



Research
Nuclear Power—Review

美国高温气冷堆现状

Andrew C. Kadak

Kadak Associates, Inc., Port St. Lucie, FL 34952, USA

ARTICLE INFO

Article history:

Received 3 November 2015

Revised 3 March 2016

Accepted 8 March 2016

Available online 31 March 2016

关键词

高温气冷堆

下一代核电站

许可证申请

(美国)核管理委员会

《2005年能源政策法案》

研究现状

摘要

2005年,美国国会通过了《2005年能源政策法案》,该法案授权在2021年之前建造和运行一个高温气冷堆 (HTGR)。在美国国内专家对未来核技术发展方向进行了多年的研究后,该法案才得以通过。作为该法案的结果,美国国会设立了名为“下一代核电站”的项目,这是一种为制氢提供工艺用热的HTGR。尽管HTGR被寄予了很高的期望,但其现状仅限于完成关于先进燃料、石墨和其他材料的研究计划,并不是如国会于2005年提出的建造一个示范电站。HTGR发展目标降低背后有许多原因,包括:用于研究的政府资金不足,对反应堆不切实际的高温要求,对“氢”经济需求的延迟,来自轻水冷却的小型模块反应堆的竞争,业主公司对新技术的兴趣较低,美国天然气价格过低,以及美国对非水冷反应堆许可证申请的具有挑战性的流程等。

© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

1. 引言

2002年12月,美国能源部(DOE)发布了《第四代核能系统技术路线图》[1],其概述了许多未来核电能源的选择。这项研究成果是第四代国际论坛工作的一部分,是论坛各成员国愿意发展国际合作而选择开发的技术。美国选择了氦气冷却的高温气冷堆用于工艺热应用和电力生产。由于这项决定,美国国会通过了《2005年能源政策法案》(公开法律编号:109-58)[2],为被称为“下一代核电站”(NGNP)的项目筹集资金,并且要求在2021年9月30日之前实现此电站的运行。爱达荷国家实验室被指定为国家带头实验室,协调高温气冷堆(HTGR)技术的研究和发展。美国和南非的核产业界采用共享技术开发的方式参与了此项目的研究

和发展。

该项目取得了卓越的初步进展,两类可选HTGR被开发和研究。这两项候选技术分别为在南非与西屋公司共同开发的球床模块反应堆(PBMR)和由通用原子公司与阿海珉集团共同开发的柱状HTGR设计。产业界形成了NGNP产业联盟[3],由对HTGR开发感兴趣的产业合作伙伴组成。除供应商外,这些合作伙伴还包括陶氏化学公司和康菲石油公司,以及NGNP技术的潜在用户。在这期间,33个产业合作伙伴加入了NGNP产业联盟。

在过去十年里,产业界花费了超过10亿美元发展该技术,而美国DOE花费了超过5亿美元支持研究和技术开发[3]。DOE提供的资金主要花费在由爱达荷国家实验室和橡树岭国家实验室开展的燃料开发、石墨认证和材料

E-mail address: kadak@mit.edu

2095-8099/© 2016 THE AUTHORS. Published by Elsevier LTD on behalf of Chinese Academy of Engineering and Higher Education Press Limited Company. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/>).

英文原文: *Engineering* 2016, 2(1): 119–123

引用本文: Andrew C. Kadak. The Status of the US High-Temperature Gas Reactors. *Engineering*, <http://dx.doi.org/10.1016/j.eng.2016.01.026>

研究方面。产业界的工作主要集中在核电站和工艺用热生产设施的概念设计。

虽然NGNP项目考虑过球床式和柱状HTGR，但是在南非由西屋公司设计的PBMR项目被撤回，DOE选择了柱状HTGR设计作为NGNP的参照电站。

2011年，在核能顾问委员会的建议下[4]，能源部部长Steven Chu (朱棣文)决定将NGNP项目的范围缩小到仅包含研发项目，忽略所有的设计活动，这就导致国会批准的电站运行日期(2021年)不可能实现。缩小项目范围的主要原因之一是无法与产业界就以何种共同出资方式支持后续工作的问题达成一致。如一封写给能源部部长的信中所述[5]，产业界提出了一种集中于产业化的投资方式，即支持项目建设，而不是支持衡量设计所需的基础研究。表1[5]给出了具体的出资建议，包括一旦设计可进行建造和获得许可，就会有相当多的私营部门投资。

DOE或政府分担的投资总额为19.25亿美元，而私营部分为36.21亿美元。政府无法同意这种出资方式。NGNP产业联盟又提出了一种与商业风险相对应的阶段性伙伴关系计划：政府将资助第1阶段的研发工作；阶段2解决初步设计和获得许可的问题，资助比例为政府占80%和产业界占20%；最后的建设阶段3将完全由产业界提供资金。这个建议没有达成共识，最终导致电站建设上的停滞不前。当时，产业联盟有33家公司，它们对推动NGNP发展都很感兴趣，但没有一家公司在没有签署必要的研究和许可证申请协议的情况下愿意承诺修建电站，因为在政府资助和获得核管理委员会(NRC)批准方面存在很高的风险。该联盟目前仍在积极支持推动美国HTGR的发展。

尽管DOE未遵守修建NGNP的承诺，但是从2006年至今还是完成了大量的技术工作。在NGNP网站上可找到关于NGNP的所有公开报告[6]。

2. 技术成就

这些技术成就的亮点总结如下。

2.1. 先进气冷堆 (AGR) 燃料

DOE的先进气冷堆(AGR)燃料开发项目[7]由David Petti博士领导，爱达荷国家实验室开发了一种由三结构同向性型(TRISO)包覆的铀碳氧化物(UCO)燃料组成的AGR燃料。该燃料具有多种特性，包括：燃耗范围为150~200 $\text{GW}_d \cdot (\text{MTHM})^{-1}$ ，时均温度峰值为1250 °C，每个初始重金属原子的裂变量(FIMA)为19.4% [8]。这种燃料在爱达荷国家实验室已经过各种辐照试验。图1[9]总结了三种AGR[†]测试的结果。

AGR1辐照试验下燃料失效率为零。图2 [9]显示了AGR燃料压块6-4-3在一项1600 °C试验中裂变产物释放的结果。除了^{110m}Ag，铀碳氧化物TRISO包覆颗粒的安全性能与以前生产的包覆颗粒相比提高了不止7倍。

AGR2试验已经完成，而AGR3/4和AGR5/6/7试验还在进行中。试验目的是确定故意失效的燃料中裂变产物的释放。这些试验将被用于从HTGR中定量化源项，以进行事故分析和应急计划区规划。尽管DOE决定放弃示范电站的开发，但燃料开发项目仍在继续进行。这些结果将被用于未来HTGR的设计。

2.2. 石墨开发和质量鉴定

未来的HTGR将需要大量石墨作为堆芯反射层和中子慢化剂。因此必须充分了解生产的石墨的材料来源和性质，特别是高温和辐照情况下石墨的反应。此外，为了安全目的，还必须了解进空气和进水情况下被辐照过的石墨的反应。目前，爱达荷国家实验室和橡树岭国家实验室与欧洲的多个试验机构合作，针对多种石墨类型进行了众多

表1 政府资助和私营部门投资份额预估[5]

Funding year	2010	2011	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024
单位：百万美元															
One FOAK ^a															
DOE	\$221	\$244	\$252	\$324	\$317	\$173	\$123	\$84	\$75	\$26	\$26	\$24	\$12	\$12	\$12
Private sector ^b			\$26	\$41	\$37	\$158	\$239	\$563	\$730	\$787	\$467	\$178	\$57	-\$36	\$365
Two FOAK ^a															
DOE	\$221	\$244	\$252	\$324	\$317	\$207	\$160	\$114	\$107	\$30	\$28	\$25	\$12	\$12	\$12
Private sector ^b			\$26	\$41	\$37	\$313	\$477	\$1121	\$1456	\$1517	\$876	\$295	\$59	-\$127	\$672

^a The acronym FOAK stands for first-of-a-kind.

^b Not including "in kind" contributions.

[†] AGR 燃料压块指定了编号，用来表示辐照、安全试验、辐照后评估的种类和压块将进行的试验的种类 [8]。

测试与研究。2000多个石墨样品被指定为先进石墨蠕变(AGC)试验系列的一部分。基于这些试验,开发了分析模型,以预测石墨在正常运行状态和事故状态下的反应。石墨质量鉴定的规范案例正由美国机械工程师学会(ASME)进行,采用美国材料与试验协会(ASTM)的质量鉴定方法。这项工作的目的是当美国准备建造HTGR时,开发出可用于HTGR的石墨的标准。

2.3. 高温材料质量鉴定

在美国,NGNP初始设计要求的依据是其产生足够用于热化学高效制氢的高温的能力。超高温反应堆(VHTR)需要超过950 的温度。当时没有符合规范要求的金属能够被应用于这种高温反应堆中。虽然仍然在追求制氢的目标,但随后的近期开发集中于在750~850 的温度范围内可用的符合规范的金属。研究方案中包括两种材料,分别是合金617和合金800H。人们为得到支持ASME规范案例的试验数据做了大量努力,以扩大合金617的可用范围,使其在950 高温运行的反应堆上作为压力边界材料;同时扩大合金800H的可用范围,使其可用温度和时间分别达到850 和500 000 h。这些质量鉴定试验得出的数据被用来开发两种合金反应的模型,以覆盖大范围的温度、应变率及荷载条件。这项工作目前仍在进行中。

3. 设计和安全方法

未来HTGR的设计、开发和许可证申请的关键领域是堆芯物理、热工水力和热传递的分析工具的验证与确认(V&V)。包含不确定性分析和比例分析的程序代码基准验

证是质量鉴定的关键组成。美国为了支持设计和许可证申请活动,已经和多所大学签订了协议,对分离效应和整体试验进行多方面测试。在NGNP不再考虑球床高温气冷堆之后,柱状反应堆被选为参照设计。俄勒冈州立大学打造了一套整体效应试验设施(称为高温试验设施,HTTF),将对热传递、流动和事故模拟的基础特性进行试验。阿贡国家实验室修建了自然循环停堆试验设施,为验证堆腔冷却系统的性能提供数据。美国许多高校正在进行分离效应试验,以帮助了解在正常运行、运行瞬态和故障状态下的现象。图3[9]总结了多个有计划或正在进行的试验。

除了验证热工水力和热传导的程序代码,人们还做了大量工作[9]来研究堆芯模拟方法。作为多物理物体导向模拟环境(MOOSE)的一部分,新程序代码正在被开发,以实现基于高保真有限元的3D模拟。这些新工具将取代目前正在使用的老旧扩散理论程序,如VSOP。对程序代码包的改进包括:燃耗计算过程中的热中子反馈,更新、修改RELAP-3D以便用于气冷堆的分析。通过与经济合作与发展组织(OECD)的合作,已经为350 MW模块高温气冷堆(MHTGR-350)确立了几个堆芯物理的基准;通过与国际原子能机构(IAEA)合作,也成功确立了若干基准。

更多的方法研究关注的是柱状反应堆设计,因为它与球床反应堆设计相比更为复杂。本项工作未来将面临的挑战包括:研究石墨的中子散射及重金属的弹性散射,石墨热性能的辐射损伤效应,停堆控制棒的空腔效应,球床内燃料球的非轴向流动和堆芯反射层界面的热传导性。另外也需要高燃耗堆芯物理截面和进气进水研究的数据来满足一些目标,以支持在美国的许可证申请活动。所有这些工作都需要DOE的资金帮助。

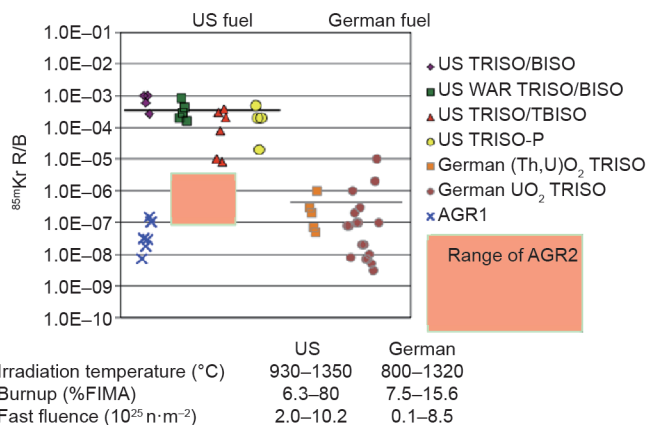


图 1. 德国和美国TRISO燃料辐照历史数据比较, AGR1和AGR2辐照结束时^{85m}Kr R/B 裂变气体的释放[9]。

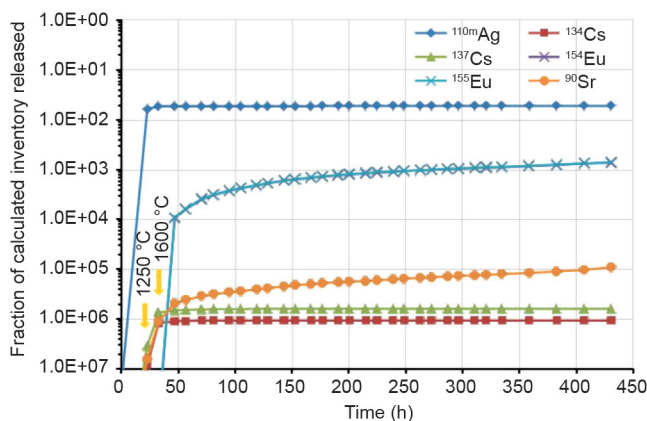


图 2. AGR1 燃料压块6-4-3在1600 加热试验中的裂变产物释放 [9]。

† ^{85m}Kr R/B 是一种与释放裂变产物相关的燃料质量测量值。该数值越小, 燃料越好。

		Scenario of interest				Experimental facilities										
		Depressurized conduction cooldown	Pressurized conduction cooldown	Air ingress	Normal operation	INL MIR core bypass	ISU heated core bypass	SNU core bypass	TAMU core bypass	CCNY core heat transfer	TAMU plenum-to-plenum NC	UP LP mixing	INL MIR LP mixing	USU transient mixed convection	INL air ingress	TAMU air ingress
Phenomena	Natural circulation	+	+	+	-	-	-	-	-	P	P	-	-	P	+	+
	Lower plenum mixing	+	+	+	+	-	-	-	-	P	-	P	+	-	+	+
	Upper plenum mixing	+	+	+	+	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-
	Jet impingement: upper plenum	+	+	+	+	-	-	-	-	-	P	-	-	-	-	-
	Jet impingement: lower plenum	+	+	+	+	-	-	-	-	-	-	P	+	-	-	-
	Core bypass	+	+	+	+	+	P	+	+	O	-	-	-	O	-	-
	Core heat transfer	+	+	O	+	-	P	-	-	P	-	-	-	O	-	-
	INL MIR core bypass	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Test facilities	ISU heated core bypass	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TAMU core bypass	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	SNU core bypass	-	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	CCNY core heat transfer	P	P	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TAMU plenum-to plenum NC	P	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	UP mixing in LP	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	INL MIR mixing in LP	-	-	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	USU transient mixed convection	P	P	-	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	INL air ingress	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	TAMU air ingress	-	-	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
	HTTF integral & separate effects	P	P	P	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-

图 3. NNGNP用于软件验证的热流体V&V矩阵[9]。符号：+, 直接可验证关键现象的数据；O, 数据部分适用；-, 不适用；P, 计划活动。

4. 许可证申请现状

由于DOE决定推迟NGNP的部署，许可申请工作已经被延期。尽管已和NRC开展了许多讨论，并且就关键话题也编制了很多白皮书，但在关键问题的解决方面仍没有太多进展，这些问题包括：安全壳性能要求、源项、许可申请基准事件的选择和应急预案。通过与NGNP产业联盟的合作，NGNP项目向NRC提交了一项针对商业电站的风险指引许可证申请策略和安全基础的提议[10]。NGNP团队根据现有的轻水反应堆标准对2500个单独的监管要求进行了检验，完成了监管差距的分析。爱达荷国家实验室提交了大量白皮书以期解决这些问题[11-13]。NRC审阅了这些文件[14,15]，但没有对这些会影响将来设计的关键问题作出任何正式决定，因此示范电站的设计无法进行。

NGNP示范电站的推迟也减慢了人们为解决关键问题所做努力的进度。对于非水冷反应堆的许可证申请，可采用风险指引或基于风险的办法，但NRC尚未给出有关适当解决途径的结论。对于类似于HTGR的具有固有安全特性

的先进反应堆来说，纵深防御到底意味着什么？这个关键问题尚未得到解决。

5. 工业界的活动

如上文所述，工业界和相关供应商，如通用原子公司、阿海珐集团和西屋公司，均在DOE的支持下开发了NGNP所需关键部件的标准和规范，包括发电和制氢。虽然爱达荷国家实验室和工业界对制氢已经开展了大量研发工作，但人们对氢气的感兴趣程度已经大大降低，因为美国天然气价格便宜，且供应量充足。

工业界的研究重点为整个发电/制氢厂的预概念设计，包括中间换热器、功率大小、概念验证研究所需的试验设施、热传递和压力容器设计研究中的设计要求和挑战，也包括各部件的试验计划，如主循环风机、停堆冷却热交换器、控制棒和反应堆保护系统的设计等。

由于工程设计工作的搁置，许多此类研究被中止。但是，一旦NGNP项目重启，这些研究得到的已有信息和

报告将会十分有用。超过160份出版物、设计研究和研究报告可被用于将来的项目[6]。依赖政府的资助,关于先进TRISO包覆燃料颗粒的研究、两种反应堆级石墨源的质量鉴定和用于许可证申请的有限的方法开发将会继续。图4[9]显示了在拟定的研发计划基础上的预计资金需求。可明确的一点是,不可能完成《2005年能源政策法案》中所设的到2021年NGNP实现运行的计划。

将纳入研究结果的基础电站的设计和开发工作不包括于资助计划内,它需要经DOE和美国国会的批准。在美国国会和NGNP产业联盟就NGNP的需求和资助方式达成一致前,不期望有重大进展。

除了政府资助的研发,至少有两个[†]私人资助的气冷堆项目正在进行:一个是基于球床的衍生设计,另一个是柱状快中子气冷堆设计[16]。X-Energy-100TM[17]是一个小型的50 MW_e高温气冷堆设计方案,采用蒸汽发电方式,以南非和中国正在发展的高温气冷堆为原型。X-Energy最近获得了来自DOE的600万美元奖励,这是DOE采取公私合作伙伴关系发展先进反应堆概念行动的一部分。

StarCore Nuclear [18]是一个正在加拿大开发的50 MW_{th}的高温气冷堆,可发电20 MW_e,另10 MW_{th}热能被用于工艺热应用。这两种技术都处于概念设计阶段。StarCore的特点是:分批加燃料,每五年更换一次整体反应堆容器筒,在卫星监测下自主运行,占地面积很小,可用于偏远地区。X-Energy电站设计更常规,采用球床堆芯和一个蒸汽发生器,能生产50 MW_e电能,若用4-6个模块,整体净发电量超过200 MW_e。目前商业化或示范站的计划还属未知,但看到除中国之外还有高温气冷堆的持续发展仍很受鼓舞。

通用原子的能量乘法器模块(EM2)是一种氦气冷却快中子反应堆,净输出电量为265 MW_e[19]。作为一个快中子反应堆,它应用了增殖和燃烧原理,可以实现理论上30年内不换料、不倒料。该电站使用气体涡轮动力和有机触底循环,可产生265 MW_e的净电量。

6. 结论

作为由美国国会单独积极推动的项目,第一个NGNP

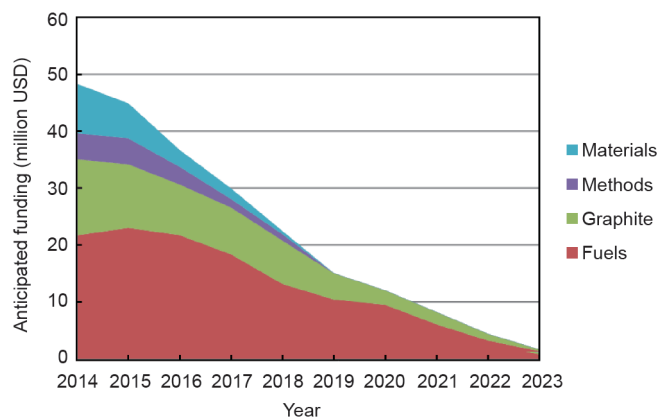


图4. 完成爱达荷国家实验室研发范围的拟定时间表[9]。

示范电站的进度明显减缓。虽然原因多种多样,但延迟的主要原因是,DOE和产业界无法就支持电站所需的研发、设计和建设的合理资助方式达成一致。由于缺乏这样的协议,产业界不愿为该项目开发的研究方面提供资金。产业界也关心政府是否做出必要的长期资助承诺,以确保项目完成,因为目前该项目需要每年都进行预算审批。尽管产业界有兴趣,但不得不说的是没有任何一个公司愿意成为支持建立电站的主要赞助商。

科研人员在以下方面已经做了大量的优质技术工作:用于未来电站设计的先进燃料、石墨、材料的开发,以及许可申请工作。已与NRC开展了重要讨论,尽管没有得出设计所需的最终结论。在NRC和开发者就风险指引的应用和基于风险的监管达成协议前,HTGR明确的安全优势[‡]还不能得到认证,为保证高安全水平,设计的成本会比实际需要的高。在美国还有很多工作要做,不仅必须完成支持许可证申请的技术和方法的研究,而且在该改进型技术的示范确定前,美国可能会继续依赖大型或小型模块轻水反应堆。根据作者的浅见,美国只能寄希望于中国引领HTGR的商业化,因为中国正在建造并将运行高温反应堆球床模块(HTR-PM)示范电站。

References

- [1] US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee, Generation IV International Forum. A technology roadmap for Generation IV nuclear energy systems. USA: US DOE Nuclear Energy Research Advisory Committee, Generation IV International Forum; 2002. Report No.: GIF-002-00.
- [2] Energy Policy Act of 2005, Pub. L. No. 109-58, 119 Stat. 595 (Aug 8, 2005).
- [3] Bredimas A. Status of the NGNP Industrial Alliance work and the business plan economics. In: IAEA Technical Meeting on the Economic Analysis of High

[†] 由 Robert Galvin (Galvin Nuclear Energy 公司) 赞助的第三个项目,这是一座 100 MW_e 高温气冷堆,采用气体涡轮动力发电,在概念设计阶段暂停。

[‡] 包括但不限于具有以下特征:不会熔化的反应堆,操作简单,换料不需要停堆,模块化,源项小,功率密度低,热效率较高,以及由于具有安全性不需要场外应急计划等。

- Temperature Gas Cooled Reactors and Small and Medium Sized Reactors; 2015 Aug 25–28; Vienna, Austria; 2015.
- [4] Nuclear Energy Advisory Council Letter to Dr. Steven Chu. 2011 Jun 30. Available from: <http://energy.gov/sites/prod/files/NEAC%20Review%20Signed.pdf>.
- [5] NNGP Industry Alliance Letter to Dr. Steven Chu. Implementation strategy for the Next Generation Nuclear Plant Project. 2009 Nov 30. Available from: <http://www.ngnpalliance.org/index.php/resources/download/czo0MzoiL2sxaTRkOHY4bDlvejBjM20yczYvQ2h1XzExMzAyMDA5X05HTIAxLnBkZiI7>.
- [6] Idaho National Laboratory [Internet]. Idaho Falls: Association of Energy Online Resources. [cited 2015 Sep 10]. Available from: https://inlportal.inl.gov/portal/server.pt?open=512&objID=452&mode=2&in_hi_userid=2&cached=true.
- [7] Petti D, Maki J, Hunn J, Pappano P, Barnes C, Saurwein J, et al. The DOE advanced gas reactor fuel development and qualification program. JOM 2010;62(9):62–6.
- [8] Kinsey J. Summary of AGR Fuel Program [presentation]. In: Technical Meeting on the Safety of High Temperature Gas Cooled Reactors in the Light of the Fukushima Daiichi Accident; 2014 Apr 8–11; Vienna, Austria; 2014.
- [9] Gougar H. NNGP program 2013 status and path forward. Idaho Falls: Idaho National Laboratory; 2014 Mar 1. Report No.: INL/EXT-14-31035.
- [10] Hicks T. Modular HTGR safety basis and approach. Idaho Falls: Idaho National Laboratory; 2011 Aug. Report No.: INL/EXT-11-22708.
- [11] Wallace EG, Fleming KN, Burns EM. Next generation nuclear plant defense-in-depth approach. Idaho Falls: Idaho National Laboratory; 2009 Dec. Report No.: INL/EXT-09-17139.
- [12] Holbrook M. Next generation nuclear plant licensing basis event selection white paper. Idaho Falls: Idaho National Laboratory; 2010 Sep. Report No.: INL/EXT-10-19521.
- [13] Jordan P. Next generation nuclear plant structures, systems, and components safety classification white paper. Idaho Falls: Idaho National Laboratory; 2010. Report No.: INL/EXT-10-19509.
- [14] Adams A. Next generation nuclear plant licensing strategy—a report to congress. Rockville: US Nuclear Regulatory Commission; Washington, DC: US Department of Energy; 2008 Aug. Report No.: ML082290017.
- [15] Basu S, Carlson D, Caruso M, DeGange J, Rubin S, Williams J. Assessment of white paper submittals on defense-in-depth, licensing basis event selection, and safety classification of structures, systems and components—next generation nuclear plant: project 0748. Rockville: US Nuclear Regulatory Commission; 2012.
- [16] Office of Nuclear Energy, US Department of Energy [Internet]. Advanced reactor concepts technical review panel public report. [cited 2014 Oct]. Available from: <http://www.energy.gov/sites/prod/files/2014/12/f19/Advance%20Reactor%20Concepts%20Technical%20Review%20Panel%20Public%20Report.pdf>.
- [17] X-energy.com [Internet]. Greenbelt: X Energy, LLC; c2016. Available from: <http://www.x-energy.com/>.
- [18] StarCore Nuclear.ca [Internet]. Montréal: StarCore Nuclear. Available from: <http://starcorenuclear.ca#!/home/>.
- [19] General Atomics.com [Internet]. San Diego: General Atomics; c2016. Available from: <http://www.ga.com/energy-multiplier-module>.