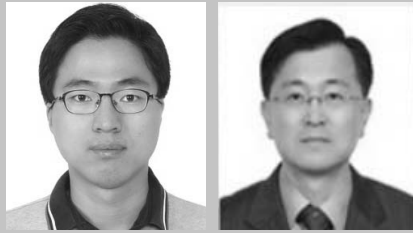


연구용원자로에 대한 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계의 적용성 고찰

Application Review on Aircraft Impact Safety Assessment and Defense Design in Research Reactor



박신영 (Shinyoung Kwag) | 노스캐롤라이나주립대 박사과정 | skwag@ncsu.edu
 류정수 (Jeong-soo Ryu) | 한국원자력연구원, 책임연구원 |

요약문

본 연구에서는 국내외 항공기 충돌에 대한 원자력발전소의 안전성 평가 및 규제 현황과 연구용원자로의 안전성 평가 및 규제 현황을 살펴보았다. 이러한 현황과 평가와 관련하여 연구용원자로에 적용할 수 있는 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준을 원자력발전소에 적용되는 기준을 기반으로 정리하였다. 본 연구를 바탕으로 후속되는 연구에서는 연구용원자로에 대한 실질적인 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준을 도출할 수 있으며, 평가 및 대비설계 방법을 상세히 정립할 수 있을 것이다. 결과적으로, 이를 바탕으로는 항공기 충돌에 대비한 연구용원자로 건물의 예비개념설계 모델을 개발할 수 있을 것으로 예상된다.

1. 서론

원자력발전소 (이하 원전) 설계에 있어서, 미국 뉴욕에 위치한 세계무역센터에 대한 9/11 항공기 테러사건 이전에는 항공기 충돌을 반영한 경우와 반영하지 않는

경우가 공존하였지만, 이후에는 IAEA를 비롯한 미국, 유럽 등 주요 국가에서 항공기 충돌에 대비한 안전성 평가를 필수적으로 요구하고 있다. 특히, 미국에서는 원전 설계 시 10 CFR 50.150 [1]의 개정 발행으로 대형 민항기의 충돌을 인위적인 사고로 분류하고 설계기준을 초과하는 사고 (Beyond Design Basis Accident, BDBA)로 반영하여, 2009년 7월 13일 이후로 건설되는 신규 원전에 대해서는 대형 민항기의 충돌평가 및 대비설계를 수행하도록 요구하고 있다. 따라서 신규 원전 인허가 신청자는 Regulatory Guide 1.217 [2]따라 NEI 07-13 [3]에 제시된 관련 절차를 설계 초기단계부터 고려하고 있다. 국내에서는 원자력법 및 안전심사지침 3.5.1.6 [4]을 기반으로 항공기 충돌로 인한 재해확률이 10⁻⁷/년 이하인 부지를 선정하여 항공기 충돌을 원전 설계 시 고려하지 않았지만, 최근에는 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙(원자력안전위원회공고 제2011-6호) [5]에 인위적인 항공기 충돌 안전성 평가 및 사고완화대책을 수립할 것을 명시하고 있고 이와 관련 규정고시와 규제지침을 신설하여 원전 설계 시 반영할 것을 법제화하고 있다.

한편, 국내외 연구용원자로(이하 연구로) 설계에 있

어서는 항공기 충돌로 인한 재해확률을 일정 수준 이하로 보고 항공기 충돌을 고려하지 않고 있으며, 인위적인 항공기 충돌에 대한 안전성 평가 규제요건과 대비설계 적용사례로서 국내에서는 현재까지 없는 실정이다. 비록 국외 사례로서 호주, 독일, 프랑스 등에 건설되거나 건설 중인 OPAL, FRM-II, JHR 등이 항공기 충돌에 대비한 설계를 수행하였으나, 소형 항공기에 국한되거나 해당 설계기준이 명확하지 않는 경우가 대부분이다. 이러한 배경 아래, 본 연구의 제 2장에서는 항공기 충돌에 대한 원전의 안전성 평가 규제 현황과 연구로의 안전성 평가 규제 현황을 살펴본다. 제 3장에서는 원전의 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준을 바탕으로 연구로에 적용 가능한 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준을 정리한다. 제 4장에서는 현재 원전의 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 시 중요인자를 살펴본다. 제 5장에서는 연구로의 항공기 충돌평가 및 대비설계 현황을 검토한다. 마지막으로 제 6장에서는 관련 내용을 정리하고 결론 및 후속 가능 연구에 대하여 기술한다.

2. 항공기 충돌 안전성 평가 규제 현황

2.1 항공기 충돌에 대한 원자력발전소 안전성 평가 규제 현황

9/11 항공기테러사건으로 인한 의도적인 항공기 충돌 이전에는 국외 원전의 경우, 항공기 충돌 사건이 낮은 확률을 가진 부지를 선정함으로써 원전 설계 시 항공기 충돌을 고려하지 않거나, 비록 고려하더라도 경비행기나 군용기 그리고 드물게 소형 민항기 충돌을 고려한 경우가 대부분이었다 [6]. 그러나 최근에는 IAEA를 비롯한 미국, 유럽 등 주요 국가에서 항공기 충돌에 대비한 안전성 평가를 필수적으로 요구하고 있다. IAEA에서는 사보타주에 대한 원전 안전성 평가 방법론을 수록하고 있으며 항공기 충돌 테러도 가상사건의 하나로

고려하고 있다 [7]. 미국에서는 9/11 항공기테러사건을 계기로 신규 원전에 대해 인위적 항공기 충돌 평가를 요구하는 규정을 2009년 6월에 제정하였다. 유럽에서는 서유럽규제자협회가 작성한 신규 원전에 대한 안전 목표 초안 [8]에서 안전과 보안 통합설계 관점에서 개선이 필요한 중점분야로 대형 민항기 충돌 방호설계를 명시하였으며, 핀란드에서는 설계 시 발전소에 손상을 줄 수 있는 불법적인 활동과 대형 민항기 충돌을 고려해야 함을 정부 법령 17절 [9]에 나타내고 있다. 프랑스에서는 현행 규제요건에는 아직 반영되지 않았으나, 프랑스 규제기관인 ASN은 2010년 7월 press release로 발행된 ASN Commission 성명에서 9/11사태의 경험을 반영하지 않은 원전을 프랑스에 건설하는 것을 허용하지 않겠다는 의견을 피력한 바 있다. 캐나다에서는 규제문서인 RD-337 [10]의 7.4.2절에서 설계에 고려되어야 할 인적유발 외부사건의 하나로 잠재적인 항공기 충돌, 선박 충돌, 테러 활동 등을 명시하고 있다.

국내의 경우는 현재 원자력법과 안전심사지침 3.5.1.6에 명시되어 있는 원전 부지 선정 기준을 기반으로 항공기 충돌로 인한 재해확률이 10^{-7} 년 이하인 부지를 선정하여 원전 설계 시 항공기 충돌관련 사항을 고려하지 않고 있다. 그러나 최근 들어 정부가 원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙에 인위적인 항공기 충돌 안전성 평가 및 사고완화대책 수립할 것을 명시하고 이에 대한 규정고시와 규제지침을 신설하여 원전 설계 시 반영할 것을 법제화하고 있다.

2.2 항공기 충돌에 대한 연구용원자로 안전성 평가 규제 현황

세계 각국에서 연구로의 안전성을 확보하기 위한 항공기 충돌 안전성 평가 규제 현황을 살펴보면, 기본적인 개념에서 유사성을 발견할 수 있다. 이는 연구로가 세워질 부지에서 우선적으로 항공기의 추락 확률을 평가하며 이러한 추락 확률이 일정 수준을 초과할 경우 설계 시 대책을 마련하도록 하고 있다. 대책을 마련하

는 경우에는 명확한 연구로의 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준은 따로 없어 원전에 적용하는 기준을 일부 사용하여 고안하고 있다. 그러나 최근에는 미국에서 발생한 9/11 항공기 테러사건으로 인하여 연구로 원자로건물 설계 시 항공기 충돌에 대한 안전성 평가 및 대비설계를 연구로 입지 부지에 관계없이 필수적으로 요구하는 경우가 많아지고 있다. 국내의 경우에도 현재까지 부지선정기준을 통해 항공기 충돌로 인한 재해확률이 일정 수준 이하인 부지를 선정함으로써 연구로 설계 시 항공기 충돌관련 사항을 고려하지 않고 있다. 그러나 최근에 규제기관이 법제화를 통해 원전 설계 시 항공기 충돌에 대한 안전성 평가 및 대비설계를 필수적으로 요구함에 따라 연구로 설계 시에도 비슷한 입장을 취하거나 이를 권고할 것으로 예측이 된다.

3. 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준

미국에서는 2009년도 10 CFR 50.150의 개정 발행으로 인하여 2009년 7월 13일 이후에 건설되는 신규 원전의 경우 대형 민항기의 충돌평가 및 대비설계를 수행하도록 새로운 기준이 제시되었으며, 이 기준에 따르면 신규 원전 인허가신청자에 대해 다음의 사항을 수행하여 그 조치결과를 제시하도록 규정하고 있다. a) 설계기준초과 사고로 반영되는 대형 민간 항공기 충돌이 원전 시설에 미치는 영향을 평가할 것; b) 대형 민간 항공기 충돌 시 운전원 조치에 가급적 의존하지 않더라도 핵심 안전기능인 노심냉각 능력 유지 혹은 격납건물의 구조 건전성 유지, 사용후 핵연료 냉각능력 유지 혹은 사용후 핵연료 저장조 구조 건전성 유지를 수행할 수 있음을 입증하는 설계특성 및 기능적 능력을 식별하고 포함시키기 위한 실제적인 분석을 수행할 것; c) 위의 설계특성, 기능적 능력, 대처 방안이 어떻게 운전원의 조치에 대한 의존도를 줄이면서도 항공기 충돌의 영향을 완화할 수 있는지를 설명할 것 등이다. 항공기 충돌평가와 관련된 사항과 충돌하중에 대해서는 대상 항공기로

서 장거리 운항용 대형 민간 항공기의 연료 주입량, 충돌속도, 충돌각도를 고려하도록 요구하고 있다. 상세특성은 SGI (Safeguard Information)로 분류되어 일반에게 공개되지는 않고 있으나 연료는 이륙 시의 연료량을 고려하도록 되어 있으며, 충돌속도는 미국 세계무역센터 및 펜타곤 항공기 충돌 사고에서 계속된 속도에 준하도록 결정되어 있다. 항공기의 충돌 루트를 결정하는 활공각도 및 수평각도는 충돌에너지가 가장 큰 직각으로 가정한다.

항공기 충돌평가 및 대비설계 방법은 미국 NEI (Nuclear Energy Institute)에 의하여 개발되고 미국 NRC (Nuclear Regulatory Commission)와 EPRI (Electric Power Research Institute)가 검토 승인한 NEI 07-13 [3]에 따라 수행한다. 이 가이드에서는 격납건물 및 사용후 핵연료 저장시설 그리고 열제거 (Heat Removal)에 필요한 안전관련 기기를 포함하는 구조물의 대형 민항기 충돌에 대한 영향평가를 주기기 공급자나 인허가 신청자가 용이하게 수행할 수 있도록 관련절차를 제시하고 있다. 항공기 충돌에 대한 필요한 해석과 평가를 수행하기 위한 전반적인 순서는 그림 1과 같다. 항공기 충돌 평가대상은 노심냉각 기능을 유지하거나 격납건물 구조건전성 유지, 그리고 사용후 핵연료의 냉각 기능을 유지하거나 사용후 핵연료 저장조의 구조 건전성을 유지하여야 한다는 것이다. 필수기능 수행능력 평가는 필수기능 수행에 필요한 핵심설비와 핵심설비의 전원공급 케이블 등 보조기능을 수행하는 설비를 포함한다. 평가 시에 고려하여야 하는 주요 평가인자는 구조물의 크기, 위치, 외부 충돌 방호물 존재 여부 등이다. 외부 충돌 방호물의 기능을 수행하기 위해서는 벽 두께가 18 in 이상인 철근콘크리트 구조이어야 한다.

현재, 원전 설계 시와는 달리 연구로에 적용되는 명확한 항공기 충돌평가 및 대비설계 기준은 없다. 그러나 원전에 사용하는 10 CFR 50.150, Regulatory Guide 1.217 및 NEI 07-13 기준을 기반으로 이를 설정하면 크게 무리가 없을 것으로 보인다. 연구로에서 항공기 충

돌 평가대상은 원자로와 사용후 핵연료 저장조를 포함하는 원자로건물에 대해서 구조건전성 유지와 노심 냉각 및 사용후핵연료 냉각 기능 유지 사항이 될 것이다. 구체적인 평가항목, 손상메커니즘 및 평가방법은 원전의 경우를 따르면 된다. 그러나 충돌 하중으로서 대상 항공기를 선정하는데 있어, 연구로는 저출력의 연구용 목적 시설이므로 원전의 경우와 같이 대형 민항 항공기를 고려하는 것은 타당하지 않으므로 별도의 논의가 필요할 것으로 보인다.

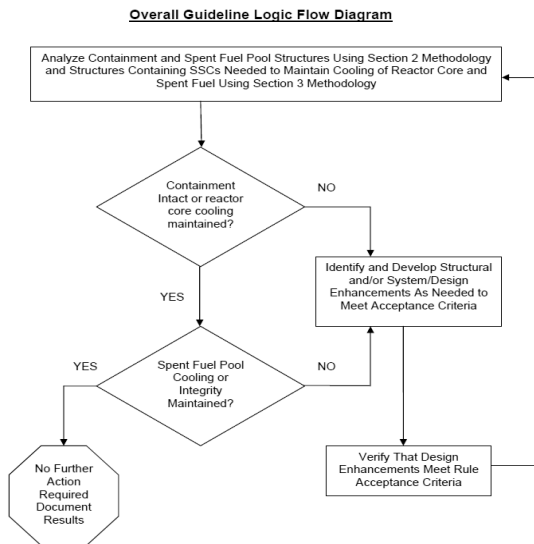


그림 1. 항공기 충돌에 대한 원자력발전소의 전반적인 안전성 평가 흐름도 [3]

4. 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계시 중요 인자

원전 격납건물 혹은 연구로 원자로건물의 항공기 충돌평가는 그림 2 [13]에서 보는 바와 같이 크게 두 가지 파괴모드를 고려해야한다. 항공기 엔진 충돌에 의한 국부파괴 (스캐빙 및 관통)와 항공기 전체 충돌로 인한 전반파괴 (소성붕괴)이다. 전반파괴는 충돌 대상 구조물의 동적 특성에 주로 영향을 받으나 국부파괴는 충돌 대상 구조물의 전반적인 힘/변위 특성에 독립된다. 여

기서, 국부파괴에 대한 평가는 실험에 기반으로 한 경험적인 식에 의해 수행되고, 전반파괴에 대한 평가는 시간이력해석방법 (Force Time-History Analysis Method) 및 항공기구조물 상호작용해석 (Missile-Target Interaction Analysis)에 의해 수행된다. 시간이력해석방법에서는, 충돌 대상 구조물을 강체 (Rigid)로 가정하고 항공기 찌그러짐 강도 정보 (Crushing Strength Information)와 충격량 보존법칙에 의해 충돌하중이력 (Impact Force Time-History)이 결정된다. 결정된 충돌시간이력은 시간이력해석방법의 절차를 통해 충돌 대상 구조물의 수학적 모델에 적용된다. 계산된 응답으로 인한 내부력과 관련 응력을 바탕으로 구조물의 건전성 유지를 위한 성능은 평가된다. 항공기구조물 상호작용해석에서는 항공기와 충돌 대상 구조물의 결합된 동해석 모델을 개발하고, 동적 응답은 초기속도 문제로서 결정된다. 이 방법을 통한 충돌 평가 시에는 사용하는 항공기구조물의 상호작용 해석 모델이 요구되는 충돌하중이력과 일치하는지를 반드시 증명하여야 한다. 그러므로 등가의 충돌하중이력을 생성하기 위한 항공기구조물 상호작용 해석 모델을 개발하기 위해서는 상세한 항공기의 정보가 필수적이다.

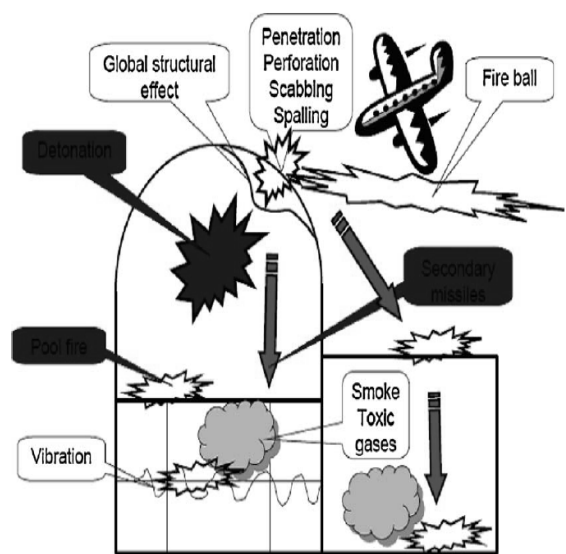


그림 2. 항공기 충돌의 영향 [12]

5. 연구용원자로의 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계

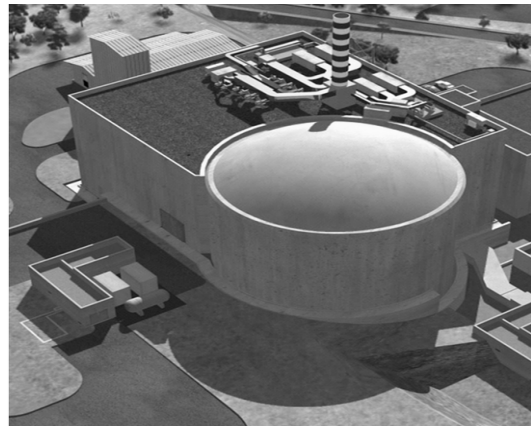
국내의 연구로에서 항공기 충돌에 대한 안전성 평가 및 대비설계는 현재 거의 이루어지지 않고 있다. 국내의 경우, 적용사례가 없고, 국외는 일부 국가에서 적용하고 있으나 평가 방법 및 설계 기준이 원전에 적용되는 기준을 일부 준용하거나 명확하지 않는 상황이다. 호주와 독일에 건설된 연구로 OPAL과 FRM-II 그리고 프랑스에 건설되고 있는 연구로 JHR 에는 항공기 충돌에 대비한 설계가 적용되었다. 충돌 대상 항공기는 소형 민간 항공기(경비행기)로 예상되며, 적용 설계기준은 명확하지 않다. 각각의 항공기 충돌에 대한 대비설계 주요 특징은 표 1에 정리하였다.

그림 3(a)는 항공기 충돌에 대비한 설계가 적용된 호주 연구로 OPAL을 보여준다. 원자로건물 주요 부위를

항공기 충돌에 대비한 철골 격자 (Aircraft Impact Steel Framed Grillage)가 둘러싸고 있다. 이 철골 격자는 탄성 및 소성 변형에 의하여 항공기 충돌로 인한 운동학적 에너지가 건물 내부로 전달되지 않도록 하는 기능을 하여 원자로건물의 항공기 충돌에 대한 안전성을 확보하게 한다. 충돌 격자의 설계는 가장 큰 손상을 일으키는 원자로건물의 항공기 충돌 위치를 선정하고, 이를 시간이력해석, 항공기구조물 상호작용 해석 등의 방법을 통하여 수행되었다 [13]. 그림 3(b) 와 (c)는 항공기 충돌에 대비한 설계가 적용된 독인 연구로 FRM-II 및 프랑스연구로 JHR을 보여준다. 철근콘크리트구조로 형성된 원자로건물의 두꺼운 외벽은 건물 내 원자로구조물 집합체 (Reactor Structure Assembly) 등의 핵심 구조물, 계통 및 기기를 둘러싸므로써 항공기 충돌에 대한 안전성을 확보한다. 이는 대부분의 원전에 적용된 항공기 충돌 대비설계 (3장 참조)와 유사함을 보여준다.



(a) 호주 OPAL



(b) 프랑스 JHR



(c) 독일 FRM-II

그림 3. 국외 연구용 원자로

표 1. 국외 연구용원자로의 항공기 충돌 대비설계 특성 및 특징

국외 연구로	설계특성	설계특징
OPAL	원자로건물 상부에 별도의 항공기 충돌에 대비한 철골 격자(Aircraft Impact Steel Framed Grillage)를 설치함.	항공기 충돌 에너지를 충돌로 인한 철골격자의 변형과 항공기의 찌그러짐을 통해 흡수함.
FRM-II	원자로건물이 철근콘크리트구조의 충분한 외벽 두께를 보유함.	항공기 충돌에 의한 국부거동과 전반거동을 두꺼운 콘크리트 외벽을 통해 방호함.
JHR	원자로건물이 철근콘크리트구조의 충분한 외벽 두께를 보유함.	항공기 충돌에 의한 국부거동과 전반거동을 두꺼운 콘크리트 외벽을 통해 방호함.

6. 결론

연구로에서 인위적인 항공기 충돌에 대한 안전성 평가 및 대비설계가 머지않아 필수적으로 요구될 것으로 예상된다. 일부 국가에서 항공기 충돌에 대처한 설계를 하였지만, 충돌 대상 항공기가 소형 민간 항공기(경비행기)에 국한되거나 적용한 충돌 평가 및 대비설계 기준이 명확하지 않는 상황이다. 더욱이 국내에는 연구로 설계 시 항공기 충돌에 대한 안전성 평가 및 대비설계를 도입한 사례가 전무하다. 그러므로, 본 연구에서는 항공기 충돌에 대한 원전 안전성 평가 규제 현황과 연구로 안전성 평가 규제 현황을 살펴보았다. 이러한 현황과 관련하여 연구로에 적용할 수 있는 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준을 원전에 적용되는 기준을 바탕으로 살펴보았다. 또한, 연구로의 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 시 중요 인자를 검토하였다. 현 단계의 연구를 바탕으로 연구로에 대한 실질적인 항공기 충돌 안전성 평가 및 대비설계 기준을 도출할 수 있으며 평가 및 대비설계 방법을 상세히 정립할 수 있다. 결과적으로, 이를 기반으로 하는 항공기 충돌에 대비한 연구로 원자로건물의 예비개념설계 모델을 개발할 수 있을 것으로 예상된다.

참고문헌

1. United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC), 10 CFR Part 50.150, "Aircraft Impact Assessment", 2009.
2. United States Nuclear Regulatory Commission (USNRC), Regulatory Guide 1.217, "Guidance for the Assessment of Beyond-Design-Basis Aircraft Impact", 2011.
3. Nuclear Energy Institute (NEI), NEI 07-13, "Methodology for Performing Aircraft Impact Assessments for New Plant Designs", Rev.8P, 2011.
4. 한국원자력안전기술원, 안전심사지침, 3.5.1.6, 1999.
5. 원자력안전위원회, 원자력안전위원회공고 제2011-6호, "원자로시설 등의 기술기준에 관한 규칙", 2011.
6. 정철현, 김상윤, "원전구조물의 국부충돌 및 항공기 충돌", 대한토목학회지, 제59권, 제4호, pp.18-26, 2011.
7. International Atomic Energy Agency (IAEA), Nuclear Security Series No. 4, Technical Guidance, "Engineering Safety Aspects of the Protection of Nuclear Power Plants against Sabotage", 2007.
8. Western European Nuclear Regulators' Association (WENRA), "Safety Objectives for Nuclear Power Plants", 2009.
9. Finish Acts and Decrees, "Government Decree on the Safety of Nuclear Power Plants", 2009.

10. Canadian Nuclear Safety Commission (CNSC), RD-337, “Design of New Nuclear Power Plants”, 2008.
11. 정철현, 문일환, 정래영, 현창현, “원자력발전소 구조물의 항공기 충돌 평가”, 전산구조공학, 제 25권, 제3호, pp.32-42, 2012.
12. Frano, R. L., Forasassi, G., “Preliminary Evaluation of Aircraft Impact on a Near Term Nuclear Power Plant”, Nuclear Engineering and Design, Vol.241, pp.5245-5250.
13. Australian Nuclear Science and Technology Organisation (ANSTO), RRRP-7225-EBEAN-002, “Safety Analysis Report”, Chapter 4, Rev.0, 2004.