가압열충격을 받는 원자로용기의 확률론적 건전성 평가

김종민† ·배재현*·손갑헌*·윤기석*·최택상*

Probabilistic Evaluation of RV Integrity Under Pressurized Thermal Shock

Jong-min Kim, Jae-hyun Bae, Gap-heon Sohn, Ki-seok Yoon and Taek-sang Choi

Key Words: Probabilistic Fracture Analysis(확률론적 파괴해석), Pressurized Thermal Shock(가압열충격), Reactor Vessel(원자로용기)

Abstract

The probabilistic fracture analysis is used to determine the effects of uncertainties involved in material properties, location and size of flaws, etc, which can not be addressed using a deterministic approach. In this paper the probabilistic fracture analysis is applied for evaluating the RV(Reactor Vessel) under PTS(Pressurised Thermal Shock). A semi-elliptical axial crack is assumed in the inside surface of RV. The selected random parameters are initial crack depth, neutron fluence, chemical composition of material (copper, nickel and phosphorous) and RT_{NDT}. The deterministically calculated K_I and crack tip temperature are used for the probabilistic calculation. Using Monte Carlo simulation, the crack initiation probability for fixed flaw and PNNL(Pacific Northwest National Laboratory) flaw distribution is calculated. As the results show initiation probability of fixed flaw is much higher than that of PNNL distribution, the postulated crack sizes of 1/10t in this paper and 1/4t of ASME are evaluated to be very conservative.

기호설명

K_I(응력확대계수), K_{IC}(균열진전 파괴인성치), RT_{NDT}(기준 무연성 천이온도)

1. 서 론

원자력발전소의 설계기준 가상사고에는 주증기 배관파단, 증기발생기 전열관 파단 및 냉각재 상실사고 등이 있다. 냉각재 상실사고시 비상노심 냉각수 주입에 의해 원자로용기에 열충격을 주며 이러한 조건에서 압력이 상승하면 원자로용기에 열충격과 가압이 동시에 발생하게 되는데 이를 가압열충격 사고라고 한다. 이러한 사고가 발생하면 원자로 노심을 보호하기 위하여 비상노심냉각수(15 ^{o}C)가 공급이 되며 원자로용기 내벽(290 ^{o}C)에는 약 275 ^{o}C의 온도차에 의한 열응력이 발생하고 압력 상승에 의한 응력이 증가하여 원자로용기에 균열이 존재하면 균열성장에 의하여 원자로용기의 건전성을 위협할 수 있다[1].

원자로용기의 건전성을 평가하기 위하여 결정론적 파괴해석방법이 이용되어왔다. 결정론적 파괴해석에서는 균열의 크기와 형상 및 재료특성의 변화와 같은 불확실성을 고려하지 못하였으나, 최근 확률론적인 방법의 도입으로 이러한 점을 보완하게 되었다. 본 논문에서는 이러한 불확실성을 고려하기 위하여 확률론적 파괴해석을 이용하여 가압열충격에 의한 원자로용기의 건전성을 평가하였다. 확률론적 파괴해석을 위한 확률변수

† 한국전력기술주식회사
E-mail : jmkim5@kopec.co.kr
TEL : (042)868-4105 FAX : (042)863-4862
* 한국전력기술주식회사

로는 초기균열길이, 중성자조사량, 재료특성인 구리(Cu), 니켈(Ni), 인(P)의 함량과 천이온도(RT_{NDT}) 등을 고려하였다. 고정균열과 PNNL 분포균열의 균열진전 확률의 계산은 Monte Carlo 기법을 사용하여 수행하였다. 응력확대계수는 응력값을 3차 다항식으로 근사하여 Influence Function 방법으로 계산하였다.

2. 확률론적 파괴해석 절차

2.1 해석자료[2]

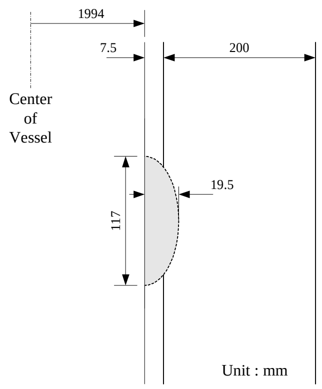

Fig. 1 The location and shape of the defect

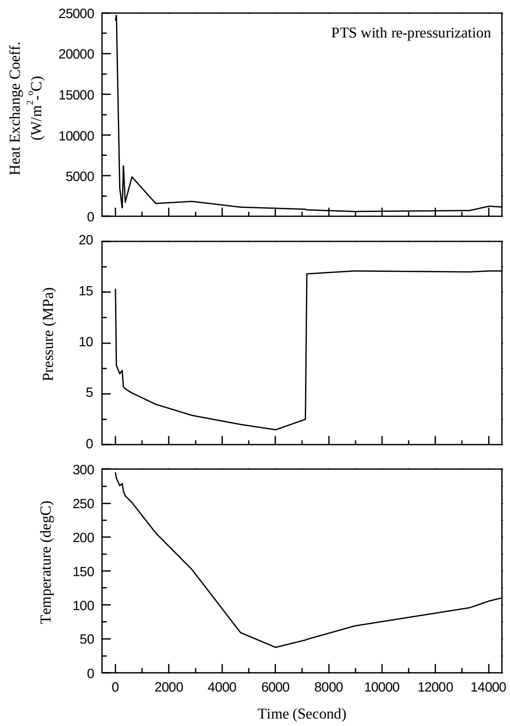

Fig. 2 Time histories of variables during PTS transient

해석에 사용된 원자로용기는 원자로내반경 1994 mm, 모재 벽두께 200 mm 및 클래드 두께 7.5mm이며, 결함의 형상은 반타원형 축방향결함이고 Fig. 1과 같다. 가압열충격 과도조건은 Fig. 2와 같이 0초에서 압력이 급격히 감소하여 저압상태(500 MPa이하)로 있다가 7200초에서 급격히 가압이 되는 것으로 이러한 압력변화는 전형적인 가압열충격 사건에서 나타난다. Fig. 3은 원자로 내벽에서의 중성자 변화량을 나타낸다.

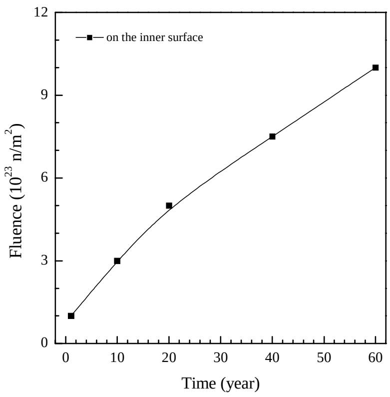

Fig. 3 Fluence on the inner surface

원자로용기 모재, 용접재 및 피복재의 온도에 따른 기계적 특성은 Table 1과 같다. 선택된 확률변수에 대한 통계특성(평균 및 표준편차)은 Table 2와 3에 있으며, Table 4는 PNNL에 따른 균열크기 분포이다.

Table 1 Material properties of RV

	Temp. (°C)	Base Metal & Welds	Cladding
Modulus of elasticity (MPa)	20	204000	197000
	300	185000	176500
Poisson's ratio	20-300	0.3	0.3
Thermal conductivity (W/m/°C)	20	54.6	14.7
	300	45.8	18.6
Thermal diffusivity $x10^{-6}$ (m²/s)	20	14.7	4.1
	300	10.6	4.3
Thermal expansion coeff. $x10^{-6}$ (1/°C)	20	10.9	16.4
	300	12.9	17.7

Table 2 Chemical composition & initial RT_{NDT}

	Initial RT_{NDT}	1 SD* uncertainties
Base metal	-20 °C	9 °C
Welds	-30 °C	16 °C
	% Copper(Cu)	2 SD uncertainties
Base metal	0.086	0.02
Welds	0.120	0.02
	% Phosphorous(P)	2 SD uncertainties
Base metal	0.0137	0.002
Welds	0.0180	0.002
	% Nickel(Ni)	2 SD uncertainties
Base metal	0.72	0.1
Welds	0.17	0.1

주) SD : Standard Deviation

Table 3 Shift formula & corresponding uncertainties

Base metal	mean	$\triangle RT_{NDT}$ = [17.3+1537*(P-0.008)+238*(Cu-0.08)+191*Ni^2*Cu]*$\varphi^{0.35}$
	1 SD	10 °C
Weld	mean	$\triangle RT_{NDT}$ = [18+823*(P-0.008)+148*(Cu-0.08)+157*Ni^2*Cu]*$\varphi^{0.45}$
	1 SD	6 °C
$\triangle RT_{NDT}$ normal distribution truncated between +3SD and -3SD		

2.2 온도 및 응력해석

확률론적 파괴해석을 수행하기 위해서 과도조건에 대한 온도분포와 열응력 및 압력 응력을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 본 논문에서는 Influence Function 방법을 적용하기 위하여 균열이 없는 상태의 응력분포를 계산하고, 이를 식 (1)과 같이 근사적으로 표시한 3차 다항식으로부터 응력확대 계수를 계산하였다.

$$s(x) = s_0 + s_1(x/t) + s_2(x/t)^2 + s_3(x/t)^3 \quad (1)$$

여기에서, s(x)는 원자로용기 내벽에서 x 만큼 떨어진 곳에서의 응력이고 t는 원자로용기의 벽 두께이다. 응력분포로부터 식 (1)의 계수인 s_0, s_1, s_2 및 s_3를 계산하면 반타원형 축방향표면균열에 대한 응력확대계수를 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

Table 4 Flaw depth & PNNL distribution

Flaw Depth(mm)	PNNL Dist.
2.1336	0.6446
4.2926	0.3037
6.4262	0.0413
8.5852	5.71E-03
10.7188	2.39E-03
12.8524	1.13E-03
15.0114	5.40E-04
17.145	2.72E-04
19.304	1.40E-04
21.4376	7.35E-05
23.5712	3.91E-05
25.7302	1.13E-05
27.8638	8.41E-06
30.0228	5.52E-06
32.1564	4.13E-06
34.29	2.96E-06
36.449	2.2E-06
38.5826	1.46E-06
40.7416	1.19E-06
42.8752	1E-06
45.0088	7.65E-07
47.1678	4.06E-07
49.3014	2.63E-07

$$K_I = (\pi a)^{0.5}[s_0 i_0 + s_1 i_1(a/t) + s_2 i_2(a/t)^2 + s_3 i_3(a/t)^3] \quad (2)$$

여기에서, a는 균열깊이이고 i는 영향계수이다.

파괴인성치 K_{IC}는 참고문헌 [2]에서 제시한 식 (3)~(5)를 사용하여 계산하였다.

$$K_{IC} = 36.5+3.1\exp[0.036(T-RT_{NDT}+55.5)] \quad (3)$$

$$(K_{IC})_{mean} = 1.43*(K_{IC}) \quad (4)$$

$$(K_{IC})_{SD} = 0.15*(K_{IC})_{mean} \quad (5)$$

식(3)에서 (5)까지는 ASME Code[3]에서 제시한 식과 동일하며, 식 (3)의 최대값은 220 MPa*$m^{0.5}$이고, 식(5)의 최대값은 15 MPa*$m^{0.5}$이다. T는 균열선단에서의 냉각재온도이고, RT_{NDT}는 기준 무연성 천이온도이다.

2.3 RT_{NDT} 계산

기준 무연성 천이온도 RT_{NDT}는 참고문헌 [2]에서 제시한 식(6)를 사용하여 계산한다.

RT$_{NDT}$ = RT$_{NDT0}$ + △RT$_{NDT}$ + M (6)

$$M = ERRTN\sqrt{(\sigma_{RT_{NDT0}})^2 + (\sigma_{\Delta RT_{NDT}})^2} \quad (7)$$

식 (6)에서 RT$_{NDT0}$는 RT$_{NDT}$의 초기치, △RT$_{NDT}$는 중성자 조사에 의한 RT$_{NDT}$의 증가량이고 M은 Margin이다. 식 (7)에서 ERRTN은 평균값이 0이고, 표준편차가 1인 정규분포에서 임의로 추출한 값이며, $\sigma_{RT_{NDT0}}$, $\sigma_{\Delta RT_{NDT}}$는 각각 RT$_{NDT0}$와 △RT$_{NDT}$의 불확실성을 고려한 1 SD(Standard Deviation)값이다.

2.4 해석절차

Fig. 4는 원자로용기의 가압열충격 해석절차를 나타낸 것으로 결정론적 방법과 확률론적 방법으로 이루어져 있다. 결정론적 방법은 해석에서 필요한 입력자료를 이용하여 유한요소해석 모델을 만들고 온도해석 및 응력해석을 통하여 응력분포계수(s_0~s_3) 및 영향계수(i_0~i_3)를 구할 때까지의 절차를 의미한다. 확률론적 방법은 선택된 주요 변수를 확률변수로 가정한 후 표본추출 기법을 이용하여 해석하는 방법으로 본 논문에서는 균열진전에 대한 확률을 Monte Carlo Method를 이용하여 계산하였다.

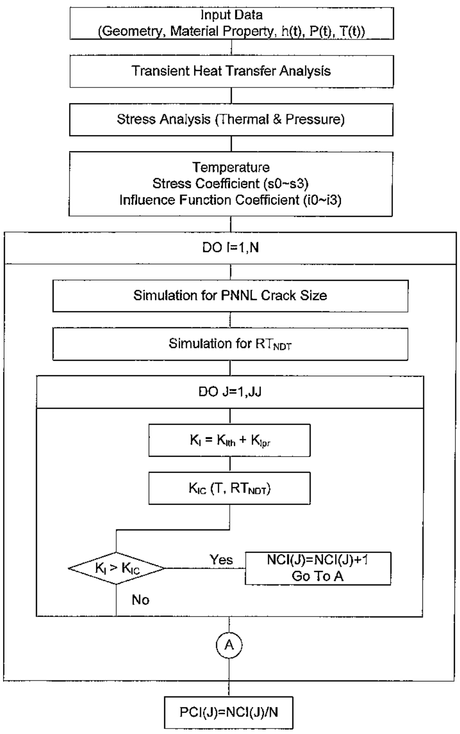

Fig. 4 The schematic diagram of the probabilistic fracture analysis

3. 해석결과 및 검토

3.1 RT$_{NDT}$

파괴인성치(K_{IC})는 식 (3)에서와 같이 T와 RT$_{NDT}$의 함수이고 RT$_{NDT}$에 따라 확률결과에 큰 영향을 미치므로 중성자조사 및 가동년수에 따른 RT$_{NDT}$를 계산하였다.

중성자조사에 따른 RT$_{NDT}$의 결과는 Fig. 5와 같으며 확률변수는 Table 2와 3에 제시된 RT$_{NDT}$의 초기치, 화학조성비 및 △RT$_{NDT}$의 변화량 계산식이다. 가동년수조사에 따른 RT$_{NDT}$의 결과는 Fig. 6과 같으며, 확률변수는 중성자조사에 따른 RT$_{NDT}$에 중성자조사량을 추가하였다.

Fig. 5와 6에서 RT$_{NDT}$는 중성자 조사량에 따라 대체적으로 선형적으로 증가하는 경향을 보이고 있으며, Fig. 5와 6이 별다른 차이를 보이지 않는 것은 RT$_{NDT}$ 값에 대한 중성자조사량 확률변수의 영향이 크지 않기 때문인 것으로 판단된다.

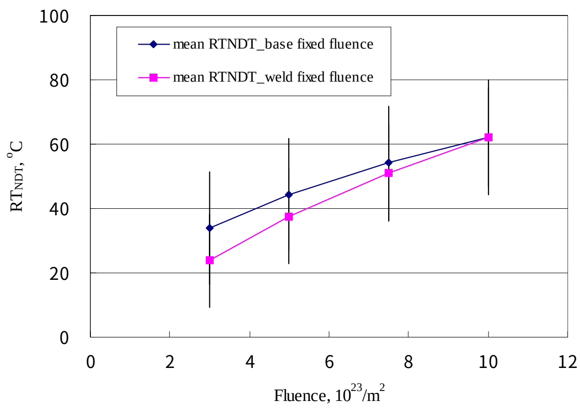

Fig. 5 RT$_{NDT}$ increase with fixed fluence

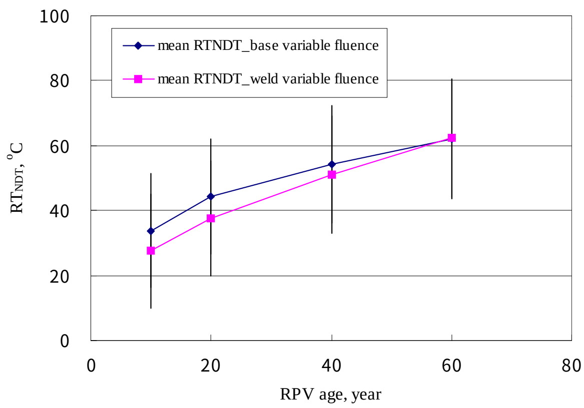

Fig. 6 RT$_{NDT}$ increase with variable fluence

3.2 균열진전 확률

종횡비(aspect ratio, a/2l)가 1/6이고, 두께비(thickness ratio, a/t)가 1/10인 Fig. 1과 같은 균열의 모재와 용접재에 대한 균열진전 확률은 각각 Fig. 7 및 8과 같다. 균열진전에 사용된 확률변수는 3.1절의 중성자조사에 따른 확률변수와 동일하다.

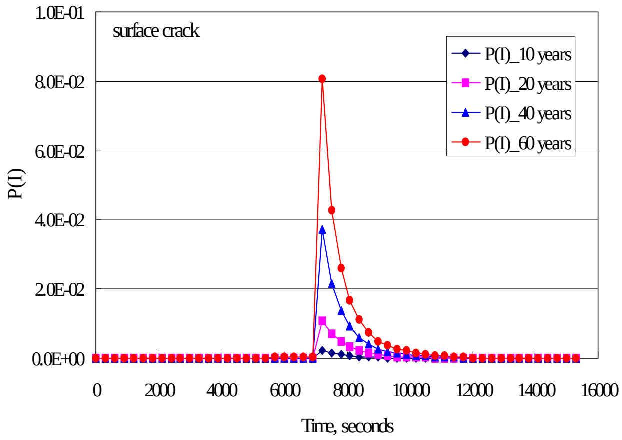

Fig. 7 Probability of crack initiation in base metal during PTS

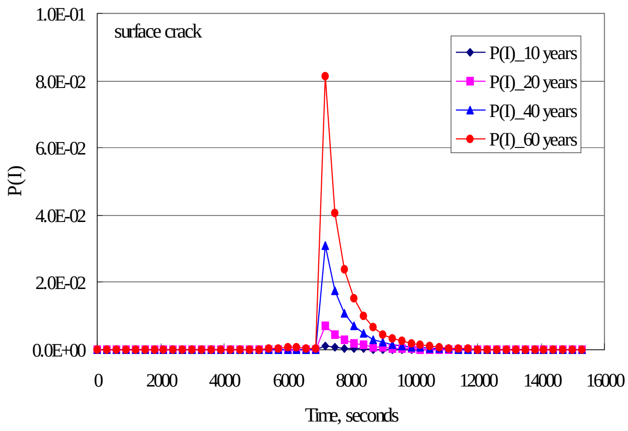

Fig. 8 Probability of crack initiation in weld metal during PTS

균열진전 판단기준은 K_I값이 K_{IC}값보다 크면 균열이 증가하는 것으로 판단하였다. Fig. 7과 8에서 7200초에 균열 진전확률이 가장 크게 나타나는 것은 Fig. 2에서 7200초에 압력이 급격히 상승하여 K_I값이 증가하였기 때문이다. Fig. 7과 8에서 가동년수가 증가할수록 이에 비례하여 RT_{NDT}값이 증가하여 K_{IC}값이 감소하므로 균열진전확률이 증가함을 알 수 있다.

Fig. 5와 6에서 가동년수 60년($10x10^{23}/m^2$)의 경우 모재와 용접재의 RT_{NDT}가 동일하므로 Fig. 7과 8에서 균열진전 확률이 일치한다. Fig. 5와 6에서 가동년수 40년($7.5x10^{23}/m^2$)과 20년($5x10^{23}/m^2$)의 경우 모재와 용접재의 RT_{NDT} 차이가 Fig. 7과 8에서 균열진전확률의 차이로 나타나는 것으로 볼 수 있다. 한편 가동년수 10년($3x10^{23}/m^2$)의 경우 Fig. 5와 6에서 RT_{NDT}의 차이가 있지만 Fig. 7과 8에서 균열진전확률에 차이가 없는 것은 K_I값이 너무 작어 균열 진전이 안 일어나기 때문이다.

3.3 PNNL 분포에 의한 균열진전확률

종횡비(aspect ratio, a/2l)가 1/6이고, 결함깊이가 PNNL 분포에 따른 모재와 용접재에서의 균열진전확률은 각각 Fig. 9, 10과 같다. 균열진전에 사용된 확률변수는 3.1절의 중성자조사의 확률변수에 PNNL 분포에 의한 균열의 크기변화가 추가된다.

3.2절에서와 같이 7200 초에 균열진전확률 분포가 가장 크게 나타났으며, 가동년수 증가에 따라 균열진전확률이 증가함을 알 수 있다.

7200 초에서 PNNL분포에 의한 균열진전확률(Fig. 9,10)이 3.2절의 1/10t 고정균열의 균열진전확률(Fig. 7,8)보다 작은 것은 PNNL 분포에서의 균열길이가 대부분 1/10t보다 작기 때문인 것으로 판단된다.

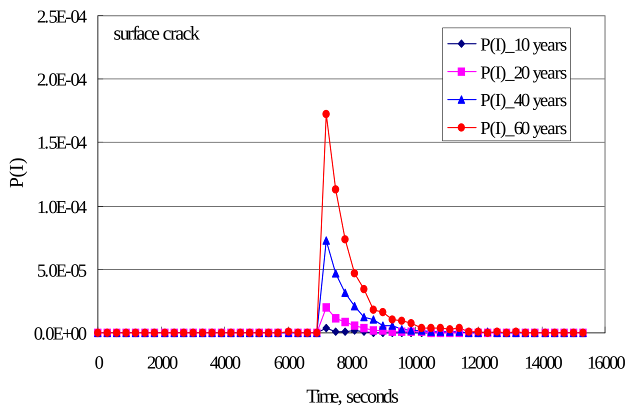

Fig. 9 Probability of crack initiation in base metal with PNNL flaw distribution during PTS

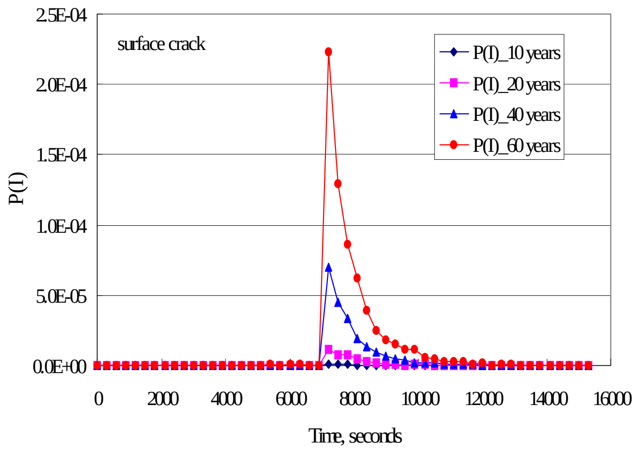

Fig.10 Probability of crack initiation in weld metal with PNNL flaw distribution during PTS

4. 결 론

가압열충격을 받는 원자로용기에서의 균열진전 거동을 확률론적 해석방법으로 평가하였으며, 수행내용과 결과는 다음과 같다.

(1) 확률론적 파괴역학 해석방법을 이용하여 여러 확률변수의 영향을 평가하였으며, 고정균열과 PNNL 균열분포에 대한 균열진전확률을 계산하였다.

(2) 중성자 조사량을 고정변수와 확률변수로 처리하여 평가한 결과 RT_{NDT} 값에는 별차이가 없었다. 즉, 모재 및 용접재에 있어서 각 가동년수에서의 RT_{NDT}는 유사한 값을 보였다.

(3) 고정균열(균열길이=1/10t=19.5 mm)은 PNNL 균열분포에 비해 균열진전확률이 수백배 큰 것으로 나타났다. 이는 PNNL 분포에서 약 94%의 균열이 4.3mm 미만으로서 이에 비해 본 논문에서의 고정균열크기가 매우 보수적이기 때문으로 판단된다. ASME Code에서 규정하고 있는 가상균열길이, 1/4t,는 이런 점에서 매우 보수적임을 알 수 있다.

참고문헌

(1) USNRC, 2002, “Technical Basis for Revision of the Pressurized Thermal Shock(PTS) Screening Criteria in the PTS Rule (10CFR50.61)”, Draft NUREG, Section 1.1

(2) OECD/NEA PWG3-IAGE Metal Group, 2004, "Probabilistic Structural Integrity of a PWR Reactor Pressure Vessel", pp. 1~28

(3) ASME, 1998, ASME Code Section XI, "Rules for Inservice Inspection of Nuclear Power Components", Appendix A, pp. 413