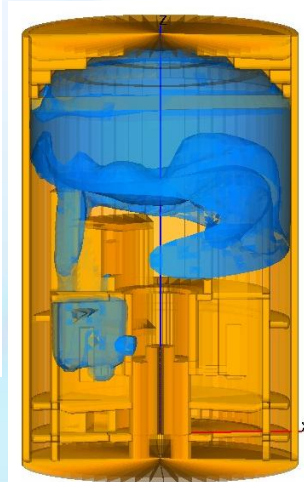
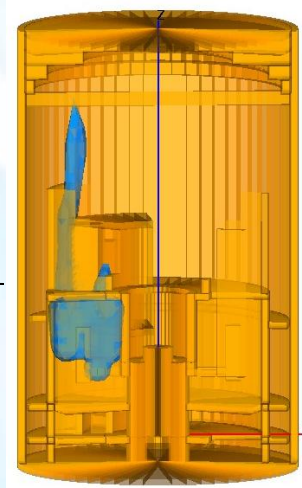
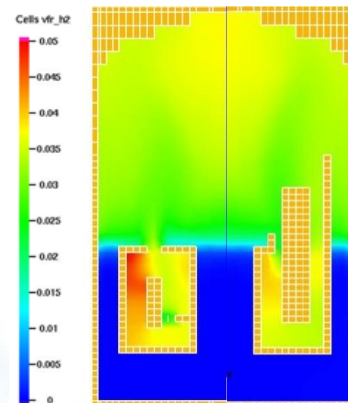
## 严重事故相关理论研究

### 安全壳内氢气行为

#### 局部隔间内氢气问题



#### 氢气整体分布和局部燃烧问题



- 氢气燃烧产生的高温
- 使附近区域的设备和仪表性能降级甚至失效

## 短期

- SAMG自主框架
- 更深层次的IVR措施有效性理论研究
- .....

## 长期

- 蒸汽爆炸机理及实验研究
- 熔池结构研究
- EDMG与EOP/SAMG整合优化设计
- 堆芯捕集器措施设计及有效性实验验证分析
- .....



## 自主SAMG框架考虑

- 乏池严重事故与堆芯严重事故管理协同
- 厂区多机组SAM管理
- 辅助TSC判断电厂主要缓解措施有效性的考虑
- 对严重事故仪器仪表的可用性和信息有效性判断的考虑
- 优化负面影响判断及决策，有利于TSC进行事故处置措施的快速判断
- 对于处置威胁方面，优化措施的投入，减少对非严重威胁方面的投入
- .....



# 汇报完毕

恳请批评指正，谢谢！

