



# 经济理论与经济管理

工作论文系列

Working Paper Series

## 核电的经济特性及其安全性管制的有效性分析

王俊豪 胡 飞

ETBMWP038

2021. 09. 22

\* 本刊编辑部试运行工作论文项目，刊发已定稿论文。

# 核电的经济特性及其安全性管制的有效性分析<sup>\*</sup>

王俊豪 胡 飞

**[提 要]** 核电是一种清洁能源，在能源供给方面具有很大优势，但核电存在巨大的安全风险。核电的经济特性决定了核电安全管理需求。以管制经济学为研究视角，本文将核电安全性管制措施分为行政强制手段为主的直接安全性管制和以经济手段为主的间接安全性管制两大类。研究发现，核电企业投入和安全管理检查频次与事故发生概率密切相关。核电企业的安全投入会随着安全隐患风险程度的增加而增加，并且也会随着被发现安全隐患事件带来企业损失的增加而增加。核电企业因被管制检查发现的安全隐患所承受的损失太小是造成安全管理检查失效或产生负面效应的根源。据此，本文提出相应的政策建议，以提高核电安全性管制的有效性。

**[关键词]** 核电产业；外部性；安全风险；安全性管制

## 一、引言及文献综述

自1951年人类首次实现核能发电开始，全世界的核电站数量和核电装机容量呈较快增长趋势。核电产业的核心业务是核电站运营。核燃料生产、核电站的设计和乏燃料处理等都是为核电站运营服务的，为提高问题讨论的集中度，本文讨论的“核电”主要是指核电站运营。核电企业是指核电站运营企业。

根据《全球核工业状态报告》<sup>①</sup>，截至2020年8月，全球共有409个核电反应堆（核电机组）在运行，平均运行时间为30.7年，51个核电反应堆在建，189个核电反应堆永久性关闭，31个核电反应堆处于长期停运状态。2019年，全世界核电占

所有电力生产的10.3%。核电与水电、煤电一起构成了世界电源的三大支柱，在世界能源结构中占据重要地位。根据国际原子能机构发布的《能源技术评价2020》<sup>②</sup>，在综合考虑新建核电机组和核电机组退役的情况下，到2030年，全球核电装机容量最多可达6.32亿千瓦，到2050年，全球核电装机容量最多可达9.64亿千瓦。

1991年12月，中国大陆第一座核电站——秦山核电站首次实现并网发电，随后相继建成广东大亚湾、江苏田湾等核电基地。随着中国经济社会发展，总体能源需求量增大，能源供需矛盾突出。同时，能源消耗总量的上升，煤电产生的大气污染问题越来越突出，大气质量问题日益严重。由此，国家提出要加快能源生产和利用方式变革。2007年，国务院正式批准了《核电中长期发展规划（2005—

<sup>\*</sup> 王俊豪（通讯作者），浙江财经大学中国政府监管与公共政策研究院，浙江工商大学经济学院，邮政编码：310018，电子邮箱：wjunh@zufe.edu.cn；胡飞，浙江工商大学经济学院。本文得到了国家社会科学基金重大项目“中国特色政府监管理论体系与应用研究”（18ZDA111）的资助。感谢匿名评审人提出的修改意见，笔者已做了相应修改，本文文责自负。

<sup>①</sup> 资料来源：《World Nuclear Industry Status Report》，<https://www.worldnuclearreport.org>。

<sup>②</sup> 资料来源：《Nuclear Technology Review 2020》，<https://www.iaea.org>。

2020年)》。根据该《规划》，中国到2020年，核电运行装机容量达到4000万千瓦。截至2019年12月，中国运行核电机组48台，居世界第三，核电运行装机容量4551.8万千瓦<sup>①</sup>；平均运行时间为8.1年，大大少于30.7年的世界平均运行时间；在建核电机组14台，居世界第一；1个核电机组已长期停运。但在2019年，核电仅占中国所有电力生产的4.9%，远低于10.3%的世界总体水平，因此，中国的核电产业相对年轻，具有较大的发展潜力。

2020年9月22日，习近平总书记在第七十五届联合国大会上宣布，中国力争2030年前二氧化碳排放达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。碳中和是指国民经济和社会发展中产生的温室气体净排放量为零。目前，我国能源领域二氧化碳排放量约占二氧化碳总排放量的88%。可见，碳中和的核心要义是减少二氧化碳排放，而关键是有有效减少能源领域二氧化碳排放量。由于核电属于清洁能源，核能发电不会产生加重地球温室效应的二氧化碳，不会造成空气污染。同时，随着我国核电产业批量化、标准化建设及装备国产化发展，核电设施的建造成本将进一步降低，从而促使核电上网电价也将较大幅度地降低。此外，相比水电、风电、光伏等清洁能源，核电及其送出系统具有更高的设备利用率，核电系统成本较低。这些都决定了中国在将来要大力发展核电。

但在核电发展的进程中，核事故的阴影始终相伴而行。在世界范围内，陆续发生了切尔诺贝利核事故、三哩岛核事故以及日本福岛核事故等重大核电事故。其中，特别受国际社会关注的是发生于2011年3月11日的日本福岛核事故。这次核事故等级为核事故最高级7级（特大事故）。事故影响远远超出了核电厂设计的范围和核电厂严重事故管理指南所针对的状况。事故发生后，撤离了距离福岛第一核电厂20千米半径范围内的居民。福岛县

在核事故后以县内所有儿童约38万人为对象实施了甲状腺检查。截至2018年2月，已诊断159人患癌，34人疑似患癌。2021年4月，日本福岛核事故处理后废水排海问题进一步引起国际社会广泛关注。日本政府决定将福岛第一核电站上百万吨核污染水排入大海，这种极不负责任的做法将严重损害日本国内民众、周边国家人民切身利益和国际公共安全，国际社会对此表示反对，从而演变为一个超越国界的国际性问题。因此，核电事故不仅会产生严重的事故损害后果，而且会导致社会和民众对核电站建设运营的强烈抵制，进而严重影响整个经济社会的发展。基于以安全性为主的考虑，德国等多国民众对核电站持明显反对态度。国际社会和核电国家也越来越加强核电安全管理。国际社会建立了以国际原子能机构为主导的管制体系。世界主要核电国纷纷制定了相关法律，并成立相应机构实施核电管制。

党的十八大以来，中国的核电事业进入安全高效发展的新时期。随着核电在中国的大力发展，国家对核电安全的重视程度也达到了前所未有的高度。2014年3月24日，在荷兰海牙第三届核安全峰会上，习近平主席提出理性、协调、并进的核安全观，强调发展和安全并重，倡导打造全球核安全命运共同体。<sup>②</sup>2017年9月我国颁布了《中华人民共和国核安全法》，强调核安全工作必须坚持安全第一、预防为主、责任明确、严格管理、纵深防御、独立监管、全面保障的原则；并由国务院核安全监督管理部门负责核安全的监督管理。<sup>③</sup>党的十九届五中全会进一步强调，把安全发展贯穿国家发展各领域和全过程，防范和化解影响我国现代化进程的各种风险，筑牢国家安全屏障。确保生态安全，加强核安全监管，维护新型领域安全。<sup>④</sup>2021年3月，第十三届全国人民代表大会第四次会议通过的《政府工作报告》再次强调在确保安全的前提

① 数据来源：国际原子能机构（IAEA）发布的《Nuclear Technology Review 2020》，<https://www.iaea.org>。

② 参见《中国的核安全》白皮书，国务院新闻办公室2019年9月3日发表。

③ 详见《中华人民共和国核安全法》（第四条和第六条），2017年9月1日由全国人民代表大会常务委员会颁布。

④ 详见《中共中央关于制定国民经济和社会发展第十四个五年规划和二〇三五年远景目标的建议》，2020年10月29日中国共产党第十九届中央委员会第五次全体会议通过。

下积极有序发展核电。因此，在具有特殊经济特征的核电产业特别需要加强安全管制，坚持安全发展观，以安全为前提，积极有序发展我国核电产业。

尽管在实践层面，核电安全性管制的必要性已获得全社会的普遍认同，但从理论层面看，许多与核电安全性管制相关的理论问题还需要深入探究。例如，核电安全管制的决定性因素是什么？核电与其他行业的安全性管制是否存在根本性差异？现有文献对这些问题尚未给出明确解释。又如，是否所有的安全管制检查必然会促使企业增加安全投入？安全管制检查是否必然降低事故发生概率？如果安全管制检查并非必然导致企业增加安全投入，应当实施怎样的安全管制检查策略，以确保安全管制检查一定会降低核电事故发生概率？对于这些与核电安全性管制实践密切相关的理论问题，目前国内的研究多局限于工程安全层面，缺乏系统的理论研究。

国外针对核电安全性管制方面的研究并不多见。较多的是与之类似的职业健康安全领域，针对管制检查执法对降低事故发生率的有效性进行实证研究。例如，Viscusi (1979) 在对 1972—1975 年期间美国职业安全与健康管理局实施的安全生产管制效果研究后，认为当行政处罚力度很小的情况下，强制性安全管制对安全生产没有明显作用。Bartel & Thomas (1985) 也认为强制性安全管制对安全生产作用很小。但是，Gray & Scholz (1993)、Weil (1996) 和 Lanoie (1992) 通过更大样本的数据分析后，认为强制性安全管制措施可以有效减少事故发生概率。Levine *et al.* (2012) 在对加利福尼亚高风险行业的管制检查进行分析后，发现管制检查减少了 9.4% 的伤害事故。Mischke *et al.* (2013) 认为，长时期的管制检查对降低事故概率是有效的，短期的管制检查作用不明显，并且集中性的检查效果优于一般检查。Tomba *et al.* (2016) 认为，设定了处罚标准的管制检查才能被证明是有效的，但未设定处罚标准的管制检查的有效性难以被充分证明。Li & Singleton (2019) 对不同行业 and 不同时间段的检查效果作了分析，认为在紧接着管制检查周期后的下一个周期时间段内，管制检查能降低事故发生概率，但是超出该时间段后，管制检查的效果将会消

失。并且，对制造业的管制检查效果较为明显，而对于服务业的管制检查效果并不显著。综上所述，管制检查对降低事故发生概率是有积极意义的，但并非每类检查都能明显降低事故发生概率。

由于我国核电的起步相对较晚，对核电安全性研究主要集中于工程安全领域（王庆等，2015；潘亚兰等，2016；何铮等，2017；王浩等，2017；李建波等，2019）。对核电安全性管制的研究还比较薄弱。胡帮达（2018）介绍了美国通过建立独立的核管制委员会，革新管制执法模式，确定企业赔偿数额并建立多层级的责任保险机制等途径，以提高核安全性的基本经验。刘尚源（2019）重点介绍了英国核电产业发展情况、核法规标准体系和核安全管制与审评制度。万斌斌（2018）对我国和美国核安全管制部门采用的核电厂建造阶段监督检查流程和内容做了比较研究。李干杰和周士荣（2006）介绍了我国核电厂的安全状况、核安全管制机构、法规体系、许可证制度和核安全监督的主要内容，并阐述了强化核安全管制的基本策略。朱志权和陈倩（2017）重点分析了我国核电产业面临的新核电技术可靠性尚待验证、乏燃料处置乏力、核专门人才短缺、核邻避效应加剧、核安全管制不足等风险。芮晓明等（2018）总结了我国核电厂运行效率的现状，并从核电产业管制状况及核电技术发展状况两个角度对核电产业效益保障情况进行了概述，提出核安全是保障核电效益的基础。综合上述国内研究文献，国内学者对美国、英国等发达国家的核电法律制度、管制机构及其执法模式等方面的基本经验作了介绍，但结合中国实际对中国核电管制制度和方法的研究比较薄弱。一些学者主要从宏观层面研究核电安全的重要性及其基本思路，但从作为核电管制对象的核电企业微观层面有针对性地研究核电安全的文献并不多。现有文献对核电安全性研究主要集中在工程学领域，从经济学特别是从管制经济学角度研究核电安全性问题的文献还很少见。可见，从经济学角度对核电安全性管制的深入研究具有很大的开拓空间。

因此，针对上述理论研究的现状和薄弱环节，本文在分析核电运营安全的经济特征基础上，从经济学角度对核电安全性管制需求作了理论分析，论



证了实行核电安全性管制的根本原因。基于核电安全监督检查是保证核电运营安全的主要管制措施这一客观事实，本文分析了核电安全管制监督检查对事故概率可能存在的不同影响，发现确实存在不适当的安全管制监督检查反而会增加事故概率的可能性，并运用模型分析方法重点探寻了导致这种可能性的基本原因。最后，根据理论模型分析结果，本文提出了相应的政策建议。

## 二、核电的经济特征分析

核电作为一种高效能源，在受控条件下会给人类社会带来巨大的利益，但是核电一旦发生重大事故，会对社会造成巨大灾害。从安全管制视角看，核电可被视为第二产业中的特殊产业形态，其事故后果的严重性远远超过第二产业中其他产业类别。核电的特殊性除了核电技术复杂外，还是由核电的经济特征决定的，并引发相应的核电安全管制需求。

### （一）核电具有显著风险外部性

从不同视角，对经济活动外部性有不同的分类方法（沈满洪，2007）。本文从安全管制角度，将经济活动的外部性分为确定外部性和偶发外部性。如果 A 事件的发生确定会导致 B 事件的发生，B 事件的发生会对除了 A 事件以外的主体和客体产生影响，那么 A 事件就具有确定外部性。比如企业的超标准排污行为，必然会对周围民众和外部环境产生一定程度的负面影响，具有明显的确定外部性。如果 A 事件的发生不一定会导致 B 事件的发生，但是会以随机概率导致 B 事件的发生，而 B 事件一旦发生，一定会对除了 A 事件以外的主体和客体产生影响，那么 A 事件具有偶发外部性。根据 B 事件对除 A 事件以外主体和客体产生影响的性质，可以将偶发外部性分为偶发正外部性和偶发负外部性。偶发正外部性事件将以一定概率对原发事件以外的主体和客体产生积极影响。比如原创

性科学研究可以被视为偶发正外部性事件。科学研究的行可被视为 A 事件，科学研究取得的成果可被视为 B 事件，科学研究并不必然产生科研成果，只以随机概率产生科研成果。当科研成果产生后，将会给除了科研人员以外的社会其他方面带来积极效果。因此，科学研究行为具有偶发正外部性。偶发负外部性事件将以一定概率对原发事件以外的主体和客体产生消极影响。比如酒驾行为等可以被视为偶发负外部性事件，酒驾行为可被视为 A 事件，交通事故可被视为 B 事件。酒驾行为并不必然导致交通事故的发生，但会以随机概率导致交通事故的发生。当交通事故发生后，可能会给包括酒驾人员在内的人员、车辆等造成损失。本文将偶发负外部性也称为风险外部性，将偶发负外部性事件也称为风险外部性事件。

核电事故的不可杜绝性和事故后果的极端严重性表明，核电运营活动具有显著风险外部性。虽然随着核电技术的不断发展，核电安全性也越来越高。<sup>①</sup>但是，核电无法实现绝对安全，目前世界上仍然有许多国家在使用安全风险相对较高的第一代和第二代核电站，并且即使是现有的第三代和第四代核电站也不能完全杜绝事故的发生。与核电站相关的各个环节，比如核燃料生产、核电站的设计建设和运营、乏燃料处理等都不同程度地存在安全风险。<sup>②</sup>所以，核电站的事故风险仍以一定概率存在。历史上发生的几起重大核事故表明，核事故一旦发生，将会对外部环境造成极大污染，并且会造成核电厂周围居民的生命健康和财产的巨大损失，甚至影响到多个国家的安全与稳定。<sup>③</sup>

### （二）核电的风险外部性难以完全内部化

大家知道，第二产业以制造业为主，还包括建筑业和电力、天然气、自来水供应等公用事业。电力产业又可进一步分为核电、火电、水电、风电等。虽然所有第二产业中的细分产业都存在风险负

<sup>①</sup> 目前，世界现有核电站堆型可分为四代，安全性最高的第三代和第四代核电站的安全性已经远远高于第一代和第二代核电站。

<sup>②</sup> 比如理论计算 AP1000 核电厂 SGTR 事故导致堆芯损伤事故概率均值为  $3.95 \times 10^{-9} / (\text{堆} \cdot \text{年})$ 。

<sup>③</sup> 例如，1986 年苏联发生的切尔诺贝利核事故，泄漏的放射性物质随风飘到了丹麦和芬兰等一些欧洲国家，事故导致的被伤害人数多达 2 000 余人，并且事故导致 11 余万人被紧急疏散和迁移。

外部性,但除核电外,其他第二产业的细分产业所产生的风险负外部性通常能由产业内相关企业承担,从而实现外部风险内部化。而核电的一个特殊性就在于其风险负外部性难以完全内部化,其主要原因来自两个方面:一是事故后果极端严重,灾害损失会远远超过核电企业承受能力;二是核电事故处置难度大,事故处置持续时间超过一般企业的生存周期。事故后果的极端严重性不仅体现在灾害的实际影响上,还体现在灾害带来的社会心理创伤上。核电站在失控状态下会给人类带来巨大的灾难。核事故不仅会造成核电运营单位的巨大损失,而且核事故具有明显的负外部性。一旦发生严重核事故,核电站周围数十公里区域环境都将受到核污染,导致该区域成为长期的生产生活禁区。并且核电站事故不仅造成核电厂区人员的伤亡,并且会导致救援人员的伤亡和周边居民的身体伤害。与此同时,公众对核电的知识壁垒和公众对核事故灾害的历史记忆,容易造成公众对核事故的不准确定位。核电站的小事故容易被公众心理放大,进而造成社会恐慌,甚至造成比核事故本身更加严重的食品生产与供应、交通等次生事故,直接危及社会安全和社会公共利益,甚至影响国家安全。

核事故处置主要是受制于科技能力限制。目前,人类对核事故的处理手段还极其有限。特别是对核污染的消除能力相当薄弱,不具备彻底消除放射性污染物的能力,只能采取禁入污染区、屏蔽污染源等限制措施来消除或减弱核事故污染物对人类社会的影响。因此,严重核事故的处置持续时间长。比如,苏联的切尔诺贝利核事故发生的数十年后,当地政府仍然在处理该事故后果,并且该处置过程还将长时间持续。因此,这种核事故造成的负外部性是哪一家核电运行企业都不能完全内部化的。为此,世界多数核电国要求核电运营企业承担有限事故赔偿责任。<sup>①</sup> 1957年,美国出台了全世界第一部关于核事故损害赔偿相关的法律——《普

莱斯—安德森原子能行业损害责任法》。当时明确核电运营单位的有限核电事故赔偿限额不超过6千万美元。法国的《核责任法》规定了核电运营企业的最高事故赔偿责任限额为6亿法郎。英国的《能源法》规定核电运营企业的最高事故赔偿责任限额为2000万英镑。中国与国际社会做法相类似,规定核电运营企业承担有限赔偿责任。核损害赔偿由核电站运营企业和国家共同承担。核电运营企业的核电事故赔偿限额3亿元人民币,政府财政补偿为8亿元人民币。<sup>②</sup>

### (三) 安全投入能降低核电事故风险

事故风险由事故发生概率和事故损害后果两方面因素决定,事故概率越高,安全风险越高。事故损害后果越严重,安全风险也越高。因此,企业的安全投入被用于降低事故发生概率和减弱事故损害后果。在实践中,核电企业的安全投入往往难以区分是用于降低事故发生概率还是减弱事故损害后果。从理论上讲,减弱事故损害后果的措施也可以被理解为降低了更高风险事故发生的概率。由此,本文将安全投入统一理解为降低事故发生概率。随着核电产业的不断发展,每个核电机组的平均安全投入水平也在不断增加,核电运营的安全风险越来越小。从核电产业整体看,安全投入是有效的,可以降低核电安全风险。就此原理而言,如果无限增加安全投入,事故发生概率可以降低至接近于零;反之,如果不进行安全投入,在一定时间段内,事故将必然发生。但这存在有效安全投入的经济性问题。

### (四) 安全投入对核事故风险弱化的边际效用递减

虽然安全投入必然能降低事故风险,但是当安全投入达到一定水平后,安全投入对事故风险弱化的效用具有必然的收敛性,安全投入对事故发生概率或事故损害后果的降低效用随着投入总量的增加而不断弱化。在安全投入达到相当大,安全风险降

<sup>①</sup> 但有部分国家规定核电运营企业承担事故无限责任,如德国、瑞士、奥地利、日本等国家。

<sup>②</sup> 1986年国务院出台《关于处理第三方核责任问题的批复》(国函【1986】44号),规定核电运营企业对核事故承担的最高事故赔偿责任限额为人民币1800万元,如果核事故损害赔偿超过核电运营单位赔偿限额,政府财政将提供最高限额为人民币3亿元的财政补偿。2007年,国务院出台《关于核事故损害赔偿责任问题的批复》(国函【2007】64号),提升了此类限额标准,该批复将核电运营企业的核事故赔偿限额提升至3亿元人民币,将政府财政补偿提高至8亿元人民币。

低到一定水平的情况下，进一步的安全投入对事故风险的弱化效用将微乎其微。从逻辑上来看，当安全投入达到一定水平后，安全投入对事故风险弱化效用递减也是必然的，否则核电企业将会持续无限制增大安全投入。安全投入在达到所谓的“一定水平”之前，企业会自发地增加安全投入。在这个阶段，政府对企业实施安全管制是缺乏必要性的，政府对企业实施安全性管制是为了追求更高的安全目标。因此，本文讨论的所有情况是针对核电企业安全投入达到一定水平，安全投入对事故风险弱化边际效用递减的阶段。

### 三、核电的安全性管制需求

从社会福利最大化角度来审视核电企业的安全性投入，为追求绝对的安全性所进行的过度安全投入，与不足够的安全投入一样都被理解为不合理行为。如果安全投入不足，社会面临的事故风险过高，事故损失大。如果过度安全投入，会造成社会安全资源的浪费，最合理的安全投入应被理解为实现了社会总损失最小的安全投入水平。

对于生产活动造成的概率事故，社会总损失由两部分组成：社会总的安全投入和事故概率损失，社会总的安全投入为所有核电企业的安全投入<sup>①</sup>，社会总损失记为  $U_s(x)$ ，可以表示为：

$$U_s(x) = -x - Q_s \times F(x) \quad (1)$$

式中， $x$  为企业的安全总投入； $Q_s$  为事故后果带来的社会总损失； $F(x)$  为事故发生概率，因此，社会总损失最小化的企业安全投入  $x_1$  应该满足：

$$F'(x) \Big|_{x=x_1} = \frac{-1}{Q_s} \quad (2)$$

本文将核电企业视为理性经济人，它在进行安全投入决策时，不会将社会总损失最小化作为其决策目标，而是将企业自身总损失最小化作为其决策目标。在没有管制情况下，企业的安全相关总损失由两部分组成：企业安全投入和事故概率损失。因此，企业的安全总损失记为  $U_p(x)$ ，可以表示为：

$$U_p(x) = -x - Q_p \times F(x) \quad (3)$$

据此，企业损失最小的安全投入水平为：

$$F'(x) \Big|_{x=x_2} = \frac{-1}{Q_p} \quad (4)$$

根据前述核电的第 2 个经济特征，核电风险外部性不能实现完全内部化，即  $Q_p < Q_s$ 。由此对照式 (2) 和式 (4) 可知：

$$F'(x) \Big|_{x=x_2} < F'(x) \Big|_{x=x_1} \quad (5)$$

根据前述核电的第 4 个经济特征，企业安全投入边际效用具有递减性。所以从式 (5) 可得： $x_2 < x_1$ 。也就是说，在没有安全性管制情况下的企业安全投入低于社会福利最大化要求的应有安全投入水平。因为  $U_s(x_1)$  是式 (1) 的最大值，所以必然  $U_s(x_2) < U_s(x_1)$ 。也就是说，在没有安全性管制情况下的企业按照自身损失最小化进行安全投入，导致了社会福利的损失，由此反证了对核电运营实施安全管制的必要性。

从上述论证结果可总结出结论 1：从安全性管制视角来看，由于核电运营企业不存在运营风险外部性完全内部化的实现途径，必然要求政府对核电安全实施安全性管制，以确保核电企业按照社会福利最大化进行安全投入。

从经济学意义分析，安全性管制有两个主要目的，一是使企业按照社会福利最大化进行安全投入；二是使企业将事故风险外部性内部化。为实现这两个管制目的，安全性管制措施可以对应地分为直接安全性管制和间接安全性管制两大类。

#### (一) 直接安全性管制

直接安全性管制是指管制机构以行政手段为主，直接干预被管制对象的安全要素，使被管制对象实现法律法规和管制政策的相关规定，从而达到迫使被管制对象按照社会福利最大化进行安全投入的目的。根据安全管制行为与被管制者风险活动行为的时间先后顺序不同，直接安全性管制可以分为进入类安全性管制和监督类安全性管制两类。进入

<sup>①</sup> 本文对安全风险防范的其他成本暂不予考虑，比如安全管制成本等。



类安全性管制是指管制者先于被管制者风险活动行为,从资质、财力、物力等方面对被管制对象进行严格审查,将高风险的被管制者限制在某项经济活动范围之外的管制行为。这类管制通常表现为安全性相关的行政许可。监督类安全性管制是指在被管制者风险活动启动后,管制者对该项活动的安全风险进行检查,迫使被管制者消除安全风险的管制行为。这类管制通常表现为安全性行政执法检查。

在核电产业中,直接安全性管制措施被广泛应用。在核电厂装料运行前,需经过大量的行政审批,从运营企业资质、人员资质等方面对被管制者实施进入类管制。在核电厂开始运营后,管制者对其实施随机性监督检查、定期监督检查、驻厂监督检查等多种形式的行政执法检查。管制者通过进入类安全性管制和监督类安全性管制的综合作用,迫使核电运营企业按照社会福利最大化进行安全投入。

## (二) 间接安全性管制

间接安全性管制是政府对核电企业提出强制性经济要求,迫使企业将其经济行为的社会安全风险成本内部化,避免因成本失真而扭曲市场资源配置,同时,保障安全事故受害人依法得到赔偿。现有间接安全性管制的方法相对单一,通常是以强制保险为主要形式的财务保障强制要求。间接安全性管制方法最早在交通安全管制领域中广泛应用。即机动车交通事故责任强制保险要求,以保障机动车道路交通事故受害人依法得到赔偿,由保险公司对被保险机动车发生道路交通事故造成本车人员、被保险人以外的受害人的人身伤亡、财产损失,在责任限额内予以赔偿的强制性责任保险。<sup>①</sup> 间接安全性管制方法正在逐渐向核电等其他安全管制领域

拓展。

相对直接安全性管制而言,核电产业中的间接安全性管制应用较少,目前主要的间接安全性管制措施是要求核电运营企业作出最低的财务保证,此项要求已被所有核电国家普遍采用。该财务保证的实现方式有多种,例如,可以采用购买预存保证金、开立信用证或商业保险等方式,而大多数国家的核电运营企业都是以购买商业保险的形式来实现该财务保证。核事故后果的严重性使得单一保险公司难以承受相应的保额,因此多数核电国家以核保险联合体为主体来承接核电安全保险,根据核保险联合体遵守的《各国核保险联合体临时业务经营准则》要求,核保险联合体成员所接受的份额必须是净自留责任,任何成员不得为其承担的风险进行分保,并不能使用任何中介。1999年5月11日,“中国核保险共同体”经当时的保监会批准成立。<sup>②</sup> 主要国内承保业务包括核电运营期的保险业务(核物质损失险,核损害第三者责任险)以及核物质运输责任险和放射性雇主责任险。核损害第三者责任险保单限额为3亿元和600万元的附加费用。同时,中国的相关规定还要求核电企业缴纳核电厂场外核事故应急准备资金,用于核电厂场外核事故应急相关工作。<sup>③</sup>

## (三) 安全管制措施的经济效应

对于后果严重的核电事故,直接安全管制无法完全避免事故发生,且无法实现事故后果外部性的完全内部化,因为赔偿能力或赔偿执行困难等原因,在实际情况下,要实现事故责任方履行事故的完全赔偿责任存在问题。对此,一些学者(Eastbrook & Fischel, 1985; Grundfest, 1992)已指出了无限赔偿责任的弊端。但是,如果某核电企

① 详见《机动车交通事故责任强制保险条例》,2019年3月2日修订版。

② 该共同体成员单位从发起之初的3家发展至目前的29家,包括22家财产保险公司、6家再保险公司和1家特殊成员公司。目前,中国全部商业运行或即将进入商业运行的商用核电反应堆均投保了运营阶段的商业保险。

③ 《核电厂核事故应急管理条例》(国务院第124号令)第34条规定,核电厂场外核事故应急准备资金由核电厂和地方人民政府共同承担。根据该《条例》,财政部和原国防科工委共同印发了《核电厂核事故应急准备专项收入管理规定》(财防[2007]181号),明确核电企业在基建期按设计额定容量每千瓦5元人民币的标准缴纳场外核应急专项收入,在运行期按年度上网销售电量每千瓦时0.2厘人民币的标准缴纳场外核应急专项收入。核电企业承担上缴的场外核应急专项收入,基建期应在核电工程浇灌第一罐混凝土的当年起三年内按规定承担数额的30%,40%和30%分年度缴清;运行期应在商业运行后的次年开始,根据上一年的实际上网销售电量按规定标准缴纳。



业作为事故责任方不完全承担事故损失，那么该企业实际支付的风险成本低于其应当支付的风险成本。即企业的总体成本非公平性降低，该企业实际支付成本不能反映其真实成本，在企业间竞争时，扭曲了市场的资源配置作用。因此，需要通过间接安全性管制来强化市场资源配置，维护社会公平。间接安全性管制通过强制要求，使核电企业将其事故风险成本内部化。但即使通过间接安全性管制来实现核电企业事故风险外部性内部化后，核电企业事故损失仍然不同于社会事故损失。比如实施强制保险后，核电企业在发生事故后，部分或全部损失由保险公司承担，事故给核电企业带来的实际损失将会降低，但是社会事故损失保持不变。因此，从理性经济人角度考虑，核电企业事故损失的降低会降低企业的安全投入意愿。<sup>①</sup> 换言之，由间接安全性管制实现的核电企业事故风险外部性内部化，无法保障核电企业按照社会福利最大化来进行安全投入，甚至可能导致核电企业进一步偏离社会福利最大化的安全投入水平。因此，如果需要核电企业按照社会福利最大化进行安全投入，仍然需要对核电企业实施直接安全性管制。

只有在事故后果轻微且赔偿操作过程比较容易的情况下，可以通过要求核电企业履行无限责任来实现核电企业事故风险外部性的内部化。此时核电企业将按照社会福利最大化进行安全投入，因此可以不对核电企业实行直接安全性管制。同时，核电企业履行无限责任也消除了间接安全性管制的必要性。也就是说，只有在此情况下，才可以不对企业进行安全性管制。

#### 四、核电安全管制检查对事故概率的影响

从前面部分可知，对于已运营的核电企业，监督性安全管制检查是主要的安全性管制措施，安全管制检查的有效性是核电安全性管制效果的关键所在。本文将详细分析安全管制检查对事故概率的影响。

当核电企业处于监督类安全性管制状况下，企业在安全方面的效用受到其安全投入量和安全管理

检查频次两个变量的决定，企业安全投入量又受到安全管理检查频次的影响。将事故损失总量、检查处罚金额等其他相关因素设定为常数量，由此可以将企业安全效用抽象地表示为  $U(x(r), r)$ ，企业按照效用最大化进行安全投入，其投入水平为：

$$x(r) = \operatorname{argmax} U(x(r), r) \quad (6)$$

因此：

$$\frac{\partial U(x(r), r)}{\partial x} = 0 \quad (7)$$

根据上式可得：

$$\frac{\partial^2 U(x(r), r)}{\partial x^2} \times \frac{dx(r)}{dr} + \frac{\partial^2 U(x(r), r)}{\partial x \partial r} = 0 \quad (8)$$

即：

$$\frac{dx(r)}{dr} = -\frac{U''_{xr}}{U''_{xx}} \quad (9)$$

另一方面，事故概率函数类似地可以被抽象地表示为  $F(x(r), r)$ ，因此：

$$\begin{aligned} \frac{dF(x(r), r)}{dr} &= \frac{\partial F(x(r), r)}{\partial x} \times \frac{dx(r)}{dr} \\ &\quad + \frac{\partial F(x(r), r)}{\partial r} \\ &= -\frac{\partial F(x(r), r)}{\partial x} \times \frac{U''_{xr}}{U''_{xx}} \\ &\quad + \frac{\partial F(x(r), r)}{\partial r} \end{aligned} \quad (10)$$

本文第二部分核电安全经济特征（三）可抽象表达为  $\frac{\partial F(x(r), r)}{\partial x} < 0$ ，核电安全经济特征（四）

表明了安全投入边际效用的收敛性。因此对企业的效用而言，安全投入同样具有收敛性，即  $U''_{xx} < 0$ 。在其他因素不发生改变的情况下，增加安全管理检查频次不会提高事故发生概率，这是显而易见的，即  $\frac{\partial F(x(r), r)}{\partial r} \leq 0$ ，由此，从式（10）可以看出，

<sup>①</sup> 在下文结论 3 中将予以详细证明，此观点与麦金农和皮尔（McKinnon & Pill, 1997）共同提出的“道德风险”理论一致。

安全管制检查对事故概率的影响可能会出现以下三种情况:

(1) 当  $U''_{xr} \geq 0$  时,  $\frac{dF(x(r), r)}{dr} < 0$ , 安全管制检查减少事故发生概率。

(2) 当  $U''_{xr} < 0$ , 且  $\left| \frac{\partial F(x(r), r)}{\partial x} \times \frac{U''_{xr}}{U''_{xx}} \right| < \left| \frac{\partial F(x(r), r)}{\partial r} \right|$  时,  $\frac{dF(x(r), r)}{dr} < 0$ , 安全管制检查也减少了事故发生概率。

(3) 当  $U''_{xr} < 0$ , 且  $\left| \frac{\partial F(x(r), r)}{\partial x} \times \frac{U''_{xr}}{U''_{xx}} \right| > \left| \frac{\partial F(x(r), r)}{\partial r} \right|$  时,  $\frac{dF(x(r), r)}{dr} > 0$ , 安全管制检查增加事故发生概率。

从式 (9) 可以看出, 因  $U''_{xr} < 0$ , 所以  $U''_{xr} \leq 0$  等价于  $\frac{dx(r)}{dr} \leq 0$ ,  $\frac{dx(r)}{dr}$  表示企业投入受安全管制检查频次的影响程度。

综合上述三种可能影响后果, 可得到结论 2: 当核电企业投入随着安全管制检查频次的增加而增加时, 安全管制检查必然会降低事故发生概率; 当企业投入随着安全管制检查频次的增加而减少时, 安全管制检查可能会增加事故发生概率, 从而产生负面效应。

### 五、核电安全管制检查产生负面效应的原因分析

本文认为所有的核电安全事故均起源于未被消除的安全隐患。正因为如此, 安全管制检查才具备了实施的正当性。设想在某安全生产领域, 如果在不存在安全隐患的情况下, 安全运营事故可以毫无征兆地发生, 在事故发生前, 未发生任何安全隐患事件, 那么管制者进行监督检查时, 也无法发现或减少安全隐患事件。安全管制监督检查行为对事故发生概率将不会产生任何影响, 因而安全管制监督检查行为在该领域属于无效行为, 应当被取消。

据此, 本文将核电安全检查管制简化为两阶段事故模型。第一阶段, 企业进行了一定的安全投入, 用于安全自查、装备配备等自我安全管理, 安全隐

患事件以与其安全投入相对应的概率出现。第二阶段, 部分安全隐患事件导致了最终事故的发生。实际核电安全事故发生的过程为多阶段类型。比如, 在核电企业进行一定安全投入时, 安全隐患事件 (记为事件 A) 以一定概率发生, 未被处理的事件 A 以一定概率导致更严重的另一安全隐患事件 (记为事件 B) 的发生, 未被处理的事件 B 最终以一定概率导致事故的发生。对于此类事故发生类型, 可以将事件 B 视为两阶段分析法中的安全隐患事件, 但是在进行分析过程中, 应当将事件 A 和事件 B 的持续时间一并统计在安全隐患事件的统计时间内, 在对安全隐患事件发生概率分析中也应当同时考虑事件 A 及其概率, 并对应进行处理。当然, 如果将事件 A 视为两阶段分析法中的安全隐患事件也可以用类似的方法予以分析。

为了简化分析, 本文还将安全隐患事件种类和事故种类进行单一化。也就是说, 企业安全投入量决定了唯一的安全隐患事件的发生概率, 安全隐患事件的发生会导致唯一的安全事故发生。安全隐患事件为独立的随机事件, 安全隐患事件发生的概率与所统计时间段的长度成正比。本文将单位时间内平均发生安全隐患事件的概率记为  $f(x)$ , 其中  $x$  为企业的安全投入值, 安全隐患事件转变为事故的概率记为常数  $m$ , 在没有安全管制检查情况下的事故发生概率为  $F(x) = f(x)m$ 。在接下来的讨论中, 本文将  $f(x)$  称为安全隐患概率函数, 该函数满足以下性质:

- ①  $f'(x) < 0$ ;
- ②  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f(x) = 0$ ;
- ③  $\lim_{x \rightarrow +\infty} f'(x) = 0$ ;
- ④  $f''(x) > 0$ ;
- ⑤  $f(x) \Big|_{x=0} = 1$ 。

核电的经济特征 (三) 表明随着安全投入资金的增加, 安全隐患事件发生的概率逐渐降低。因此安全隐患概率函数的一阶导数小于 0, 被记为性质①。在安全投入资金量无限大的情况下, 安全隐患事件将不再发生, 发生概率函数趋近于 0, 并且概率函数的变化趋势趋近于 0。这两种性质分别被表示为性质②和性质③。核电的经济特征 (四) 表

明随着安全投入资金的增加，安全隐患事件概率降低幅度越来越小。该函数满足边际概率递减的性质，也就是说，安全隐患概率函数的二阶导数大于0，安全隐患概率函数的这种性质被记为性质④。本文通过归一化安全隐患概率函数来设定单位时间。即在核电企业安全投入为零的情况下，在单位时间间隔内，安全隐患事件的平均次数为1次，即安全隐患事件发生概率为1。安全隐患概率函数的这种性质被记为性质⑤。

安全隐患概率函数反映了在某种安全技术背景下的安全投入有效性。如果核电企业的安全投入发生突变，以至于可以让其采取替换原有安全技术的其他安全技术。本文将此类安全技术彻底改变的情况视为另一个独立的安全分析案例或独立的安全分析阶段，安全隐患概率函数将另行设定。因此本文设定安全隐患概率函数及其一阶导数函数和二阶导数函数均为连续函数。

当核电企业处于安全管制状态下，管制检查人员将根据法律相关规定对核电企业进行安全监督检查。如果在安全监督检查过程中发生了安全隐患事件，该隐患会被管制检查人员发现，并且管制检查人员将督促核电企业消除该隐患，并可能因为该隐患受到处罚，同时核电企业受到的处罚和消除该隐患所花费的成本将会因此事件遭受总金额为 $q$ 的经济损失。如果安全隐患事件不是在安全监督检查过程中发生，管制检查人员将错过安全隐患事件，被错过的安全隐患事件将以 $m$ 概率导致事故的发生，事故导致的核电企业总损失为 $Q_p$ 。

安全隐患事件在未经消除的情况下，从发生到导致最终事故将持续一段时间，本文将安全隐患事件持续时间记为 $t$ ，安全隐患事件持续时间 $t$ 越长，该事件越容易被发现，安全隐患事件持续时间表明了安全隐患事件被发现的难易程度。同时将安全管制检查人员在时间段 $T$ 内实施安全管制检查的数量记为 $R$ ，因此安全隐患事件发生后，被管制检查人员发现的概率为：

$$a = R \frac{t}{T} = rt \quad (11)$$

式中， $r = \frac{R}{T}$ ，代表单位时间内进行安全管制检查的

频率。这里的单位时间的定义同 $f(x)$ 中所涉及的单位时间定义一致，根据安全隐患事件概率函数性质⑤， $r \leq 1$ 。从对隐患的单一化假设可知 $t$ 是一个固定常数。由此可见，安全隐患事件发生后，该事件被管制检查发现的概率与安全管制检查频次成正比。处于安全管制状态下的核电安全事故概率为：

$$F(x, r) = f(x)m(1-rt) \quad (12)$$

管制检查人员发现安全隐患事件的概率为 $f(x)rt$ 。

当核电企业处于安全管制状态下，核电企业仍然按照损失最小化原则进行安全投入，核电企业总损失效用可以记为：

$$U = -x - f(x)m(1-rt)Q_p - f(x)rtq \quad (13)$$

式(13)右端第一项代表核电企业安全投入，第二项代表事故对企业造成的损失，第三项代表安全隐患事件给企业造成的损失。将式(13)改写为如下形式：

$$U = -x - f(x)mQ_p + f(x)rt(mQ_p - q) \quad (14)$$

安全隐患的风险程度从两个因素进行评价：一是安全隐患导致事故的概率；二是安全隐患导致事故后果的严重程度。一般而言，事故对核电企业造成的损失越大，事故对社会造成的损失也越大，因此，可以认为式(14)中的 $mQ_p$ 表示了安全隐患的风险程度。从式(14)容易发现，当 $q < mQ_p$ 时， $U$ 是 $r$ 的减函数。即企业因被管制检查发现的安全隐患所承受的损失小于安全隐患的风险程度时，企业总损失随管制检查频次的增加而减少，企业欢迎管制机构对其进行安全管制检查。当 $q > mQ_p$ 时， $U$ 是 $r$ 的增函数。即企业因被管制检查发现的安全隐患所承受的损失大于安全隐患的风险程度时，企业总损失随管制检查频次的增加而增加，企业不愿意管制机构对其进行安全管制检查。

对式(13)求极值，即设定企业总损失函数对安全投入的一阶导数为0，得出企业安全投入满足如下安全投入最优化方程：

$$f'(x) = \frac{-1}{(1-rt)mQ_p + rtq} \quad (15)$$



因  $f''(x) > 0$ ，所以从式 (15) 易知， $x$  随  $mQ_p$  的增加而增加，且  $x$  随  $q$  的增加而增加。因此，可得出结论 3：核电企业的安全投入会随着安全隐患风险程度的增加而增加，并且也会随着被发现安全隐患事件带来损失的增加而增加。

事故给核电企业造成实际损失的降低（即  $Q_p$  的减少）会相应降低核电企业的实际安全隐患风险。因此，财务保障类的间接性安全管制降低了核电企业事故实际损失，由此得知本文第三部分提出的观点：间接性安全管制会降低企业的安全投入意愿。

将式 (15) 改写为：

$$f'(x) = \frac{-1}{mQ_p + rt(q - mQ_p)} \quad (16)$$

因  $f''(x) > 0$ ，所以从式 (16) 可以看出，如果  $q > mQ_p$ ， $x$  将随着  $t$  的增加而增加，也就是说，在核电企业被管制检查发现安全隐患后，所付出的代价大于该安全隐患风险时，安全隐患越容易被发现，核电企业的安全投入越大。其原因在于企业不愿因隐患被监督检查人员发现而付出较大的代价。反之，如果  $q < mQ_p$ ， $x$  将随着  $t$  的增加而减少。也就是说，在核电企业被管制检查发现安全隐患后，所付出的代价小于该安全隐患风险时，安全隐患越容易被发现，核电企业的安全投入越小。这种现象往往不太容易引起关注，而在管制检查中经常出现的核电企业经常发生的小隐患总“屡教不改”的现象正是出于这个原因。因为隐患不严重，管制者往往在发现隐患后都不对核电企业予以处罚，即  $q < mQ_p$ ，因此核电企业对这类隐患缺乏投入，最终出现“小错不断、屡教不改”的现象。

从式 (16) 还可以看出，如果  $q < mQ_p$ ， $x$  将随着  $r$  的增加而减少，即企业安全投入将随着管制检查频次的增加而减少。反之，如果  $q > mQ_p$ ， $x$  将随着  $r$  的增加而增加，即企业安全投入将随着管制检查频次的增加而增加。与此同时，根据结论 2，当核电企业投入随着安全管制检查频次的增加而减少时，安全管制检查可能会增加事故发生概率。当核电企业投入随着安全管制检查频次的增加而增加时，安全管制检查必然降低事故发生概率。故当  $q < mQ_p$ ，安全管制检查可能会增加事故发生概率。

当  $q > mQ_p$ ，安全管制检查必然降低事故发生概率。

综上可得结论 4：核电企业因被管制检查发现的安全隐患所承受的损失太小是安全管制检查失效或产生负面效应的根源。如果核电企业在被管制检查发现安全隐患后，所付出的代价小于该安全隐患风险，核电企业希望管制机构对其进行安全管制检查，但安全管制检查可能会增加事故发生概率。如果当核电企业在被管制检查发现安全隐患后，所付出的代价不小于该安全隐患风险，安全管制检查的有效性才能得到充分保障。

## 六、结论与政策建议

本文从安全性管制视角，指出虽然核电在能源供给方面存在很大优势，但是由于核电运营存在明显的安全风险，核电的安全性管制十分必要。核电与其他第二产业的根本区别在于核电运营活动不存在风险外部性完全内部化的实现途径。为确保核电企业按照社会福利最大化进行安全投入，必然要求对核电实施安全性管制。本文通过理论分析，认为财务保障类的间接性安全管制降低了核电企业事故实际损失，由此会降低企业的安全投入意愿，不恰当的间接性安全管制会不利于核电运营安全目标的实现。核电企业因被管制检查发现的安全隐患所承受的损失太小可能造成安全管制检查失效甚至产生负面效果。如果企业在被管制检查发现安全隐患后，所付出的代价小于该安全隐患风险，核电企业希望管制机构对其进行安全管制检查，但是此类安全管制检查可能会增加事故发生概率。

根据本文的研究结论，笔者提出以下政策建议：

(1) 应当综合运用安全管制措施对核电运营安全实行有效管制。一方面采取财务保障类的间接性安全管制，促使核电运营活动的社会安全风险成本部分内部化，避免因成本失真而扭曲市场资源配置，同时保障安全事故受害人依法得到赔偿。另一方面要强化监督执法、审批准入等直接性安全管制，以达到促使核电企业按照社会福利最大化进行安全投入的目的。(2) 对核电企业实施财务保障类间接性安全管制时，应当建立“第三方责任险”核电运营强制保险制度。除了对核电企业为自身损失进行保险，

## 王俊豪等：核电的经济特性及其安全性管制的有效性分析

还应当重点强制核电企业对事故给社会造成的负外部性进行保险。同时，适当限制核电企业为自身损失而进行过度投保的行为。(3)对核电企业实施直接性安全管制应当坚持“违规必纠”和“违规必罚”原则。在核电安全管制规则制定和执行过程中，为确保安全管制检查对降低事故概率的有效性，对核电进行安全管制过程中发现的安全隐患，管制者应当要求核电企业必须纠正，并且应当配套必要且适当的处罚，避免“纠错不罚”的情况发生。(4)对核电企业实施直接性安全管制应当坚持“过罚相当、适度从严”原则。对安全管制中发现安全隐患的处罚程度，应当与该安全隐患的风险程度相适应。安全隐患的风险程度越高，处罚力度应当越大。

此外，政府有关部门还应当严格监督核电企业，高度重视对核电运行和维护人员及管理者的培训，重点提高相关人员的可靠性。有关可靠性研究显示，各类人机交互系统中，人的行为对系统影响至关重要。无论是三哩岛还是切尔诺贝尔核电事故，人为误操作是事故的主要原因。核电事故证明了人的可靠性作用远大于系统设备的可靠性。对核电厂这么重要而复杂的系统，工作人员和管理者的知识、技能和心理等综合素养是核电整体高可靠性的根本保障。因此，必须持续加强对核电厂人员的训练和管理的监督，以使人员的可靠性与保障核电安全相适应。

### 参考文献

- 何铮、常华健、杨培勇、刚直、张锴、谢永诚、梁星筠，2017：《核电主设备分析法设计中应力线性化路径可靠性及优化分析》，《原子能科学技术》第7期。
- 胡帮达，2018：《安全和发展之间：核能法律规制的美国经验及其启示》，《中外法学》第1期。
- 李干杰、周士荣，2006：《中国核电安全性与核安全监管策略》，《现代电力》第5期。
- 李建波、梁招瑞、宋永军、尹训强、宋彦霖、江彬，2019：《某核电机组安全壳打压试验期间安全壳外加应变计数据分析研究》，《核技术》第12期。
- 刘尚源，2019：《英国核电法规标准体系及监管情况综述（上）》，《标准研究》第2期。
- 潘亚兰、栾秀春、王喆、左家旭、宋维，2016：《非能动先进压水堆核电厂 SGTR 事故概率安全评价》，《核技术》第8期。
- 芮晓明、郝丽娜、王昆鹏，2018：《我国核电的效益及核安全保障基础概述》，《核安全》第3期。
- 沈满洪，2007：《资源与环境经济学》，北京：中国环境科学出版社。
- 万斌斌，2018：《在建核电厂中美核安全监管对比研究》，《核安全》第5期。
- 王浩、余嘉炜、周世梁、毛伊静、许桐雨，2017：《基于 BDMP 的核电厂蒸汽发生器水位控制系统可靠性评价》，《原子能科学技术》第12期。
- 王庆、房永刚、初起宝、徐宇、李海龙，2015：《核安全一级主管道疲劳校核》，《原子能科学技术》第8期。
- 朱志权、陈倩，2017：《我国核电产业发展面临的机遇、风险及其对策》，《东华理工大学学报（社会科学版）》第4期。
- Bartel, A. P., and L. G. Thomas, 1985, "Direct and Indirect Effects of Regulation: A New Look at OSHA's Impact", *Journal of Law & Economics*, 28 (1): 1 - 26.
- Easterbrook, F. H., and D. R. Fischel, 1985, "Limited Liability and the Corporation", *University of Chicago Law Review*, 52 (1): 89 - 117.
- Gray, W. B., and J. T. Scholz, 1993, "Does Regulatory Enforcement Work? A Panel Analysis of OSHA Enforcement", *Law & Society Review*, 27 (1): 177 - 213.
- Grundfest, J. A., 1992, "The Limited Future of Unlimited Liability: A Capital Markets Perspective", *Yale Law Journal*, 102 (2): 387 - 425.
- Lanoie, P., 1992, "Safety Regulation and the Risk of Workplace Accidents in Quebec", *Southern Economic Journal*, 58 (4): 950 - 965.
- Levine, D. I., M. W. Toffel, and M. S. Johnson, 2012, "Randomized Government Safety Inspections Reduce Worker Injuries with

No Detectable Job Loss”, *Science*, 336 (6083): 907 – 911.

Li, L., and P. Singleton, 2019, “The Effect of Workplace Inspections on Worker Safety”, *Industrial and Labor Relations Review*, 72 (3): 718 – 748.

Mckinnon, R. I., and H. Pill, 1997, “Credible Economic Liberalizations and Overborrowing”, *American Economic Review*, 87 (2): 189 – 193.

Mischke, C., J. H. Verbeek, J. Job, T. C. Morata, A. Alvesalo-Kuusi, K. Neuvonen, S. Clarke, and R. I. Pedlow, 2013, “Occupational Safety and Health Enforcement Tools for Preventing Occupational Diseases and Injuries”, *Cochrane Database of Systematic Reviews*, 8 (8): CD010183.

Tompa, E., C. Kalcevic, M. Foley, C. McLeod, S. Hogg-Johnson, K. Cullen, E. MacEachen, Q. Mahood, and E. Irvin, 2016, “A Systematic Literature Review of the Effectiveness of Occupational Health and Safety Regulatory Enforcement”, *American Journal of Industrial Medicine*, 59 (11): 919 – 933.

Viscusi, W. K., 1979, “The Impact of Occupational Safety and Health Regulation”, *Bell Journal of Economics*, 10 (1): 117 – 140.

Weil, D., 1996, “If OSHA Is So Bad, Why Is Compliance So Good?”, *RAND Journal of Economics*, 27 (3): 618 – 640.

(责任编辑: 杨万东)

## AN ANALYSIS OF THE ECONOMIC CHARACTERISTICS AND THE EFFECTIVENESS OF SAFETY REGULATION OF NUCLEAR POWER

WANG Jun-hao<sup>1</sup> HU Fei<sup>2</sup>

- (1. China Institute of Regulation Research, Zhejiang University of Finance and Economics;
2. School of Economics, Zhejiang Gongshang University)

**Abstract:** As a kind of clean energy, nuclear power has many comparative advantages, but its production has obviously safety risks. The economic feature of nuclear power determines the demand of the production safety regulation for the production process. From the perspective of regulation economics, this paper divides regulation measures into direct regulation measures based on administrative compulsory means and indirect regulation measures based on economic means. This paper finds that the accident probability is closely related to the nuclear power plant’s safety investment and regulation inspection frequency. The nuclear power plant’s safety investment is related to the the risk degree of potential safety hazard and the plant’s losses of the potential safety hazards found by regulators. This paper also points out that the insufficiency of the plant’s losses of the potential safety hazards found by regulators is the key reason for the inefficiency or negative effects of inspection. Correspondingly, this paper puts forward related policy suggestions to improve the effectiveness of the safety regulation of nuclear power.

**Key words:** nuclear power; externality; safety risk; safety regulation