

특 집

韓·日原子力산업 세미나 발표 논문



<일본에서는 경수로의 수명연장 연구가 진행중이다(오아리시 연구소)>

발전소 수명연장기술 개발 최근 동향 12년짜리 프로젝트, 경수로 수명연장 이익 얻어내

스즈키 이사오
(鈴木 功)

일본 발전설비 기술검사 협회
東京 시험연구 센터
PLEX 담당주관

요 약

발전소수명연장(PLEX) 기술개발 계획은 1985년도 부터 시작된 12년짜리 프로그램이다.

목표는 기존 경수로의 수명을 연장시켜 더 많은 에너지를 얻어냄으로써 수명기간 발전원가(lifetime generating cost)를 줄이는 데 있다.

일본 JAPEIC가 현재 기술개발을 담당하고 있다. 발전소 부품을 조사·연구하는 PLEX프로젝트는 3단계로 나누어져 있다.

제1단계는 PLEX의 타당성에 주안점을 두었다.

제2단계에서는 입증시험 및 수명연장 기술의 평가방법을 개발중이다.

프로젝트에 대한 전반적인 평가는 제3단계에서 이루어진다.

특집 : 한·일 原子力산업 세미나

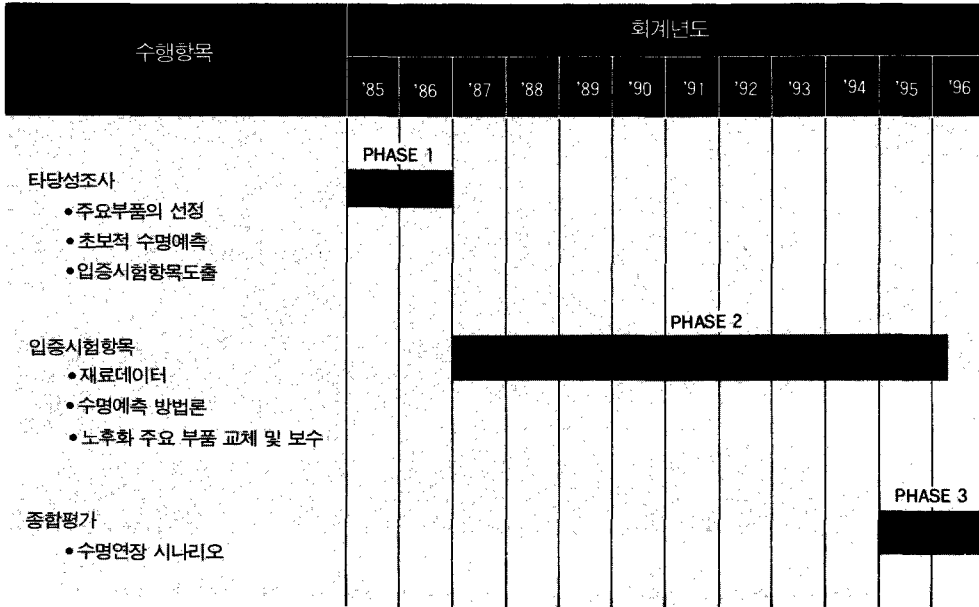


그림 1 :
PLEX 계획
공정 표

이 논문에서는 발전소 설비부품 재료의 舉動에 대한 종합 입증시험 및 經年變化 평가에 대하여 다음과 같이 현재 진행중인 주요 활동을 보고하고자 한다.

① 가압경수로의 水質條件과 같은 상태에서 저합금 鋼(low alloy steel) 및 스텐레스 鋼이 熱에 의해서 받는 經年變化에 따른 疲勞壽命

② 방사선을 쬐인 스텐레스 鋼의 파괴 강도(fracture toughness)

I. 서 론

발전소수명연장(PLEX) 기술개발 계획은 1985년도 부터 시작된 12년차 리 프로그램이다.

목표는 기존 경수로의 수명을 연장

시켜 더 많은 에너지를 얻어 넣으로써 수명기간 발전원가(lifetime generating cost)를 줄이는 데 있다.

通商産業省의 위임을 받아 일본 JAPEIC가 현재 기술개발을 담당하고 있다.

그림 1에는 PLEX 프로젝트를 3단계로 구분하고 있다.

제1단계 타당성 연구는 1986 회계년도에 완료되었는데 발전소 수명을 결정짓는다고 생각되는 주요 부품 및 구조물을 선정하고 주요 부품에 대해 수명을 잠정적으로 한번 추정해 보았다.

제2단계에서 입증시험을 할 대상 항목도 도출하였다.

제2단계의 입증시험은 현재 수행중인 PWR의 경우 대상 항목은 다음과 같다.

① 가압경수로의 水質條件 아래서 저합금 鋼 및 스텐레스 鋼이 열에 의해서 받는 經年變化에 따른 피로 수명

② 듀플렉스(duplex) 스텐레스 鋼의 열에 의한 經年變化

③ 방사선을 쬐인 스텐레스 鋼의 파괴 강도

④ 방사선쬐임에 의해서 유발된 스텐레스 강의 응력부식 거동

⑤ 經年變化를 감시하기 위해 방사선을 쬐이지 않은 저합금 강을 이용한 원자로 압력용기 감시시험의 재구성 기술

⑥ 補修技術用으로 원격제어되는 자동 half-bead용접기의 개념 설계

위에 언급된 시험 항목중 ⑤ 및 ⑥ 항목은 1989 회계년도에 완료 하였다.

제3단계 종합평가에서는 발전소 부

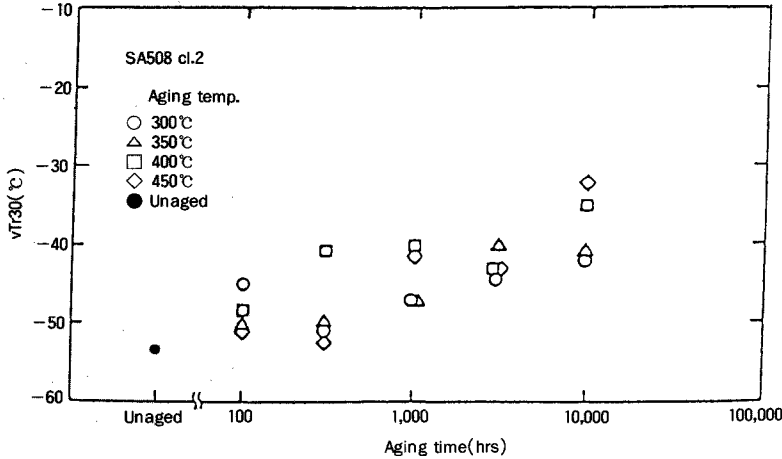


그림 2 :
 熱的經年변화후
 SA508 cl.2
 30ft-lb 천이도
 변화

품재료의 경년변화에 따른 성능퇴화 자료를 集積하고 발전소 수명연장 시나리오도 개발하고자 한다.

여기에서는 항목 ①, ②, ③에 대하여 지금까지의 추진현황을 중점으로 보고자 한다.

II. 가압경수로의 수질 조건과 같은 상태에서 저합금 鋼 및 스텐레스 鋼이 열에 의해서 받는 경년변화에 따른 피로 수명

1. 목 적

이 프로그램의 목적은 PWR 환경에서의 재료 성능퇴화가 피로 특성 및 피로강도에 미치는 영향을 정량적으로 이해하는데 있다.

2. 프로그램 개요

다음과 같은 2개의 시험으로 구성된다.

(1) 제1단계 시험

열에 의한 경년변화가 일으키는 재료 성질의 변화를 조사하고 80년간에 걸친 경년변화가 일어나도록 하는 熱處理方法을 결정한다.

(2) 제2단계 시험

80년간의 경년변화가 일어나게 하는 모의재료에 대해 疲勞 및 기타 데이터를 얻는다.

제1단계는 1989 회계년도에 완료되었다.

그 결과 스텐레스 316 母材의 경우 미세 구조 및 기계적 특성이 유의할 만큼 변하지 않음을 관찰할 수 있었

며 단지 스텐레스 강 316의 경우 용접 재료 및 열에 영향을 받은 부분만이 시험대상이 되어야 함을 알 수 있다.

3. 재 료

압력용기에 사용하는 SA508 cl.2, SA533B cl.1과 같은 저합금 강과 배관에 사용되는 오스테나이트 鋼(austenite stainless steel) SS316을 가압경수로 일차계통 壓力境界를 시험하는 재료로 선택하였다.

이 프로그램에서는 시험재료를 국내에서 처음 공급한 발전소 것과 화학적 조성이 가능한 같도록 조정하였다.

4. 시험 절차

인장(tensile), 사파충격(Charpy impact), 疲勞龜裂 성장률 및 파괴 강도 시험 등을 하였다.

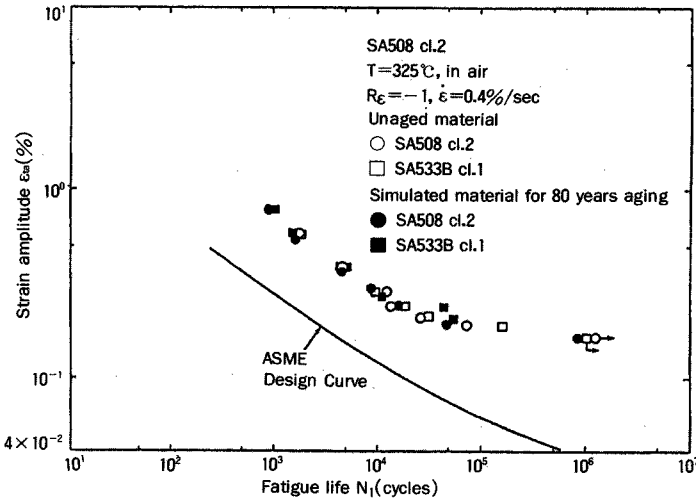


그림 3 : SA508 cl.2와 SA533B cl.1의 피로균열발생 시험결과

연성 및 사피 충격시험은 AS-TM A370 및 E8, ASTM A370 과 E23을 각각 사용하였다.

피로 균열 성장을 시험은 공기 중에서 그리고 325℃의 가압경수로 모의 환경에서 실시하였다.

파괴 강도시험은 ASTM E399 나 또는 E813에 따라 수행했는데 25mm두께 ITCT시편을 사용하였다.

5. 지금까지의 추진 현황

(1) 제1단계 실험 결과

① SA508 cl.2의 미세구조, 硬度 및 인장 특성은 300~450℃에서 10,000시간동안 열적 경년변화를 주어도 유의할 만한 변화가 발견되지 않았다.

② 그림 2는 SA508 cl.2가 30 ft-lb 천이(遷移)온도(vTr30)와 經年사이에 갖는 관계를 나타내고 있다.

vTr30은 450℃ 또는 450℃에서 10,000시간동안 열적 경년변화를 주었지만 약간의 변화가 있었을 뿐이었다.

③ 325℃에서 80년간 경년변화에 동등한 모의 열처리 방법은 Larson-Miller 매개변수를 이용하여 정할 수 있다.

그 결과 저합금 강에 대해 80년간 경년변화에 해당하는 모의 열처리방법은 445℃에서 3,400시간이었다.

(2) 제2단계 실험 결과

① 그림 3은 SA508 cl.2 SA533B cl.1의 피로시험 결과 사례를 보여 주

고 있다. 325℃ 공기중에서 경년변화가 없던 재료와 熱的 경년변화를 준 재료사이에는 유의할 만한 차이를 발견할 수 없었다.

ASME Section III의 피로 설계 커브에는 충분한 여유가 있었다.

② 그림 4는 SA508B cl.2를 가압경수로의 수질조건과 같은 상태에서 시험하였을 때의 피로 균열 전달 속도를 보여준다.

가압경수로와 같은 환경에서 열적 경년변화를 받은 재료는 경년변화가 없었던 재료에 비하여 피로 균열 전달 속도가 조금 빨라졌다.

③ 그림 5는 SA508 cl.2의 파괴 강도 시험 결과를 보여준다.

경년변화가 없었던 재료와 열적 경년변화를 겪은 재료의 파괴강도 사이에는 유의할 만한 차이가 없었다.

오스테나이트 스텐레스 강(austenitic stainless steel), 탄소 강(carbon steel) 및 니켈 합금 강(nickel base alloy)에 대한 실험은 현재 진행 중이다.

III. 방사선을 쬐인 스텐레스 鋼의 파괴강도

1. 목 표

이 프로그램의 목표는 원자로 内部 構造物이 방사선에 노출되어 脆化(embrittlement)되는 정도를 평가하는

발전소 수명연장 기술개발 최근동향

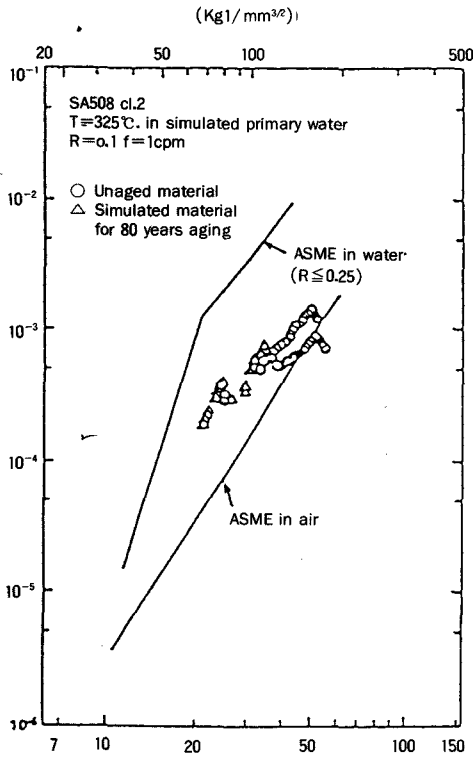


그림 4 : 피로균열 전파율(전달속도) 시험결과 (모의냉각수에서의 SA508 cl.2 재질)

기술을 확보하는데 있다.

2. 프로그램 개요

방사선을 쬐인 재료에 대해 인장, 파괴강도 및 피로균열 성장속도 시험을 실시하여脆化정도, 원자로부터 분 석 및 종합적인 파괴역학 평가를 명확히 알 수 있게 하는 데이터를 얻었다.

3. 재 료

시험 대상이 되는 원자로 내부 구조물 부품은 표 1에 정리되어 있다.

中性子束 測定管(flux thimble)에 대한 중성자 最大 照射量(fluence)은 7.5×10^{22} 개/cm²(E>0.1 MeV)이었다.

4. 시험 절차

인장강도는 기본적으로 ASME E8에 따라서 스크류 형식의 Instron 시

험기를 사용하여 측정하였다.

三點式 變形棒 技法을 이용하여 뜨거운 공기속에서 파괴강도시험을 하였고 피로 균열 성장속도는 가압경수로의 수질조건과 같은 상태에서 실시하였다.

5. 지금까지의 추진 상황

(1) 기계적 시험

인장시험은 常溫, 300°C, 350°C의 공기속에서 실시되었다.

그 중성자속 측정관에 대한 결과를 그림 6에 나타내었다.

降伏應力과 인장 강도는 중성자 照射量이 $10^{21} \sim 10^{22}$ /cm²이었을 때 급격히 증가하였다.

중성자 照射量이 높은 재료를 높은 온도에서 시험한 결과 연성(ductility)이 줄어 드는 것으로 나타났다.

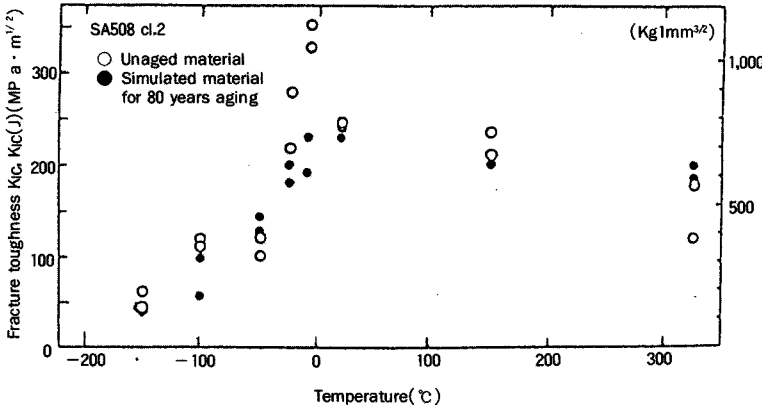
중성자 照射量이 높은 시료와 낮은 시료 모두 SEM 파괴기법에 따른 dimple rupture에 의해 파괴되었다.

중성자속 측정관에 대한 파괴강도 시험 결과를 그림 7에 보였다.

균열이 2mm일 때의 破損 係數(tearing modulus)를 계산하였다.

Jc점들이 널리 散布된 것은 블런팅(blunting)과 균열 시작 工程사이에 명확한 구분이 없기 때문이다. 이것은 스텔레스 강과 같이 연성이 좋은 재료가 가진 일반적인 성질이다. 중성자 照射에 의한 취화의 경향은 파손계수

그림 5 : 파괴강도 시험결과(SA508 cl.2)



에 의해 명확히 알 수 있다.

(2) 방사선조임에 따른 脆化 모델

Johnson 등이 개발한 모델에 항복 응력 모델과 Hamilton 등이 개발한 파괴 강도 모델을 변형하여 방사선조임에 따른 취화 정도를 예측하는 잠정적인 모델을 개발하였다.

IV. 종합

(1) 가압경수로의 수질조건과 같은 상태에서 저합금 鋼 및 스테인레스 鋼이 열에 의해서 받는 경년변화에 따른 피로 수명

지금까지 우리는 저합금 강에 대해 서 제2단계 시험을 수행하였다.

우리는 열적 경년변화를 겪은 저합금 강에 대하여 피로 커브를 얻을 수 있었는데 ASME Section III의 피로 설계 커브에 대해 충분한 여유를 갖고 있었다.

앞으로 이러한 결과를 이용하여 저합금 강의 건전성을 평가할 예정이다.

(2) 방사선을 쬐인 스테인레스 鋼의 파괴 강도

이 프로그램에서는 방사선에 노출

된 스테인레스강의 재료성질을 구하였다.

지금까지 얻은 시험결과는 중성자 쬐임량이 $10^{21} \sim 10^{22}/\text{cm}^2 (E > 0.1 \text{ MeV})$ 이상이면 인장강도와 파괴강도가 확실히 떨어진다는 것을 보여준다.

또한, 방사선조임에 따른 취화를 예측하는 모델도 개발하였다.

가압경수로의 수질조건과 같은 상태에서 피로 균열 성장속도와 같은 데이터를 구하고 예측모델과 파괴 역학을 이용하여 방사선에 노출된 스테인레스 강의 건전성을 평가하는 작업을 앞으로 계속할 것이다.

앞에서 언급한 바와 같이 제2단계 프로그램은 착실히 진행되고 있다.

앞으로 발전소 부품의 경년변화에 따른 성능저하 데이터를 더욱 많이 集積하고 분석할 것이다.

이와 동시에 종합평가단계인 제3단계 프로그램을 추진할 것이며 이러한 데이터와 분석결과에 근거하여 발전소 수명연장 시나리오를 개발하고자 한다.

표 1 : 시험대상 재료

부 품 명	재 료	中性子照射量 ($n/\text{cm}^2, E > 0.1 \text{ MeV}$)
中性子束측정관	Type 316	최대치 : 10^{22}
열차페 Bolt	Type 316	최대치 : 10^{21}
연료 Nozzle	Type 304	최대치 : 10^{21}

발전소 수명연장 기술개발 최근동향

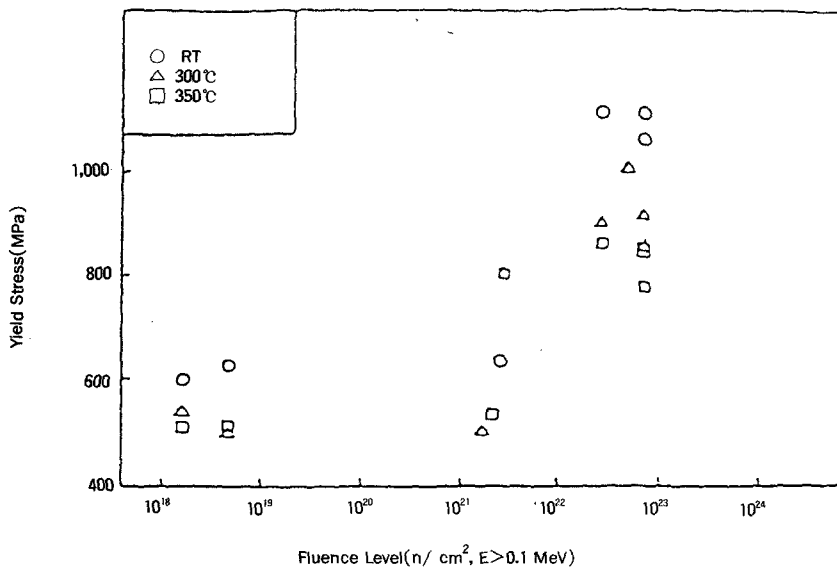


그림 6 :
방사선 照射된
中性子束 측정관의
항복응력

그림 : 7

방사선 照射된
中性子束 측정관의
Tearing
Modulus

