

輕水爐壓力容器에 關한 最近話題

— 原子爐壓力容器的 製造 —

原子爐壓力容器는 제조과정에서 非破壞檢査 등에 의해서 엄격하게 그 品質이 관리되고 있으며 또한 近年에는 稼動中檢査 (ISI)에서 作業원 의 피폭저감과 보다 高品質의 品質向上을 위해서 여러가지의 技術改善努力이 경주되고 있다.

1. 壓力容器的 製造와 檢査

1.1 壓力容器的 製造管理

原子爐壓力容器的 製造순서는 그림 1 과 같다. 壓力容器鋼材에 대해서는 全體積에 걸친 초음파 탐상시험 (UT), 鍛造材에 대해서는 全表面에 걸친 磁粉探傷試驗 (MT), 또는 浸透液探傷試驗 (PT)을 실시하여 健全함을 확인하는 동시에 所定의 機械試驗을 실시하여 충분한 특성을 갖고 있음을 확인하고 있는데 그외에 壓力容器가 제조 중에 받는 熱處理나 加工에 대한 영향도 고려되고 있다.

鋼板의 경우를 例로 들면, 鋼板은 素材메이커에서 제조된 후 壓力容器製造會社에 引渡되어 그림 1 에서와 같은 순서로 熱間屈曲, 燒入, 燒戻하고 여러가지의 機械加工, 용접 및 용접후열처리 (應力除去燒鈍)를 施工한 후 體積檢査, 表面檢査에 의해서 용접부의 健全성을 확인한 다음 耐壓試驗을 實施하여 完成한다. 또 경우에 따라서는 熱間屈曲 대신에 冷間加工을 施工한다.

이와 같이 壓力容器製造中에 사용하는 材料가

받는 熱履歷 또는 冷間歪는 재료의 機械的 性質, 특히 破壞靱性特性에 큰 영향을 줄때도 있으므로 鋼材의 健全성을 확인하기 위해 테스트·쿠편試驗을 실시한다. 즉, 이 시험은 압력용기제조 중에 鋼材가 받는 동등한 熱履歷 또는 冷間加工을 機械性 試驗片에 부여하여서 材料試驗에 제공해서 規定値를 만족하는 것을 확인하고 있다

2. 壓力容器的 製造技術

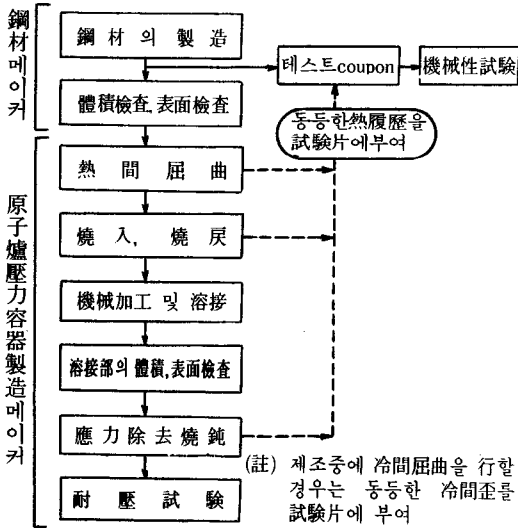
2.1 壓力容器的 構造

原子力發電機器는 稼動中의 健全성을 확인하기 위해서 原子力플랜트의 정기검사시 稼動中檢査 (ISI)가 實施되고 있다. 日本의 경우 原子爐 壓力容器는 第1種容器로 분류되기 때문에 耐壓 용접조인트 전부가 초음파탐상검사의 대상이 되며 매년 정해진 범위의 檢査가 행해진다.

이들 검사는 高放射能環境에서의 作業이기 때문에 종사하는 檢査員의 放射線 被曝低減對策이 중요한 과제가 되고 있다. 이와 같은 要求에 應하여 ISI의 對象이 되는 용접조인트를 적게 하기 위해서 종래에 3枚의 鋼板으로 제조되었던 壓力容器胴體의 링을 2枚의 鋼板으로 製造한다. 또한 數枚의 鋼板을 용접하여 제조하던 壓力容器 下鏡部도 下鏡페달 및 下鏡돔을 一體의 鍛造品으로 구성하게 되었다.

表 1 에 이들 ISI대상 용접선의 低減效果를 나

〈그림 1〉 原子爐壓力容器的 製作順序



〈表 1〉 最近 原子爐壓力容器的 溶接線 低減 (1100MW BWR-RPV의 例)

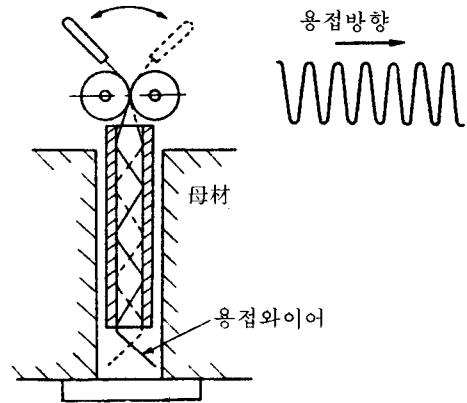
	既設壓力容器	最近의 壓力容器	低減率 (%)
上鏡	49	44	10
胴體	148	133	10
下鏡	66	19	71
合計	264	196	26

타냈는데, 그 효과는 下鏡에서 크게 나타나고 있다. 下鏡의 돔부분은 종래 3~4枚의 鋼板으로 제조하였었는데, 이 부위에 제어봉 housing의 管群을 관통시켜서 결합시키기 때문에 高방사능 분위기와 함께 運轉開始後 용접부위로의 접근이 대단히 곤란했다. 따라서 下鏡돔의 一體化에 의해 용접선의 저감과 ISI의 作業성이 대폭 개선되었다.

또한 壓力容器胴體에 대해서는 素材鋼板의 대형화에 의해서 용접조인트의 감소가 도모되고 있는데, 최근에는 세로방향의 용접조인트를 없애기 위해 胴體링을 一體製造하는 一體鍛造링도 검토되어 實用化의 단계에 들어서고 있다.

3. 壓力容器的 溶接技術

〈그림 2〉 狹開先MIG溶接 와이어벤딩의 原理와 weeping패턴



壓力容器的 健全성을 확보하기 위해서는 사용하는 鋼材의 健全성을 확보함과 함께 용접조인트에 대해서도 母材와 동등이상의 성능을 갖고 있음을 확인하는 것이 필요하다.

壓力容器的 主要한 용접조인트는 종래 Sub-Merged Arc Welding(SAW)이 주로 사용되어 왔다. 최근에는 壓力容器와 같이 두께가 두꺼운 鋼板의 용접방법으로 品質向上 등의 관점에서 SAW를 대체하는 여러가지의 용접방법이 검토되어 實機에 적용되고 있다.

최근의 용접방법의 一例로 이미 BWR 壓力容器에 적용되고 있는 狹開先MIG溶接法의 가장 큰 특징은 그림 2에서와 같이 용접와이어를 波狀의 塑性變形을 주면서 연속공급하는 것이며, 이 방법에 의해 용접아크가 自動的으로 搖動하여 溶込不良 등 용접결함이 생기기 쉬운 開先壁面에서의 溶込을 충분히 하며 또한 1層1패스로 용접을 시공하기 때문에 종래의 SAW에 비해 결함의 발생율을 낮게 할 수 있다.

狹開先MIG溶接은 SAW에서와 같이 용접플럭스를 사용하지 않으므로 그림 3에서와 같이 용접플럭스에서 부터의 水素 侵入이 없고 용접후 수소 갈라짐 등의 결함도 발생하기 어렵다.

狹開先MIG溶接法의 溶着金屬量이 그림 4에서와 같이 板두께 200mm의 경우, SAW의 약 1/4이

됨은 ISI의 범위를 적게 하고 검사원의 피폭저감, 定檢工程의 단축에 이어진다. 특히, 溶接入熱이 종래의 SAW에 비해서 약반으로 줄어들며 溶着金屬 및 용접열영향부 (Heat Affected Zone, HAZ)로의 열영향이 적고 우수한 破壞靱성을 갖는 용접조인트를 얻을 수 있다.

4. 原子爐壓力容器的 檢査 및 耐壓試驗

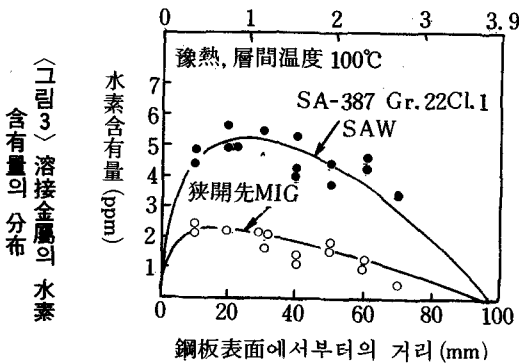
4.1 溶接部の 檢査

원자로 압력용기는 충분한 시험, 검사를 받은 鋼材를 열처리, 가공 및 용접하여서 제조된다.

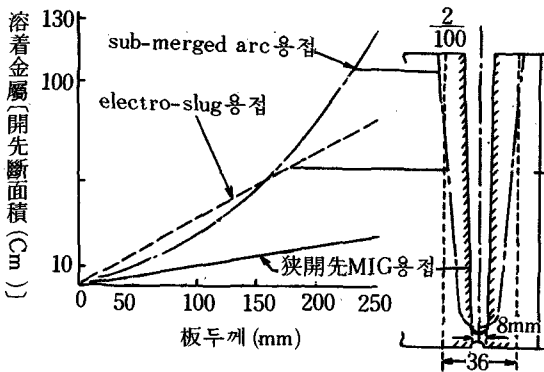
그림 1에 나타난 각 작업단계는 모두 중요한 작업공정으로서 충분한 검사가 이루어지며 健全性이 보증되고 있다. 그림 5는 그 예로서 용접부 검사 현황이다.

4.2 耐壓試驗의 變遷과 現況

壓力容器에서 稼動前 耐壓試驗이 규격화된 것



〈그림 3〉 溶接金屬의 水素含有量의 分布



〈그림 4〉 狹開先 MIG溶接의 開先形狀 및 溶着金屬量

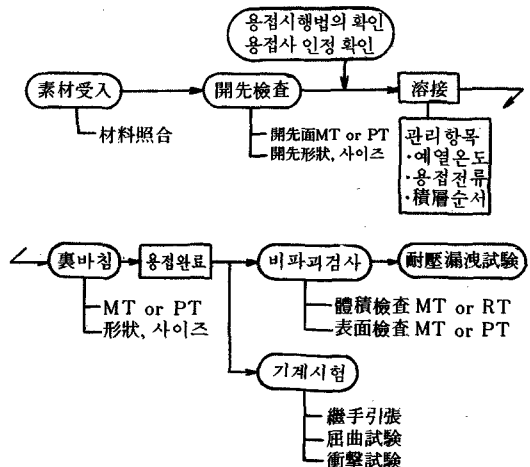
은 1914년에 ASME Sec. I, Power Boilers에서였다. 이 시기에 耐壓試驗은 漏洩試驗과 壓力容器的 強度 確認을 目的으로 규정되었다. 이 기준이 규정되기 이전에는 해머로 壓力容器를 두들겨 그 소리로 결함의 유무를 확인하도록 요구되었다.

그 당시는 비파괴 검사기술도 불충분해서 耐壓試驗이 유일한 壓力容器的 健全성을 확인하는 방법이었으나, 非破壞檢査技術의 진보에 따라 오랜 세월에 걸쳐서 개선되어 왔다. 최근에 와서는 破壞力學的 評價方法의 진보에 의해 크게 改訂할 것이 필요하게 되었다.

1919년부터 1930년頃까지 설계기준의 적용범위는 리벳구조의 압력용기에 한정되었으나, 1930년에 처음으로 設計基準에 용접구조의 압력용기가 대상으로 적용되었다. 이 시기의 내압 시험에서는 시험압력으로 壓力容器胴部에 肉眼으로 관찰할 수 있을 정도의 塑性變形이 생길때까지의 높은 壓力을 負荷하는 것이 일반적으로 실시되었는데, 改善된 基準에서는 溫度補正을 포함해서 運轉壓力의 2배까지로 줄인 시험압력이 규정되었다.

그러나 이 경우에도 압력용기의 局部에 塑性變形이 발생한다. 당시, 壓力容器的 設計應力

〈그림 5〉 原子爐壓力容器溶接部の 檢査



은 規定引張強度의 1/5이었으므로 耐壓試驗時에 생기는 應力은 引張強度의 2/5이거나, 降伏強度의 4/5에 상당하였다.

1950년에 ASME Sec. VIII에서 설계응력을 規定引張強度의 1/4로 올리고, 耐壓試驗時의 시험압력을 설계 또는 운전압력의 1.5배로 규정하였다. 그 결과 耐壓試驗時에 생기는 응력은 規定引張強度의 1/3이거나, 降伏強度의 3/4에 상당하게 되었다.

이 値는 상당히 보수적인 値였는데, 壓力容器的 構造不連續部에 應力集中이 생겨서 降伏되어 局部的인 變形이 생길 가능성이 생겼다. 그 다음에 ASME Sec. III에서 試驗壓力로 설계압력의 1.25배로 규정하였다. 試驗壓力를 1.5배에서 1.25배로 낮춘 이유는

(1) Sec. III에서와 같은 限界設計에 의한 비교적 얇은 두께의 容器에 대해서는 局部에 큰 변형이 생길 가능성이 있다는 것,

(2) ASME Sec. III에서는 보다 높은 허용응력을 채택하고 있으므로 기본적으로는 Sec. VIII로 설계압력의 1.5배의 水壓試驗時에 생기는 應력과 같은 레벨로 유지할 것,

(3) 空壓試驗에서는 耐壓試驗과 비교해서 加壓가스에 內藏되어 있는 축적에너지에 의한 解放時의 위험을 감소시킬 것 등이 있다.

空壓試驗에서는 압력용기의 膜應力을 最小規定降伏強度의 약2/3까지 억제하게 된다. Sec. III에서 규정된 설계압력의 1.25배의 시험압력이 負荷되면, 最小引張強度의 약2/5 또는 降伏強度의 약4/5에 상당하는 應力이 壓力容器部材에 발생하게 된다.

1953年 Pressure Vessel Research Committee (PVRC)의 報告書에서는 160,000件的 壓力容器試驗中 4,000件 以上の 압력용기에 대해 현저한 결함이 耐壓試驗에 의해 검출되었고, 이중 21個는 상당히 중대한 상태였는데, 이들 중대한

결함은 材料欠陥, 異材溶接조인트材 등에서 발생되었다. 이와 같이 耐壓試驗은 누설 및 결함 등을 발견하는 것이 가능하다.

英國原子力委員會 및 美國原子力委員會에서는 1950年代 및 1960年代에 압력용기의 強度에 미치는 耐壓試驗의 영향을 평가하기 위해서 많은 研究를 실시하였는데, 이들 연구는 모두 耐壓試驗에 대한 要求를 바꿀 必要가 없다고 결론하였다.

稼動을 시작한후의 耐壓試驗에 관해서 ASME Sec. XI가 發刊되기 이전에는 특정한 기준은 없고, 일반적으로 壓力바운더리에서의 構造機器의 운전보수를 위해 原子力플랜트를 보유한 電力會社에 의해 耐壓試驗이 실시되었다. 한편, 壓力容器的 강도에 미치는 過壓試驗의 効果와 稼動中檢査에 관한 연구에 의해서 過壓試驗에 의한 稼動中檢査의 비파괴검사 요구를 되도록 감소시킬 것이 희망되어 지고 있었다. 그러나 過壓試驗時에는 稼動中에 耐壓負荷에 의해서 생기는 비틀어짐(歪)보다 더 큰 비틀어짐이 생기므로 미리 數値解析을 하여 충분히 조사할 필요가 있다는 것이 지적되고 있다.

稼動前의 耐壓試驗에서 壓力容器가 Sec. III에 의한 耐壓試驗이 실시되었다면, 稼動中에 용접보수가 행하여진 후의 耐壓試驗은 다른 系統의 構造機器에 손상을 주지 않도록 하기 위해서 定常運轉壓力의 1.1배의 耐壓試驗이 인정되게 되었다. 이와 같은 耐壓試驗關係의 기준을 表2에 나타내었다.

耐壓試驗의 첫째 목적은 機器의 稼動期間中에 그 건전성이 충분히 유지되는 것을 실증하기 위한 確認試驗이며, 두번째 목적은 이들 機器의 各種 結合部에서 부터의 漏洩 有無를 확인하기 위함이다.

그러나 현재 ASME Sec. XI에서의 稼動中 耐壓試驗과 漏洩試驗은 그 試驗壓力가 각각 1.1 P_o 및 1.0 P_o (P_o는 定格運轉壓力)에서 행해도

〈表 2(a)〉 耐壓・漏洩試験基準

項目 規格名	製 作 時							
	耐 壓 試 験				應力(膜應力)制限		漏 洩 試 験	
	水 壓 試 験		氣 壓 試 験		水壓試験	氣壓試験	水壓試験	氣壓試験
	試験壓力 (P_{HT})	温度 유지時間	試験壓力 (P_{PT})	温度 유지時間			試験壓力 温度	試験壓力 温度
MITI規格 第1種容器, 第1種管	$1.25 \times P_m \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	-	$1.25 \times P_m \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	-	0.9 σ_y	0.9 σ_y	P_{HT}	
第2種容器	$1.5 \times P$	=	$1.25 \times P_D$	=			P_{HT}	P_D
第3種容器, 第2種管	$1.5 \times P_m$	=	$1.25 \times P_m$	=			P_{HT}	
第3種管		=	$1.25 \times P_m$	=				
電氣協會 JEAC-4205(1974)								
ASME Code Sec.Ⅲ	$1.25 \times P_D \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	≥10分	$1.25 \times P_D \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	≥10分	0.9 σ_y	0.9 σ_y	$\frac{P_D, 3/4 P_{HT}}$	$\frac{P_D, 3/4 P_{PT}}$
ASME Code Sec.Ⅴ Div. 1	$1.5 \times P_D \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	=	$1.25 \times P_D \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	=			$\frac{2}{3} P_{HT}$	$\frac{5}{4} P_{PT}$
ASME Code Sec.Ⅴ Div. 2	$1.5 \times P_D \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	=	$1.15 \times P_D \times \frac{S_m(T)}{S_m(T_0)}$	=	0.9 σ_y	0.8 σ_y	$\frac{P_D, 3/4 P_{HT}}$	$\frac{P_D, 3/4 P_{PT}}$
ASME Code Sec. Ⅺ Class 1.								
Class 2								
Class 3								
BRITISH STANDARD 1500	$1.5 \times P_{Eq}$	≥30分	$1.15 P_{Eq}$	≥30分	-	-	P_{HT}	P_D
1515	$1.3 \times P_{Eq}$	≥30分	$1.3 P_{Eq}$	≥30分	-	0.9 σ_y	P_{HT}	≤1.1 P_D
3915	$1.25 P_{Eq}$	≥30分	$1.25 P_{Eq}$	≥30分	0.9 σ_y	0.9 σ_y	P_{HT}	P_{PT}
AD-MERKBLA - TTER B-O (西獨)	$1.3 \times P_m$							
ISO/Dis 2694	$1.25 P_{Eq}$	≥30分	$1.1 P_{Eq}$	≥30分	0.9 E_{120}	0.9 E_{120}	P_{HT}	P_{PT}
Swedish Code	$1.3 \times P_D$	≥5分	$1.1 P_D$	≥5分			-	P_D
一般高壓ガス	$1.5 \times P_D$	5~20分	$1.25 P_D$	5~20分				P_D
HPI 提案	$1.5 \times P_{Eq}$ ($1.25 P_{Eq}$)	≥10分	$1.25 P_{Eq}$ ($1.1 P_{Eq}$)	≥10分	0.9 σ_y	0.9 σ_y	P_{Eq}	P_D
壓力容器構造規格	$1.5 P_D$	-	$1.25 P_D$	-	-	-	-	
JIS 特定規格案	$1.25 P_{Eq}$	≥30分	$1.1 P_{Eq}$	≥30分	0.9 E_{120}	0.9 E_{120}	P_{HT}	P_{Eq}

註 P_D : 設計壓力 P_m : 最高使用壓力

T : 試験温度 T_0 : 使用温度

P_0 : 定常運轉壓力(100%出力時)

$$P_{Eq} = P_D \times \frac{f_n}{f_t} \times \frac{t_a}{t_d} \text{ kg}$$

E_{120} : 0.2%耐力

f_n : 常温에서 材料의 許容應力 規定值
(kg/mm^2)

f_t : 設計温度에서의 許容應力(kg/mm^2)

t_a : 實際로 使用하는 板의 두께(mm)

t_d : 設計壓力에서의 計算두께 (mm)

P_{HT} : 水壓試驗壓力

P_{PT} : 氣壓試驗壓力

σ_y : 降伏應力值

S_m : 設計應力強度

$S_m(T)$: 温度 T 에서의 設計應力強度

(表 2 (b)) 耐壓・漏洩試驗基準

稼 動 期 間 中						備 考	
耐 壓 試 驗				漏 洩 試 驗		液壓試驗：水壓試驗에 準 한다	
水 壓 試 驗		氣 壓 試 驗		水壓試驗	氣壓試驗		
試驗壓力	溫 度 유지時間	試驗壓力	溫 度 유지時間				
							MITI規格(告示501號)에 서는 稼動期間中の 耐壓 試驗을 特히 區別하고 있 지 않으므로 製作時的 規 格이 全期間에 걸쳐서 適 用된다.
$>1.1 \times P_0$	$>38^\circ\text{C}$	-	-	-	-	$>P_0$ $>38^\circ\text{C}$	-
$>1.1P_0$	$>100^\circ\text{F}$ $>4\text{時間}$					$>P_0$ $>100^\circ\text{F}$	
$>1.25P_0$	$>100^\circ\text{F}$ $>4\text{時間}$						
$>1.1P_0$	$>100^\circ\text{F}$ $>4\text{時間}$						
							()内는 1,000kg/cm ² 以上

무방함이 인정되고 있다. Sec. III에서 기술되고 있는 稼動前 耐壓試驗의 概要는 다음과 같다.

- (1) 脆性破壞를 방지하기 위해서 耐壓試驗時의 온도를 $RT_{NDT} + 60^\circ\text{F}$ 以上으로 한다.
- (2) 耐壓試驗壓力을 設計壓力의 1.25배로 한다.
- (3) 耐壓試驗時 壓力유지시간을 10분 이상으로 한다.

(4) 1次一般膜應力強度는 耐壓試驗溫度에서 機器材料 降伏強度의 90%를 넘어서는 안된다.

(5) [1次膜應力強度+屈曲應力強度]는 耐壓試驗溫度에서 기기재료 항복강도의 135%를 넘어서는 안된다.

(6) 外壓은 135%를 넘어서는 안된다.

(7) 耐壓試驗의 回数가 10회를 넘을 경우에는

疲勞解析을 실시할 것.

또한 稼動開始後의 耐壓試驗은 ASME Sec. XI 에 기술되어 있는데, 그 내용은 다음과 같다.

(1) 脆性破壞를 방지하기 위해서 耐壓試驗時의 온도를 100°F (38°C) 이상으로 한다.

(2) 耐壓試驗壓力은 각 클래스의 콤포넌트마다 다음과 같이 실시한다.

a) 클래스 1 콤포넌트의 시험압력은 100% 定格出力에서 公稱運轉壓力의 1.10배 이상이어야 한다.

b) 클래스 2 콤포넌트의 시험압력은 설계압력의 1.25배 이상이어야 한다.

c) 클래스 3 콤포넌트의 시험압력은 설계압력의 1.10배 이상이어야 한다.

(3) 압력유지콤포넌트는 규정된 시험압력과 시험온도에서 試驗을 하며, 肉眼으로 이상이 없음을 확인하여야 한다.

(4) 耐壓試驗에서 檢査를 실시하기 전에 시험압력 및 시험온도를 4시간 유지하여야 한다.

(5) 運轉開始前 耐壓試驗은 Sec. III 에 규정되어 있는 要求를 만족하여야 한다.

(6) ISI프로그램으로 실시할 경우는 10년에 1회 行한다.

稼動開始前의 시험압력으로 第1種 機器系統에 대해서 설계압력의 1.25배 압력이 채택된 경우는 前述과 같으며, 機器의 製作이 완료된 후에 높은 압력을 負荷했을때의 이점으로 다음과 같은 점들이 고려된다.

(1) 일정한 靜壓에 대한 耐壓強度를 구함으로서 稼動期間中の 건전성이 확보됨이 實證된다.

(2) 각 結合부에서 부티의 漏洩 有無가 확인된다.

(3) 變形 또는 欠陷의 有無가 확인된다.

(4) 形狀의 改善 및 기계적 응력제거의 효과가 있다.

(5) 최대허용압력을 알 수 있다.

한편, 耐壓試驗의 欠點으로는

(1) 기기의 内部에 결함이 존재하고 있다면, 그 결함을 증대시킬 가능성이 있다.

(2) 기기의 대형화에 따라 耐壓試驗時에 축적되는 에너지가 크므로 만약 破損이 일어난다면, 큰 사고로 이어질 위험이 있다.

(3) 용접작업직후에 耐壓試驗을 하던가, 용접 후 열처리가 불충분하였을 경우에 지연파괴를 조장할 우려가 있다.

(4) 歪時効에 의해 材質을 劣化시킨다.

(5) 局部的으로 比例限界를 넘는 위치에서는 板두께가 얇아진다 등이다.

稼動中에 耐壓試驗을 실시하여야 할 필요한 조건은

(1) 기기의 보수후에 그 부분의 強度上 性能保證 및 漏洩 有無의 확인이 필요한 경우.

(2) 연료교환 또는 정기점검 등을 위해 長期間에 걸쳐 原子爐를 정지시킨 다음 再起動시키려는 경우.

(3) 기기에 설계상 여유가 있을 경우, 어떤 목적을 위해서 최고허용압력을 증가시킬 필요가 있을 때.

(4) 기기에 局部的으로 材質劣化가 인지되었을 때, 그 기기의 성능을 再確認할 필요가 있을 경우 등이다.

稼動中 耐壓試驗의 欠點은

(1) 鋼材가 熱脆化 또는 照射脆化 등에 의해 현저하게 材質의 劣化되었을 경우에 균열이 존재하고 부적당한 온도조건으로 시험을 하면 破損될 가능성이 있다.

(2) 균열이 존재하고 있을 때, 균열先端이 塑性變形하여 高溫下에서 歪時効에 의해 脆化되어 破壞發生抵抗을 감소시킬 가능성이 있다.

(3) 耐壓試驗時 過壓力에 의해서 생기는 높은 歪레벨이 部材의 피로수명을 저하시킬 경우가 있다.

(4) 高歪레벨의 반복 負荷는 지연파괴에 도달할 가능성이 있다 등이다.