

輕水爐壓力容器에 關한 最近話題

現在 發電用 原子爐의 80%를 占하고 있는 輕水爐는 爐心內의 核燃料에서 發生한 热을 물을 使用하여 爐外로 보내는(水冷卻)型 式이기 때문에 热除去上 물을 加壓해서 高溫에서도 液體로 使用하도록 考案되었으므로 爐心容器는 壓力容器(PV)로 되어 있다. 이 壓力容器는 核燃料體와 같이 交換할 수 있는 消耗品이 아 니기 때문에 그 發電爐의 停年까지 健全性을 維持하여야 한다. 다음은 이의 確保를 위해 海外에서 研究檢討되고 있는 對應策들이다.

— 原子爐와 壓力容器鋼材의 變遷 —

1. 發電用原子爐와 壓力容器

(1) 壓力容器의 役割

原子爐壓力容器는 核燃料集合體를 内藏하고 있으며 原子力發電플랜트의 心臟部에相當한다. 즉, 火力發電所에서의 보일러 그 自體라 할 수 있다. 보일러는 管群과 버너로 구성되어 비교적 단순한 구조이나 原子爐壓力容器의 내부는 구조가 복잡하다. 그외에 壓力容器쉘은 核反應에 의한 열에너지를 爐心의 밖으로 운반하는 역할을 담당하는 1차냉각재(물)를 高溫·高壓으로 유지하는 壓力바운더리를 구성하는 구조물이므로 매우 중요한 機器이다.

核燃料의 안정된 핵반응과 热除去를 유지하기 위해서는 壓力容器가 原子力플랜트의 使用期間中에 不適合함이 없이 가동되어야 한다. 原子力發電所의 電氣出力이 大型化되면 그림1(日本의 例)에서와 같이 압력용기도巨大해지는데, 配管ル프에서와 같이 分岐시켜서 小型화할 수도 없다.

이와 같은 原子爐壓力容器와 보일러의 기본적인 차이를 정리하면 다음과 같다.

- 原子爐壓力容器는 火力發電의 보일러와 石油精製裝置인 하이드로크래커를 結合한 것과 같

은 구조로 되어 있다.

- 보일러에서는 내부에 不適合이 있으면 補修를 할 수 있으나 壓力容器에서는 내부 기기의 극히 일부만이 交換될 정도로서 使用期間이 끝날때까지 補修, 交換이 불가능하다.

- 火力發電用 보일러의 쉘은 파손이 일어나도 중대한 사고를 야기시키는 일이 없으나 原子爐壓力容器쉘의 파손은 大事故가 되므로 使用期間中 이와 같은 경우가 있어서는 안된다. 이를 위해 압력용기쉘의 製造에 있어서는 세밀한 設計와 品質保証에 特別한 노력이 必要하다.

- 火力發電 보일러는 热에 의한 구조의 손상에 留意하는 설계로 되어 있으나, 原子爐壓力容器에서는 核反應熱에 의한 손상보다도 放射線의 照射를 받아서 發生하는 손상을 고려에 넣어 예정된 使用期間中에 破損이 일어나지 않을 것을 우선 염두에 두고 있다.

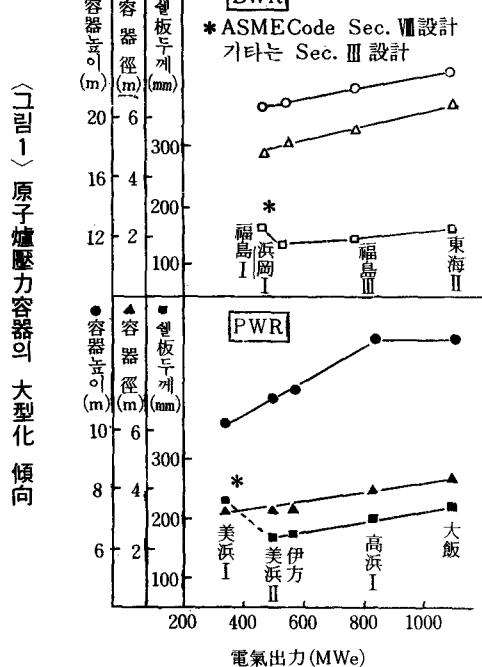
輕水爐는 技術經驗이 풍부한 물을 冷却材로 사용하기 때문에 그 臨界temperature의 제약을 받아 1次冷却水를 液體의 상태로 사용하는 限 약 370 °C以上的 온도에서는 사용할 수 없다. 이로 인해 輕水爐의 原子爐壓力容器는 設計temperature 360 °C以下, 설계압력은 150kgf/cm²(PWR), 80kgf/cm²

(BWR)에서 사용되며 사용기간은 40EFPY(Effective Full Power Years, 100% 出力換算實効年)로 설계되고 있다.

설계온도 360°C는 현재 超臨界石油火力의 運轉溫度와 비교하면 상당히 낮다. 또한 運轉壓力에 있어서도 火力發電所 300kgf/cm²와 비교하면 原子力發電所의 設計諸元은 이보다 상당히 낮다(그림2).

이와 같이 火力發電所의 經驗을 下廻하는 安全側의 설계제원을 취하고 있는 것은 파손에 의한 放射能의 누설에 대한 安全性을 보증하기 위해서 壓力容器의 大破損事故가 발생하지 않도록 하는 設計處理인데 原子力發電所의 經濟性은 이와 같은 安全側의 설계로도 충분히 유지된다.

이처럼 發電터빈으로 보내는 蒸氣의 條件이 新銳火力發電所보다 나쁘기 때문에 原子力플랜트의 熱效率은 30%정도가 되어 火力發電의 약 38%를 下廻하고 있다. 이로 인해 核熱에 의해



火力發電 정도의 過熱蒸氣를 만드는 核過熱의 시도가 20년전에 있었으나 工業化되지는 않았다. 다만, 소련의 發電爐에서 沸騰水型의 RBMK는 壓力管方式으로서 후연블록중으로 輕水가 흐르는 壓力管을 배치하는데, 全長 약7m의 下半部는 지르코늄合金, 上半部는 스테인레스스틸로 만들어져 있고 7m 길이의 燃料 上半部에서 過熱하여 超高温・高壓의 蒸氣를 생산한다.

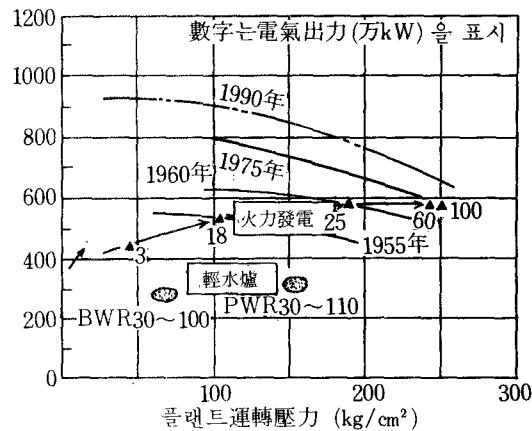
(2) 原子爐壓力容器의 特殊性

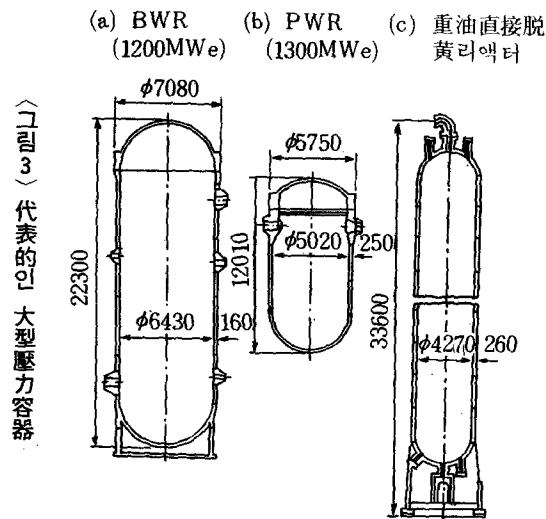
原子爐壓力容器 特有의 課題가 없는 것은 아니다. 그 첫번째가 크기와 形態의 問題이다. 그림1에서와 같이 輕水爐壓力容器는 鐵鋼製構造物에서는 선박, 특히 艦艇에 다음가는 大型이다.

그 形態를 다른 大型鋼製構造인 重油直接脫黃리액터와 비교하면 그림3과 같다. 原子爐壓力容器의 설계온도, 압력이 아무리 낮다고 하더라도 大型爐心을 넣기 위해서는 PWR의 경우 직경 4m, BWR의 경우 6m가 된다. 이와 같이 큰 직경의 압력용기는 原子爐에서 처음으로 設計, 建造되었으며 이러한 壓力容器에 앞에서의 1次冷却水 壓力を 加하기 위해서는 그 셀의 板두께는 PWR 200mm, BWR 150mm가 된다. 이처럼 두꺼운 두께의 鋼材는 軍艦의 裝甲板을 제외하면 工業플랜트에서는 드물다.

輕水爐 爐心의 크기는 그 높이, 직경 비율의

〈그림2〉 發電플랜트의 高溫, 高壓化 傾向





검토와 세로형으로의 선택 등에서 核燃料集合體의 길이는 현재 PWR, BWR 모두 4m가 되었다. 처음에는 지르칼로이로 高品質의 긴 것을 만들 수가 없어서 이 보다 짧았으나 기술의 진보와 더불어 世界的으로 4~5m(KWU의 PWR 5m)가 되었으며 앞에서의 소련의 7m는 예외이다.

壓力容器의 높이도 이에 따라서 美國製 PWR 13m, BWR 22m로 높아졌으며 또 대형구조물인데도 上部의 헤드는 핵연료집합체의 교환을 위해 분리할 수 있어야 한다. 종래의 壓力容器에서는 이와 같은 구조는 小型의 容器이외에는 경험이 없었다. 따라서 原子爐壓力容器에 처음으로 大型의 플랜지耐壓構造가 도입되었다.

또한 1次冷却水가 壓力容器에서 나와서 热을 전달한 후 다시 壓力容器내로 들어가기 위해서는 압력용기에 노즐을 붙여야 한다. 原子爐壓力容器내에서는 多量의 热이 발생하므로 그 열을 운반하는 冷却水의 流量은 PWR에서 $62 \times 10^6 \text{kg/hr}$, BWR에서 $48 \times 10^6 \text{kg/hr}$ 로서 매우 크며, 이 만한 冷却水量을 處理하기 위해서는 冷却水配管口徑이 커진다. 이와 같은 大口徑 노즐의 製造와 접합도 새로운 기술이었다.

두번째는 放射能에 대한 安全性에 관한 設計

處理이다. 核反應에 의해 多量의 高速中性子束, 热中性子束 및 γ 線束이 발생하여 壓力容器쉘과 爐內構造物에 照射效果를 준다. 이 照射效果는 壓力容器部材를 劣化시킬 뿐만아니라 부식생성물의 介入 등으로 인한 1차냉각수중의 混在物을 放射化시킨다. 특히, 鋼材와 물의 反應에서 생기는 부식생성물을 방사화시키면 냉각수의 放射線量이 높아진다.

1次冷却水가 오염되면 펌프, 밸브, BWR에서는 氣水分離器, PWR에서는 蒸氣發生器에 放射化物이 모여서 정기점검시 종사자의 폭포량이 증대한다. 그러므로 1次冷却材의 오염을 방지하기 위해서 PWR에서는 1次冷却系統을 모두 스테인레스스틸로, BWR에서는 보통 鋼材와 스테인레스스틸을併用하고 있다.

또한 압력용기의 内面은 모두 스테인레스스틸을 용접클래딩法으로 클래드한다. 이때 스테인레스스틸로는 austenite stainless steel이 사용된다. 이와 같은 工作도 原子爐壓力容器 이외에서는 實施된例가 없다.

以上과 같이 原子爐壓力容器는 설계체원이 매우 여유있게 되어 있으나 製造上에서는 재료의 선택, 重量化, 용접시공의 새로운 기술 등 많은 開發技術에 의해 建造되고 있다. 그리고 그 工作精度는 물리실험장치의 製作정도로서 이 큰 원자로압력용기에는 극히 고도의 高性能設計, 製造技術이 驅使되고 있다.

(3) 原子爐壓力容器의 歷史

原子力發電所에서의 壓力容器製造 第1號는 英國에서 建設된 탄산가스冷却爐인 Calder Hall爐(1959年 臨界, 電氣出力 18.4만KW)의 壓力容器이다. 이 압력용기는 円筒型으로 직경 11.3m, 높이 21.6m였다. 탄산가스냉각로는 天然우라늄을 燃料로 하기 때문에 同一出力에서는 輕水爐보다 大型이 될 수 밖에 없다.

電氣出力이 38.4만KW인 Hunterston爐(1963年 臨界, 球型)의 경우에는 그 직경이 21.3m

이다. 참고로 같은 탄산가스냉각로인 日本의 東海1號爐(1965年臨界)는 전기출력 16.6만KW로서 球型壓力容器를 사용하는데 직경이 18.3m이다. 圓筒型보다 球型壓力容器의 경우가 같은 内壓荷重, 같은 직경일때 두께를 1/2로 제작할 수 있는 것이 有利하다.

輕水爐에서는 약 3%의 低濃縮우라늄燃料를 사용하므로 爐心을 가스爐보다 작게 설계할 수 있으나 燃料體의 길이가 길므로 圆筒型壓力容器로 설계할 수 밖에 없다.

이와 같은 壓力容器의 健全性을 保証하기 위해서 다음과 같은 研究開發이 추진되어 현재에 이르렀다.

● 압력용기의 材料로는 鐵鋼材料가 사용된다. 처음에는 高炭素-망간鋼이 사용된 경우도 있었으나, 현재는 망간-몰리브덴低合金鋼이 世界各國에서 建造되는 압력용기에 사용되고 있다. 이와 같이 世界各國에서 모두 같은 類의 鋼材를 사용한다는 것은 產業界에서 과거에는 그例가 없었던 일로서 이는 壓力容器가 原子爐의 安全性을 확보하는데 있어서 매우 중요한 構造라는 인식에서 온 것이다.

● 압력용기의 製造는 發電所 現場에서 鋼板 또는 鍛造材를 용접해서 만드는 것이 아니고 整備된 工場內에서 施工된다. 또 검사에 대해서

도 多重検査에 의한 면밀성이 요구되며 최종적으로는 過壓試驗에서 健全性이 보증된다.

● 壓力容器의 설계에는 최신의 설계기준을 기초로 하여 合理化가 도모되고 있다. 本體의 重量이 수백톤이 넘으므로 이 이상 무거워지면 工場에서 제작해서 발전소로 운반하여 크레인으로 爐心部에 넣는 作業이 곤란하여지기 때문에 輕量化를 도모하는 것이 큰 課題이다. 이 設計課題은 상세한 應力解析에 의해 군더더기를 빼는 것이 도모되고 있으나 이로 인해 壓力容器의 健全性이 손상되지 않게 세심한 留意가 기울여지고 있다.

이상과 같은 압력용기의 構造에서는 다른 구조물에서는 볼 수 없었던 기술을 集約한 것이다. 그러나 世界原子力發電所의 운전경험은 고작 15EFPY에 불과하므로 다음과 같은 原子爐 특유의 事象에 대해서는 별도로 健全性을 보증하는 수속이 강구되고 있다.

그 하나는 원자로 특유의 운전환경에 의한 영향평가로서 첫째, 核燃料에 의해 발생하는 中性子束에 의한 構造材料의 照射效果, 두번째, 高温·高壓冷却水에 의한 환경효과이다.

이들은 중첩되어 영향을 미치는데 前者は 體積效果이고, 後자는 内表面效果이다. 그러나 前者도 積算照射量은 内面이 최대이고 外面으로

〈表1〉 原子爐壓力容器鋼材의 代表例

材 料 規 格 ASME (JIS)		化 學 成 分 (wt %)							引張性質 (室溫)				
		C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Mo	0.2%耐力 (kgf/mm ²)	引張強度 (kgf/mm ²)	伸長 (%)	조리기 (%)
主 要 初 期 의 鋼 種	SA212B	≤0.33	0.15 ~0.30	≤0.9	≤0.04	≤0.05	-	-	-	≥26.7	49.2 ~59.8	≥21	-
	SA302B	<0.25	"	1.15 ~1.50	≤0.035	≤0.04	-	-	0.45 ~0.60	≥35.2	56.2 ~70.3	≥18	-
	SA105	≤0.35	≤0.35	0.60 ~1.05	≤0.04	≤0.05	-	-	-	≥25.3	≥49.2	≥22	≥30
	SA336	≤0.27	0.15 ~0.30	0.50 ~0.80	"	"	0.5 ~0.9	0.25 ~0.45	0.55 ~0.70	≥35.2	56.2 ~70.3	≥18	-
現 用 鋼 種	SA533BC1.1 (JIS SQV 2A相當)	≤0.25	"	1.15 ~1.50	≤0.035	≤0.04	0.4 ~0.7	-	0.45 ~0.60	"	"	"	-
	SA508C1.2 (JIS SFQ2A2相當)	≤0.27	0.15 ~0.40	0.50 ~1.00	≤0.025	≤0.025	0.5 ~1.0	0.25 ~0.45	0.55 ~0.70	"	56.2 ~73.8	"	≥38
	SA508C1.3 (JIS SFQ1A3相當)	≤0.25	"	1.20 ~1.50	"	"	0.4 ~1.0	≤0.25	0.45 ~0.60	"	"	"	"

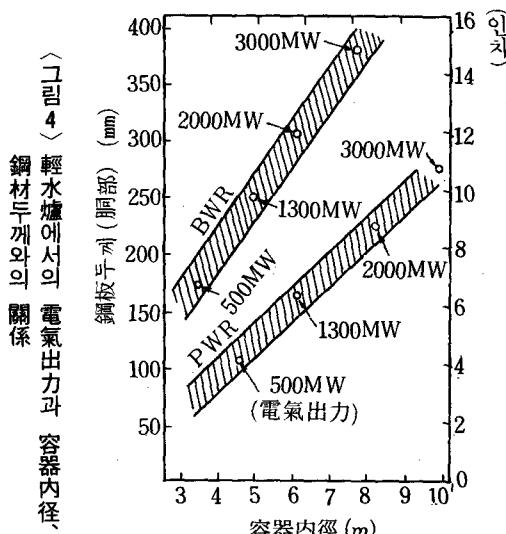
gal수록 鋼材自身에 의한 흡수산란으로 被照射量은 低減된다. 이처럼 爐心에 近接한 壓力容器쉘部材의 内表面은 가장 엄격한 劣化環境에 놓여 있다.

이 때문에 이 부분을 구성하는 部材의 鋼材는 가장 性質이 뛰어난 재료를 사용하며 용접조인트部를 되도록 없게 하는 것에 유의하며 鍛造材의 용용이 고려되고 있다. 또 구조설계에서는 노즐 등의 접합물을 爐心近接쉘에는 절대로 설치하지 않을 것을 규정하고 있다.

2. 壓力容器鋼材의 變遷

輕水爐發電플랜트의 歷史를 보면 1950년대 후반으로 거슬러 올라간다. 즉, 1957년에 Shippingport爐(PWR, 電氣出力 9만KWe), 1959년에 Dresden 1號爐(BWR, 21만KWe)가 차례로臨界되어 商業用發電이 시작되었다. 그후 輕水爐는 점점 大型화되어 현재는 130만KWe級이建設된다.

압력용기에 使用되는 鋼材도 이 大型화에 따라서 变천하여 130만KWe급 압력용기(PWR)의材두께는 250mm정도이며 均質性, 높은 耐性이 필수의 要求性能으로 되어 있다. 이를 위해 原子力先進國에서는 鋼材製造技術의 개선, 재료



성능의 향상이 도모되고 있다.

다음은 壓力容器鋼材의 变천을 재료性能에 대한 요구의 역사와 재료제조기술의 变천에 관한概設이다.

(1) 材料性能에 대한 要求의 歷史

輕水爐壓力容器用 鋼材로는 初期에는 보일러 등에서 실적이 있는 Si-Mn系低合金鋼이 사용되었으나, 그후 플랜트의 大型化에 따라서 현재는 Mn-Mo-Ni系低合金鋼이 사용되고 있다.

여기서는 採用鋼種의 变천을 材料要求性能의 变천이라는 관점에서 1) 플랜트 大型化의 對應에 따르는 強度, 耐性에 대한 要求, 2) 材料의健全性 確保에서의 要求, 3) 設計, 구조의 安全성 평가기준 등에 관한 法制上에서 부터의 要求로 나누었다.

① 鋼材의 두꺼워짐과 材料性能(強度, 耐性)의 確保

輕水爐壓力容器 鋼材의 대표적인 鋼種을 表1에 나타내었다. 이 表에서 보는 바와 같이 초기의 경수로에서는 Si-Mn系低合金鋼인 SA 212B 등이 사용되고 있다. 이들은 보일러用 鋼板으로 사용실적도 많고 용접성도 양호하다. 이 鋼種을 사용한 發電플랜트의例로는 Indian Point 1號爐(1962年 臨界)를 들 수 있다.

그후 高溫強度의 향상을 도모하여 Mo을 첨가한 SA302B鋼(Mn-Mo系)이 채택되어 壓力容器

〈表2〉 Mn-Mo-Ni系鋼(A 533 B鋼)의 Cu 및 P量의 制限(ASTM規格付加條項 - 1974)

	Dipper 分析	製品分析
Cu (%)	0.10	0.12
P (%)	0.012	0.017

〈表3〉 Mn-Mo-Ni系鋼材의 Cu, P 및 S量의 制限 (ASTM規格 - 1983年)

(原)	A533 B Cl. 1		A 508 Cl. 3	
	Dipper 分析	製品分析	Dipper 分析	製品分析
Cu (%)	0.10	0.12	0.10	0.10
P (%)	0.012	0.015	0.012	0.015
S (%)	0.015	0.018	0.015	0.018

用鋼材로 널리 사용되었다. 1960年代 中半부
터 輕水爐發電플랜트의 大型化가 급속히 진행됨
에 따라서 使用鋼種도 변화해 왔다.

즉, 原子力發電플랜트는 스케일 메리트가 있기 때문에 單基當의 出力を 높여서 發電코스트의 低減을 도모하였는데 發電플랜트가 大型화되면 壓力容器의 직경 및 두께는 그림4와 같이 증가한다. 따라서 100mm 이상 두께의 鋼板에서는 SA 302B鋼으로는 耐性의 확보가 불충분해져서 AS-ME는 1964년에 Ni의 첨가(Mn-Mo-Ni系로 개량)에 의해 對應하였다. 이 鋼種을 SA 302B 改良鋼이라고 한다.

그후 原子力發電플랜트의 大型化가 더욱 진행되어 이 改良鋼으로도 對處가 곤란하게 되었다. 즉, 이와 같은 鋼材는 austenite 化溫度 (~900°C)에서 어느 정도 이상의 속도로 냉각하지 않으면 強度 및 耐性의 확보가 어렵다. 板두께가 얇으면 大氣中에 방치하여 冷却(空冷)하여도 무방하나 두꺼운 鋼材가 되면 水中에 烧入(水冷)하여 냉각하지 않으면 所定의 냉각속도를 얻을 수 없다. 그래서 1965년에 이 SA302B 改良鋼의 热處理를 그때까지의 烧鈍·燒戻處理에서 烧入·燒戻處理로 변경하였다. 이것이 SA533B鋼으로서 현재 가장 많이 사용되고 있다.

한편, 鍛造鋼에 대해서도 같은 開發過程을 겪어서 SA105에서 SA336 그리고 SA508로 되었다. SA508鋼에 관해서는 Cl. 2와 Cl. 3가 사용되고 있으나 近年에 용접시 再熱갈라짐 문제 때문에 Cl. 3가主流를 이루고 있다.

② 材料健全性確保에서의 要求(中性子照射脆化對策)

원자로압력용기가 보통 플랜트와 다른 점은 중성자의 照射環境에 있다는 것으로서 中性子照射에 의해 鋼材의 強度는 상승하나 延性, 耐性이 低下되는데 특히 耐性의 低下가 현저하게 되는 현상을 中性子照射脆化라고 한다.

이 中性子照射脆化는 從來의 연구에 의해 銅

〈表4〉 原子爐壓力容器用鋼材의 破壞耐性規定
(ASME Code Section III의 比較)

項 目	從來의 規定	1972年 6月의 New規定
試 驗 的 種 類	DWT 또는 CVN	DWT 및 CVN
試驗片採 取 方 向	L 方向 또는 T 方向	T 方向(鋼板·鍛鋼의 경우)
判 定 基 準	① DWT의 경우 NDTT ≤ 最低使用溫度 -33°C ② CVN의 경우 最低使用溫度 -33°C 에서 a) ≥4.2kg-m (3個의 平均值) b) ≥3.5kg-m (2個의 最低值) (a), b) 는 A533B Cl. 1鋼의 경우	① DWT에서 T_{NDT} ($\geq NDTT$) 를 決定 ② $\leq (T_{NDT} + 33^\circ\text{C})$ 에서 CVN值가 a) $\geq 6.96.9\text{kg}\cdot\text{m}$ (吸收에너지) b) $\geq 0.89\text{mm}$ (橫膨出量) 를 만족시킴으로서 RT_{NDT} 를 決定 ③ 水壓試驗溫度 $\geq RT_{NDT}$ $+ 33^\circ\text{C}$ 에서 使用可能 (壓力容器에서의 경우)

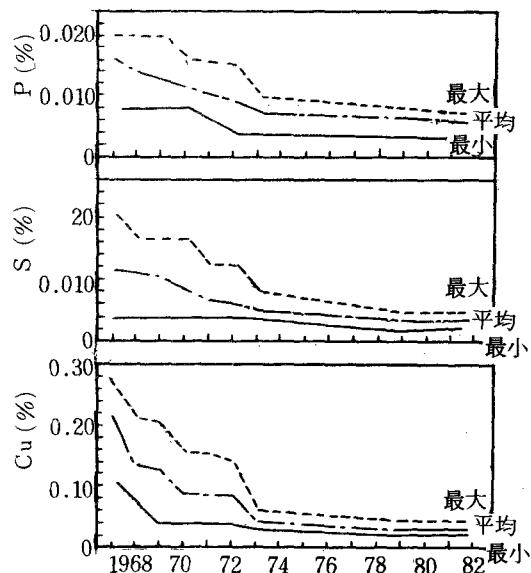
DWT : 落重試驗

L : 壓延方向 또는 鍛造方向

CVN : V노치 살피試驗

T : 上記直角인 方向

〈그림5〉 日本에서의 輕水爐壓力容器鋼材의
Cu, P, S 含有量 变遷



및 磷의 영향이 크다는 것이 알려져 있다. 그러나 당시의 SA302B鋼, SA533B鋼 등에는 銅의 규제가 없었기 때문에 극단의 경우에는 0.3% 이상의 銅이 들어있는 鋼材가 사용되었다. 그래

서 美國에서는 1974년에 ASTM에서 A533B 鋼規格의 付加的 條項으로 表2의 제한을 설정했다.

그후 中性子照射脆化에 관한 지식의 축적과 鋼材製造技術의 발전에 의해 1983년의 ASTM 규격에서는 表3과 같이 규정하고 있다. 그림5는 一例로 日本의 輕水爐壓力容器用 鋼材의 銅, 磷, 黃含有量의 变천을 나타낸다. 이 그림에서 日本의 鋼材는 1974年以後에는 현재의 ASTM規格을 충분히 만족하는 낮은 含有量에 있음을 알 수 있다.

(3) 法制上에서의 耐性에 대한 要求

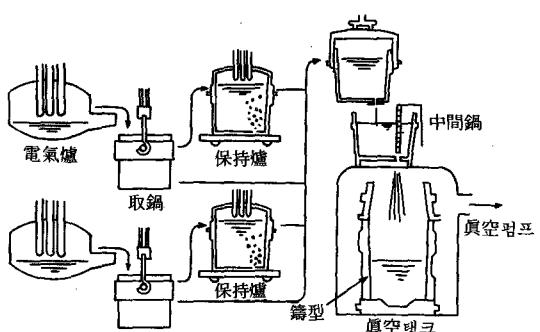
原子爐壓力容器의 不安定破壞는 그 災害의 파급효과가 무척 크기 때문에 그 방지대책에 막대한 노력을 기울이고 있으며 鋼材의 耐性에 대한 要求가 엄격하게 法制上 규정되어 있다.

表4는 美國의 ASME Sec. III規定의 变천을 表示하고 있다. 1971年以前에는 例를 들면 水壓試驗을 室温(~21°C)으로 하여 최저 사용온도를 설정할 경우 耐性要求值(落重試驗에 의한 NDT 温度)는 21°C~60°F(33°C)로 해서 -12°C 정도

〈그림 6〉 日本에서의 大型鋼塊 製造法과 크기의 变遷 一例

	'55	'60	'65	'70	'75	'80
溶解法			酸性平爐		真空取鍋精鍊	
			堿基性平爐 및 電氣爐	堿基性電氣爐		
鑄造法	大氣鑄造	真空鑄造 (에카나강팅프)	真空鑄造 (스팅이제터)			
最大鋼塊	140t	220t	250t	400t	500t	570t

〈그림 7〉 大型鋼塊의 普通造塊法 一例



로 충분했다. 그런데 1972年以後에 破壞力學을 기초로 하는 평가기준이 도입되면서 要求되는 耐性值(RT_{NDT}: 關聯溫度, NDT와 거의 同等)는 一例로 -35°C가 되는 등 엄격해져 가고 있다.

(2) 材料製造技術의 變遷

① 製鋼, 造塊

大型鋼塊의 제조법과 크기의 变遷 예를 그림6에 나타내었다. 그림6에서 보는 바와 같이 제조가능한 最大鋼塊는 계속 大型화되어 현재는 570ton의 鋼塊가 제조가능하다. 그림6에서는 日本의 경우로 용 部材를 대상으로 하였을 경우, 종래에는 素材鋼을 塩基性의 平爐와 電氣爐에 의해서 용해시켜 真空下에서 鑄込시켰으나 1973년 이후에는 電氣爐와 保持爐를 사용하여 大型鋼塊가 제조되고 있다. 그림7에 大型鋼塊의 造塊法 一例를, 表5에 세계의 主要鍛鋼메이커의 最大鋼塊를 나타내었다.

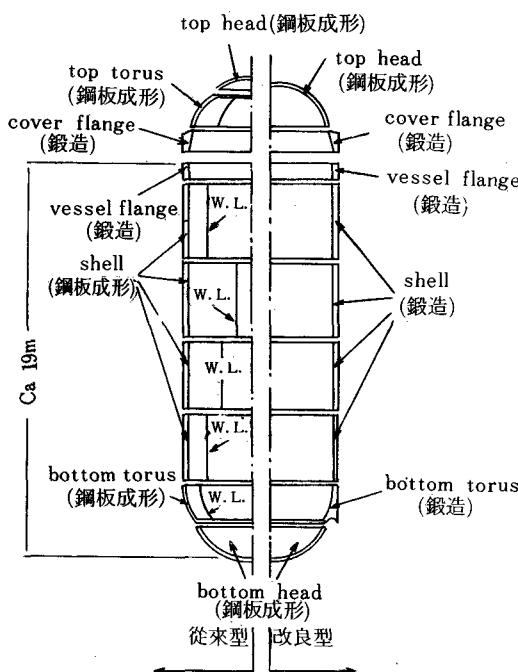
原子爐壓力容器用 鍛鋼인 SA508Cl. 3은 1977년에 그때까지의 電氣爐鋼 이외에 轉爐鋼의 적용도 인정되게 되었다. 日本에서는 1982年에 J-IS가 개정되어 새로운 JIS G 3204(壓力容器用 調質型合金鋼鍛鋼品)가 개정되어 轉爐에서 溶製된 鋼塊가 原子爐壓力容器用 鍛鋼部材로 사용되는 길이 열렸다.

즉, 轉爐製鋼法에서는 종래의 量產技術 이외

〈表5〉 世界의 主要鍛鋼 메이커의 最大鋼塊

會社名	國名	最大鋼塊(t)
日本製鋼所	日本	570
神戸製鋼所	日本	510
日本鑄鍛鋼	日本	400
United States Steel	美國	370
Bethlehem Steel	美國	350
Thyssen	西獨	350
川崎製鐵	日本	320
Klöckner	西獨	250
Terni	이탈리아	220
British Steel	英國	218
Creusot Loire	프랑스	190

〈그림 8〉 BWR PV/251" (BWR 75)



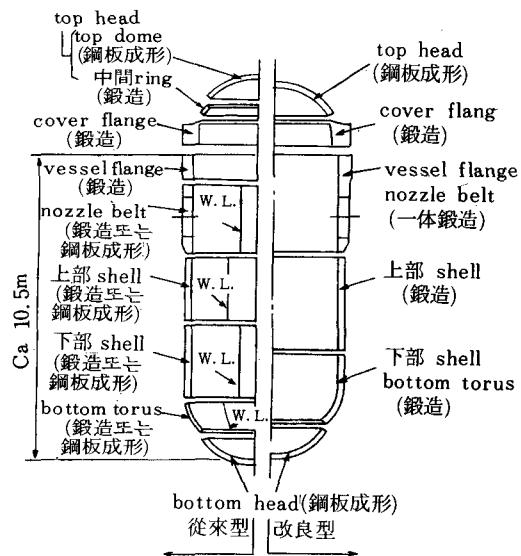
에 低磷, 低硫黃鋼의 溶製技術, 脱ガス장치에 의한 脱酸·脱水素能力의 향상 등 脱ガス技術의 진보에 의해서 大型清淨鋼塊가 제조될 수 있게 되었기 때문이다.

轉爐프로세스는 1) 使用原料는 溶銑 100%이기 때문에 불순물원소(Cu, As, Sb, Sn 등)가 적다, 2) 轉爐에서의 操業은 全自動吹鍊이 가능하며 成分이나 温度制御가 쉽다, 3) 脱ガス장치에 의해 低酸素, 低水素로 脱ガス 할 수 있으며 또한 성분의 微調整이 가능하다는 특징이 있다.

② 熱間加工

원자력발전소에서는 單基出力의 증가에 의한 電力コスト의 低下가 시도되어 현재는 100~130만KWe급의 輕水爐가主流를 이루고 있다. 또한 單基出力의 증가에 대한 요청외에 稼動期間中検査(ISI)의 간략화와 그에 따른 검사작업원의 被曝低減, 가동율 향상, 안전성 향상 등의 관점에서 壓力容器部材 등의 大型化, 一體化가 도모되어 왔다. 그 결과 현재는 外徑 10m, 높

〈그림 9〉 PWR PV/173~182"



이 5m급의 링材 또는 外徑 8m급의 圓板과 그 球面成形製品이 제조가능하게 되었다.

1) BWR

그림8은 BWR壓力容器의 從來型과 改良型의 설계를 비교한 것이다. 셀부분은 종전에는 鋼板을 용접해서 링狀으로 하였으나 현재에는 셀링鍛造에 의해 一體로 제조함으로서 세로방향의 용접선을 없애도록 하고 있다.

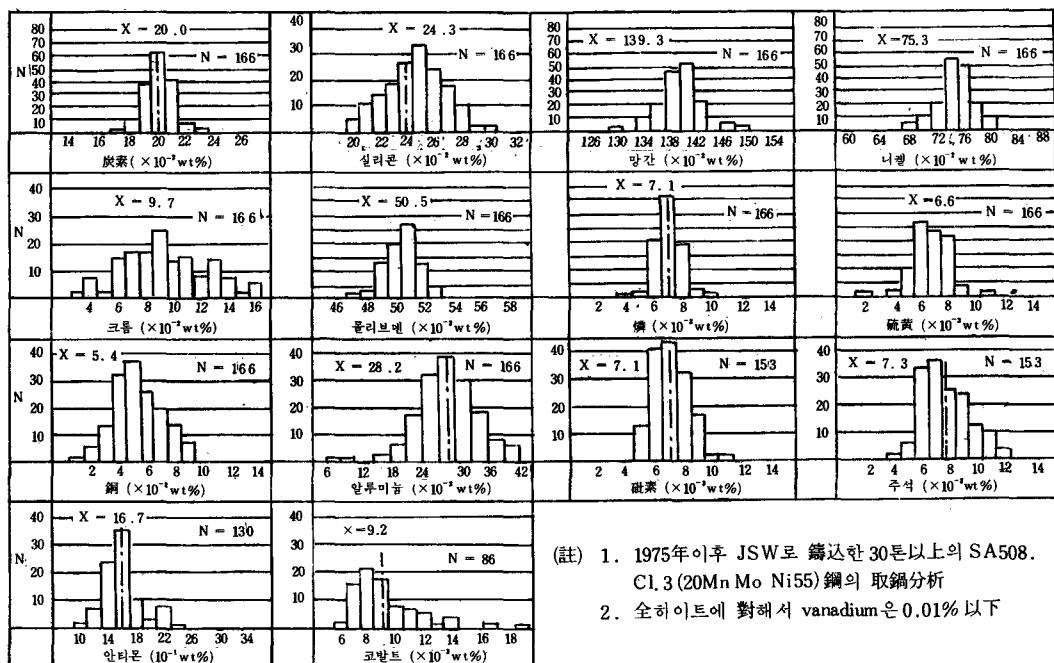
2) PWR

그림9는 PWR압력용기의 從來型과 改良型의 설계를 비교한 것이다. 종래에는 플랜지部와 노즐벨트部를 따로 제조하여 용접하였던 것을 鍛造로 一體化한다던가, 노즐스텝을 깎아서 만들면서 노즐의 세트온型化, 셀의 鍛造化와 長尺化, Bottom Ring의 鍛造化 등의例를 들 수가 있다.

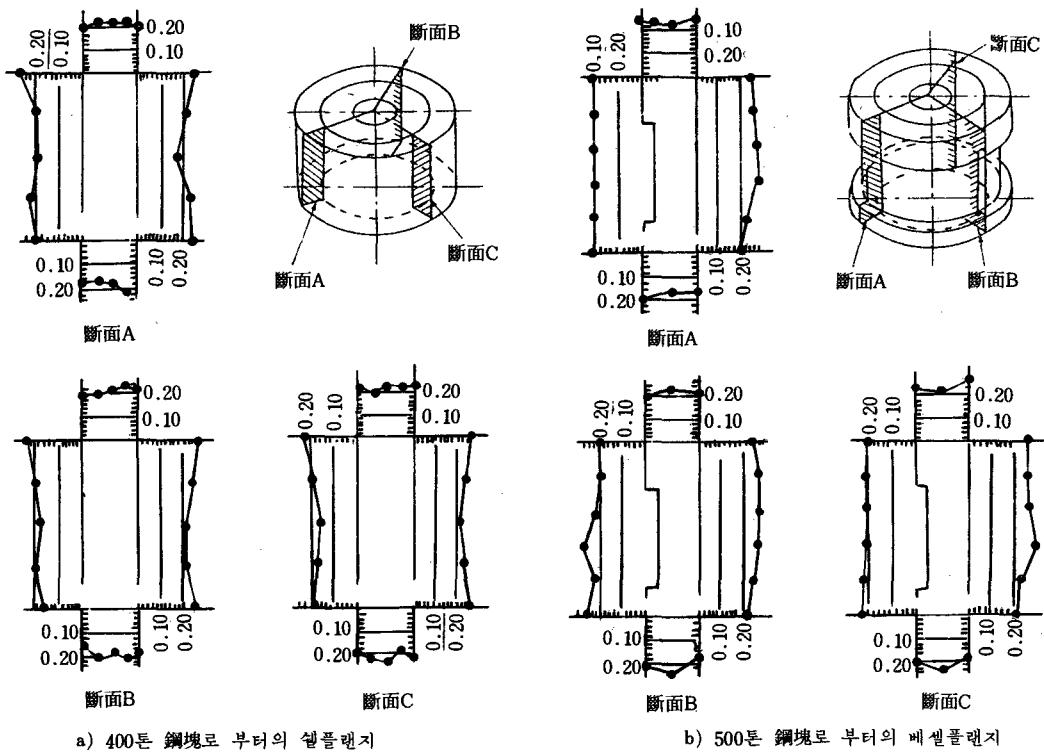
특히, 최근에는 길이가 긴 셀링을 鍛造에 의해서 一體로 제조함으로서 中性子照射를 받는 爐心部에 面한 영역의 가로방향 용접선을 전부 없애는 경우도 있다.

이상으로 壓力容器의 大型化, 一體化의 例를 소개하였는데 이들은 모두 ISI의 自動化, 간략

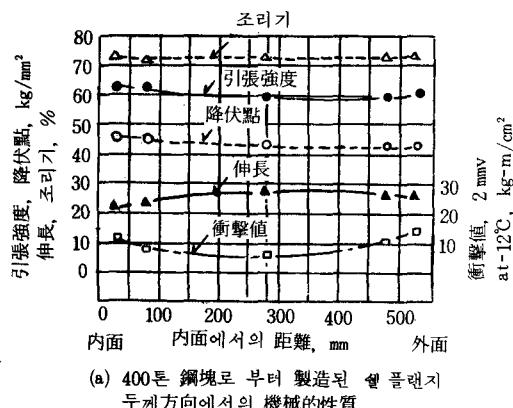
〈그림10〉 SA 508 CL 3 (20Mn Mo Ni55)鋼의 化學成分



〈그림11〉 400톤 또는 500톤 鋼塊로 부터 製造된 大型 플랜지材에서의 炭素量 偏析



〈그림12〉 大型·一体型 플랜지材의 두께方向에서의
機械的性質



The graph plots mechanical properties against the distance from the inner face (0 to 500 mm). The y-axis represents properties in kg/mm² or mm²/kg, and the x-axis represents distance from the inner face in mm.

Distance from inner face (mm)	Tensile Strength (kg/mm ²)	Elongation (%)	Impact Value (kg·mm/cm ²)	Tensile Modulus at -12°C (kg·mm/cm ²)
0	~75	~60	~25	~15
100	~70	~55	~22	~12
200	~72	~50	~25	~10
300	~70	~48	~25	~10
400	~68	~50	~10	~10
500	~70	~60	~15	~12

화 및 작업중 피폭저감 등에 현저한 효과를 기대할 수 있다.

③ 热处理

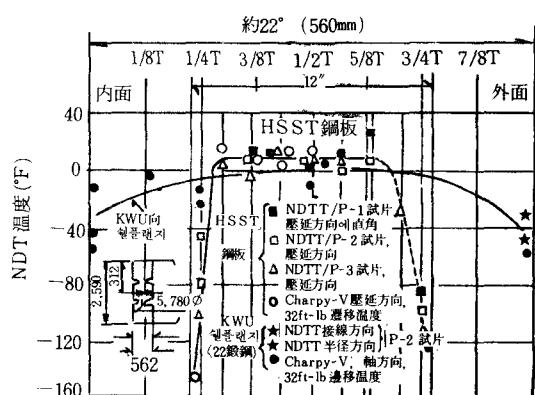
眞空處理技術의 진보에 따라大型鍛鋼品의 水素系欠陷 問題는 적어졌다. 현재大型部材의 재조에는 燒鈍·燒戻方式 등을 사용하여 수소계 결합을 방지하고 있다.

④ 不純物制御

原子爐壓力容器用 鋼材의 제조에 있어서 불순물 제거에 관해서는 현재 다음과 같은 수준에 있다.

- 1) 原料의 선택에 의한 $Cu < 0.04\%$ 와 기타 As, Sn, Sb 등의 低減,
 - 2) P, S의 極低下(약 0.003%),
 - 3) 高真空中에서의 脱ガス處理에 의한 $H > 1$

〈그림13〉 大型 플랜지材 (두께 560mm) 와 HSST
計劃試材(300mm) 의 NDT 測度 比較



ppm, 0 < 30 ppm

그림10에 SA508, Cl. 3鋼의 화학성분을 나타내었다. 그림10은 1975~1978年 사이에 鑄込된 鋼材를 대상으로 하고 있다.

⑤ 内部性状

原子爐壓力容器部材가 大型화될수록 偏析抑制는 중요한 과제가 된다. 특히, 탄소량은 강도와 용접성에 영향을 미치므로 제御가 必要하다. 그림11은 400톤 또는 500톤 鋼塊로부터 제조한大型플랜지材의 内·外面의 탄소량 분포를 나타낸 것인데 모두 탄소량의 偏析이 대단히 적다는 것을 알 수가 있다.

⑥ 強度와 耐性

鋼塊가 大型化될수록 均質性의 확보는 일반적으로 어려워지는데 大型鋼塊로부터 제조된 壓力容器部材의 경우에도 기계적 성질 등의 균일성이 요구된다.

그림12에 400톤 鋼塊 및 500톤 鋼塊로 제조한 쉘플랜지의 두께방향에서의 기계적 성질의 분포를 나타내었는데 균일함을 알 수 있다.

또한 그림13은 플랜지材의 無延性遷移溫度 (NDT溫度)의 두께방향분포를 HSST鋼板(1969年製造)과 비교한 것으로서 플랜지材의 경우가 매우 두꺼우면서도 두께中心部의 低温耐性이 HSST鋼板보다 우수하다는 것을 알 수 있다.