



中国化学品安全协会

# “化危为安”线上讲堂

化危为安

化危为安

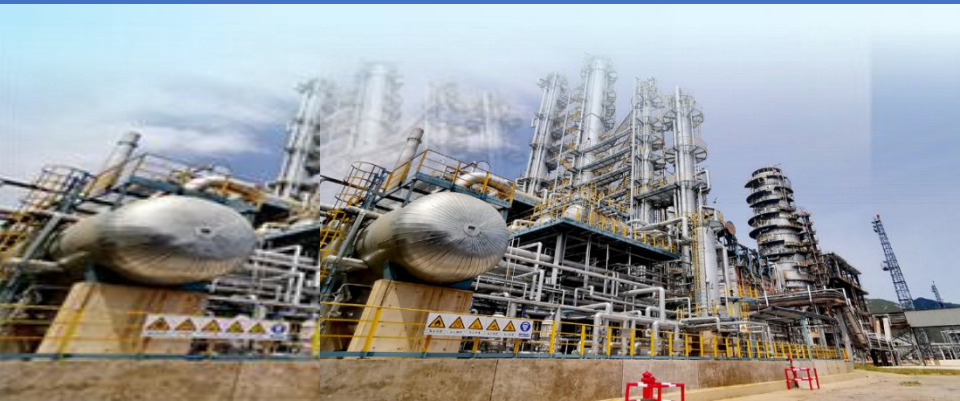
# 化工企业安全保护层分析

主讲人：李奇

康安保化工安全咨询有限公司

2021年6月4日

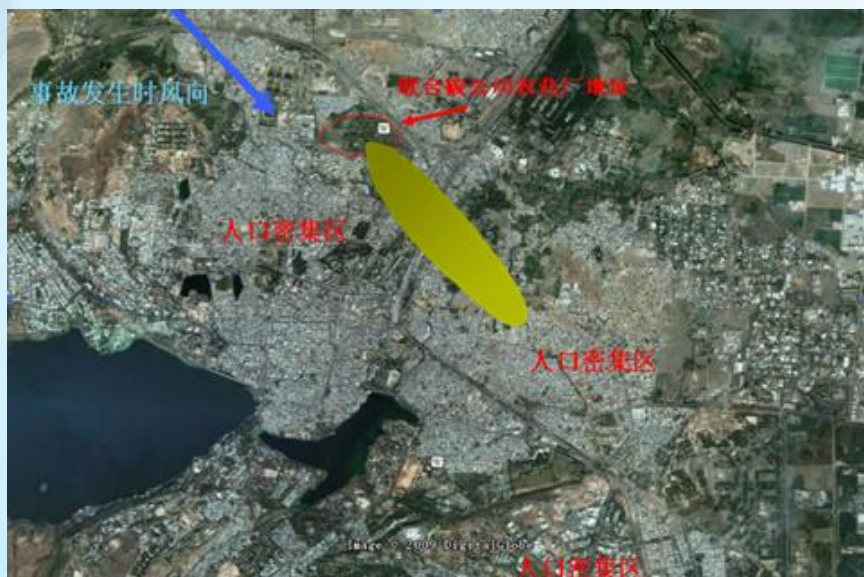
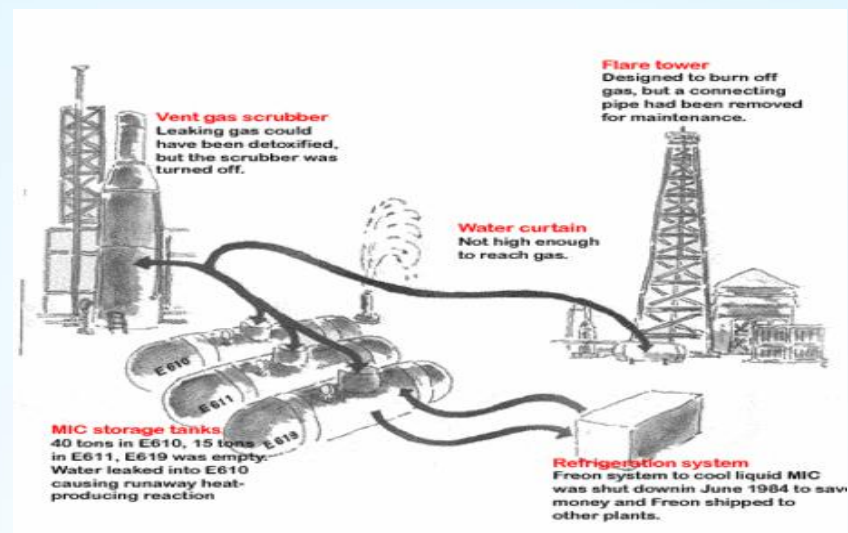
电话：18611947316 邮箱：service@qdhse.com

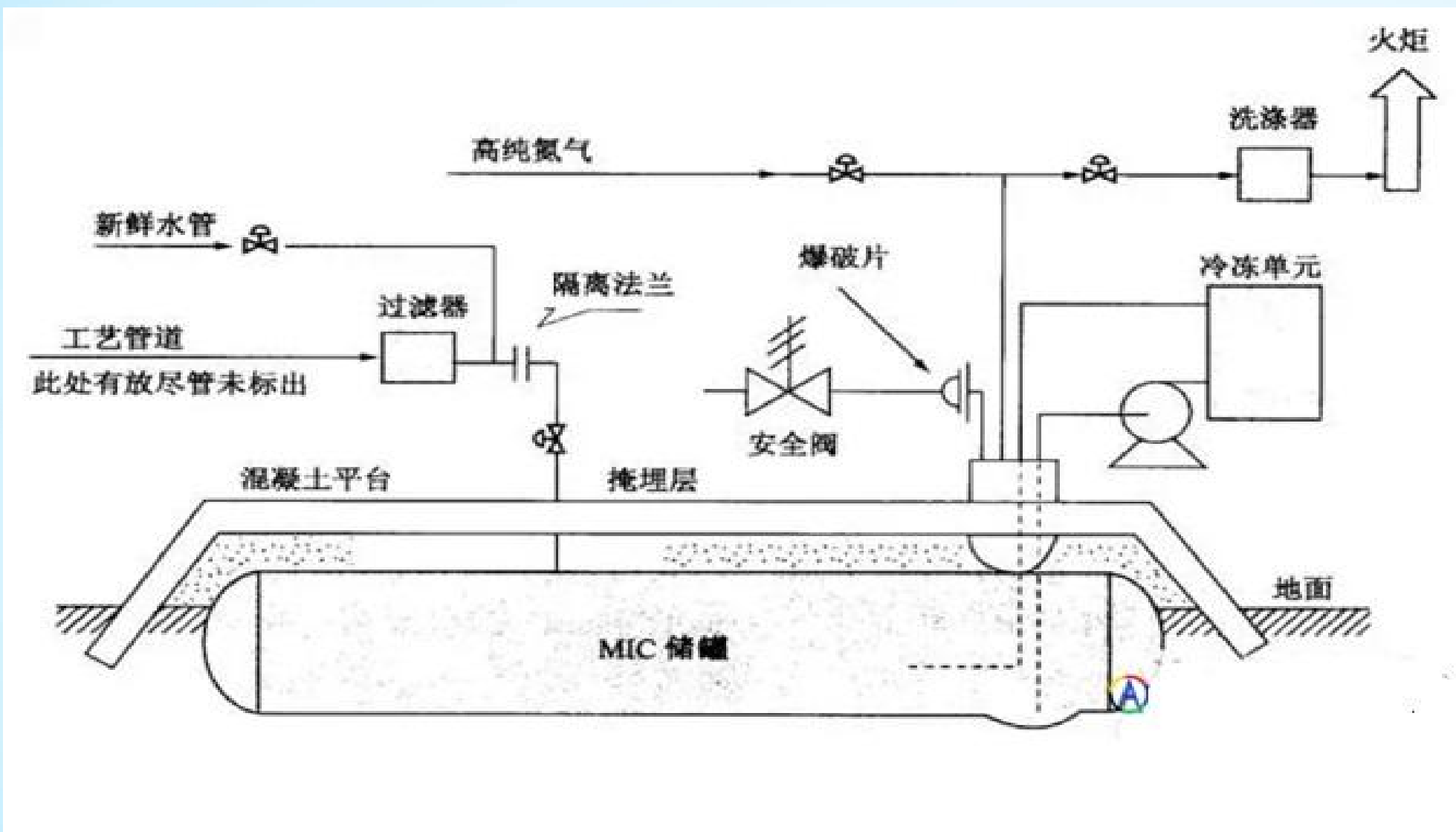




## 安全经验分享：

1984年12月3日，位于印度博帕尔市的美国联合碳化物公司农药厂发生甲基异氰酸酯(Methyl Isocyanate, 简称MIC)毒气泄漏事故。据国际聚氨酯协会异氰酸酯分会提供的数据，该起事故共造成6495人死亡、12.5万人中毒、5万人终身受害。







## 安全面临的挑战:

**2003**



2003 中石油开县井喷

**2005**



2005 中石油吉化事故

**2008**



2008 中石油兰州石化爆炸

**2013**



2013 中石油大连漏油事故

**2010**



2010 兰州石化爆炸

**2010**



2010 大连漏油事故

**2017**



2017 临沂金誉石化爆炸事故

**2017**



2017 新疆宜化燃爆事故

**2017**



2017 乌石化检修事故

**2017**



2017 大连石化火灾事故

**2017**



2017 连云港聚鑫爆炸事故

**2017**



2017 山东日科化学爆燃事故

**2015**



2015 中石化黄岛爆炸

**2015**



2015 福建PX爆炸事故

**2015**



2015 日照石大科技爆炸

**2015**



2015 东营滨源爆炸

**2015**



2015 天津港爆炸事故

**2018**



2018 四川宜宾恒达科技爆炸

**2018**



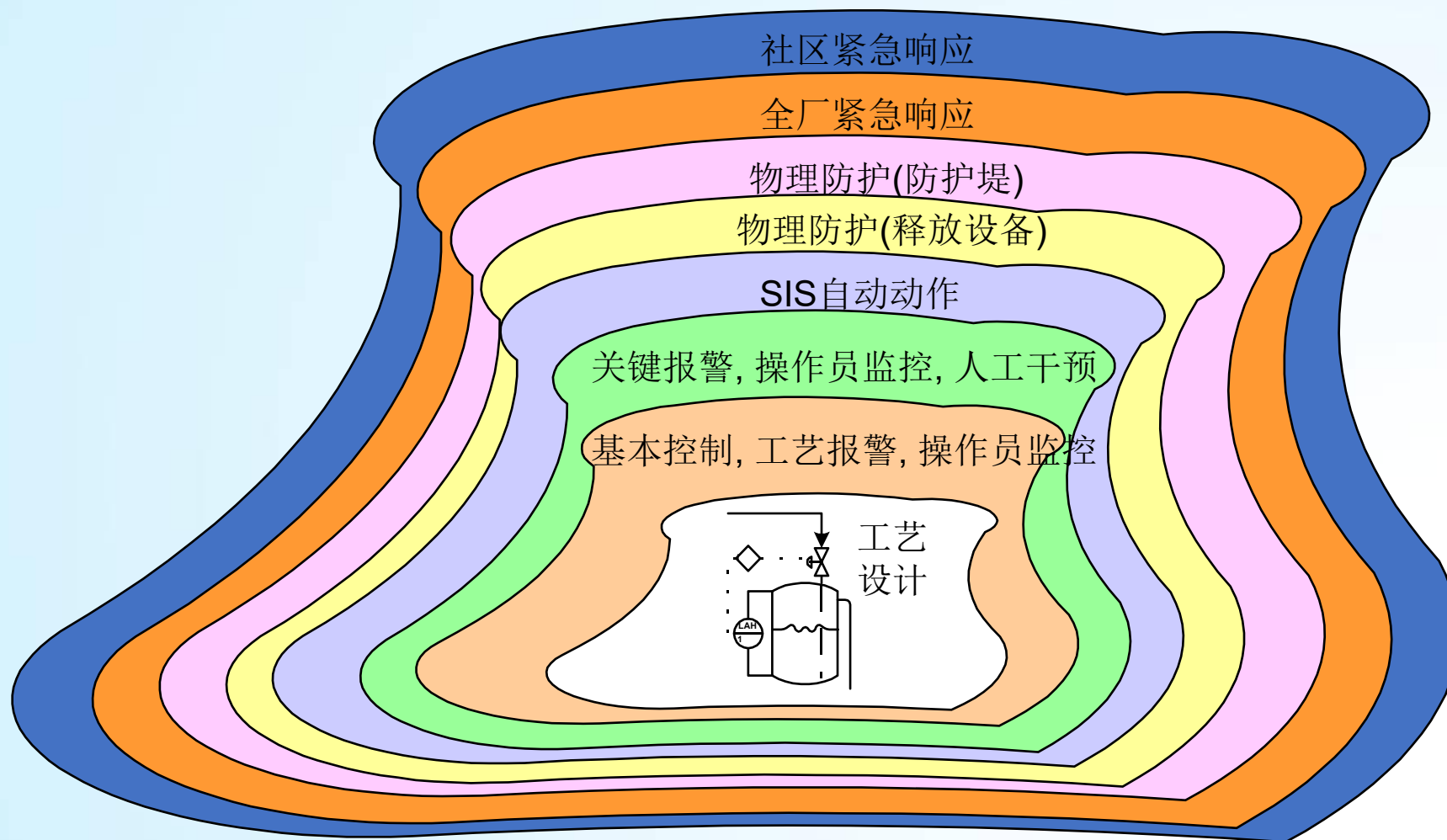
2018 张家口盛华氯乙烯爆炸事故

**2019**



2019 江苏盐城响水天嘉宜爆炸

## 过程安全层层设防的保护层模型（洋葱模型）





HSE

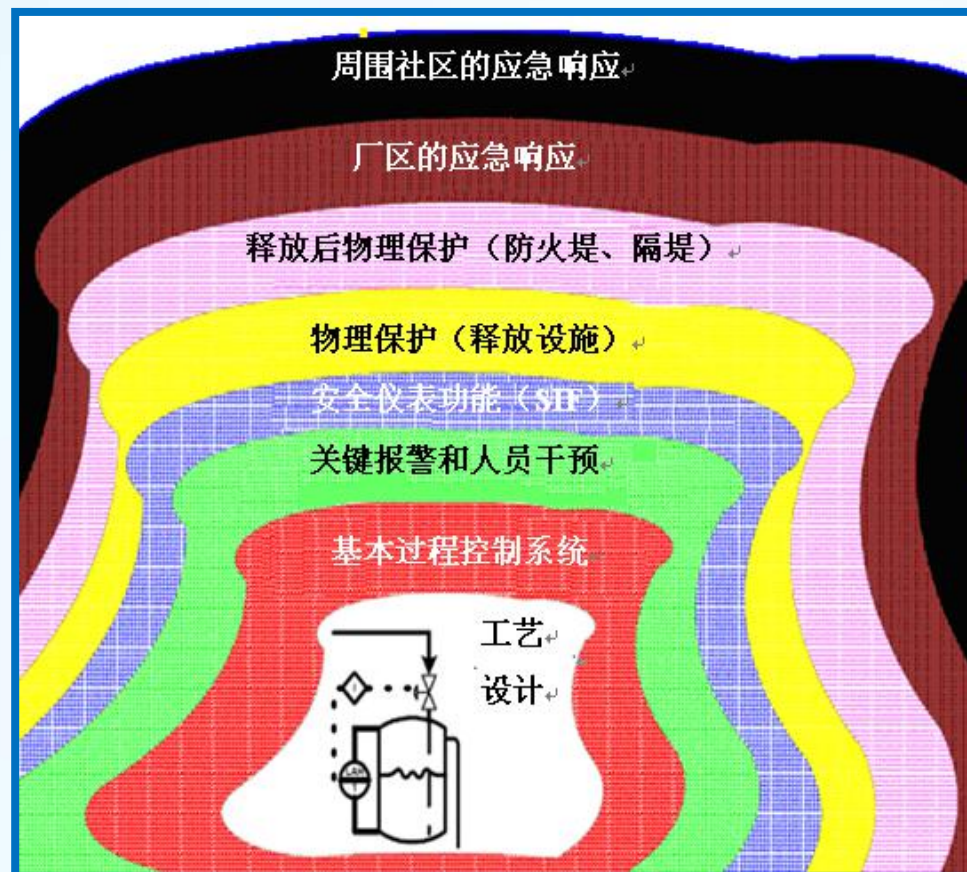
康安保工艺安全

典型的化工过程包括各种保护层（保护措施），这些保护层降低了事故发生的频率

多安全为足够安全？

需要多少保护措施？

每层降低多少风险？





## 保护层分析概述

保护层分析（LOPA）是在定性危害分析的基础上，进一步评估保护层的有效性，并进行风险决策的系统方法；

其主要目的是确定是否有足够的保护层使风险满足企业的风险标准；

基于事故场景的一种半定量分析方法，通常使用初始事件频率、后果严重程度和独立保护层（IPL）失效频率的数量级大小。



## Layer of Protection Analysis ——保护层分析

20世纪80年代末：美国化学品制造商协会出版了《过程安全管理标准责任》，书中建议将“足够的保护层”作为有效的过程安全管理系统的一个组成部分。

1993年：美国CCPS《化工过程安全自动化指南》，书中建议将LOPA作为确定安全仪表功能完整性水平的方法之一。

2001年：CCPS发布了《保护层分析——简化的过程风险管理》，书中详细地讨论了LOPA的基本规则和应用。

2003年：国际电工委员会（IEC）发布了IEC61511：过程工业领域安全仪表系统的功能安全，将LOPA技术作为确定安全仪表系统完整性水平的推荐方法之一。

# LOPA术语

## 1) 场景scenario

可能导致不期望后果的一种事件或事件序列。每个剧情至少包含两个要素：初始事件及其后果。

## 2) 初始事件initiating event

事故场景的初始原因

## 3) 独立保护层independent protection layer

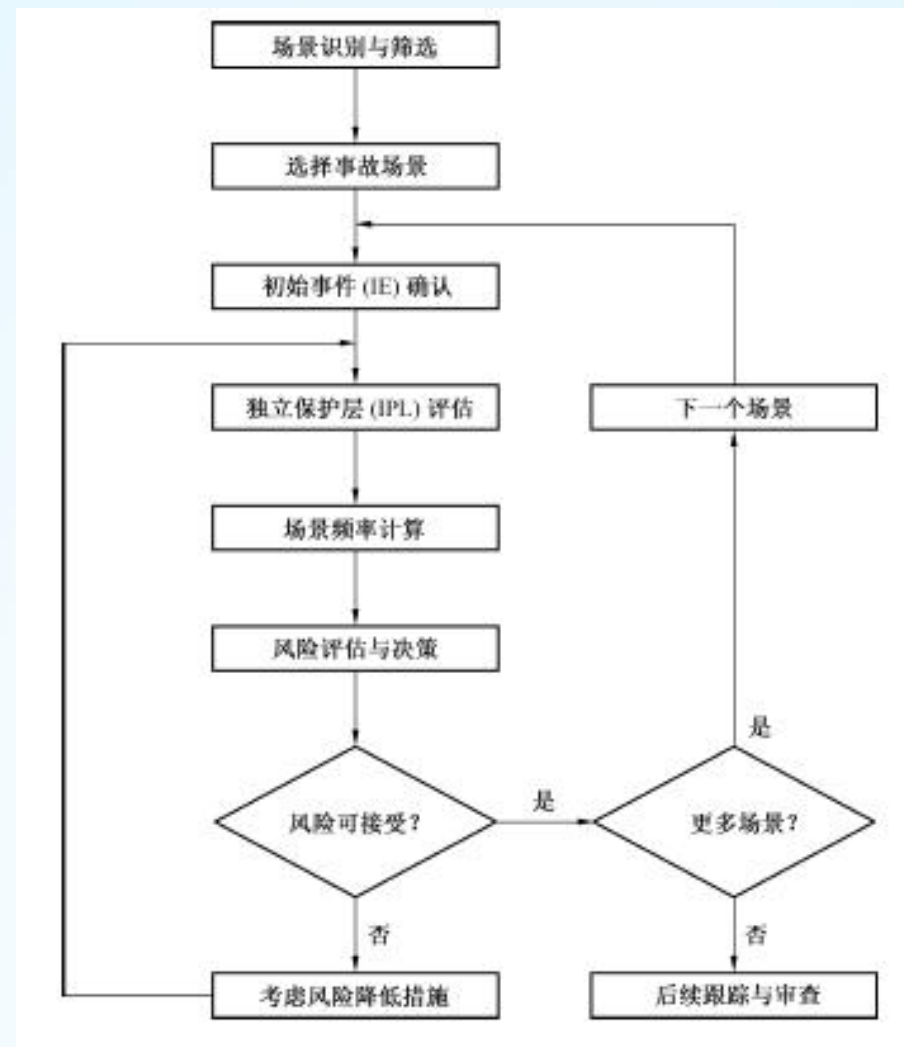
能够阻止剧情向不期望后果发展，并且独立于剧情的初始事件或其它保护层的设备、系统或行动。（简称IPL）

## 4) 要求时的失效概率probability of failure on demand

系统要求独立保护层起作用时，独立保护层发生失效，不能完成一个具体功能的概率。（简称PFD）

## 保护层分析的基本程序

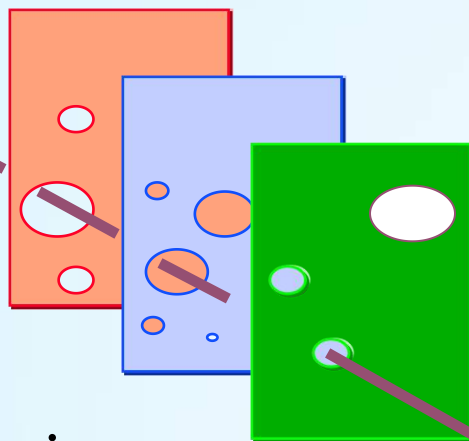
- a) 场景识别与筛选
- b) 初始事件 (IE) 确认
- c) 独立保护层 (IPL) 评估
- d) 场景频率计算
- e) 风险评估与决策
- f) 后续跟踪与审查



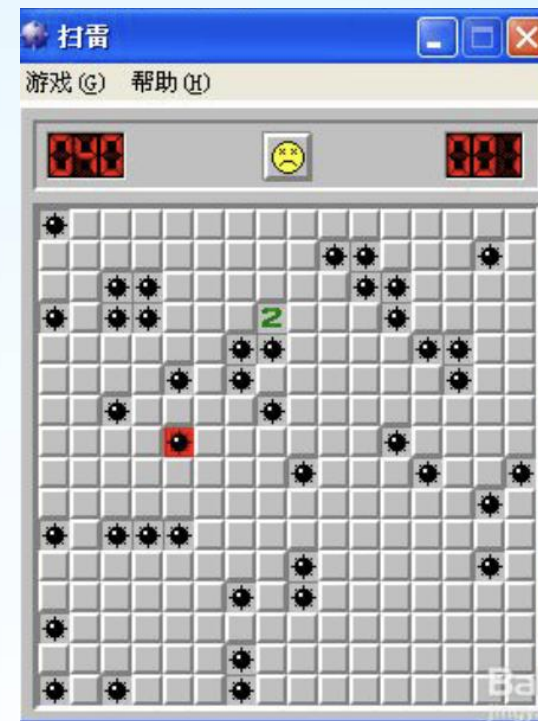




Hazard or Risk  
危害或风险




Barriers  
or Controls 屏障或控制



Incident 事故

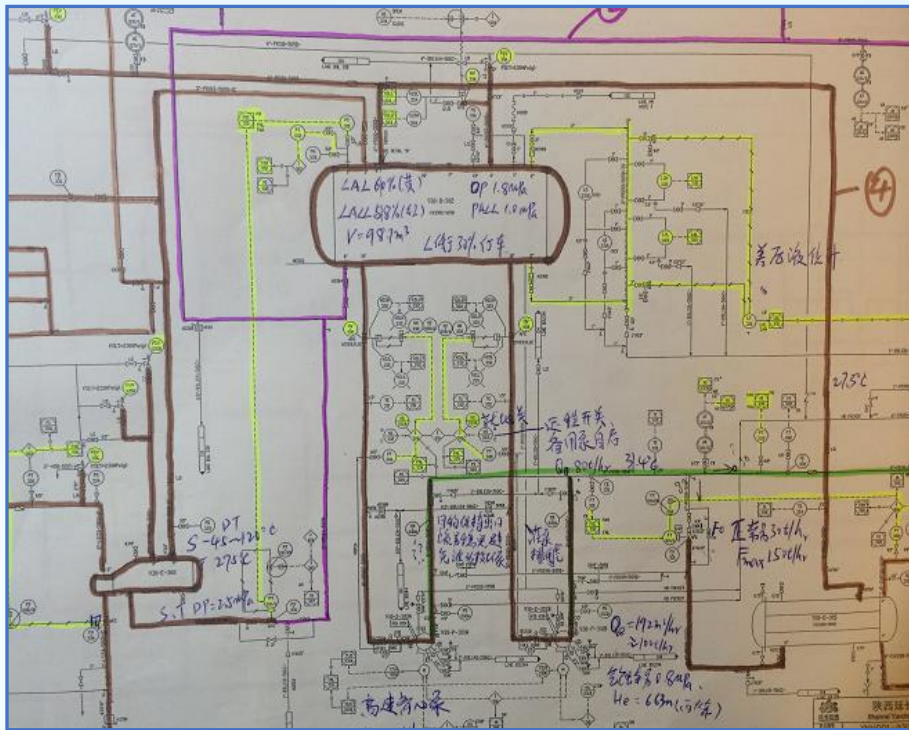
# 01 场景识别与筛选

## 场景信息来源

- 
- a) 采用 HAZOP 分析方法进行危害分析的结果;
  - b) 采用 AQ/T3034中的工艺危害分析方法进行危害分析的结果;
  - c) 事故分析结果;
  - d) 工艺变更分析;
  - e) 安全仪表功能审查结果;
  - f) 其他危害分析结果等。

## HAZOP方法:

- **危险与可操作性分析**——HAZOP方法是通过使用一组引导词（比如流量偏高/偏低、压力偏高/偏低等），对生产工艺或操作进行结构化和系统化的审查，来全面和系统地辨识工艺装置设计和运行中可能存在导致安全或操作问题的缺陷，并评估所采取的安全措施是否足够和适当，如果不足或缺，则进一步提出应采取的安全措施或建议。

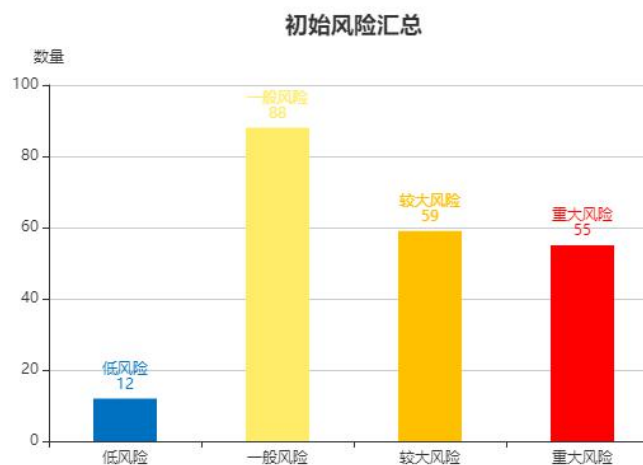
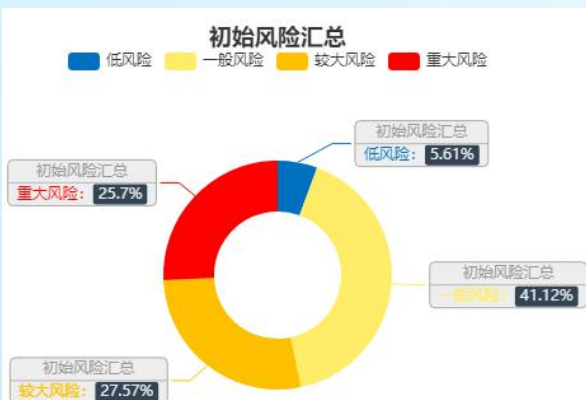


HAZOP分析的思路：从装置的进料到出料，针对每一条管线、每一台设备、每一台阀门逐一进行分析。HAZOP也被定义为：对生产工艺系统危险性与可操作性的严格检查。



# 01场景识别与筛选

POSSIBLE CAUSES 可能原因	C#	CONSEQUENCES 后果	Initial Risk 初始风险				S#	SAFEGUARDS 控制措施	措施类别	Current Risk 现有风险				REC# 编号	RECOMMENDATION 建议措施	是否 LOPA
			P	A	E	R				P	A	E	R			
氯化氢球罐2TK2001A/ B来料减少或中断	1	氯化氢来料量减少， 供气不足，进入反应 器2RC2001氯化氢 量减少，乙烯与氧气 正常进入反应器时可 能达到爆炸极限，发 生爆炸，造成人员伤 亡	G4	G5	G3	G4	1	氯化氢球罐2TK2001A/B压力低 报警2PIA2912A/B (0.705MP a)	报警	D4	D5	D3	D4			←关联场景
							2	氯化氢流量低报警2FIC2183 (8 450m3/h)	报警							
							3	氯化氢流量2FSL2183低低联锁 停车 (7128m3/h)	安全仪表功能 (SIF)							
							4	循环气氧气含量高联锁停车2 AT2179/80/81 (2003, 5%)	安全仪表功能 (SIF)							

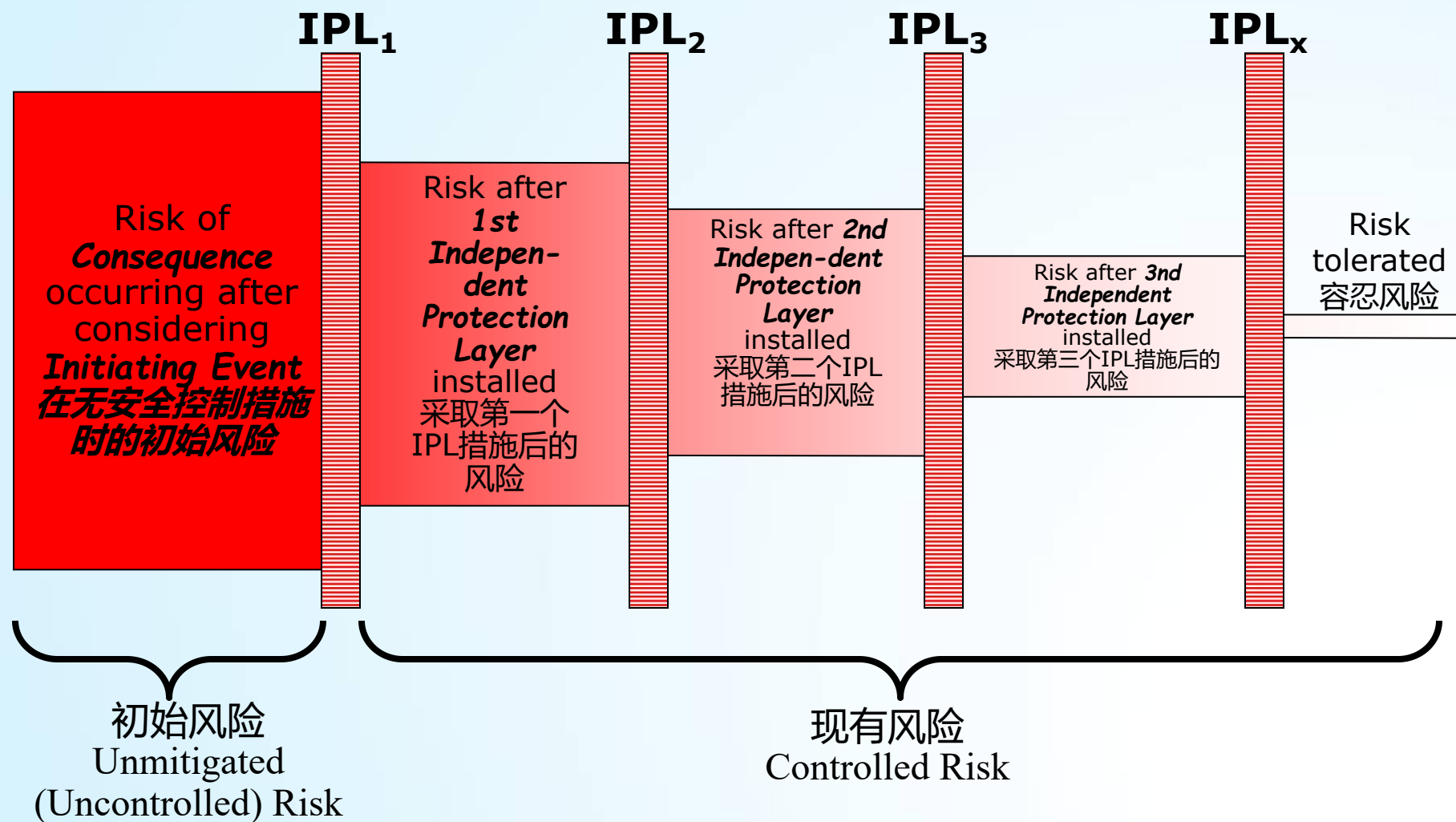


注：数据来源于康安保公司工艺危害分析软件平台

## 02初始事件（IE）确认

- a) 审查场景中所有的原因，以确定该初始事件为有效初始事件；
- b) 应确认已辨识出所有的潜在初始事件，并确保无遗漏；
- c) 应将每个原因细分为独立的初始事件（如“冷却失效”可细分为冷却剂泵故障、电力故障或控制回路失效），以便于识别独立保护层；
- d) 在识别潜在初始事件时，应确保已经识别和审查所有的操作模式下的初始事件；
- e) 当人的失效作为初始事件时，应制定人员失误概率评估的统一规则并在分析时严格执行。

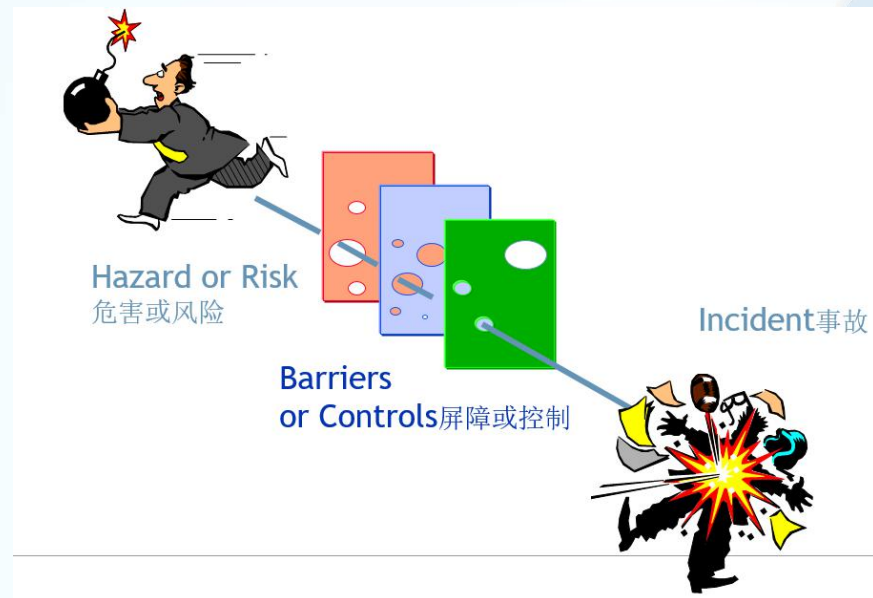
## 03独立保护层 (IPL) 评估





## 03独立保护层（IPL）评估

- a、独立性：独立于初始事件和任何其他已经被认为是同一场景的独立保护层的构成元件；
- b、有效性：按照设计的功能发挥作用，应有效地防止后果发生；
- c、可审查性：对于阻止后果的有效性和 PFD 应以某种方式（通过记录、审查、测试等）进行验证。审查程序应确认如果独立保护层按照设计发生作用，它将有效地阻止后果。



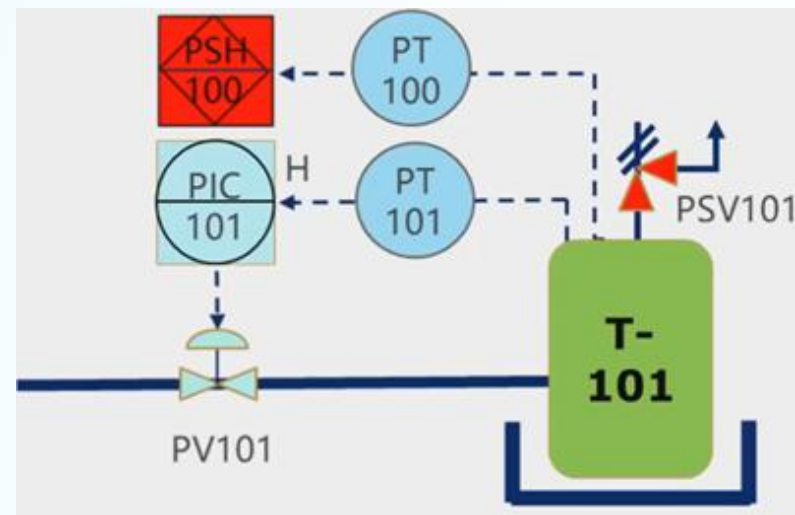
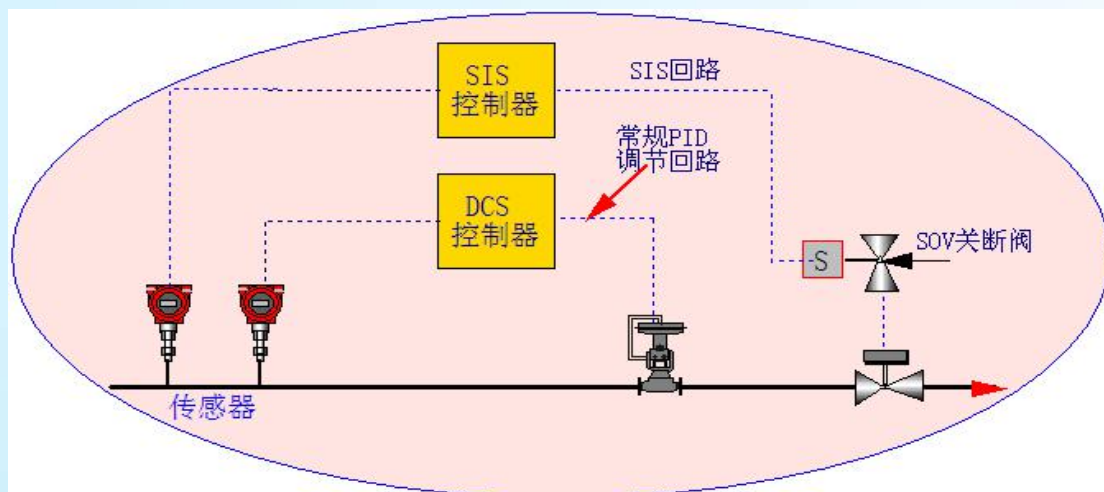


HSE

康安保工艺安全

## 常见的典型的IPL

- ◆ 基本过程控制BPCS
- ◆ 关键报警与人员响应
- ◆ 安全仪表系统SIS
- ◆ 安全泄放系统（安全阀、爆破片、呼吸阀）等



## 不作为IPL措施

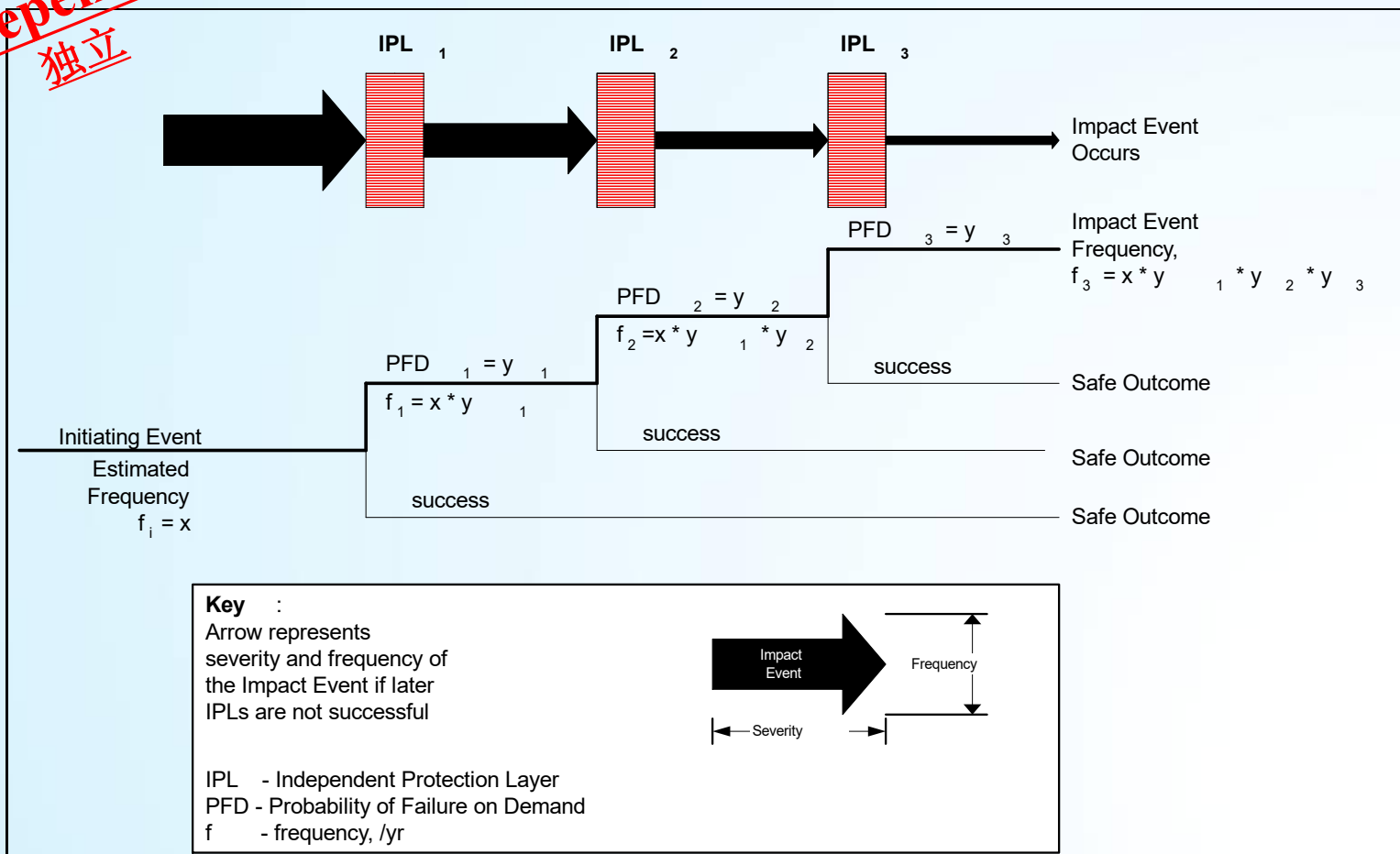
以下防护措施不宜作为独立保护层:

- a) 培训和取证: 在确定操作人员行动的PFD时, 需要考虑这些因素, 但是它们本身不是独立保护层。
- b) 程序: 在确定操作人员行动的PFD时, 需要考虑这些因素, 但是它们本身不是独立保护层。
- c) 正常的测试和检测: 正常的测试和检测将影响某些独立保护层的PFD, 延长测试和检测周期可能增加独立保护层的PFD。
- d) 维护: 维护活动将影响某些独立保护层的PFD。
- e) 通信: 作为一种基础假设, 假设工厂内具有良好的通信。差的通信将影响某些独立保护层的PFD。
- f) 标识: 标识自身不是独立保护层。标识可能不清晰、模糊、容易被忽略等。标识可能影响某些独立保护层的PFD。



## 04场景频率计算

**Independent**  
独立



## 04场景频率计算

$$f_i^C = f_i^I \times \prod_{j=1}^J PFD_{ij} = f_i^I \times PFD_{i1} \times PFD_{i2} \times \cdots \times PFD_{ij}$$

式中:

$f_i^C$ ——初始事件*i*的后果*C*的发生频率, 单位为 /a;

$f_i^I$ ——初始事件*i*的发生频率, 单位为 /a;

$PFD_{ij}$ ——初始事件*i*中第*j*个阻止后果*C*发生的IPL的PFD。

## 04场景频率计算

初始事件发生频率和独立保护层失效频率

其数据可采用：

- a) 行业统计数据；
- b) 企业历史统计数据；
- c) 基于失效模式、影响和诊断分析（FMEDA）和故障树分析（FTA）等的数据；
- d) 供应商提供的数据。



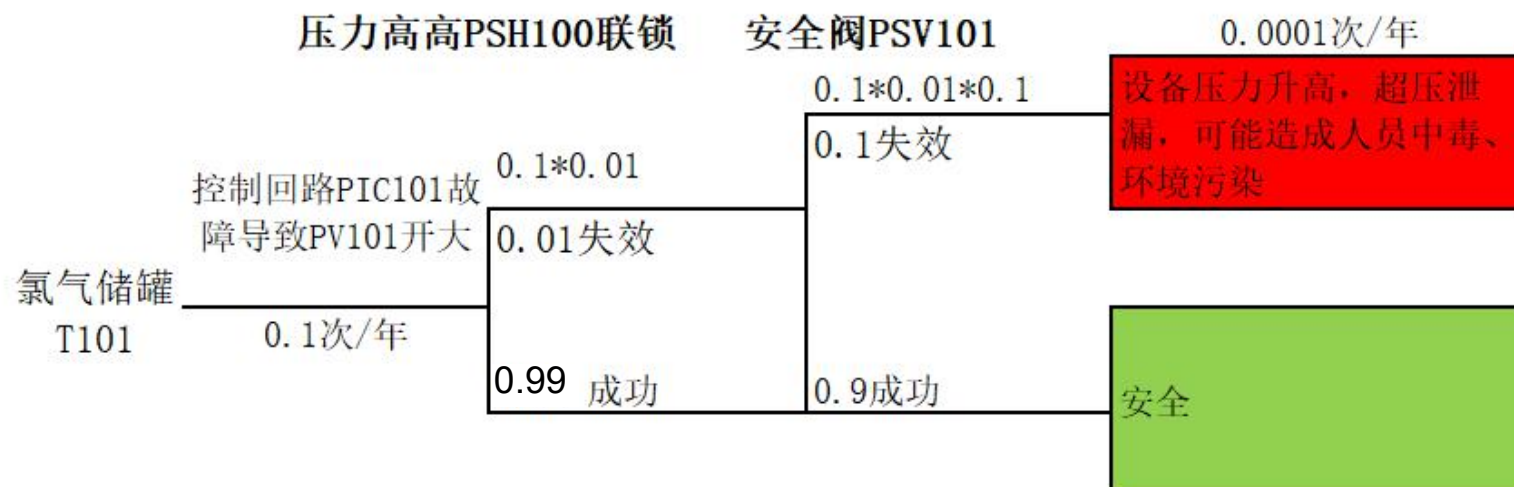
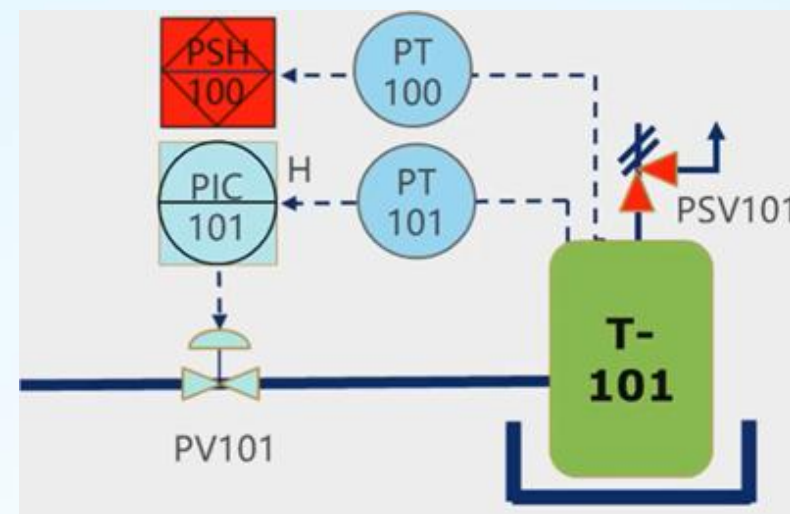
## 常见的初始事件IE的失效频率

序号	触发原因	失效频率（次/年）
1	压力容器残余失效	1.00E-06
2	常压罐失效	1.00E-03
3	工艺管线泄漏(10%截面积/100m)	1.00E-03
4	工艺管线破裂（断裂/100m）	1.00E-05
5	气体长输管道泄漏(/km)	2.97E-04
6	气体长输管道破裂(/km)	3.30E-05
7	液体长输管道泄漏 (/km)	2.61E-04
8	液体长输管道破裂 (/km)	5.29E-05
9	安全阀误打开	1.00E-02
10	自立阀失效	1.00E-01
11	冷却水失效	1.00E-01
12	换热器内漏（泄漏孔径20mm）	1.00E-02
13	单台泵故障跳停	1.00E-01
14	BPCS (基本工艺控制)失效	1.00E-01
15	小的外部火灾 (总的原因)	1.00E-01
16	大的外部火灾 (总的原因)	1.00E-02
17	操作失误(简单操作)	0.01（每次作业）
18	操作失误(复杂操作无独立检查)	0.1（每次作业）
19	操作失误(复杂操作有独立检查)	0.01（每次作业）

## 常见的典型的IPL的PFD

序号	保护层类型	风险降低因子 RRF	PFD
1	基本工艺控制 (BPCS)	10	$1 \times 10^{-1}$
2	现场控制盘 (LCP)	10	$1 \times 10^{-1}$
3	自力阀	10	$1 \times 10^{-1}$
4	双单向阀	10	$1 \times 10^{-1}$
5	报警人员响应 (15分钟响应时间)	10	$1 \times 10^{-1}$
6	标准作业程序 (SOP)	10	$1 \times 10^{-1}$
7	安全仪表功能 (SIL1)	10	$1 \times 10^{-1}$
8	安全仪表功能 (SIL2)	10	$1 \times 10^{-2}$
9	安全仪表功能 (SIL3)	10	$1 \times 10^{-3}$
8	安全阀/爆破片 I (前或后带切断阀)	10	$1 \times 10^{-1}$
9	安全阀/爆破片 II (前或后带切断阀)	100	$1 \times 10^{-2}$

# 常见的典型的IPL

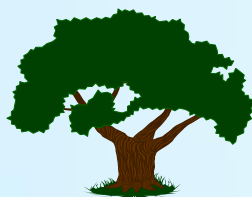


## 05风险评估与决策



$$\text{风险}R = \text{后果}C \times \text{频率}P$$

- 人员伤亡
- 财产/设备破坏
- 生产损失
- 环境影响
- 声誉损失
- 社会/政治影响

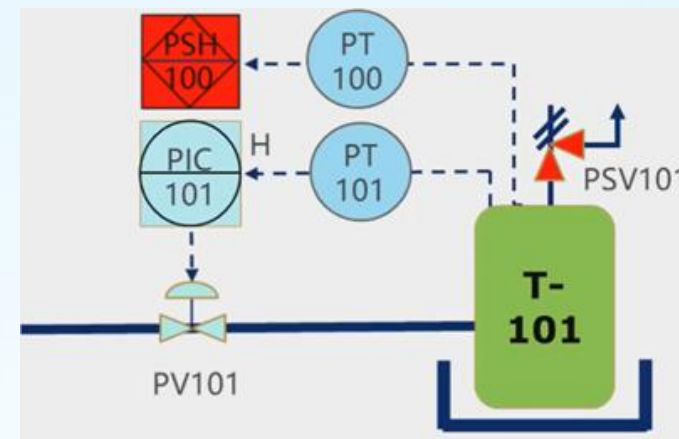




# 05风险评估与决策

HSE风险矩阵						发生的可能性等级--从不可能到频繁发生					
						L0	L1	L2	L3	L4	L5
						Remote	Not expected to occur	Could Occur, Not Likely	Probable to Occur	Expected to Occur	Has Occurred/Will Occur
事故严重性等级 (从轻到重)	后果等级	人员伤亡	财产损失	环境影响	声誉影响	10 <sup>-6</sup> -10 <sup>-5</sup> /年	10 <sup>-5</sup> -10 <sup>-4</sup> /年	10 <sup>-4</sup> -10 <sup>-3</sup> /年	10 <sup>-3</sup> -10 <sup>-2</sup> /年	10 <sup>-2</sup> -10 <sup>-1</sup> /年	10 <sup>-1</sup> -1/年
	C0	急救/轻微皮肤刺激	小于1万美元	保持在二级防护或建筑物内, 对人类健康或环境没有影响	没有影响;	D(L0&C0)	D(L1&C0)	D(L2&C0)	D(L3&C0)	C(L4&C0)	C(L5&C0)
	C1	场内: 单个 OSHA 可记录伤害	1万至10万美元	在二次防护之外, 但在现场维护, 对人类健康或环境没有影响;	一些轻微的本地投诉; 侧路封闭	D(L0&C1)	D(L1&C1)	D(L2&C1)	C(L3&C1)	C(L4&C1)	B(L5&C1)
	C2	场内: 多个 OSHA 可记录伤害; 场外: 短期健康影响	10 万至 100 万美元	在二次防护之外, 现场低至中度影响人类、健康或环境;	一些新闻报道, 很快就消失了; 二级公路封路	D(L0&C2)	D(L1&C2)	C(L2&C2)	C(L3&C2)	B(L4&C2)	B(L5&C2)
	C3	场内: 永久致残损伤; 场外: 单次场外住院或受伤	100 万美元至 1 000 万美元	场外低至中度影响/对人、健康或环境的风险	新闻报道, 后续主要道路封闭 < 24 小时。	D(L0&C3)	D(L1&C3)	C(L2&C3)	B(L3&C3)	A(L4&C3)	A(L5&C3)
	C4	现场: 死亡; 场外: 重伤或多次住院	1000 万至1亿美元	中度现场或场外影响/对人、健康或环境的风险	多日当地新闻报道, 公众兴趣高; 主要道路或高速公路关闭 > 24 小时	D(L0&C4)	C(L1&C4)	B(L2&C4)	A(L3&C4)	A(L4&C4)	S(L5&C4)
	C5	场内: 多人死亡; 场外: 单例死亡或多例长期健康影响病例	大于 1 亿美元	对人、健康或环境的重大现场或场外影响/风险	多日国家/地区新闻报道, 重大公益; 主要高速公路多日封闭	C(L0&C5)	B(L1&C5)	A(L2&C5)	A(L3&C5)	S(L4&C5)	S(L5&C5)

# 常见的典型的IPL



如果目标风险<0.0001次/年，结果？

如果目标风险<0.00001次/年，结果？

## 06后续跟踪与审查

- a) 应对LOPA分析结果的执行情况进行后续跟踪，对LOPA提出的降低风险行动的实施情况进行落实。
- b) LOPA的程序和分析结果可接受相关的审查。



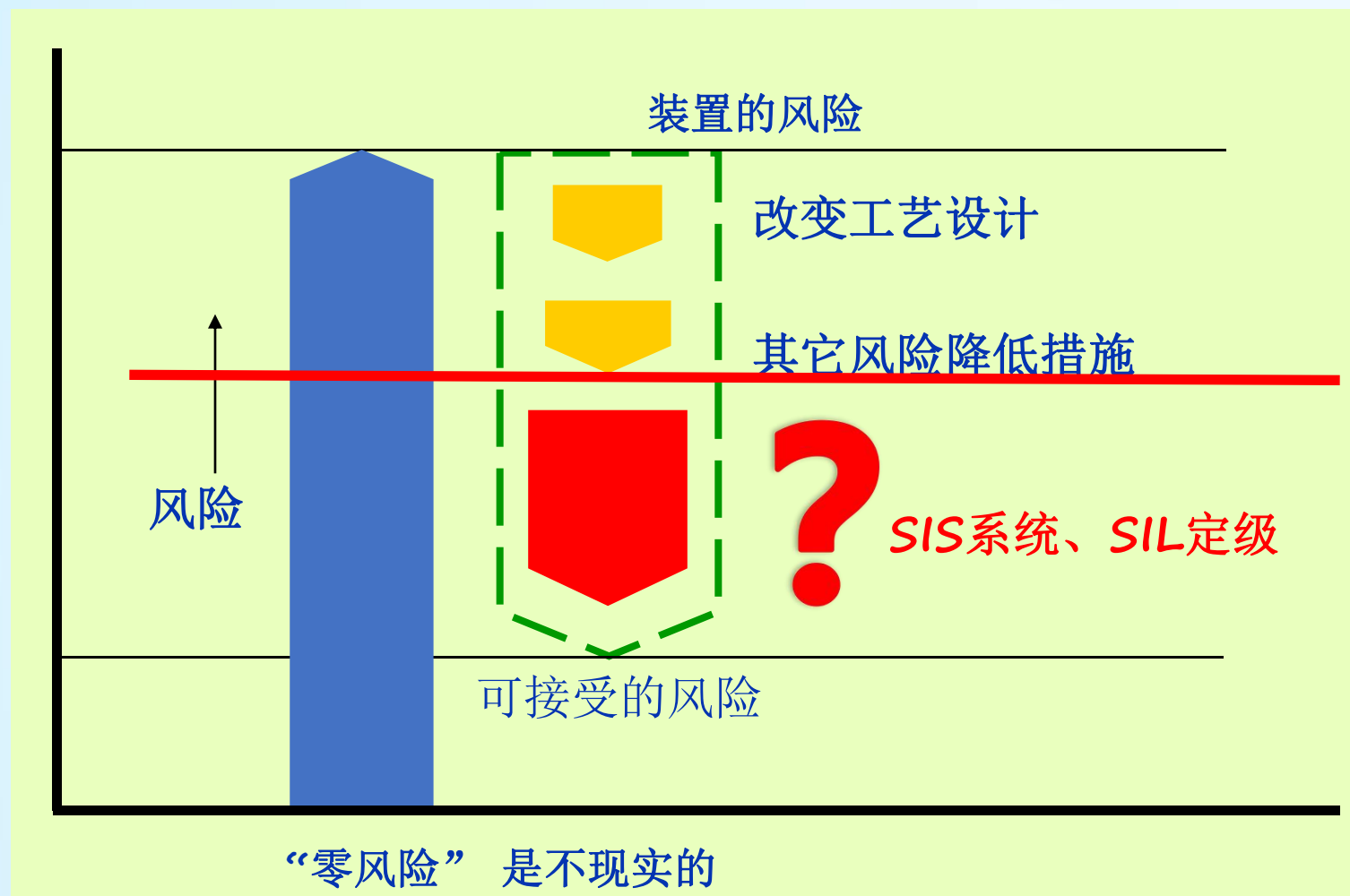
# LOPA案例

LOPA场景：淡盐水循环槽液位升高，通过气相管线渗入氯气总管，可能导致氯气总管积液，电解槽氯气侧压力升高，离子膜超压破膜，氢气与氯气混合，可能发生火灾爆炸，损坏电解槽，导致氢气、氯气泄漏，人员中毒，环境污染。														
引发原因数量 IC Number	引发事件 Initiating Event	频率Frequency(ICL)	严重度Severity	减缓事件目标频率T MEL	修正因子Modifiers					无IPL时的RRF With No IPLs	IPL1	IPL2	需要的RRF RRF Required	Status
					点燃概率Ignition	占有率Occupancy	风险存在的时间Time at Risk	使能事件Enabling Event	容器失效修正Container Failure		电槽阴阳极气相压差3PD13030 A低报警 (-8kPa)	淡盐水循环槽液位3LIZA3060 高高联锁停所有整流器 (90%)		
											报警	安全仪表功能 (SIF)		
	多引发事件										Applicable RRF			
IC1	二次盐水流量控制回路故障导致 进料调节阀3FV3031A开大	1.00E-01	4	1.00E-05	1.00	0.17	1.00	1.00	1.00	1700.00	10.00	170.00	1.00	pass
IC2	淡盐水泵3PU3064A/B故障停	1.00E-01	4	1.00E-05	1.00	0.17	1.00	1.00	1.00	1700.00	10.00	170.00	1.00	pass
IC3	淡盐水循环槽液位控制回路故障 导致调节阀3LV3060关小或关闭	1.00E-01	4	1.00E-05	1.00	0.17	1.00	1.00	1.00	1700.00	10.00	170.00	1.00	pass
SIF RRF Required												510.00		
PFD												1.96E-03		
SIL等级												SIL2		
受保护设备												电槽槽3EM3030A-H		
SIF标识												3LIZA3060		
建议措施														
建议落实后SIL等级														
建议落实后PFD值														
备注：巡检人员每小时一次，人员暴露频率10min/60min=0.17														

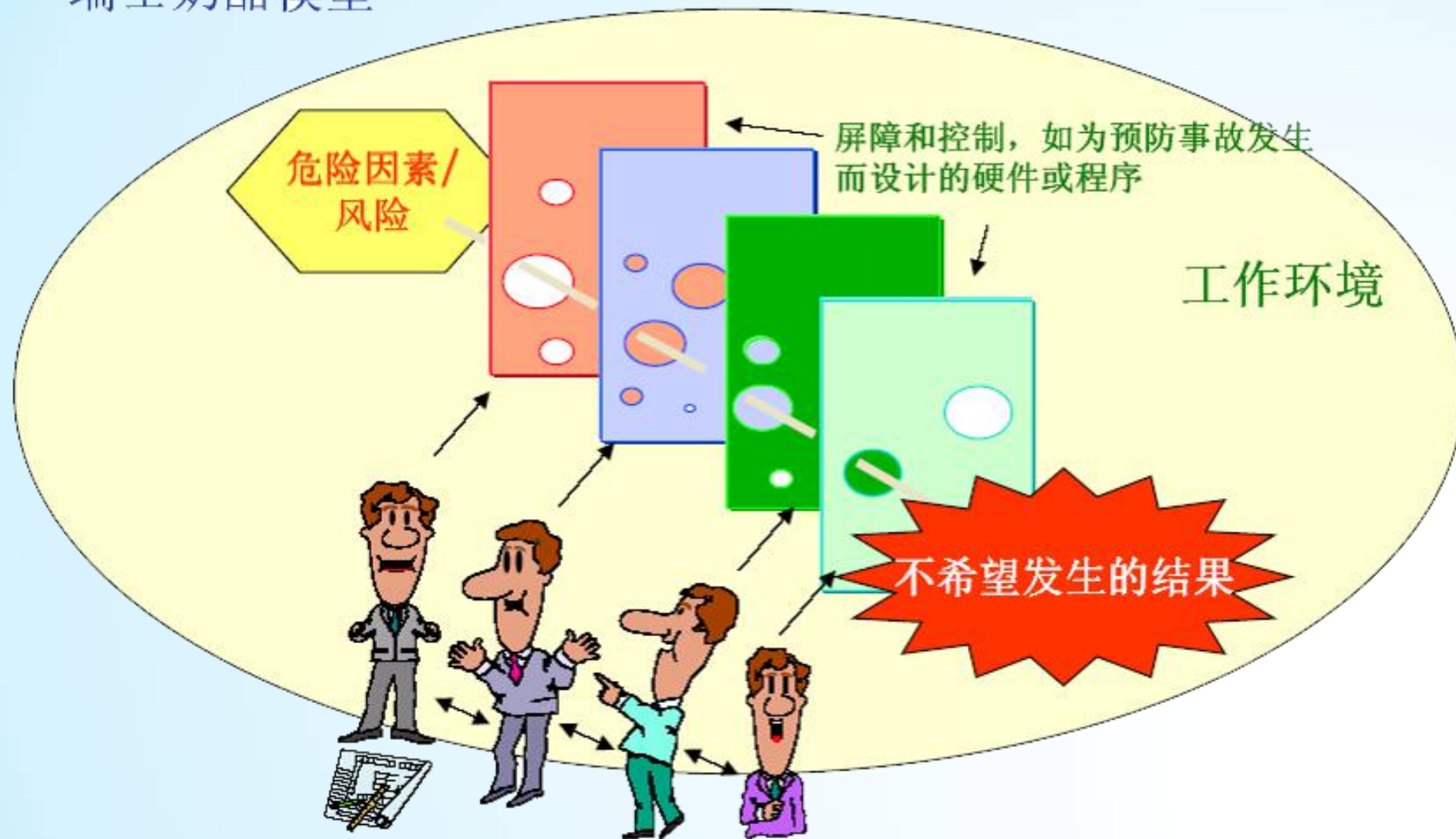
注：数据来源于康安保公司工艺危害分析软件平台

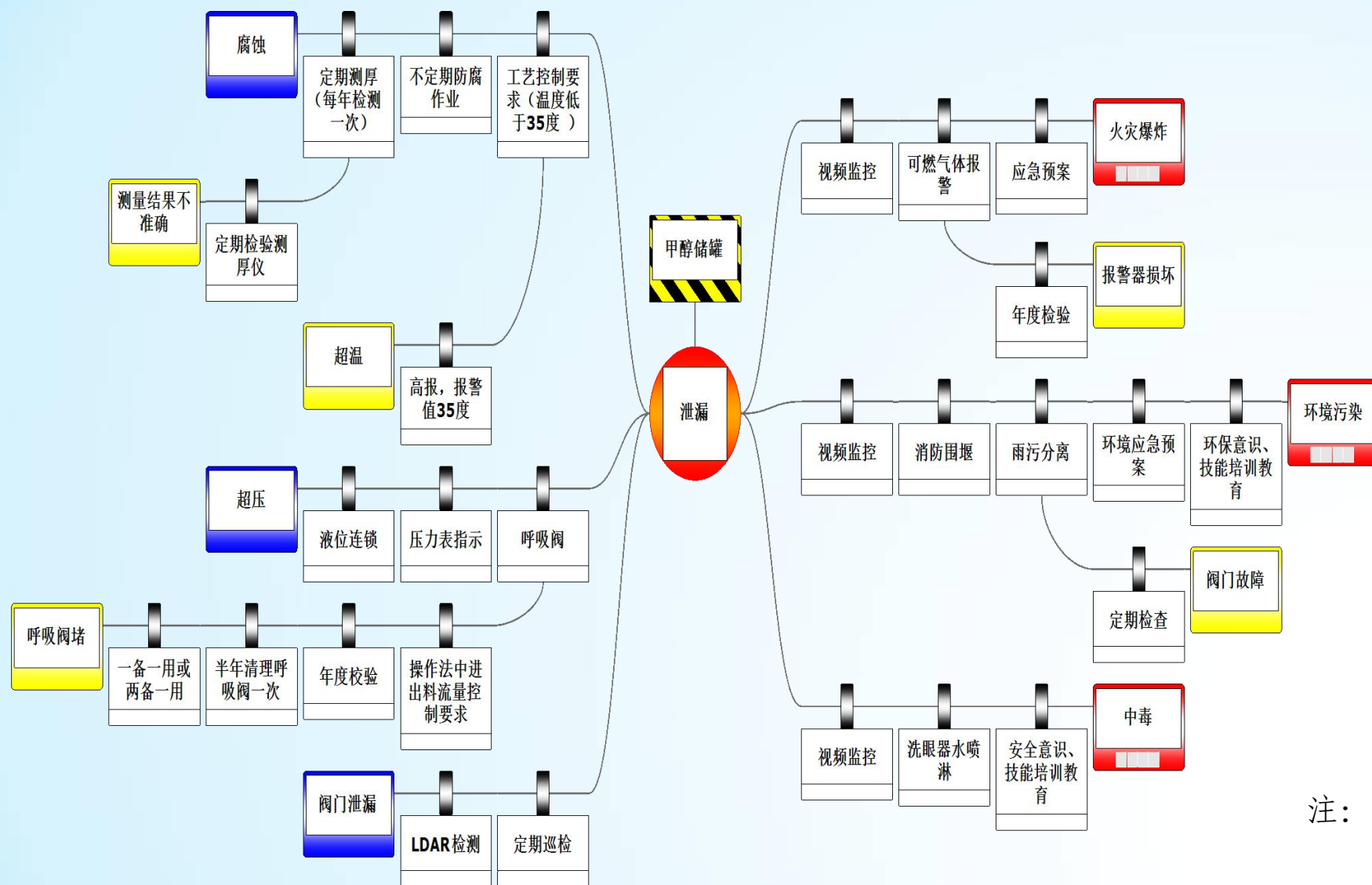


# LOPA与SIL定级的关系



## “瑞士奶酪模型”





注：数据来源于康安保公司

09 裂解轻油罐  
191FV01A/B、  
191FV03

01.02 公司副总

重大危险源管  
理规定

40号令 重大危险源  
暂行管理规定



紧急泄压人孔DN600  
(-  
0.4KPa/1.90KPa)

问题和建议: 建议对紧  
急泄压人孔进行定期  
检查维护, 编制相应  
的管理制度;

绩效目标或描述: 完好  
率: 100%

07.04 设备工程师

1 非常关键

? 不确定

裂解轻油储罐  
191FV01A/B、  
191FV03设有双呼吸  
阀  
191FPVSV01A1/A  
2、  
191FPVSV01B1/B  
2、  
191FPVSV03A/A  
(-  
0.3KPa/1.20KPa)

问题和建议: 公司编制  
呼吸阀检查维护管理  
规定, 明确日常检  
查、定期抽检、校验  
的相关内容和要求;

绩效目标或描述: 完好  
率: 100%

07.04 设备工程师

2 中等关键

? 不确定

GBT 37327-2019  
常压储罐完整性管理  
常压储罐管理  
规定

裂解轻油储罐  
191FV01A/B、  
191FV03设有压力高  
报警 (1.2KPa)

问题和建议: 修改压力  
高报警值, 建议高报  
值由1.2KPa设置为  
1.1KPa;

绩效目标或描述: 关键  
报警管理

07.03 工艺工程师

3 一般关键

? 不确定

裂解轻油储罐  
191FV01A/B、  
191FV03设有压力调  
节控制回路  
PISA012A/B、  
PISA014

问题和建议:

绩效目标或描述: 开启  
关闭范围: 0.7--  
1.0KPa

09.02 电仪主管

2 中等关键

自力式调节阀定期校  
验

问题和建议:

绩效目标或描述:

09.03 仪表工程师

3 一般关键

- 差

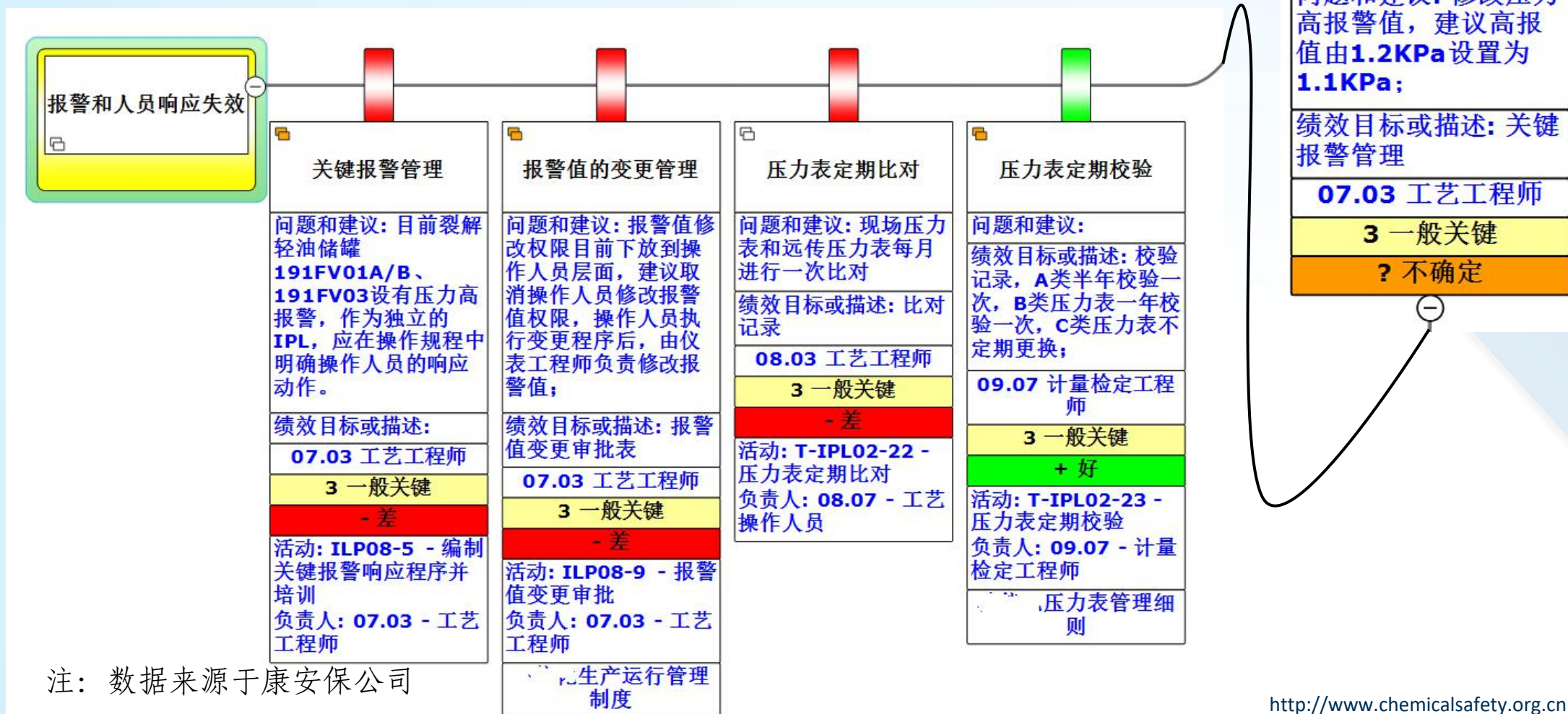
氮气自力式调节阀故  
障导致自力式调节阀  
PCV001A/B、  
PCV003全开;

描述: 目前设置为  
0.5KPa

注: 数据来源于康安保公司



## 报警屏障分析





# 呼吸阀屏障分析



<b>班组日常定期检查</b> (班组每周一次)
<b>问题和建议:</b> 细化呼吸阀检查记录项目;
<b>绩效目标或描述:</b> 检查记录
<b>07.07 工艺操作人员</b>
<b>3 一般关键</b>
<b>活动: IPL11-02-01 - 呼吸阀日常检查</b> <b>负责人: 07.07 - 工艺操作人员</b>

<b>储运中心定期抽检</b> (每月两次)
<b>问题和建议:</b> 编制相应的管理制度;
<b>绩效目标或描述:</b> 检查记录
<b>07.04 设备工程师</b>
<b>3 一般关键</b>
<b>活动: IPL11-02-01 - 呼吸阀日常检查</b> <b>负责人: 07.07 - 工艺操作人员</b>

<b>每年校验</b>
<b>问题和建议:</b> 缺少校验, 建议每年进行校验
<b>绩效目标或描述:</b> 校验记录 (每年检验一次)
<b>07.04 设备工程师</b>
<b>2 中等关键</b>
<b>活动: IPL11-02-03 - 呼吸阀的定期检验</b> <b>负责人: 07.04 - 设备工程师</b>
<b>GBT 37327-2019 常压储罐完整性管理</b>

**储罐191FV01设有双呼吸阀**  
**191FPVSV01A1/A2 (-0.3KPa/1.20KPa)**

**问题和建议:** 公司编制呼吸阀检查维护管理规定, 明确日常检查、定期抽检、校验的相关内容和要求;

**绩效目标或描述:** 完好率: **100%**

**07.04 设备工程师**  
**2 中等关键**

**GBT 37327-2019 常压储罐完整性管理**  
**常压储罐管理规定**

注: 数据来源于康安保公司





HSE

康安保工艺安全

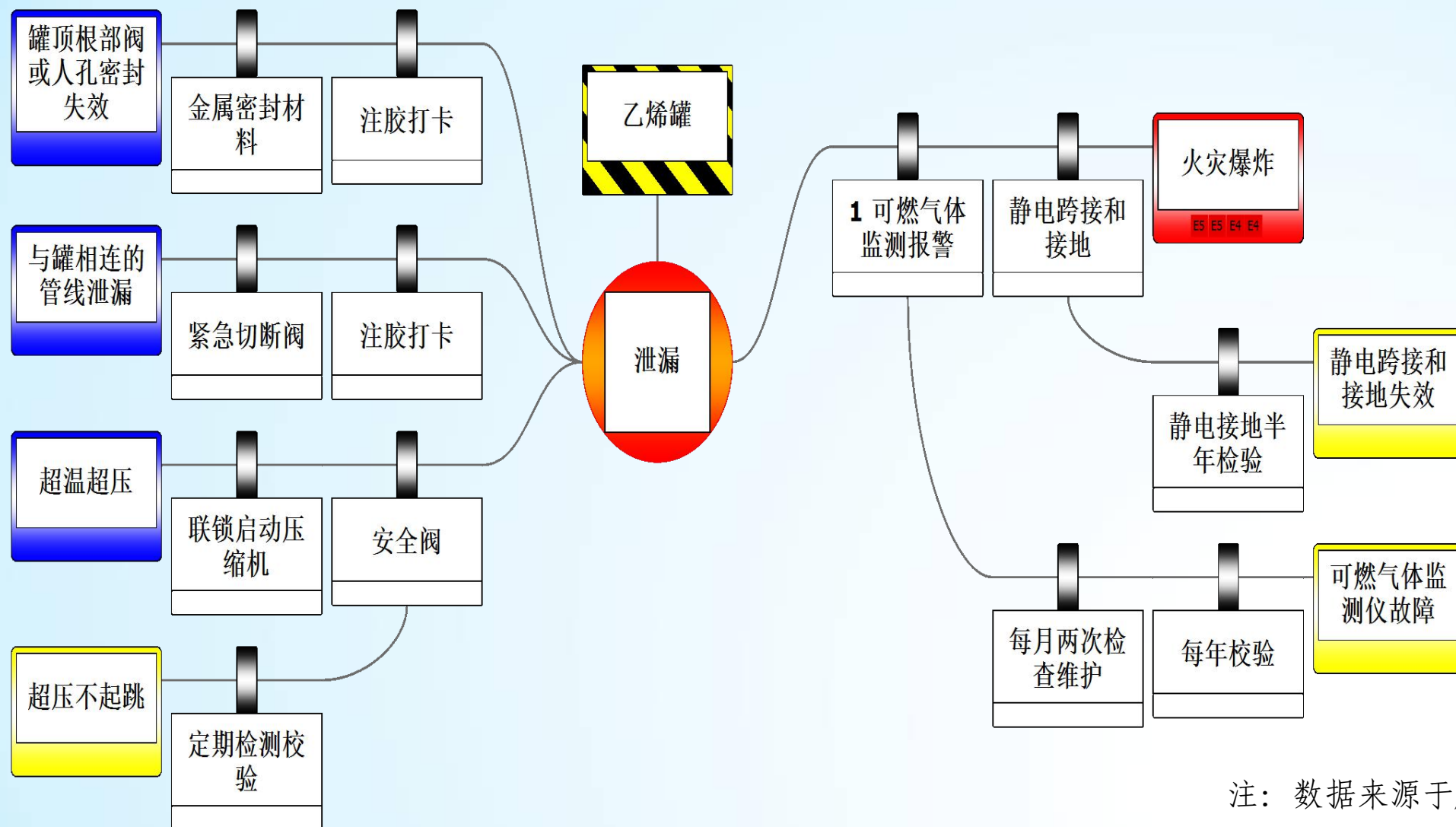
## 紧急泄压人孔屏障

共性问题：目前对紧急泄压人孔不实施管控，部分缺少相关的设计参数，建议补齐相应的设计参数；编制相应的管理规定，对紧急泄压人孔进行定期检查维护。




紧急泄压人孔DN600 (- 0.4KPa/1.90KPa)
问题和建议：建议对紧急泄压人孔进行定期检查维护，编制相应的管理制度；
绩效目标或描述：完好率：100%
07.04 设备工程师
1 非常关键

(+)



注：数据来源于康安保公司





康安保工艺安全

“化危为安”线上讲堂

# LOPA相关的标准

ICS 13.200  
C 67  
备案号: 49407—2015

# AQ

## 中华人民共和国安全生产行业标准

AQ/T 3054—2015

### 保护层分析(LOPA)方法应用导则

Guidelines for layer of protection analysis(LOPA)

# LOPA相关的标准

ICS 25.040  
N 10



中华人民共和国国家标准

GB/T 32857—2016

保护层分析(LOPA)应用指南

Application guide for layer of protection analysis(LOPA)

# LOPA分析人员组成



- a ) 组长
- b ) 记录员
- c ) 设计人员
- d ) 操作人员
- e ) 工艺工程师
- f ) 仪表工程师



- g ) 设备工程师
- h ) 安全工程师
- i ) 工艺包供应商
- j ) 成套设备供应商
- k ) 其他专业工程师

## LOPA优点：实用的风险管理工具

与定性分析相比较，LOPA 分析可以提供相对量化的风险决策依据；

与基于“风险对我而言可以接受”的主观或情感上的判断相比，LOPA提供了更好的风险决策基础。

LOPA 分析是安全完整性等级（SIL）的重要评估工具；

通过 LOPA 分析，可以了解不同独立保护层在降低风险过程中的贡献，在此基础上，可以选择更加经济合理的保护措施来降低风险。

## LOPA优点：实用的风险管理工具

LOPA的信息可以帮助工厂决定操作、维护以及相关培训的重点放在哪些防护措施上。

LOPA可用于识别操作人员的关键安全行为和关键安全响应。这将有助于在企业全过程生命周期内开展更有针对性的培训和测试，并使得操作手册能反映最重要的过程变量、报警和行动。

例如：许多公司决定将检验、测试和预防性维护活动的重点放在LOPA识别出的独立保护层（IPL）上。





康安保工艺安全

“化危为安”线上讲堂

# 安全是我们的信仰

## Safety is our belief!

李奇

康安保工艺安全技术总监

Mobile: 18611947316

QQ: 121438347

E-mail: [service@qdhse.com](mailto:service@qdhse.com)

Website: [www.qdhse.com](http://www.qdhse.com)

