

APR+ 대체교류발전기의 가스터빈 적용에 대한 민감도분석[§]

문호림^{*†} · 박범락^{**} · 박영섭^{*}

* 한국수력원자력(주) 중앙연구원, ** 한국전력기술(주)

Sensitivity Analysis for Using Gas Turbine Generator to Provide Alternate Alternating Current in APR+

Ho Rim Moon^{*†}, Bhum Lak Park^{**} and Young Sheop Park^{*}

* KHNP Central Research Institute,

** KEPCO Engineering & Construction

(Received May 16, 2011; Revised October 30, 2011; Accepted November 10, 2011)

Key Words : Alternate Alternating Current(대체교류발전기), Core Damage Frequency(노심손상빈도), Gas Turbine Generator(가스터빈발전기), Diesel Generator(디젤발전기), Component Failure(기기고장률)

초록: 원자력발전소의 대체교류발전기는 소내정전에 대처하기 위하여 설치되고 있다. 국내 원자력발전소에서 사용되고 있는 대체교류발전기의 구동형식은 대부분 디젤발전기이다. 가스터빈은 디젤발전기보다 구조가 간단하고 유지정비주기가 길다는 장점이 있지만 국내 원자력발전소에 적용사례가 없다는 단점이 있다. 본 논문의 목적은 APR+ 대체교류발전기의 구동형식을 선정하기 위하여 디젤발전기와 가스터빈의 민감도 분석을 하는 데 있다. 이를 위하여 디젤발전기와 가스터빈의 물리적 특성과 국내의 대체교류발전기 적용현황, 그리고 US-APWR의 비상발전기 및 대체교류발전기의 가스터빈 적용사례를 조사하였다. 마지막으로 신뢰도 데이터에 대한 민감도 분석과 신행 노형인 APR+에 가스터빈 대체교류발전기를 적용하여 노심손상빈도의 민감도를 분석하였다.

Abstract: Alternate alternating current (AAC) is used in nuclear power plants (NPPs) in order to cope with station black outs (SBOs). AAC has been provided using diesel engine drive types in Korea's NPPs. The structure of gas turbine generators (GTGs) is simpler than that of diesel generators (DGs), and GTGs have the advantage of longer maintenance intervals. However, GTG-AAC was not used in NPPs in Korea because of the lack of operation/maintenance experience. The purpose of this paper is to analyze the safety of APR+ considering a diversity of AAC types. This paper analyzes reliability data, mechanical specifications of DGs and GTGs, and the sensitivity of core damage frequency to the ACC type.

1. 서 론

원자력발전소의 대체교류발전기(Alternate Alternating Current; AAC)는 소내정전(Station BlackOut; SBO)에 대처하기 위하여 설치 및 운영되고 있다. 국내 원자력발전소에서 사용되고 있는 AAC의 구동형식은 모두 디젤발전기(Diesel Generator; DG)이며 차세대 원자로 개발과 신월성 원자력발전소 건설사업⁽¹⁾에서 AAC의 가스터빈(Gas Turbine Generator; GTG) 선정에 대한 검토를 수행한 바 있다. 그러나, 운전경험과 유지/보수 기술의 부족과 부품 구매원의 제한 등을 고려하여

AAC의 구동형식은 DG로 선정하였다.

GTG는 DG보다 구조가 간단하고 유지/정비 주기가 길다는 장점⁽²⁾이 있는 반면에 국내 원자력발전소에 적용사례가 없기 때문에 운전/정비 경험이 적다는 단점이 있다.

이런 이유로 APR+(Advanced Power Reactor Plus) 기술개발사업에서도 AAC의 구동형식을 DG로 채택하였다. 그러나 후쿠시마원전 사고의 대처방안의 하나로 비상전원의 다양성 확보를 위하여 GTG-AAC의 선정을 검토하고 있다.

10CFR50.63⁽³⁾과 Reg.Guide1.155⁽⁴⁾에는 SBO 대처방안으로 AAC설치와 SBO 발생 후 10분 이내에 AAC의 운전이 가능하도록 규정하고 있다. 특히, EPRI Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document(ALWR URD)⁽⁵⁾는 AAC를 GTG로 설치하도록 명시하고 있다.

§ 이 논문은 2011년도 대한기계학회 신뢰성부문 춘계 학술대회(2011. 5. 19.-20., 서울과기대) 발표논문임

† Corresponding Author, moonn@khnp.co.kr

© 2012 The Korean Society of Mechanical Engineers

Table 1 Comparison of code & standard for AAC

구분 항목	미국	국내
관련법규 및 기준	•10CFR50.2 •10CFR50.63 •Reg.Guide 1.155	•미국 설계요건 준용 •원자로서설등의기술기준 제 24 조 6 항
배경 및 목적	•SBO 대처요건의 명문화	•SBO 대처요건의 명문화
주요 내용	•SBO 시 AAC 를 10 분 이내에 비상모선에 공급할 수 있으면 상세분석 불필요 •1 대의 AAC 로 다수 호기 공용 가능	•AAC 확보 •AAC 성능은 시험을 통하여 입증되어야 함
현황	•원전의 약 40%가 AAC 추가 설치함	•가동원전에 AAC 를 추가 설치 중 •대부분 DG

미국 규제기관(Nuclear Regulatory Commission; NRC)의 설계인증(Design Certification; DC)을 신청 중인 일본 미쓰비시 중공업(주)의 170만kW급 US-APWR(Advanced Pressurized Water Reactor)⁽⁶⁾은 비상발전기와 AAC를 모두 GTG로 선정하였다.

미국 원자력발전소의 인허가는 단일인허가제도와 2단계 인허가제도로 분류되는데, DC는 단일인허가제도에 속한다. DC는 특정 원자력발전소의 건설/운영허가와 상관없이 원자로 설계 공급사가 표준 설계를 규제기간의 검토를 통해 그 타당성을 공인 받는 제도이다.

본 논문의 목적은 원자력발전소의 설계개념인 다양성을 고려한 신형 노형 AAC의 구동형식을 선정하기 위하여 DG-AAC와 GTG-AAC의 민감도 분석을 하는 데 있다. 이를 위하여 DG와 GTG의 물리적 특성과 국내의 AAC 적용현황, 그리고 US-APWR의 비상발전기 및 AAC에 GTG 적용사례를 검토하였다. 마지막으로 DG와 GTG의 최신 신뢰도 데이터를 이용한 민감도분석과 APR+ 확률론적 안전성평가(Probabilistic Safety Analysis; PSA) 모델에 GTG-AAC를 적용하여 노심손상빈도(Core Damage Frequency; CDF)의 민감도를 분석하였다.

2. 특성비교

2.1 AAC 관련 규제요건

Table 1에 원자력발전소 AAC의 미국과 국내 관련법규를 비교하였다. 국내의 AAC에 대한 관련규정은 「원자로서설 등의 기술기준 제24조6항⁽⁷⁾」

Table 2 Comparison of property for DG & GTG

구분	구동형식	DG	GTG
일반	작동원리	왕복/회전운동	회전운동
	출력특성	주위조건에 의한 영향 없음	주위조건에 의한 영향 있음
	경 부하 운전	엔진내부에 흑화현상 발생	흑화현상 없음
	진동	대책필요	불필요
	소음	105~115 dB/M	80~95 dB/M
	냉각수	필수	필요없음 (공냉식)
연료	몸체가격	GTG 보다 낮음	DG 의 1.5~2.5 배
	연료 소비율	150~230 (g/PS.H)	190~500 (g/PS.H)
	사용연료	A,B,C 중유, 경유, 등유	등유, 경유, A 중유, 천연가스, LNG
	윤활유 소비량	0.5~3 (g/PS.H)	0.4~0.5 (g/PS.H)
배기	NOx	300~1000ppm	20ppm 이하
전기	주파수 변동율	±5%	±0.4%
	전압 변동율	±4%	±1.5%
	기동시간	평균 8~10 초	평균 40 초

* 비교대상: DG: 7,000kW / GTG: 10,000kW 급

에 기술되어 있다. AAC 1대로 다수 호기가 공용으로 사용하는 것을 허용하는 미국의 SBO 사고에 대한 규제요건 10CFR50.2⁽⁸⁾와 10CFR50.63도 국내 원전에 준용되고 있다.

2.2 물리적 특성 비교

DG 및 GTG의 물리적 특성은 Table 2에 제시하였다. DG는 실린더내 연료의 연소로 발생하는 에너지를 이용하여 피스톤 및 크랭크 축에 의해 생성된 회전력으로 발전기를 구동시킨다. GTG는 연료의 연소로부터 얻어지는 고압의 열에너지를 유용한 기계적 에너지로 변환하는 동력기관으로써 압축기, 연소기 및 터빈으로 구성되어 있다. 외부로부터 흡입된 공기는 압축된 후 연소기로 보내지며 여기서 연료와 혼합되어 연소되면서 온도는 100℃ 이상으로 상승한다. 고온, 고압의 이 연소가스가 터빈을 통과하면서 팽창하는 과정에서 터빈을 구동하여 유효동력으로 이용된다. GTG는 DG

Table 3 Current status of AAC installed in Korea's Nuclear Power Plants

호기	구동형식	비고
고리	1,2	디젤
	3,4	
영광	1,2	
	3,4	
	5,6	
울진	1,2	
	3,4	
	5,6	
신고리	1,2	
	3,4	

보다 진동이 적고 냉각수가 필요 없으며 NOx와 같은 배기가스의 배출량도 적으나 주위온도에 따라 출력특성이 영향을 받는다. DG 기동시간은 평균이 10초인 반면에 GTG기동시간은 약 40초 정도이다. 기기 자체의 가격은 GTG가 DG보다 1.5에서 2.5배 정도 높으나 건설 및 설치비용은 GTG가 보다 경제적이다.

특히, GTG는 부품수가 DG보다 3분의 1정도 적기 때문에 구조가 간단하고 기기가 차지하는 부피가 작은 장점이 있다. 매 주기 정비점검이 필요한 DG와 다르게 GTG는 정비주기가 전 발전소 운전 기간 중에 최대 7-8번 정도⁹⁾ 필요하기 때문에 유지비용이 절감될 수 있다.

3. 국내원전의 AAC 현황

Table 3에 국내 AAC 적용 현황을 정리하였다. SBO 사고시의 미국 규제요건 10CFR50.2를 적용하여 DG-AAC 1대가 영광3,4호기에 최초로 설치되었다. 설치된 AAC는 EDG와 동일한 용량 및 형식의 내진, 안전등급(Q-Class)의 DG가 선정되어 설치되었다. 그 외 고리 1,2,3,4, 영광 1,2 및 울진 1,2호기의 AAC는 EDG와 상이한 비내진, 비안전(Non Q-Class) DG가 설치되었다.

신고리 3,4호기에 GTG-AAC를 적용할 예정이었으나 DG의 기자재 구매가 용이하고 기동성, 출력 특성 및 운전 편의성이 유리하여 신고리 3,4호기의 AAC 구동형식을 DG로 변경하였다.¹⁰⁾

국내 GTR의 기술 현황은 두산 중공업(주)에서 5.25MW급을 개발 완료하고 성능시험 중에 있으며 동서발전주식회사에 2012년 납품할 예정이다.

Table 4 Specification for the GTG of US-APWR

제작사 / 모델명	Kawasaki / MIT-33
엔진무게	약 14,000kg
주파수	60 Hz
성능	5,300kW

Table 5 Starting time of GTG for US-APWR

	공기온도 ¹⁾ (°C)	실험횟수 (times)	기동시간 ²⁾ (sec)
Cold (20 times)	15.2	20	26.6
Hot (131 times)	18.1	131	28.0

1)공기온도: Intake air temperature

2)기동시간: "Ready to load condition"까지 도달하는 평균기동 시간

4. US-APWR의 GTG 적용 현황

US-APWR은 미국 NRC의 DC를 2007년 12월 신청하였다. US-APWR은 AAC 2대는 물론, 안전등급(Class 1E) 비상발전기 4대 모두에 GTG를 적용하고 있다. US-APWR의 GTG의 특징은 Table 4에 정리하였다.^{9),11)} US-APWR의 GTG는 60Hz/ 5,300kW 규모이며 Kawasaki社는 미쯔비시 중공업(주)의 계열회사이다.

US-APWR의 "Initial Type Test Result of Class 1E Gas Turbine Generator System¹¹⁾"에서 제시한 GTG의 기동시간은 Table 5에 정리하였다. 공기 온도에 따른 GTG의 평균 기동시간은 모두 30초 이내로 평가되었다.

5. 민감도분석

5.1 기기 고장률 분석

기기 고장이란 내부결함으로 인해 기기가 요구된 기능을 수행하지 못하는 것을 의미한다. 기기 고장은 크게 기동실패(Fail To Start; FTS)와 운전중 고장(Fail to Run; FTR)으로 나눌 수 있다. FTS는 해당기기의 동작요구가 있을 때 기기가 자체의 상태나 반응을 변화하는 데 실패하는 것이다. FTR은 기기가 성공적으로 기동되었다고 가정할 때 임부

Table 6 Comparison of component failure data for EDG and GTG in ALWR URD of EPRI

기기	FTS (per demand)	FTR (per hour)
EDG	1.4E-02/d	2.4E-03/h
GTG	2.5E-02/d	1.0E-05/h
EDG 대비 GTG 고장률차이(%)	△ 78.6% 높음	▼ 99.6% 낮음

Table 7 Comparison of component failure data for EDG and GTG in NUREG/CR-6928

기기	FTS	FTLR ¹⁾	FTR ²⁾
EDG 시험기기: 225 대	5.0E-3/d	3.0E-3/d	8.0E-04/h
GTG 시험기기: 2 대	2.5E-2/d	2.0E-3/d	8.0E-04/h

1) FTLR; Fail to load and run for 1 hour
2) FTR; Fail to run beyond 1 hour

수행시간 동안 운전을 계속하는 데 실패하는 것을 의미한다.

EPRI의 Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document(ALWR URD)⁽¹²⁾에서 도출한 EDG와 GTG의 기기 고장률을 Table 6에 정리하였다. GTG의 FTS확률은 EDG에 비해 78.6% 높으며 FTR확률은 99.6% 낮다.

NUREG/CR-6928⁽¹³⁾를 검토하면 EPRI의 ALWR URD보다 EDG의 성능이 향상되었으며, Table 7에 기기 고장률을 정리하였다. 그러나 GTG의 경우 대상기기 수 및 평가시간이 극히 제한적이다.

SBO의 초기사건에 직접 영향을 주며 그 영향이 FTR보다 노심손상에 부정적 영향을 미칠 수 있는 FTS는 두 자료원 모두 GTG가 EDG보다 높은 경향을 나타낸다.

EPRI의 ALWR URD는 1990년 이전 데이터인 반면에 NUREG/CR-6928는 1998년부터 2002년까지의 현재 산업계의 평균 성능을 반영한 데이터이다.

Fig. 1에 두 데이터의 경향을 비교하여 도시하였다. EPRI의 ALWR URD는 SBO시 대처 시간을 8시간으로 규정하고 있으며, 이를 위해서 비안전급 AAC를 설치하도록 요구하고 있다. Fig. 1에 DG의 FTS와 8시간 동안의 SBO대처능력을 평가하기 위한 통합 신뢰도(Combined UnReliability; CUR)를 비교하였다.

CUR은 FTLR이 없는 경우와 있는 경우를 분리하여 다음 식과 같이 정의하였다. 즉, FTLR은 1시간 이내 기동실패 데이터이므로 FTR에 7시간을 곱하여 CUR을 계산하였다.

$$\begin{aligned} \text{Combined Unreliability} &= \text{FTS} + \text{FTR} \times 8h \\ &\quad \text{(for EPRI ALWR URD)} \\ &= \text{FTS} + \text{FTLR} + \text{FTR} \times 7h \\ &\quad \text{(for NUREG/CR-6928)} \end{aligned}$$

EDG의 CUR은 EPRI의 ALWR URD 기준으로 3.32E-02, NUREG/CR-6928 기준으로 1.36E-02로

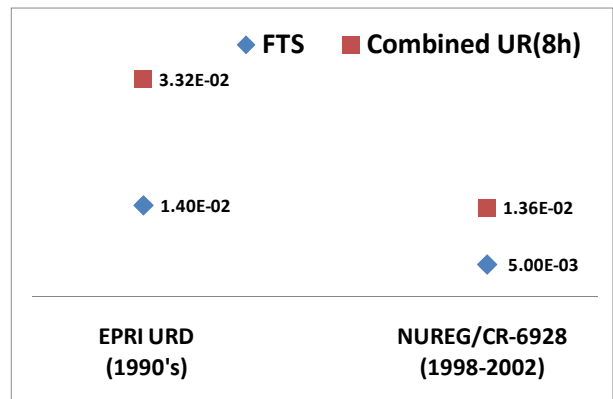


Fig. 1 Comparison of performance estimates for EDG unreliability in ALWR URD of EPRI and NUREG/CR-6928

EPRI의 ALWR URD보다 NUREG/CR-6928에서 약 59% 개선되었다.

GTG에 대한 EPRI의 ALWR URD와 NUREG/CR-6928의 데이터 민감도분석은 수행하지 않았다. 그 이유는 NUREG/CR-6928에 수록된 GTG의 데이터는 Table 7에 정리한 것처럼 단 2개의 GTG에서 추출된 데이터로 그 신뢰도가 낮기 때문이다.

US-APWR의 DC과정에서 NRC도 GTG 데이터의 신뢰성에 대한 검토 의견⁽¹⁴⁾을 미쓰비시 중공업(주)에 제시하였다. 이에 대한 답변으로 미쓰비시 중공업(주)는 GTG 품질에 대한 보고서⁽⁹⁾를 NRC에 제출하였다. 이 보고서에 제시된 GTG의 현장 데이터를 Table 8에 정리하였다.

GTG의 기동 신뢰도는 $(1-2/7394) \times 100 = 99.97\%$ 로 계산되었다. 즉, US-APWR GTG의 FTS는 3.0E-04/demand로 평가되었다. 이 값은 NUREG/CR-6928 DG의 FTS 5.0E-03/demand 보다 낮은 값이다. 즉, US-APWR의 GTG는 NUREG/CR-6928 DG보다 높은 기동 신뢰도를 가지고 있는 것으로 분석되었다. 그러나 US-APWR PSA에서 GTG의 기기 고장률 데이터는 NUREG/CR-6928의 DG 데이터를 사용하여 보수적으로 평가⁽¹⁵⁾하였다.

Table 8 Field data of GTG starting reliability

Number of Units	Start Attempts	Failed Starts
375	7394	2

Table 9 Component failure data for APR+ sensitivity analysis

기기	고장모드	고장률	비고
DG	FTS	2.41E-2/d	EPRI URD + 고유데이터 +베이지안처리
	FTR	1.55E-3/h	
GTG	FTS	2.50E-2/d	EPRI URD
	FTR	1.00E-5/h	

그리고 EPRI의 ALWR URD 기준으로 GTG의 CUR는 2.51E-02로 EDG의 CUR 3.32E-02 보다 약 24% 낮게 분석되었다.

5.2 노심손상빈도 분석

국내 APR+ PSA 모델에 AAC를 GTG로 대체하는 경우를 적용하여 민감도분석을 수행하였다. 국내 운전경험이 있는 DG의 기기 고장률은 국내 고유데이터를 반영하여 베이지안 처리를 하였다. 평가에 사용한 기기 고장률 데이터는 Table 9에 정리하였다.

APR+의 전기분야 주요 설계특징은 4-train 으로 설계된 것이다. 즉, APR+ 비상전원계통은 EDG가 4대로 기계적, 전기적으로 완전 독립된 4-train으로 설계되었으며, DG-AAC가 1대로 다수호기 공용으로 설계되었다.

DG-AAC를 GTG-AAC로 대체했을 때의 신고리 3,4 대비 노심손상빈도(Core Damage Frequency; CDF)의 민감도분석결과를 Table 10에 정리하였다.

경우 1은 현재 APR+의 설계특성인 4개의 EDG 및 1대의 DG-AAC를 고려한 경우이다. EDG와 DG-AAC 간의 공통원인고장(Common Cause Failure; CCF)을 고려하였으며 그 외에 해당기기 간의 유사율을 70%⁽¹⁶⁾ 적용하였다. 경우 2는 DG-AAC 대신에 GTG-AAC를 고려하여 GTG의 고장률을 적용하였으나 EDG와 GTG-AAC를 공통그룹에 설정하고 유사율을 70%로 적용하였다. 경우 3은 EDG와 GTG-AAC간의 CCF가 존재하지 않은 것으로 가정하여 EDG 4대간의 CCF만 고려하였다.

민감도분석 결과, APR+ DG-AAC 대신에 GTG-AAC로 대체하였을 경우의 CDF의 향상도는 1%

Table 10 Sensitivity analysis for APR+

경우	내용	신고리 3,4 대비 CDF 향상도	유사율
1	4 EDG & DG-AAC	26.5%	70%
2	4 EDG & GTG-AAC (CCF ²⁾ 고려)	26.5%	70%
3	4 EDG & GTG-AAC (CCF 미고려)	27.0%	0%

미만으로 신뢰성에 큰 변화가 없는 것으로 분석되었다. 이것은 경우 1에서 알 수 있듯이 APR+는 4대의 EDG가 설계되어 있어서 비상전원에 대한 신뢰도가 신고리3,4대비 이미 26.5%정도 향상되어 있기 때문에 AAC의 영향이 크지 않은 것으로 판단된다.

6. 결론

본 논문에서는 원자력발전소의 설계개념인 다양성을 고려하여 APR+ AAC의 구동형식을 선정하기 위하여 DG-AAC와 GTG-AAC의 민감도분석을 수행하였으며 그 결과는 다음과 같다.

(1) DG와 GTG의 물리적 특성과 US-APWR의 비상발전기 및 AAC에 대한 GTG 적용사례를 검토하였다.

- GTG는 DG보다 구조적으로 간단하여 정비주기가 길다는 장점을 가지고 있으나 국내 원자력발전소에 적용된 사례는 없음

- US-APWR은 비상발전기와 AAC에 모두 GTG를 적용하고 있음

(2) US-APWR에 적용된 GTG의 성능을 조사하고 EPRI의 ALWR URD 및 NUREG/CR-6928 이용하여 DG 및 GTG의 데이터 민감도분석을 수행하였다.

- US-APWR에 적용된 GTG의 신뢰도는 99.7%이며, 기동시간은 30초 이내의 성능을 가지고 있음

- 최신 데이터인 NUREG/CR-6928의 데이터는 EPRI의 ALWR URD보다 약 59%의 EDG 신뢰도가 향상됨

(3) APR+ PSA 예비모델에 AAC를 GTG로 대체하여 CDF민감도분석을 수행하였다.

- APR+의 DG-AAC를 GTG-AAC로 대체하였을 때 CDF 향상 정도는 1% 미만으로 신뢰성 측면에

서 큰 변화가 없음

- APR+는 신고리3,4대비 EDG가 2대에서 4대로 설계되어 있어서 비상전원에 대한 신뢰도가 상당히 향상됨

참고문헌

- (1) KHNP, 2002, *Review to select AAC for Shin-Wolsong Nuclear Power Plant.*
- (2) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2009, "New I&C Technologies for US-APWR," *Mitsubishi Heavy Industries Technical Review* Vol. 46, No.4.
- (3) 10CFR50.63, *Loss of all alternating current power.*
- (4) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1988, *Station Blackout*, Regulatory Guide 1.155.
- (5) EPRI, 1990, *Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document*, Vol. 10.
- (6) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2009, *Design Control Document for The US-APWR*
- (7) Ministry of Government Legislation, 2008, *Regulation on Technical Standards for Nuclear Reactor Facilities, Etc., 6 of Article 24.*
- (8) 10CFR50.2, *Definitions.*
- (9) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2010, *Qualification and Test Plan of Class 1E Gas Turbine Generator System*, MUAP-07024-NP, Rev.2.
- (10) KHNP, 2002, *Design Plan of AAC for Shin-Kori and Shin-Wolsong Nuclear Power Plant.*
- (11) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2010, *Initial Type Test Result of Class 1E Gas Turbine Generator System*, MUAP-10023-NP, Rev.0.
- (12) EPRI, 1990, *Advanced Light Water Reactor Utility Requirements Document*, Vol. 2, Rev.1.
- (13) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2007, *Industry-Average Performance for Components and Initiating Events at U.S. Commercial Nuclear Power Plants*, NUREG/CR-6928.
- (14) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 2009, "RAI NO. 394," Rev. 0.
- (15) Mitsubishi Heavy Industries, Ltd., 2009, *Design Control Document for The US-APWR Chap. 19 Probabilistic Risk Assessment and Severe Accident Evaluation*, MUAP-DC0019, Rev.2.
- (16) U.S. Nuclear Regulatory Commission, 1998, *Guidelines on Modeling Common-Cause Failures Probabilistic Risk Assessment*, NUREG/CR-5485, Rev.0.