原子炉材料의 改善 展望

—그 現況과 課題—

原子力플랜트의 開發에는 높은 安全性確保가 필수적이다. 일부 部材의 손상에 대해서도 放射能을 플랜트內에 가두어 두는 다중방호시스템을 구성하는 구조재료도 예외는 아니다.

원자력플랜트의 구조재료가 특히 높은 技術이 요구되는 것은 그 사용환경이 지금까지의 既存플랜트, 즉 化學플랜트 등에서 거의 경험하지 못했던 것이기 때문이다. 방사선의 存在, 광범한 냉각재의 온도 및 불순물농도 등 원자력플랜트 특유의 환경이 구조재료의 여러가지 破損모드, 즉 劣化, 脆弱化, 疲勞, 크립 등에 영양을 미친다.

이와같이 사용환경은 앞으로의 구조재료연구를 중요한 지위를 차지하도록 하였다.

1. 耐圧部材用 低合金鋼

가. 耐圧機器部材와 그材質

發電用原子爐의 80%를 占하는 軽水爐에서는 蒸氣發生系統(NSSS)機器메이커에 따라 그 設計가 약간씩 다르다. 主要耐圧機器로는 원자로압력용기(RPV), 증기발생기(SG), 가압기(PR) 펌프, 밸브, 주순환계배관(RLP) 등이 있으며 그 대표적인 例 두가지를 그림1에 나타내었다.

사용되는 재료는 25년의 상업용 경수로 역사속에서 변천을 되풀이하여 왔는데 현재 사용되고 있는 주된 低合金鋼의 규격을 表1에 나타내었다. 表中의 SA533,508 및 相當鋼種은 引張強度 약 60kgf/㎟로서 여러조건을 균형있게 定着하고 있어 당분간은 이들 鋼種으로 推移될것으로 생각된다.

나. 耐圧部材에 要求되는 성질과 製造上의 對應

대표적인 耐圧機器로 RPV를 例로 들면 이것은 열기관의 보일러의 일종이나 原子爐의 특성에 관한 安全性上의 점에서 部材에는 특별한 성능이 요구된다.

(1) 所要의 性質

구체적으로는 다음과 같은 특성이 요구된다.

① 均質等方性

② 높은 破壞耐性

③ 내부결함이 적으며 또한 被検査性이 양호할 것.

④ 용접성이 좋을 것.

材料仕様이 같더라도 保証하는 내용이 나라에 따라 다를 때가있다. 대표적인 例로서 材料試験片의 採取位置에 대한 ASTM code(美國)와 TÜV規格(서독)을 비교하면 前者는 열처리면에서 20㎜×40㎜위치를, 後者는 기본적으로 80㎜×80㎜를 규정하고 있다.

최근 NSSS機器메이커各社에 의해 使用部材의 大型, 一体化가 요청되고 있다. 그 목적은 安全性의 向上외에,

① 單基出力의 증가에 의한 발전코스트의低下

② 가동중검사(ISI)의 용이화.

③ 운전효율의 증가.

④ 플랜트建設의 공기단축 등이다.

이와같은 요청하에서 현재 RPV部材中에서 가장 중요한 flange部에는 두께 550㎜, 外径 8 m가 넘는 두꺼운鍛鋼링材의 제조법이 확립되고

있다. 이들 部材에 요구되는 성능을 달성하기 위해서는 먼저 均質하고 健全한 大型鋼塊의 제조가 그 前提가 된다. 현재 570t 까지의 鋼塊 제조기술이 확립되어 있다.

代表的인 材料特性으로 얻어지고 있는 것은.

① 偏析이 적은 冶金的均質性

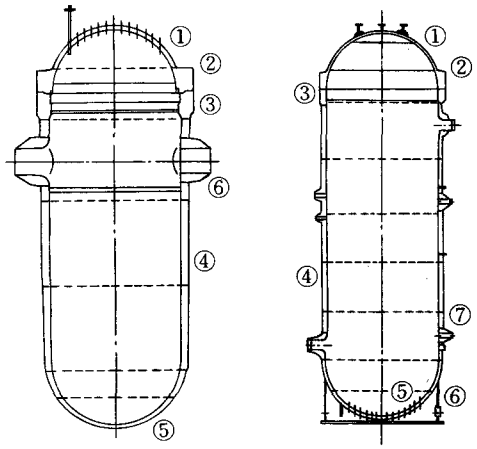
② 고강도, 高靭性 및 그 均質性 등이다. 한편 비금속介在物 등의 내부결함에 대해서는 E-FG 3㎜以下의 결함을 보증할 수 있어야 하며 이들 결함을 충분히 검출할 수 있음이 확인되고 있다.

(2) 製造上의 對應

部材에 요구되는 高品質을 만족시키기 위해서는 제조과정에서 여러가지의 배려가 필요하다.

① 鋼塊의 清浄度 : 鋼塊의 대형화에 따라 높은 清浄度를 유지하기 위해 모든 溶鋼狀態에서 眞空脫가스處理를 적용하고 있다. 또 최근에는 取鍋精錬技術의 적용이 확립되어 脫가스 (H_2 <

〈그림 1〉 輕水爐圧力容器의 形狀



PWRPV
① 上部鏡板
② 上蓋 flange
③ 胴 flange
④ 円筒胴部
⑤ 下部鏡板
⑥ 노즐 (set-in)
⑦ 노즐 (set-on)

BWRPV
① 上部鏡板
② 上蓋 flange
③ 胴 flange
④ 円筒胴部
⑤ 下部鏡板
⑥ 容器支持脚
⑦ 노즐 (各種目的用)

〈表 1〉 現用主要低合金鋼의規格

		材料規格	化學組成 (Wt. %)											機械的性質						
														室溫				高溫		
			C	Si	Mn	P	S	Nr	Cr	Mo	V	Cu	Al	耐力 (kg/mm²)	引強強度 (kg/mm²)	伸長 (%)	絞度 (%)	耐力 (kg/mm²)	引張強度 (kg/mm²)	伸長 (%)
日本 MITI JIS	鋼板	SQV 2A	≦0.25	0.15/0.30	1.15/1.50	≦0.035	≦0.040	0.40/0.70	-	0.45/0.60	-	-	-	≧35	56/70	≧18	-	-	-	-
		SQV 2B	≦0.25	0.15/0.30	1.15/1.50	≦0.035	≦0.040	0.40/0.70	-	0.45/0.60	-	-	-	≧49	63/81	≧16	-	-	-	-
	鍛鋼	SFVC 2B	≦0.30	≦0.35	0.70/1.35	≦0.030	≦0.030	-	-	-	-	-	-	≧25	≧49	≧16	≧38	-	-	-
		SFVQ 2A	≦0.27	≦0.40	0.50/1.00	≦0.030	≦0.030	0.50/1.00	0.25/0.45	0.55/0.70	≦0.05	-	-	≧35	56/74	≧16	≧38	-	-	-
		SFVQ 1A	≦0.25	≦0.40	1.20/1.50	≦0.030	≦0.030	0.40/1.00	≦0.25	0.45/0.60	≦0.05	-	-	≧35	56/74	≧16	≧38	-	-	-
美國 (ASME)	鋼板	SA533B Cl…1	≦0.25	0.15/0.40	1.15/1.50	2) ≦0.035	≦0.040	0.40/0.70	-	0.45/0.60	-	2)	-	≧35	56/68	≧18	-	-	-	-
		SA533B Cl…2												≧49	63/81	≧16	-	-	-	-
	鍛鋼	SA508, Cl. 2	≦0.27	0.15/0.40	0.50/1.00	3) ≦0.025	≦0.025	0.50/1.00	0.25/0.45	0.55/0.70	≦0.05	3)	-	≧35	56/74	≧18	≧38	-	-	-
		SA508, Cl. 3	≦0.25	0.15/0.40	1.20/1.50	3) ≦0.025	≦0.025	0.40/1.00	≦0.25	0.45/0.60	≦0.05	3)	-							
西獨 (TUV)	鋼板	22NiMoCr37 (W. Nr. 1.6751)	0.17/0.24	0.10/0.35	0.50/1.00	≦0.015	≦0.015	4) 0.60/1.20	0.30/0.50	0.50/0.70	≦0.03	≦0.18	0.005/0.050	≧40	57/72	≧18	≧45	≧32	≧50	≧14
	鍛鋼	20MnMoNi55 (W. Nr. 1.6310)	0.17/0.23	0.15/0.30	1.20/1.50	≦0.012	≦0.008	0.50/0.80	≦0.20	0.40/0.55	≦0.02	≦0.18	0.010/0.040	≧40	57/71	≧19	≧45	≧32	≧51	≧14

註 : 1) TUV는 350℃ 2) ASME SA 533, 追加要求 S66.1
3) ASME SA 508, 追加要求 S 8.1.2 4) 爐心部 : 60/1,000

1ppm, O_2 < 30ppm), 極低P, S (0.003%以下)를 가능하게하고 있다. 또 大型鋼塊에는 多히트鋳込法(MP法)을 적용하여 偏析을 극소로 하고 材力値에 기여하는 탄소량에 대해서도 특별히 고려한다.

② 結晶粒의 微細化 : 結晶粒의 미세화는 高靭性에 큰 효과를 준다. 結晶粒의 미세화에 대해서는 加工熱処理, 되풀이급속 가열처리, 미세화원소의 첨가 등의 방법이 있으나 大型鋼塊에서는 熱間加工時 加工歪가 일정하지 않고 또 鍛造後 열처리가 끝날때까지 적어도 2회이상 austemite를 반복해야 하므로 미세화원소의 첨가법을 이용하고 있다.

③ 燒入性 : 충분한 燒入性을 확보하는 것은 특히 두꺼운 材의 경우 균일한 기계적 성질을 얻는데 중요하다. austenite化온도는 結晶粒成長을 최소한으로 하기 위해 870~910℃가 선택된다. 燒入水槽는 최대한의 냉각속도를 얻을수 있도록 攪拌裝置를 가진 것으로 하고 있다.

다. 앞으로의 課題

軽水爐는 현대의 尖端技術中에서도 안전성과 설계성능의 달성도에서 뛰어난 成果이다. 이들 재료를 보다 大型化, 一体化, 高靭性化하는 목표를 위해 노력해야 할 것이다.

2. 蒸氣發生器材料

PWR플랜트의구성은 그림 2와 같은데 原子爐를 중심으로하여 증기발생기(SG)에서 증기를 발생하는 곳까지의 원자력증기발생장치, 즉 1차계통설비와 터빈·발전기를 중심으로한 2차계통설비로 분리된다. 이와같이 SG를 介入시켜서 1차계통(NSSS)과 2차계통으로 완전히 분리되므로 保守面에서 매우 유리하다.

PWR에서의 1次側 및 2次側의 수질기준을 表 2에 표시하였다. 1차계통에는 핵분열 반응속도를 제어하는 boron이 함유되어 있는데 boron에 의한 PH低下를 막기 위해 LiOH를 첨가하여 PH를 조정하는 水質管理가 행해지고 있다.

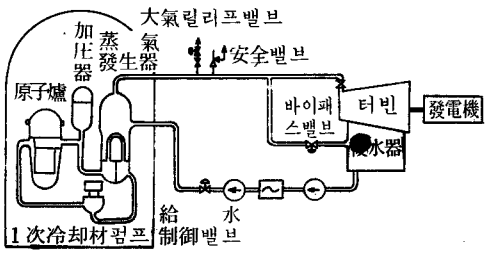
2차계통에서는 당초 燐酸塩(PO_4)処理가 적용되었으나 증기발생기伝熱管이 농축된 燐酸塩에 의해 깍이는 부식손상을 경험하여 휘발성약품처리(AVT)로 바뀌고 있으며 1차계통과 2차계통 모두 溶在酸素를 적게 하도록 제어되고 있다.

다음은 PWR플랜트의 중요부분인 증기발생기伝熱管材料를 대상으로 주로 전열관재료의 손상예와 그 개량방법이다.

가. 蒸氣發生器의 構造

PWR플랜트의 증기발생기는 그림 3에서와 같이 入口 및 出口노즐을 갖는 水室, 열교환을 하는 多数의 전열관, 이것을 지지시키는 管板, 2次側의 湿分分離器, 이것들을 收容하는 胴部등

〈그림 2〉 PWR플랜트의 構成 (1次系統과 2次系統關係)



〈表 2〉 PWR에서의 水質基準

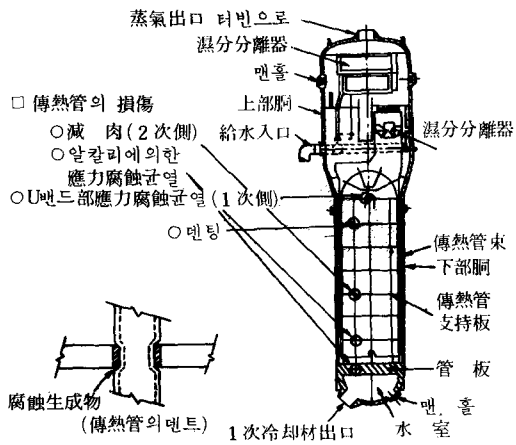
分析項目	1次側水質	2次側水質[3]
導電率(μS/cm, at 25C)	(1~40)[1]	< 2[4]
pH	(4.2~10.5)[1]	8.5~9.3
溶在水素(cc-STP/kg-H_2O)	25~35	—
Li^+ (ppm)	0.2~2.2	—
boron (ppm)	(0~4,000)[2]	—
溶在酸素(ppm)	≦0.005	<0.005[5]
F^- (ppm)	≦0.05	—
Cl^- (ppm)	≦0.05	<0.1
Na^+ (ppm)	—	<0.04
Na/Cl 몰比	—	<0.7

註 : 1) B-Li系의 各濃度의 組合에 따라 결정한다.
2) 플랜트運転狀況에따라 變한다.
3) 蒸氣發生器内水의例
4) cation 導電率
5) 脱氣器出口의 例

〈表3〉 각형식의 증기발생기와 그 특징

	51 型		51 M 型		51 F 型
	初 期	後 期	初 期	後 期	
2次側流動改善	從 來 型		改 善 型		
管支持板形狀	從 來 型		一部改善型		改 善 型
伝熱管材質	인코넬 600(特殊熱處理없음)				TT인코넬 600(特殊熱處理있음)
小U밴드部應力除去	應力除去없음				應力除去있음
管支持板材質	炭 素 鋼				ferrite系 stainless鋼
管板內擴管法	部分擴管		全 厚 擴 管		
濕分分離器改善	從 來 型		一部改善型		改 善 型

〈그림 3〉 蒸氣發生器 및 損傷例



으로 되어있다. 증기발생기에는 U型 튜브식의 구조가 채택되고 있으며 초기의 것에서부터 차차 대형화와 성능향상이 도모되어 왔다.

伝熱管의 內側에는 원자로로 부터의 高温高圧水(약160ata, 약310℃)가, 管의 外面에는 2次系統水가 각각 순환하며 2次系統水는 1차계통의 열로 가열되어 그 일부는 증기(약60ata, 274℃)가 되어서 터빈으로 보내진다. 전열관은 직경22.2㎜, 두께1.3㎜, 直管部의 길이 약10m인 U자형 튜브로서 1대의 증기발생기에 약3,400개, 중량 약50톤이 裝着되어 있다. 伝熱管은 몇개의 管支持板에 의해 지지되고 있으며 兩者의 사이에는 약간의 틈이 있다.

表3에 증기발생기 각형식(日本製)과 그 특징을 나타내었다. 51型의 前에는 44型이 있었으나 이것은 웨스팅하우스社의 설계를 그대로 使用한 형으로 51형에 비해 약간 전열면적이 적은 소형의 증기발생기이었다. 51F형은 51M형에 채택된 개량설계외에 管支持板形狀을 더욱 개량하여 耐濃縮性能을 향상시켜 텐팅대책을 강구한 것이다. 三菱51型(51F型) 증기발생기의 특징을 表4에 표시하였다.

〈表4〉 三菱 51型蒸氣發生器 主要항목(代表例)

1. 사이즈	높 이	20.6m
	上部外徑	4.5m
	下部外徑	3.4m
2. 設計圧力	管 側	175kg/cm² g
	胴 側	76.3kg/cm² g
3. 設計温度	管 側	343℃
	胴 側	291℃
4. 伝熱管	外 徑	22.2㎜
	두 께	1.3㎜
	本 數	3,388本
	材 質	인코넬 600
5. 伝熱面積		4,785m²
6. 發生蒸氣	圧 力	62.5kg/cm² g
	流 量	1,600t/h

나. 蒸氣發生器의 損傷例

현재까지 증기발생기의 전열관에서 경험한 문제점들은 表5와 같다.

① 두께 얇아짐 : 처음에는 거의 대부분의 플랜트에서 2次系統水処理에 녹방지와 복수기누설에 의한 異物에 대한 buffer로 燐酸나트륨을 注入하였었는데 이것이 管支持板隙間部와 管板上의 슬러지(녹 등의 沈着物)堆積部에 농축되었기 때문에 생긴 것이다.

② 應力腐蝕균열 : 대분이 粒界균열(IGSCC)인데 1次側에서 발생하는 것과 2次側에서 발생하는 것으로 大別된다. 前者는 Coriou crack이라고도 하며 高温脫氣水中에서 발생된다. 이것은 특히 殘留應力과 負荷應力이 대단히 큰部位(굴곡반경이 작은 U밴드부의 처음 굽혀지는 遷移點 등)에서만 발생하고 있다.

한편 後者는 管과 管板 또는 管支持板부근에서 일어나고 있다. 그리고 兩者 모두 2次系統水의 水處理에 사용한 燐酸塩에서 遊離한 알칼리 또는 슬러지의 加水分解에서 생긴 알칼리가 틈사이에서 농축된 것에 기인하는 알칼리균열이라고 생각된다.

③ 덴팅 : 管과 炭素鋼製 管支持板과의 사이에 마그네트 등의 부식생성물이 차서 관과 관지지판이 변형되는 현상이다. 덴팅에 의해 U밴드부의 頂部 또는 덴팅이 생긴 관과 관지지판의 隙間部에서 管內面에 應力이 발생하여 관내면부터 IGSCC가 생겨서 누설의 원인이 된다.

다. 蒸氣發生器伝熱管材料의 改良開發

증기발생기에서의 부식손상에 대해서는 설계·환경 및 재료면에서의 종합적인 개량 또는 대

〈表5〉 日本內蒸氣發生器一覽

電力會社	納入發電所	蒸氣發生器基數	蒸氣發生器形式	運開	備考	發生트러블			
						減肉	clevis部應力腐蝕균열	U밴드部균열	덴팅
關西電力	美浜2號	2	44	72.7		×	×		
關西電力	高浜2號	3	51	75.11.			×		
九州電力	玄海1號	2	51	75.10			×		
關西電力	美浜3號	3	51	76.12					
四國電力	伊方1號	2	51	77.9					
關西電力	大飯2號	4	51A	79.12					
九州電力	玄海2號	2	51M	81.3					
四國電力	伊方2號	2	51M	82.3					
九州電力	川內1號	3	51M	84.7(豫定)					
關西電力	高浜3號	3	51F	85.2(〃)	製作中				
關西電力	高浜4號	3	51F	85.8(〃)	製作中				
九州電力	川內2號	3	51F	86.3(〃)	製作中				
日本原子力發電	敦賀2號	4	51FA	87.6(〃)	製作中				
輸入 關西電力	美浜1號	2	CE33	70.11	CE社製	×			
關西電力	高浜1號	3	51	74.11	WH社製	×	×	×	
關西電力	大飯1號	4	51A	79.3	WH社製			×	

註 : CE : Combustion Engineering社, WH : Westinghouse社

〈表6〉 蒸氣發生器伝熱管材料規格의概要

規格 (ASME)	化學成分 (%) C	Si	Mn	P	S	Ni	Cr	Fe	Cu	降伏強度 (kg/mm²)	引張強度 (kg/mm²)	伸長 (%)	絞度 (%)	該當JIS
SB 163 Ni-Cr-Fe (600合金)	≦0.15	≦0.05	≦1.0	—	≦0.015	≧72.0	14.0~17.0	6.0~10.0	≦0.5	≧24.6	≧56.2	≧30	—	NCF 600TB
600合金	≦0.05	≦0.50	≦0.50	—	≦0.015	≧58.0	27~31	7~11	≦0.50	28.1~45.7	≦56.2	≧30	—	ASME CODE CASE N-20

책연구가 행하여져 왔다.

伝熱管이 구비하여야할 성질로는 ①應力腐蝕 균열에 대한 저항이 우수할 것, ② 全面腐蝕抵抗이 우수할 것, ③ 耐孔蝕性이 우수할 것, ④ 기계적성질이 양호할 것, ⑤ 加工性이 양호할 것, ⑥ 용접성(시일용접)이 양호할 것, ⑦ 製管性이 좋을 것, ⑧ 熱伝導가 양호할 것 등을 들 수 있다.

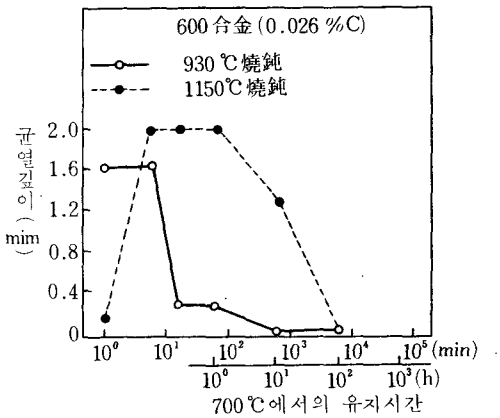
이들 여러성질중 증기발생기에서 특히 중요한 것은 원자로 특유의 환경조건에서의 伝熱管材料에 대한 ①, ② 및③의 요구이다. 이중에서 ①에 대해서는 이미 기술한 바와 같으며, ②의 전면부식저항은 운전·保守종업원의 방사선피폭 저감을 위해 요구되며, ③의 耐孔蝕性은 管과 管支持板사이의 틈에서 염소이온에 의한 孔蝕發生의 방지를 위해 요구된다.

이들 요구를 만족시키는 伝熱管재료로는 종래 600合金이 사용되어 왔다. 그 재료규격의 개요를 690合金과 함께 表6에 표시하였다.

伝熱管材料로 600合金이 널리 사용되어 왔으나 부식손상을 방지하기 위한 응력부식 균열저항 및 耐孔蝕性이 더욱 우수한 전열관 재료를 위한 연구가 행해져서 현재는 TT600合金이 널리 사용되게 되었다. TT600合金에서는 最終燒鈍温度 및 규격범위내에서의 化學成分(특히 탄소, boron) 등의 관리도 행해지고 있다.

그림 4는 600合金의 燒鈍温度, 700℃에서의 유지시간과 高温水中에서의 粒界應力腐蝕 균열

〈그림 4〉 燒鈍 温度, 700℃에서의 유지시간과 高温水中 粒界應力腐蝕균열關係



〈表7〉 MA인코넬600과 TT인코넬600의 耐蝕性等에 미치는 冶金的因子의 影響

化學成分	MA温度	MA 인코넬 600				TT인코넬 600			
		強度레벨 낮은쪽이 양호함	粒界腐蝕저항	應力腐蝕균열抵抗		強度레벨 낮은쪽이 양호함	粒界腐蝕抵抗	應力腐蝕레벨抵抗	
				非脫氣 Cl-入 高温水	高濃度 NaOH			非脫氣 Cl-入 高温水	高濃度 NaOH
低C	低温	○	○	○	△	○	△	△	○
低B									
中C		○	○	○	△	○	○	◎	○
低B									
高C		×	△	△	△	×	○	○	○
低B									
中C		○	△	×	×	△	○	○	○
低B									
低C	高温	○	○	△	×	○	○	○	△
低B									
中C		○	△	×	×	○	△	△	△
低B									

備考 1) ◎ : 우수 ○ : 良好 △ : 普通 × : 나쁨
2) MA : 燒鈍 TT : 特殊熱處理

성과의 관계를 나타낸 것으로 燒鈍溫度 930℃의 경우가 1,150℃의 경우 보다 700℃에서의 鋭敏化回復現象이 빠름을 알 수 있다.

또 表7은 최적의 TT조건선정에 관한 연구결과인데 TT處理를 할 경우 응력부식균열저항의 개선, 粒界부식감수성의 저감의 관점에서 600合金의 탄소함유량은 너무 높거나 낮은 것이 바람직하기 못하며 燒鈍溫度는 낮은 쪽이 바람직스러움을 알 수 있다.

日本通産省은 1975년부터 6개년에 걸쳐 蒸氣發生器信賴性實證試驗을 실시하였다. 이것은 局部的인 實際機器內의 조건을 준 부분부식시뮬레이숀시험 및 증기발생기 전체를 模擬하여 A-VT下에서의 건전성을 실증하기 위한 종합부식시험 등으로서 증기발생기는 통상의 상태에서 관리되고 있는 한 충분한 신뢰성 및 안전성을 갖는다는 것이 확인되었다.

한편 장래의 수요에 대응하기 위해 開發이 추진되고 있는 APWR의 新型증기 발생기에서는 전열관재료와 그 열처리조건의 선택이 주요개량검토사항의 하나로 되어있다. 응력부식균열저항을 개선한 690合金 등이 그 後補材料로 주목받고 있다.

〈그림 5〉 MA 600合金, TT 600合金 및 MA 690合金, TT 690合金의 10%NaOH中에서의 應力腐蝕균열 抵抗의 溫度依存性

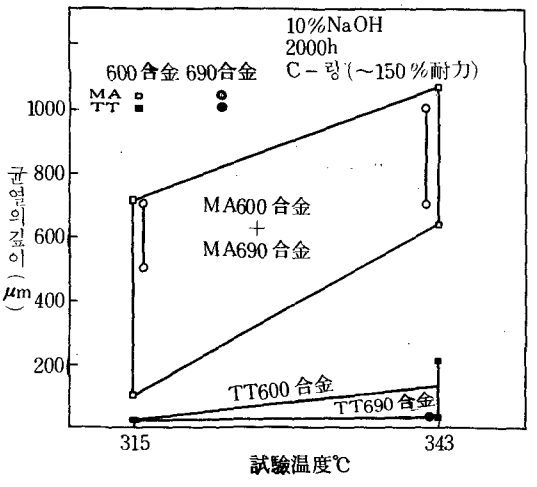


그림 5는 燒鈍 및 TT處理를 한 600合金과 690合金의 10%NaOH용액중에서의 응력부식균열특성을 비교한 例인데 316℃에서는 TT600合金과 TT690合金 모두 응력부식균열감수성에차이가 없으나 343℃에서는 TT690合金쪽이 우수하다는 것을 알 수 있다.

3. 지르코늄을 主로하는 合金

최근의 大型輕水爐(110~120만KW)의 경우 1基當 PWR에서는 피복관으로 약25톤, BWR에서는 연료 피복관과 연료채널로 약75톤의 지르코늄을 主로 한 合金을 사용한다.

가. 輕水炉用 지르코늄合金의 開發

輕水爐의 爐心으로 사용되는 재료에 요구되는 주요특성은 먼저 熱中性子吸收斷面積이 작고 냉각재인 高溫水나 水蒸氣中에서 양호한 耐蝕性 및 구조부재로서의 충분한 기계적 강도등이다. 이와같은 요구특성을 대체로 만족시켜주는 일반적인 재료로서 austenite系 스테인레

〈表8〉 各種材料의 熱中性子吸收斷面積

材料	融點 (℃)	熱中性子吸收斷面積* (barns)	熱伝導度 (cal/sec/℃/cm
알루미늄	660	0.23	0.503
지르코늄	1852	0.18	0.05
銅	1083	3.77	0.943
스테인레스	1400~1500	~2.9	0.04
티 탄	1720	5.8	0.041

*BNL-325 (2nd Edition)

〈表9〉 지르칼로이의 組成

合金名	成分 (Wt%)			
	Sn	Fe	Ni	Cr
Zircaloy-1	2.5	—	—	—
Zircaloy-2	1.5	0.12	0.05	0.10
Zircaloy-3	0.25~0.5	合計 0.25~0.4		—
Ni-Free Zircaloy-2	1.5	0.15	—	0.10
Zircaloy-4	1.5	0.20	—	0.10
Zircaloy改良合金(日本)	1.0	0.17	⟨0.1	0.12

〈表10〉 PWR燃料의 變遷

世　代	第1世代	等2世代	第3世代	第4世代	最近의新設爐
代表的플랜트	Yankee Rowe	Trino	C·Yankee	Beznan	Trojan
燃料管配列	(6×6)×3	15×15	15×15	14×14 (3루프이상에서는 15×15)	17×17
被覆管材質	AISI 348 스테인레스	AISI 304 스테인레스	AISI 304 스테인레스	Zry 4	Zry 4
被覆外徑(㎜)	8.636	9.779	10.439	10.719	9.449
被覆두께(㎜)	0.533	0.384	0.406	0.617	0.544
日本의原子爐				美浜·1	大飯·1～2

스鋼이 있는데 초기 경수로의 피복관으로 사용된 적이 있다. austenite系 스테인레스鋼은 값이 싸고 기계적 성질이나 耐蝕性은 좋으나 表8에서와 같이 비교적 큰 열중성자 흡수단면적을 갖고 있기 때문에 中性子經濟性의 면에서 바람직하지 못하다는 점과 경수로의 爐心환경인 高溫水中에서 응력부식균열감수성이 높다는 점 등으로 지르코늄을 主로하는 合金으로 바뀌어졌다.

지르코늄은 表8에서 보는 바와 같이 열중성자단면적이 적고 적당한 강도, 加工性을 가지고 있는 금속이나 高溫水나 수증기중에서의 耐蝕性은 명백하지 못하였다. 그래서 輕水爐 爐心材料로서의 지르코늄을 主로 하는 合金의 開發이 미국에서 耐蝕性을 목적으로 하여 시작되었었다. 이들 일련의 연구에서 開發된 合金은 表9에서와 같이 개발된 순서에 따라 번호가 붙여졌다.

지르칼로이－1은 耐蝕性을 劣化시키는 질소의 영향을 억제시키는 성분으로 주석을 첨가한 Zn－Sn 2元合金이다. 여기에 철, 크롬, 니켈을 加해서 耐蝕性을 더욱 개선한 것이 지르칼로이－2이다. 지르칼로이－3은 저온에서의 耐蝕性 改善을 목표로 한 것인데 耐蝕性, 강도 등에 대해 만족할만한 결과가 얻어지지 못해서 實用化되지 못하였다.

지르칼로이－2에 대한 材質上의 문제점은 PWR환경에서 水素의 흡수율이 크고, 흡수된 수소가 水素化物을 형성하여 지칼르로이의 延性을 손상시킨다는 우려였었다. 니켈이 지르칼로이의 수소 흡수를 촉진함이 명백해지자 니켈을 제외한 니켈-free 지르칼로이－2, 여기에 철의 농도를 높인 지르칼로이－4가 개발되었다. PWR환경하에서의 수소흡수특성은 지르칼로이－4가 좋고, BWR환경하에서의 耐蝕性은 지르칼로이－2가 좋다는 차이가 있다. 이들 지르칼로이중에서 현재 輕水爐에 사용되고 있는 것은 지르칼로이－2와 지르칼로이－4 두종류이다.

나. 지르칼로이의 使用經驗

PWR은 表10에서와 같이 연료설계의 변천에 따라 제1세대～제4세대로 분류되며 현재 사용되고 있는 연료는 제4세대의 延長上에 있다. 최초의 발전용 PWR인 Shippingport爐에서는 예외적으로 지르칼로이피복관이 채택되었었으나 이것을 제외하면 제3대까지는 스테인레스鋼피복관이었다. 그후 中性子經濟를 개선하기 위하여 제4세대부터 피복관 및 제어봉 가이드 팀블에 지르칼로이－4가 채택되었다.

이상에서 알 수 있듯 현행연료의 사용 조건하에서는 輕水爐燃料被覆管이나 연료채널에 사용되고 있는 지르칼로이－2, 지르칼로이－4 등 지르코늄을 主로 하는 合金이 우수한 爐心材料라고 할 수 있다.