

华龙一号核与辐射应急通用准则和 操作准则体系研究

何 璠¹，于 红²，穆克亮³

1. 中国核动力研究设计院，成都，610213；2. 中国核动力研究设计院核反应堆系统设计技术重点实验室，成都，610213；
3. 国防科技工业核动力技术创新中心，成都，610213

摘要：我国现行的通用干预水平（GIL）和通用行动水平（GAL）体系不能满足华龙一号这类先进核电机组核与辐射应急的需求，文中以国际原子能机构（IAEA）提出的通用准则（GC）和操作准则（OC）这一新的体系为主要依据，同时结合美国核能研究所（NEI）应急行动水平（EAL）的先进技术及我国核电厂操作干预水平（OIL）的现状，提出华龙一号核与辐射应急的 GC 和 OC 体系，以实现华龙一号应急分级、应急计划区（EPZ）划分和防护行动启动的先进性。

关键词：华龙一号；通用准则（GC）；操作准则（OC）；应急行动水平（EAL）；应急计划区（EPZ）；操作干预水平（OIL）

中图分类号：TL48 文献标志码：A

System of Generic Criteria and Operational Criteria for Nuclear and Radiological Emergency of HPR1000

He Fan¹, Yu Hong², Mu Keliang³

1. Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China; 2. Science and Technology on Reactor System Design Technology Laboratory, Nuclear Power Institute of China, Chengdu, 610213, China; 3. Innovation Center of Nuclear Power Technology for National Defense Industry, Chengdu, 610213, China

Abstract: The present system of generic intervention levels and generic action levels in China do not meet the need of the nuclear power plants such as HPR1000 for the nuclear and radiological emergency. In this paper, the system of the generic criteria and operational criteria of HPR1000 is advanced, based on the new system of the generic criteria and operational criteria developed by IAEA, and combining the advanced technique in the emergency action level of America Nuclear Energy Institute and the reality of the operational intervention levels in China, to improve the emergency classification, the partition of the emergency planning zone and the initiation of the protective actions.

Key words: HPR1000, Generic criteria, Operational criteria, Emergency action levels, Emergency planning zone, Operational intervention levels

0 引 言

核电厂可能发生或发生核或辐射事故（特别是设计中未考虑的事故），并且预期或者已经对公众造成核与辐射威胁的情况下，公众预期的、已接受的以及可避免的剂量可能超过监管机构规定的干预水平或等同于干预水平的其他测定量，

因此需要采取防护行动或其他响应行动，以最大限度减小事故可能对公众造成的后果。为确保防护行动迅速有效地执行，需在应急准备阶段预先对核电厂的应急分级、应急计划区划分和防护行动启动等做出科学合理的安排。

国际原子能机构（IAEA）于 2011 年印发了

一般安全导则 No.GSG-2 “Criteria for Use in Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency”，使用“通用准则（GC）和操作准则（OC）体系”替换了从 20 世纪 90 年代一直沿用至今的“通用干预水平（GIL）和通用行动水平（GAL）体系”，GC 和 OC 体系适用于应急分级的应急行动水平（EAL）、应急计划区（EPZ）、启动防护行动的操作干预水平（OIL），并基于统一的剂量准则。我国目前使用的是 IAEA 的 GIL 和 GAL 体系，没有达到国际先进水平。而华龙一号这种具有先进设计的核电机组，其核与辐射应急应建立在最先进准则的基础上。

基于 IAEA 的发展和我国现状，提出适用于华龙一号核与辐射应急的 GC 和 OC 体系。

1 IAEA 核与辐射应急体系的发展

1.1 GIL 和 GAL 体系

IAEA 提出的 GIL 和 GAL 体系如图 1 所示。

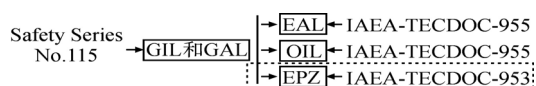


图 1 IAEA GIL 和 GAL 体系

Fig. 1 System of Generic Intervention Levels and Generic Action Levels of IAEA

图 1 中的 Safety Series No.115 为 IAEA 于 1996 年印发的安全丛书《International Basic Safety Standards for Protection against Ionizing Radiation and for the Safety of Radiation Sources》，它给出了 GIL 和 GAL 的测量量及取值；IAEA-TECDOC-955 为 IAEA 于 1997 年印发的技术文件“Generic Assessment Procedures for Determining Protective Actions during a Reactor Accident”，它给出了基于 GIL 和 GAL 的 EAL 和 OIL；IAEA-TECDOC-953 为 IAEA 于 1997 年印发的技术文件“Method for the Development of Emergency Response Preparedness for Nuclear or Radiological Accidents”，它给出了基于 GIL 和 GAL 的 EPZ 分区及范围。它们分别代表了该体系中相应部分的最先进水平。

实际上，IAEA 在该阶段尚未建立“体系”的概念，为了便于与 GC 和 OC 体系进行比较，本文将图 1 中的内容也称之为体系。另外，该体系实际上并没有包括图中 EPZ 的部分，也是为了便于比较而给出。

1.2 GC 和 OC 体系

IAEA 提出的 GC 和 OC 体系如图 2 所示。



图 2 IAEA GC 和 OC 体系

Fig. 2 System of Generic Criteria and Operational Criteria of IAEA

图 2 中的 No.GSR Part 7 为 IAEA 于 2015 年印发的一般安全要求《Preparedness and Response for a Nuclear or Radiological Emergency》，它给出了 GC 的测量量及取值；EPR-NPP Public Protective Actions 2013 为 IAEA 于 2013 年印发的应急准备与响应系列出版物《Actions to Protect the Public in an Emergency due to Severe Conditions at a Light Water Reactor》，它给出了基于 GC 的 EAL 和 EPZ 分区及范围；EPR-NPP-OILs 2017 为 IAEA 于 2017 年印发的应急准备与响应系列出版物《Operational Intervention Levels for Reactor Emergencies and Methodology for Their Derivation》，它给出了基于 GC 的 OIL。它们分别代表了该体系中相应部分的最先进水平。

IAEA GC 和 OC 体系与 GIL 和 GAL 体系的主要差异为：GC 和 OC 体系将准则分成了用于防护目的的 GC 和用于实用目的的 OC 两个层级。GC 是防护行动的正当性准则，其测量量不能直接获得；OC 是防护行动的启动准则，其测量量可以通过测量或观察直接获得；GC 和 OC 体系中的 GC 全部使用剂量作为测量量，而 GIL 和 GAL 体系中的 GIL 使用剂量作为测量量，但 GAL 使用食品中放射性核素的活度浓度作为测量量。在实际的应急响应中，由于食品中放射性核素的活度浓度是可测量的，从而被用作启动限制食品摄入这一防护行动的 OIL。另外，该体系实际上没有包括图中 EPZ 的部分，是本文为了便于比较才给出的。

2 我国现行 GIL 和 GAL 体系

我国现行的 GIL 和 GAL 体系如图 3 所示。

图 3 中的 GB 18871-2002 为我国国家标准《电离辐射防护与辐射源安全基本标准》，它给出了与 IAEA 的 Safety Series No.115 基本相同的 GIL

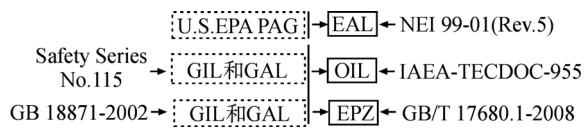


图3 我国 GIL 和 GAL 体系

Fig. 3 System of Generic Intervention Levels and Generic Action Levels of China

和 GAL；NEI 99-01 (Rev.5) 为美国核能研究所 (NEI) 于 2008 年发布的技术文件“Methodology for Development of Emergency Action Levels”，它给出了基于美国环境保护署 (EPA) 防护行动指导值 (PAG) 的 EAL，PAG 等同于 GIL 和 GAL；GB/T 17680.1-2008 为我国的国家标准《核电厂应急计划与准备准则第 1 部分：应急计划区的划分》，它给出了基于 GIL 和 GAL 的 EPZ 分区及范围。

在我国现行的体系中，EAL、OIL 和 EPZ 并没有基于统一的剂量准则，特别是 EAL，因为美国的 PAG 与我国 GB 18871-2002 的 GIL 和 GAL 并不相同。另外，虽然 GB 18871-2002 给出的 GIL 和 GAL 与 IAEA 的 Safety Series No.115 基本相同，可以认为 OIL 和 EPZ 基于统一的剂量准则，但 GB/T 17680.1-2008 给出的 EPZ 分区为烟羽应急计划区 (EPZ-plume) 和食入应急计划区 (EPZ-ingestion)，这种分区方法还在 IAEA 的 GIL 和 GAL 体系之前，是在 1981 年 IAEA 印发的安全丛书 Safety Series No.55 《Planning for Off-Site Response to Radiation Accidents in Nuclear Facilities》中提出的。而在 IAEA 的 GIL 和 GAL 体系中，EPZ 的分区已经变成了预防行动区 (PAZ)、紧急防护行动计划区 (UPZ) 和较长期防护行动计划区 (LPZ)；在 GC 和 OC 体系中 EPZ 的分区又变成了 PAZ、UPZ、计划扩展距离 (EPD)、摄入和商品计划距离 (ICPD)。可见，我国现行的体系不仅没有基于统一的剂量准则，还远落后于国际上的发展，且实际上至今仍未建立“体系”的概念，只是本文为了便于比较才将图中的内容称之为体系。

3 华龙一号 GC 和 OC 体系

华龙一号 GC 和 OC 体系主要基于 IAEA 的 GC 和 OC 体系建立，如图 4 所示。

图 4 中的 NEI 07-01 (Rev.0) 为美国 NEI 于 2007 年发布的技术文件“Methodology for

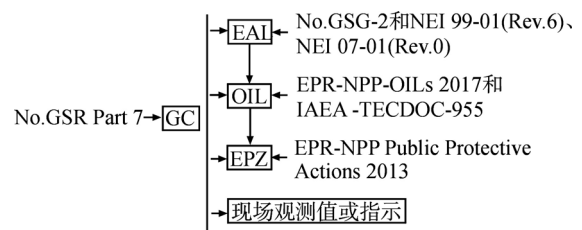


图4 华龙一号 GC 和 OC 体系

Fig.4 System of Generic Criteria and Operational Criteria of HPR1000

Development of Emergency Action Levels”；NEI 99-01 (Rev.6) 为美国 NEI 于 2012 年发布的“Advanced Passive Light Water Reactor”，它代表了国际上先进非能动轻水堆 EAL 的最先进水平；技术文件“Development of Emergency Action Levels for Non-Passive Reactors”代表了国际上能动压水堆 EAL 的最先进水平。

华龙一号 GC 和 OC 体系与 IAEA GC 和 OC 体系的主要差异为：在 OC 中增加了 EPZ 的部分，这是因为 EPZ 是实现受到类似核事故、类似威胁、类似后果的公众采取类似防护行动的最有效手段，且在实际的应用中 EPZ 的分区及范围也是基于 GC 确定的；同时运用了美国 NEI EAL 的先进技术。

3.1 GC 体系

华龙一号 GC 基于 IAEA 的 No.GSR Part7 确定，如表 1 所示。

华龙一号 GC 与 IAEA GC 和 OC 体系中 GC 的主要差异为：没有将不属于防护行动的其他响应行动 (如医疗行动、个人去污) 的测量量及取值作为 GC 的一部分，这是因为这些测量使用的是已接受剂量而不是预期剂量，将其作为采取了防护行动后个人排查的准则更为合适；增加了照射途径的部分，这是因为预期剂量的估算与考虑的照射途径相关。

3.2 OC 体系

3.2.1 OIL 华龙一号 OIL 基于 IAEA 的 EPR-NPP-OILs 2017、IAEA-TECDOC-955 和表 1 的 GC 确定，如表 2 所示。华龙一号 OIL 与 IAEA GIL 和 GAL 体系的主要差异是保留了烟羽监测的 OIL。IAEA GIL 和 GAL 体系并没有把烟羽监测作为 OIL 的一部分，其中的一个重要原因是很多事例已经表明在获得放射性烟羽监测结果前严重的释放已经结束，且释放期间放射性烟羽的浓度

表 1 华龙一号 GC
Table 1 Generic Criteria of HPR1000

防护目标	GC						防护行动	
	测定量		预期剂量	时间	照射途径			
避免严重确定性效应	GC1	相对生物效能权重吸收剂量	GC1-1	红骨髓	1 Gy	<10 h	外照射	预防性紧急防护行动
			GC1-2	组织	25 Gy	<10 h	外照射	
			GC1-3	皮肤	10 Gy	<10 h	外照射	
降低随机性效应风险	GC2	甲状腺当量剂量	GC2-1	甲状腺	50 mSv	前 7 d	内照射	紧急防护行动
	GC3	有效剂量	GC3-1	紧急	100 mSv	前 7 d	外照射和内照射	
			GC3-2	早期	100 mSv	前 1 a	外照射和内照射	早期防护行动
			GC3-3	摄入	10 mSv	前 1 a	内照射	限制食品/水/商品被污染/摄入/使用

注：紧急防护行动指甲状腺阻滞、撤离、掩蔽、防止误摄入；早期防护行动指避迁；限制食品/水/商品被污染/摄入/使用既属于紧急防护行动也属于早期防护行动

表 2 华龙一号 OIL
Table 2 Operational Intervention Levels of HPR1000

监测项目		应急准备阶段基于 GC 确定 OIL 及初始值				应急响应期间基于 OIL 初始值或修正值启动防护行动
		GC	OIL	测定量	初始值	防护行动
OIL1	烟羽监测	GC2-1	OIL1-1	烟羽周围剂量当量率	0.1 mSv/h	碘甲状腺阻滞(掩蔽、防止误摄入)
		GC3-1	OIL1-2	烟羽周围剂量当量率	1 mSv/h	撤离(掩蔽、防止误摄入)
OIL2	地面监测	GC3-2	OIL2-1	地面 1 m 高度周围剂量当量率	1 mSv/h	避迁(防止误摄入)
		GC3-2	OIL2-2	地面 1 m 高度周围剂量当量率	25 μ Sv/h	
		GC3-3	OIL2-3	地面 1 m 高度周围剂量当量率	1 μ Sv/h	
OIL3	食品/水/商品监测	GC3-3	OIL3-1	样品中 ^{131}I 活度浓度	1 kBq/kg	限制食品/水/商品被污染/摄入/使用
		GC3-3	OIL3-2	样品中 ^{137}Cs 活度浓度	0.2 kBq/kg	

注：初始值为 EPR-NPP-OILs 2017、IAEA-TECDOC-955 推荐的缺省值，具体的项目需要基于事故分析和场址条件计算得到；括号内的防护行动没有专门的 OIL，需要在启动括号外的防护行动时同时启动

在时间和空间上的变化都非常大。但考虑到烟羽监测已经被我国核电厂普遍使用，特别是华龙一号与其他堆型的核电厂共用同一个场址、实施统一的场外应急响应情况，因此华龙一号仍保留了烟羽监测的 OIL。

3.2.2 EAL 我国一直使用美国 NEI 的技术作为制定核电厂 EAL 的主要依据。美国 NEI 将应急等级分为应急待命、厂房应急、场区应急和场外应急 4 个等级，而 IAEA 则将应急等级分为厂房应急、场区应急和场外应急 3 个等级。美国 NEI 增加了应急待命这一等级更有利于核电厂营运单位的场内应急，但其他应急等级与 IAEA 并没有实质性的差异。另外，并非所有的 EAL 都要基于 GC 确定，只有那些以放射性流出物或辐射水平监测值作为指示核电厂进入场外应急的 EAL 才需要基于 GC 确定，因此华龙一号可以同时使用美国 NEI 的技术。

IAEA 对需要基于 GC 确定的 EAL 的相关描

述为：放射性流出物监测指示场外剂量大于采取紧急防护行动的干预水平，或场址边界或以外的周围剂量率指示大于撤离的 OIL，核电厂应进入场外应急。

美国 NEI 对需要基于 GC 确定的 EAL 的相关描述为：气载放射性物质释放所致场外剂量大于 10 mSv 总有效剂量当量 (TEDE) 或甲状腺待积剂量当量 (CDE) 大于 50 mSv，核电厂应进入场外应急。10 mSv TEDE 是美国 EPA PAG 中撤离的干预水平，50 mSv CDE 是美国 EPA PAG 中碘甲状腺阻滞的干预水平，等同于 IAEA 的 GC。

华龙一号则将 IAEA 和美国 NEI 的技术结合起来，并基于表 1、表 2 分别给出了需要基于 GC 和 OC 确定的 EAL，如表 3 所示。

3.2.3 EPZ 华龙一号 EPZ 基于 IAEA 的 EPR-NPP Public Protective Actions 2013 和表 1、表 2、表 3 确定，如表 4 所示。华龙一号 EPZ 分区与 IAEA 的 GC 和 OC 体系一致。

表3 华龙一号 EAL

Table 3 Emergency Action Levels of HPR1000

监测项目	GC/OC	EAL
放射性流出物监测	GC1/GC1-2/GC1-3	放射性流出物监测指示场址边界或场外剂量达到或大于采取预防性紧急防护行动的任一 GC (GC1-1、GC1-2 或 GC1-3), 核电厂应进入场外应急状态
	GC2-1/GC3-1	放射性流出物监测指示场址边界或场外剂量达到或大于采取紧急防护行动的任一 GC (GC2-1 或 GC3-1), 核电厂应进入场外应急状态
辐射监测	OIL1-2	场址边界或场外辐射监测指示达到或大于甲状腺阻滞的 OIL1-1, 核电厂应进入场外应急状态
	OIL2-1	场址边界或场外辐射监测指示达到或大于撤离的 OIL (OIL1-2 或 OIL2-1), 核电厂应进入场外应急状态

表4 华龙一号 EPZ

Table 4 Emergency Planning Zone of HPR1000

防护目标	应急准备阶段基于 GC 确定 EPZ 分区及范围			应急响应期间基于 EAL 和 OIL 启动 EPZ 内防护行动	
	GC	分区	范围	EAL/OIL	防护行动
避免严重确定性效应	GC1-1	PAZ	3 km~5 km	EAL	撤离 (甲状腺阻滞、掩蔽、防止误摄入)
	GC1-2				
	GC1-3				
降低随机性效应风险	GC2-1	UPZ	15 km~30 km	OIL1-1	碘甲状腺阻滞(掩蔽、防止误摄入)
	GC3-1			OIL1-2	撤离(掩蔽、防止误摄入)
				OIL2-1	
	GC3-2	EPD	100 km	OIL2-2	避迁(防止误摄入)
	GC3-3	ICPD	300 km	OIL2-3	限制食品/水/商品被污染/摄入/使用
				OIL3-1	
				OIL3-2	

注：范围为 EPR-NPP Public Protective Actions 2013 推荐的范围，具体的项目需要基于事故分析和场址条件计算得到；PAZ 内所有区域全部同时启动防护行动；UPZ、EPD、ICPD 内只有满足了某一 OIL 的部分区域需要启动相应的防护行动；括号内的防护行动没有专门的 OIL，需要在启动括号外的防护行动时同时启动

4 结束语

针对华龙一号核与辐射应急的先进性需求，基于 IAEA 最新提出的 GC 和 OC 体系，同时应用美国 NEI 的 EAL 先进技术，并结合我国 OIL 的现状，提出了华龙一号核与辐射应急的 GC 和 OC 体系，该体系包括了 GC 和 OC 两个层级，使

华龙一号应急分级、EPZ 分区和防护行动启动基于与 IAEA 的 GC 和 OC 体系一致的统一剂量准则，既能满足华龙一号应急准备阶段 EAL 制定、EPZ 划分和 OIL 制定的需求，又能满足应急响应期间防护行动启动的需求。

(责任编辑：杨灵芳)