

PWR 1次系統에서 腐蝕生成物 舉動

—放射線源 低減을 中心으로—

PWR發電所에서는 機器의 健全性이 충분히 확보되어 있으므로 앞으로는 방사성 부식생성물의 蓄積을 최대한 낮게 억제하여 被曝線源의 低減化를 도모하는 것이 1次系統 水化學의 중요한 과제이다.

1. 서 론

PWR플랜트에 있어서 정기점검시 등 작업자의 방사선피폭의 주요선원은 1차계 기기·배관 내표면에 부착·축적되어 방사화된 부식생성물(이하 CP라고 약한다)이다. PWR플랜트에서는 수질관리기술의 향상에 따라 기기의 건전성은 충분히 확보되어 있으므로 최근에는 국내의 모두 이 방사성 CP의 축적을 되도록 낮게 억제하여 한층 피폭선원의 저감화를 도모하는 것이 1차계 수화학의 가장 중요한 과제로 되어 있다.

서구형 PWR의 1차계냉각재의 특징은 화학 시스템으로서 붕산(H_3BO_3)이 사용되는 점과 pH조정제로 수산화리튬 (LiOH)이, 물의 방사선분해에 의한 산소(O_2)의 발생을 억제하기 위해 수소(H_2)가 각각 첨가되는 점이다. 또 이 냉각재에 접하는 기기·배관 등 구성재료의 특징은 증기발생기의 전열관에 인코넬 600/900 또는 인코로이 800(KWU 플랜트), 배관·탱크 등에 SUS 300系 상당의 오스테나이트 스테인레스鋼, 연료피복관에 지르칼로이4 및 液接表

面積은 크지 않지만 CP 거동에 의해 중요한 재료로서 연료봉지지格子에 인코넬718, 밸브·제어봉구동장치에 스테라이트합금이 사용되고 있는 점이다.

이러한 還元性 弱알칼리 環境下에서 1차계의 CP거동, 즉 爐心外材料의 부식반응에 의한 CP의 냉각재 속으로 방출(溶解·剝離), 移行, 연료봉표면에 부착·放射化·재방출, 노심외기기 배관표면에 축적 그리고 노심재료에서의 방사성 CP방출, 移行, 축적의 거동은 매우 복잡하지만, 최근 10년간의 국내외 연구자에 의한 수질 및 재료 양면에서의 많은 연구개발에 의해 밝혀진 점도 많아서 그 성과는 순차적으로 플랜트에 적용되어 線源低減에 효과를 올리고 있다.

상술한 사용재료에서 예상되듯이 방사성 CP에는 ^{58}Co , ^{60}Co , ^{51}Cr , ^{59}Fe , ^{54}Mn , ^{95}Zr 등이 존재하지만, 피폭선원으로서 중요한 것은 ^{58}Co 와 ^{60}Co 두 핵종이다. 따라서 PWR 1차계의 CP거동에서는 이 두 핵종과 근親元素인 ^{58}Ni 와 ^{59}Co 의 거동이 중요하며, 1차계수질(관리)의 특징을 살려 방사성 CP의 축적을 최소한으로 하는 제어 조건을 발견하는 것이 오늘의 관심사가 되었다.

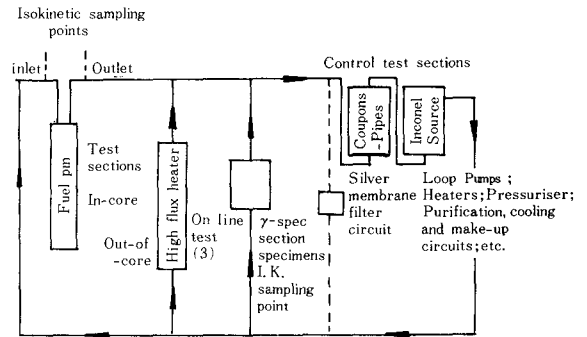
本稿에서는 수화학 국제회의에서 수화학과기 초기 기술 및 장래 기술의 두 세션에서 보고된 PWR의 CP 거동에 관련된 논문을 루프 시험, 모델에 의한 계산기 시뮬레이션, 프레필밍 등 재료의 前處理, 기타 네 부분으로 분류하여 그 내용을 개략적으로 설명하고자 한다.

2. 루프 시험

노심의 기기·배관내 표면에서 방사성 CP의 축적을 최소한으로 억제하기 위한 최적 화학관리 기술을 확립하기 위해서는 수질 뿐만 아니라 재료의 표면상태의 영향도 포함하여 CP의 방출, 이행, 부착의 메카니즘을 밝혀야 할 필요가 있다. 그러기 위해서는 방사성 CP를 다룰 수 있는 루프에 의한 시험이 필수적이다. 회의에서는 인파일루프 등에 의한 시험결과 또는 시험 계획에 관한 세건의 보고가 있었다.

영국의 하웰(Harwell)연구소의 DIDO 재료 시험로에 고온고압수루프가 접속되었다. 그 주요 부분의 블록圖를 그림 1에 표시했는데 노내 시험부에는 짧은 연료봉이 사용되나, 노외 시험부에도 히터가열의 高熱流速 지르칼로이製 모의 연료봉을 갖추고 있다. 또 방사성 CP의 부착속도의 연속모니터로서 γ 線검출기를 갖추고 있다.

루프는 스테인레스鋼으로 만들어져 있으나 PWR 1차계와의 재료밸런스를 좋게 하기 위해



〈그림 1〉 DIDO水물의 블록도

인코넬 600의 금속망으로 만든 물을 장치하는 등 PWR1차계의 모의하는 연구도 고려하고 있다. 爐內링의 中中性子束은 PWR플랜트의 피크 中中性子束과 동등하지만, 速中性子와 熱中性子の 比는 약간 작다. 실험은 1사이클 23일간을 원칙으로 해서 방사성 CP의 이행, 축적에 미치는 H_3BO_3 농도와 $LiOH$ 농도의 영향을 조사했다. 표1에 1사이클 및 3사이클 照射시험 후의 연료핀에 CP부착량을 표시했다. pH6.3(300℃)의 低pH운전시의 CP 부착량은 Co-ordinated B/Li(pH 7.0) 및 高pH(pH 7.6~7.8) 운전시의 부착량에 비해 분명히 많다. 이 거동은 스피넬산화물 용해도의 온도계수에 근거한 이행·부착 모델로 설명할 수 있다. 그러나 부착 CP의 比放射能은 高pH보다 低pH쪽이 작으며, 연료핀 위에서의 체류시간이 보다 짧아진 것으로 생각할 수 있다. 또 Co-ordinated B/Li 운전에서는

〈表 1〉 燃料핀으로의 附着

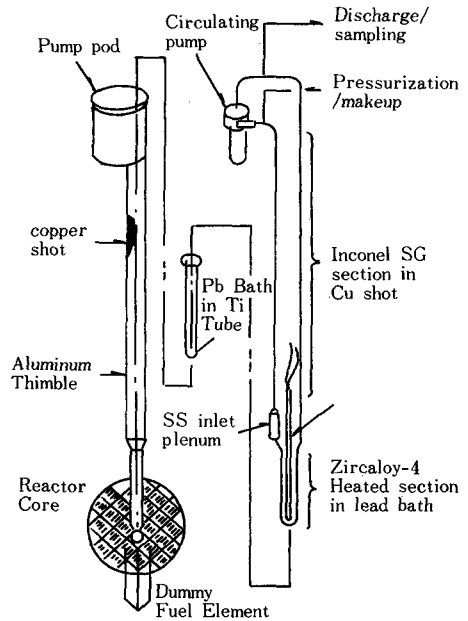
Duration (days)	Coolant composition			Deposit removal	Concentration $mg \cdot m^{-2}$			Activity $MBq \cdot m^{-2}$			
	[Li] (ppm)	[B] (ppm)	pH (300℃)		Fe	Ni	Co	^{59}Fe	^{54}Mn	^{58}Co	^{60}Co
23	2.2	200	7.6	LOMI	17	2.6	0.10	5.9	0.13	1.1	8.7
23	0.5	1,200	6.3	LOMI	94	29	0.32	2.6	0.09	1.0	4.6
				LOMI&POD	100	33	0.34	3.8	0.11	1.3	8.1
23	14	1,200	7.8	POD	22	2.5	0.18	3.5	0.08	3.5	6.7
22	14	2,000	7.5	POD	12	3.9	0.19	0.8	0.18	0.75	5.0
69	2.2	1,200	7.0	LOMI	78	12	0.30	12.5	0.41	4.7	43
77	0.3	50	7.0	LOMI	19	1.9	0.09	10.9	0.57	5.2	34
64	0.5	1,200	6.3	LOMI	140	31	0.32	9.0	0.19	2.9	13

LOMI: Low Oxidation State Transition Metal Ion, POD: PWR Oxidative Decontamination

H₃BO₃ 농도가 높은 쪽이 부착량이 많은 경향을 확인할 수 있다. ⁶⁰Co는 부착CP 속 뿐 아니라, 연료피복관 지르칼로이의 산화피막(ZrO₂) 속에도 들어가 있음이 확인되었다. 노심밖에 설치되어 있는 히타가열의 모의연료핀에 방사성 CP의 부착·축적거동에도 이와 같은 현상이 확인되었다. 재료의 표면상태에서는 인코넬 600의 용접부에 방사성 CP 축적이 현저했다.

미국의 MIT에서는 PWR의 定pH운전에 의한 방사성 CP의 축적거동을 조사할 목적으로 인파일루프 PCCL(PWR Coolant Chemistry Loop)을 설계·제작하여 연구용 원자로(MITR-II)에 설치했다. 그림 2에 PCCL 노심설치부의 주요기기를 나타냈는데 개념적으로는 증기발생기 전열관 1개와 연료봉 프로채널 1개를 모의했다. 루프의 水力직경과 길이는 PWR플랜트의 거의 1/3이다. 이 루프는 소형 캔드르타 펌프, 노심에 출입이 용이한 히타가열의 모의 연료핀 등을 채용함으로써 콤팩트하여 경제적인 것이 되었으며, 테스트런마다 새로운 배관으로 교환할 수 있게 되어 있다. 抽出系에는 부착방사능 모니터로서 스테인레스鋼製 캐피라리가 있고, Na I 검출기로 연속적인 계측을 한다. 표 2에는 CP의 이행에 영향을 미친다고 생각되는 諸因子에 대해 PWR플랜트와 PCCL을 비교해 표시했는데 플랜트의 조건을 한층 재현할 수 있도록 PCCL에서는 신중한 치수설정이 되고 있다. MITR-II의 중성자스펙트럼, 中性子束, γ線束은 경수로에 가까운 것이며, 軸방향의 평균 γ線 및 中性子束은 각각 10⁹R/hr, 1×10¹⁴n/cm²(>0.1MeV), 3×10¹³n/cm²(熱中性子)이다. 이와 같은 루프를 사용한 시험이 멀지 않아 실시될 예정이지만, 방사성 CP의 축적에 미치는 Co-ordinated B/Li관리의 효과를 확인하기 위해 B/Li比가 다른 5가지의 시험이 계획되어 있다. 얻은 결과는 CRUDSIM, CORA, PACTOL 등의 계산코드로 비교검토하도록 되어 있다.

상술한 영국 하웰 및 미국 MIT의 시험은 인



〈그림 2〉 MIT PWR 模擬試驗 루프 概略

〈表 2〉 移行支配因子의 루프/PWR比較

Mechanism	Parametric Dependence	Ratio : Loop/PWR	
		Core	Steam Generator
Film ΔT	$q'' (D_k V^4)^{1/5}$	$\equiv 1.00$ (specified)	0.93
Bulk ΔT	Q/m	0.76	0.76
Shear stress, γ	$(V^3/D_k)^{1/5}$	0.70	0.45
Erosion rate	$\sim \gamma^{0.85}$	0.74	0.52
Particulate transport coefficient	$\sim \gamma^{0.50}$	0.84	0.67
Boundary layer thickness (mas, heat, momentum)	$(D_k/V^4)^{1/5}$	1.09	1.27
Transfer coefficients (mass, heat)	$(V^4/D_k)^{1/5}$	0.91	0.79
Film T gradient	q''	0.91	0.73
Soluble mass flux			
Heat flux			
Velocity	V	0.77	0.57

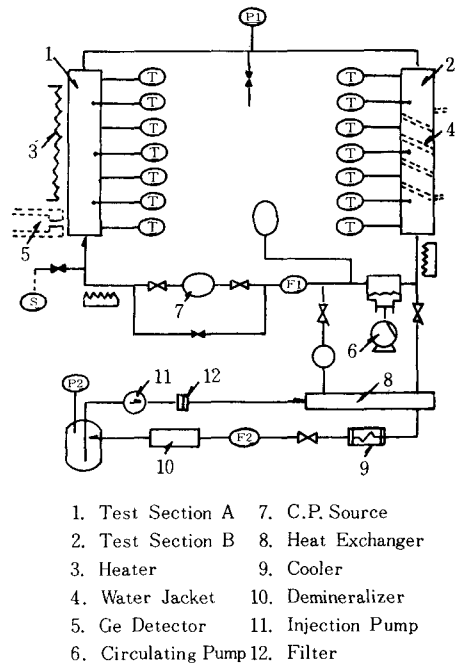
파일루프에 의한 것이지만 일본의 三菱회사의 시험은 방사성 CP를 트레이서로서 사용하는 소형 루프에 의한 것이다. 시험의 목적은 MIT의 시험과 같고, 방사성 CP의 이행·축적거동을 조사하여 爐心外機器·배관표면으로의 축적

을 최소한으로 억제하기 위한 pH관리법을 밝히는 것이다. 그림 3에 시험장치의 흐름을 나타냈지만 CP발생장치에서 방출되어 시험부에 부착된 미량의 방사성 및 비방사성 CP 쌍방의 이행량을 평가할 수 있도록 脱着가능한 2개의 금(Au) 内裝 시험부를 갖춘 소형루프이다. 시험부의 하나는 PWR연료집합체의 온도분포를, 다른 하나는 증기발생기의 온도분포를 각각 갖도록 제어된다. 最大流量은 0.5 l / min로 매우 작지만, 이온모양 CP의 이행방향은 溶解度の 온도계수에만 의존하므로 시험결과에 영향을 주지 않는 것으로 생각되고 있다. CP의 이행량 평가는 방사성 CP에 대해서는 시험부의 외측에서 Ge검출기로 연속적으로 모니터링함으로써, 비방사성 CP에 대해서는 시험부를 떼어내어 제염하여 제염액의 분석에 의해 구하고 있다. 수질은 조정탱크에의 H₃BO₃와 LiOH의 첨가에 의해, 수소는 탱크의 커버가스 압력에 의해 조정된다. 또 이 루프시험에서는 이온모양 CP의 거동을 추적하기로 되어 있으므로 抽出系에는 이온모양의 CP농도조정을 위한 이온교환樹脂塔과 크라트모양의 CP를 제거하기 위해 필터를 갖추고 있다. 이 루프는 현재 조정운전중이지만 멀지 않아 CP용해도의 온도계수에 미칠 pH의 영향에 대한 시험이 개시될 예정이다.

3. 계산코드에 의한 CP거동평가

플랜트의 복잡한 CP거동을 평가하기 위해서는 계산기가 필수적이며, 국내외에서 계산코드의 개발이 추진되고 있다. 이번 회의에서는 방사능 추적저감에 미치는 재료 또는 재료 속의 Co함유량의 영향평가 등에 관해 네건의 보고가 있었다.

프랑스 원자력청의 Beslu 팀이 개발한 PACTOL 코드는 PWR플랜트의 방사성 CP의 추적경향과 분포 등을 평가하도록 모델화 되어있고, PWR의 운전조건과 설계변경에 따른 제현상의 예측

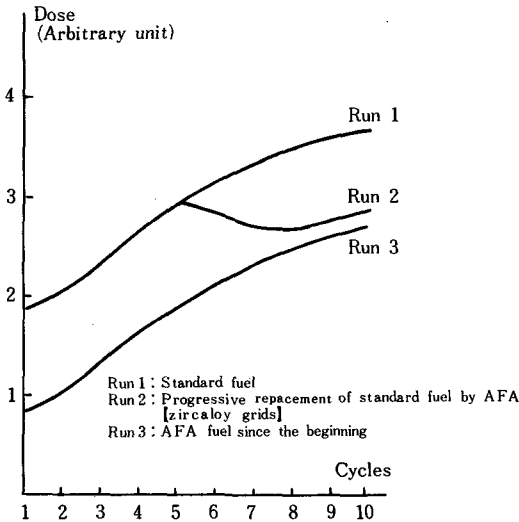


〈그림 3〉放射性 CP試驗루프 · 흐름도

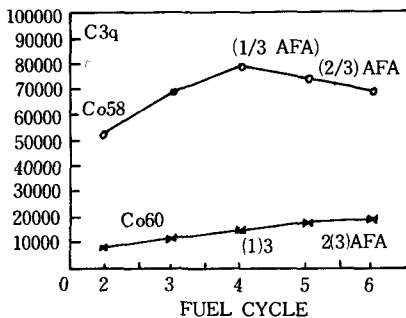
을 할 수 있다. 이 코드를 사용하여 방사성 CP의 축적억제를 위한 최적관리pH와 축적에 미치는 재료속의 Co함유량, 재료의 표면粗度, 연료집합체 支持格子材 변경 등의 효과가 계산되어 다음과 같이 예측되었다. 최적pH는 7.2(300℃, Marshall 팀의 물의 解離定數를 사용) 라고 생각된다. 단, 사용하는 물의 해리정수와 溶解度에 따라 이 pH値는 변동하므로 일반화되기 전에 實플랜트에 적용하기로 하고, EdF(프랑스 전력청)에서는 48基의 PWR 중 6基에 이 新pH 관리법을 채용했다. 재료관련에서는 ⁶⁰Co의 발생원은 통상 증기발생기 전열관이지만, 밸브와 펌프에 사용되고 있는 스테라이트의 마모가 큰 경우와 연료집합체 지지격자의 Co함유량이 큰 경우에는 이 영향이 시간이 감에 따라 커진다. 또 재료의 表面粗度を 작게 하는 것은 방사성 CP의 축적억제에 효과가 있으나 핵종에 따라 다르며 시간과 함께 작아진다. 이를 테면, 表面粗度を 2.75μm에서 0.25μm로 했을 경우 ⁶⁰Co의 축적억제계수는 제1사이클이후에는 2.04이지만

제5사이클이후에는 1.65가 될 것으로 예측하고 있다. 증기발생기 水室의 溶接波를 억제할 수 있으면 이 계수를 3~4로 하는 것도 가능하다고 한다. 그림 4에는 연료집합체의 지지격자를 인코넬에서 지르칼로이로 변경했을 경우 노심 외선량률의 저감효과를 표시했는데 이 지르칼로이製 지지격자 연료집합체(AFA)의 채용은 선량률의 저감에 크게 기여할 것임이 예측되었다. 그림 5에 Tricastin 1호기의 증기발생기 전열관에 부착한 ⁶⁰Co와 ⁵⁸Co량을 나타냈듯이 제4사이클 이후 1/3씩의 연료가 AFA로 교체되고 있으며 實測値와 豫測値는 매우 좋은 일치를 나타냈다.

三菱원자력의 大島팀이 개발한 CRSEC코드



〈그림 4〉 爐心外線量率에 미치는 지르칼로이 그리드의 影響

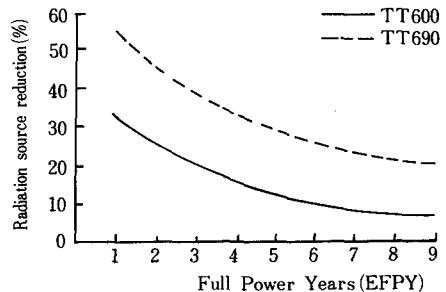


〈그림 5〉 蒸氣發生器傳熱管으로의 蓄積放射能

에는 1차냉각수 및 接液部材料의 산화피막 속의 방사성핵종 뿐 아니라 그 親元素의 거동도 발생되고 있으며, 물질이동계수에는 국내 PWR 플랜트의 데이터를 중심으로 결정되고 있으므로 국내플랜트의 수질변화와 이온모양 또는 크러드모양 CP농도의 經時變化 및 淨化流量變化에 따른 線源強度 변동의 영향 등이 평가가능하게 되어 있다. 그리고 통상운전시 뿐 아니라 노정지시에도 적용할 수 있는 특징을 갖고 있다. PWR플랜트의 模擬水質 조건하에서 부식시험 데이터와 이 CRSEC코드에 의해 증기발생기 전열관재료를 MA600 (Mill Annealed)에서 TT 600) 또는 TT690(Thermally Treated)으로 변경했을 경우의 방사선원 저감효과를 예측했다. 그림 6에 평가결과를 도시했으나 TT600을 채용했을 경우에는 제1사이클 운전 후에 32%, 10년 평균해서 15%의 저감효과가 기대되며, TT690 채용의 경우에는 각각 55%, 31%의 저감효과가 기대된다고 한다.

또한 MA材에 비해 TT材의 CP방출율이 작으나, 이것은 재료 속에 미량의 Ti가 TT처리중에 형성되는 얇은 산화피막 속에 농축되어 TiO₂가 풍부한 산화피막이 형성되는 것이 그 원인의 하나로 생각되고 있다.

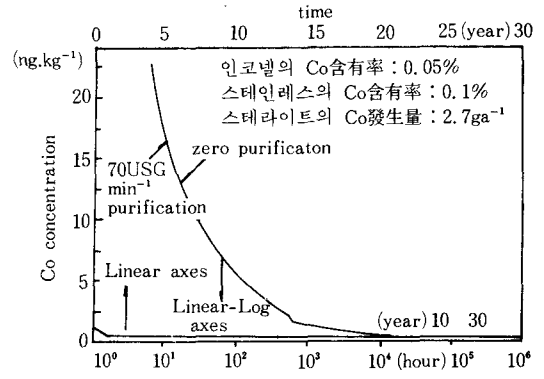
캐나다원자력공사의 Lister는 PWR의 CP방출량은 재료표면에 형성되는 보호산화피막에 의존한다고 말하고, 기존 이론 및 데이터를 사용하여 1차계를 모의한 간단한 CP 방출모델을 만들어 각 재료로부터 Co의 방출량에 대해



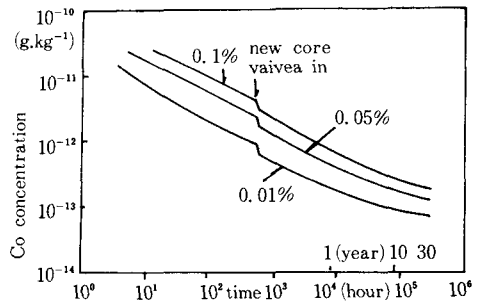
〈그림 6〉 인코넬 TT600/TT690採用에 의한 線量率 低減效果

예측했다. 그림 7의 1차냉각수중 Co농도의 시간변화에서 분명하듯이 Co농도는 10시간 후의 $17\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 에서 30년 후에는 $0.12\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 로 감소되지만, 최초의 100시간 정도의 감소량이 30년간의 감소량 거의 전부를 차지하고 있다. 여기에서 시험운전시 3주간의 HFT(Hot Function Test)에 $2.2\text{ng} \cdot \text{kg}^{-1}$ 에 까지 저감되리라고 예측하고 있다. 그림 7의 케이스에서는 스테라이트에서 Co의 방출량을 $2.7\text{g} \cdot \text{y}^{-1}$ 로 일정하다고 하지만, 이 경우 냉각수 속 Co의 주요한 발생원은 증기발생기 전열관의 인코넬 600이다. 그림 8에 인코넬 합금속의 Co함유율의 영향평가를 표시했다. Co함유율을 0.05%에서 0.01%로 감소시키는 것이며, 냉각수 속의 Co농도 감수계수는 30년간 이상에 걸쳐 2.5정도가 될 것으로 예측했다. 이에 반해 스테인레스강 속의 Co함유율은 그다지 기여하지 못하고, 스테라이트의 기여는 시간이 지날수록 커질 것으로 예측하고 있다.

미국 WH社의 Roesmer는 $170\sim 238^\circ\text{C}$ 에서 조작할 수 있는 고온 샘플링장치를 제작했다. 이에 따라 채취한 1차냉각수 속의 CP농도와 종래의 저온 샘플링법에 의한 CP농도 및 계산 코드에 의한 計算値를 비교했다. 표3에 Ni에 대한 實測値와 計算値의 비교를 표시했다. 실측치는 샘플링온도에 관계없이 거의 같은 값을 나타내고 있으나 계산치와 비교하면 현저한 차이가 확인되며, 고온에서는 과포화로 되어 있으나 저온에서는 현저하게 미포화에 있음을 확인할 수 있고 1차냉각수는 예상 이상으로 動的平衡에 있다고 생각되었다. Fe에 대해서도 같은 결과가 얻어지고 있을 뿐 아니라, 고온의 콜로이드성분 및 크러드모양의 CP농도는 상온의 2~4배인 것도 확인되었다. 따라서 CP의 고온에서 용해도 데이터의 한층 정비와 콜로이드모양의 물질형태와 거동에 관한 기초데이터를 취득하여 현재의 1차계 방사능 이행모델의 적용성을 재검토하여 토론할 필요가 있다고 말하



〈그림 7〉 1次冷却材中 Co濃도의 經變化



〈그림 8〉 1次冷却材中 Co濃도에 미치는 인코넬합금속의 Co含有率의 影響

〈表 3〉 Ni의 溶解度實測値와 計算値의 比較

Conditions	Solubilities in $\mu\text{g}/\text{liters}$ at Temp. Sample No.				
	1	2	3	4	5
Observed Hot	20.7	3.4	15.9	38.9	8.6
Computed Hot	0.5	0.4	0.4	0.4	0.6
Saturation Factor (O/C) ^a	41	8.5	40	97	22
Observed Ambient	31.7	...	9.7	21.7	8.1
Computed Ambient	3,816	...	464	464	323
Saturation Factor (O/C)	0.008	0.05	0.03

a. Computed solubilities are based on $\text{Ni}_{0.5}\text{Fe}_{2.5}\text{O}_4$ Solubility.

b. Saturation Factor : Observed Solubility divided by Computed Solubility.

고 있다.

4. 프레필링

1차계기기·배관표면에 방사성CP의 축적을

〈表 4〉表面處理와 蓄積比放射能

	Doserate	Mn-54	Co-58	Co-60
As Removed from Manway Seal Plate				
Inconel 600				
E/P	0.28	0.30	0.27	0.34
E/P+P/V	0.40	0.38	0.47	0.50
304 L Stainless Steel				
E/P	0.71	1.02	1.10	0.91
E/P+P/V	0.57	0.48	0.38	0.50
After 15 Minutes Ultrasonic Cleaning				
Inconel 600				
E/P	0.20	0.14	0.10	0.12
E/P+P/V	0.40	0.27	0.32	0.39
304 L Stainless Steel				
E/P	0.93	0.94	0.90	0.93
E/P+P/V	0.73	0.64	0.37	0.52

(As-received=1.0)

억제하기 위한 하나의 대책으로서 플랜트건설 시 재료표면에 적당한 산화피막형성 등의 전처리를 하는 연구를 진행하고 있다. 여기서는 CP의 방출을 억제하기 위한 전산화처리와 전해연마도 포함하여 보고한 네건의 개요를 소개한다.

미국 RCT社의 Asay팀은 인코넬600과 304L 스테인레스鋼에 대해 電解鍊磨(E/P), 전해연마+酸化前處理(P/V : 250~315℃의 습한 공기에 의한 처리에서 RCT프로세스라 부르고 있다)를 실시하여 증기발생기의 맨웨이실板上에 부착해 표면처리의 효과를 實플랜트에서 조사했다. 표4에는 벨기에의 Doel 2호기에서 3,800시간 시험한 결과를 未處理材(수령한 그대로의 재료)의 比로 표시했다. 그동안 Doel 2호기는 Co-ordinated B/Li 관리가 실시되었다. 이 결과로 밝혀졌듯이 전해연마는 인코넬 600에 대해서는 현저한 효과가 확인되었으나 스테인레스鋼에 대해서는 전혀 효과를 확인하지 못했다.

그러나 RCT처리를 실시하면 兩材料에서는 거의 같은 정도의 효과가 있으며, 50% 정도의 CP축적억제효과가 확인되었다. 또 Tihange 발전소의 316 스테인레스鋼製실板上에 E/P+P/V처리를 실시했던 바 핫레그, 콜드레그의 쌍방에 60% 정도의 저감효과가 확인되었다.

한편 전술한 DIDO루프에서 실시된 Wood-

〈表 5〉⁶⁰Co 蓄積에 미치는 프레필밍의 影響

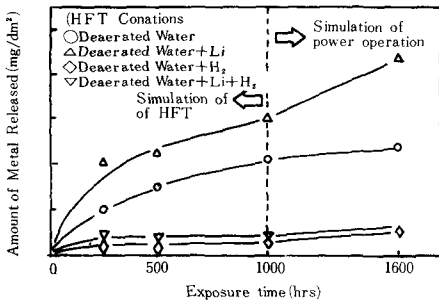
Duration (days)	Coolant chemistry			Ratio of ⁶⁰ Co uptake on prefilmed and non-prefilmed coupons	
	[B] ppm	[Li] ppm	pH 300℃	stainless steel type 304	Inconel -600
78	1,200→50	2.2→0.3	7.0	1.7	1.1
23	1,200	0.5	6.3	1.1	1.3
75	1,200	0.5	6.3+7.6	1.4	1.1
23	1,200	14	7.8	2.6	1.1
22	2,000	14	7.5	2.1	0.8

〈表 6〉프레필밍의 ⁶⁰Co 蓄積抑制效果

Treatment/Process	Normalized ⁶⁰ Co Activity (As-received=1.0)
Electroless Pd	0.038±.003
Ni-electroplating	0.110±.010
Chromate treatment	0.731±.224
Mixed phosphate	0.732±.215
Disodium EDTA	0.879±.084
Boric acid	0.880±.021
High pH oxidation	0.911
Mixed chromate	0.932±.020
Chromate conversion	0.958±.098

wark 팀의 시험결과를 표5에 표시했는데 인코넬600, 304스테인레스鋼 모두 미처리재에 비해 프레필밍材 쪽이 ⁶⁰Co의 축적량이 많다는 결과를 얻었다. 단, 이 경우는 프레필밍 처리조건이 같지 않다고 하고 있는 만큼 그 내용도 밝혀지지 못했다.

미국 EPRI의 Wood는 최근 수년간에 개발 또는 시험한 각종 표면처리방법에 대해 소개했다. PWR조건하에서 처리효과의 확인시험에는 AECL·X-2루프가 사용되었다. 결과는 ⁶⁰Co축적량에 관해 각 표면처리재와 미처리재의 比로 정리하여 표면처리에 의한 축적억제효과를 검토했다. 결과를 표6에 나타냈다. PWR조건하에서는 산화피막을 형성시키는 전처리는 처리법에 관계없이 그 효과는 작아 0.73~0.96이었으나, 非晶質Ni-P피막과 無電解Pd膜은 매우 효과가 큰 것으로 나타났다. 또 Wood는 이밖의 시험도 아울러 생각하면 우선은 PWR에서는 전해연마, 공기산화 또는 脫氣水에 의한 프레



◁그림9 인코넬 600의 CP放出量

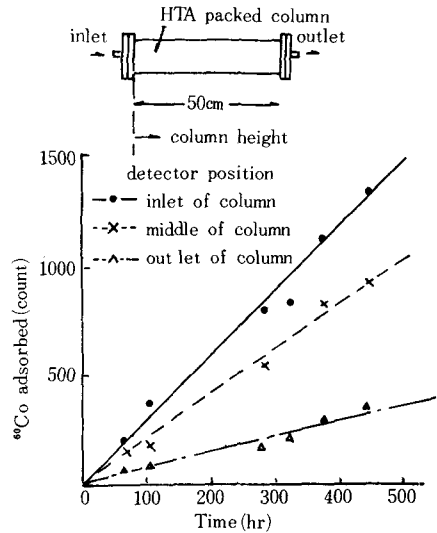
필밍처리를 하고, 계속해서 高pH운전을 하는 것이 가장 효과가 크다고 말하고 있다.

三菱원자력의 横山팀은 CP방출억제의 관점에서 산화피막 형성처리를 시험운전기간중의 核加熱前 HFT時에 실시할 것을 검토하고 있다. 종래에 일본의 PWR플랜트에서는 HFT時의 수질로서 脱氣水 또는 Li첨가수가 사용되어 왔으나, H₂를 첨가했을 경우의 효과에 대해 시험했다. 그림 9에 인코넬 600에 관한 시험결과를 표시했다. 수소첨가에 의해 금속방출량이 현저히 억제되고 있으며, 계속하여 실시된 출력운전시 수질조건하에서의 시험에서도 방출량은 낮게 억제되고 있기 때문에 HFT時的 피막형성에는 수소를 첨가하는 것이 좋다고 말하고 있다.

5. 그밖의 소식

그밖의 CP 또는 수질관리관련의 소식을 간단히 소개한다.

三菱원자력의 北尾팀은 Fe-Ti-O系 세라믹스의 고온흡착재를 개발하여 PWR 1차냉각수 조건하에서의 ⁶⁰Co와 각종 금속이온의 흡착시험을 실시하여 Co, Ni 뿐만 아니라 다른 遷移金屬에 대해서도 흡착특성이 우수한 점을 나타냈다. 그림 10의 시험결과에서 밝혀지듯이 ⁶⁰Co 흡착량은 칼럼의 각 위치에서 시간에 대해 직선적으로 증가하여 定速으로 흡착되고 있다. 이 흡착재의 Co이온 흡착용량은 온도에 의존하



◁그림 10>칼럼內的 ⁶⁰Co吸着特性

여 고온에서 커지지만 300℃에서 1.5mg/cm² 이라고 말하고 있다.

日機裝의 入谷팀은 PWR 1차냉각수의 電導도와 맨니트를 첨가했을 경우의 電導도에서 1차냉각수 속의 B, Li 그리고 pH를 이론식에 의해 산출하는 시스템을 개발했다고 보고했다.

핀란드의 Chanfreau 팀은 高温水 속에서 사용가능한 水質모니터의 개발을 추진하고 있으며 고온pH計에 관해서는 할덴爐에서 실증시험을 실시하여 순조롭게 작동했음을 소개했다.

6. 결 론

본고는 PWR 1차계의 CP거동에 관해 매우 한정된 수의 연구보고를 종합한 것이기는 하지만 국내외의 동향을 알 수 있다. 즉, 방사성 CP의 축적을 최소한으로 하기 위해 水質과 재료의 양면에서 연구가 예의 추진되고 있으며, 또 계산코드 精度의 향상을 도모하면서 계산기에 의한 방사성 CP 축적의 장기예측 또는 저감효과의 평가가 추진되고 있다. 이러한 착실한 연구에 의해 복잡한 CP거동이 조금씩 밝혀져 PWR 플랜트에서 보다 더 방사성 CP의 저감이 가능해질 것으로 기대된다.