

《解 說》

原子爐冷却水の 放射化學管理

梁 慶 麟

韓國原子力研究所 放射分析室

1. 原子爐 冷却水の 放射線分解

1.1. 放射線の 化學作用

放射性物質로부터 放出되는 α 粒子, β 線, 加速된 陽性
子, 重陽性子和 같이 電荷를 가지고 있으면서 高速으로
運動하고 있는 粒子는 物質을 通過할때에 그 運動에너
지를 주로 非彈性的衝突에 의하여 衝突된 原子 또는 分子
의 퍼텐셜 에너지로 變換하므로써 상실하게 된다. 이온
化作用은 그와같은 粒子들의 顯著한 特徵으로서 이와같
은 거의 모든 粒子의 共通性이다. γ 線, X線은 充電效
果 또는 콤펙트效果에 의해서 電子를 放出하고 放出된 電
子는 얻은 에너지를 非彈性的衝突에 의하여 잃어버린다.
電荷를 갖고있지 않은 中性子는 우선 그 에너지를 彈性
衝突에 의하여 잃고 運動에너지를 交換한다. 그러나 中
性子の 衝突을 받은 原子는 衝突할때 에너지保存則과
運動量保存則에 따라 電荷를 얻어 이온化粒子가 된다.
이와같이 이온化放射線の 非彈性的衝突에 의하여 특히 物
質이 水溶液인 경우, 계속해서 化學變化가 일어나게된
다.

放射線이 物質에 미치는 效果는 放射線에 의한 이온
化, 勵起, 이온分子反應, 解離에너지移動等の 1次反
應과 이온重和, 勵起分子反應, 活性化된 遊離基의 生成
等の 2次反應으로 나누어 生覺할 수 있다. 放射線の 種
類로서는 電子波 및 輕粒子에 屬하는 γ 線, X線, 電子
線, β 線과 重粒子인 n, p, d, α , 核分裂片을 生覺할 수 있
다. 原子核 및 輕粒子는 高速度의 電子를 통하여 이온
化 및 勵起를 일으켜 放射線通路 近傍物質에 에너지를
준다. 重粒子의 放射線은 輕粒子보다 훨씬 이온化率
이 크며 散亂이 적어 直進한다. 따라서 生成된 이온密
度는 크고 通路距離는 極히 짧다. 荷電粒子가 物質속을
1cm 通過할 때 상실하는 에너지를 LET(linear energy

transfer)라고한다. LET는 放射線の 種類 및 에너지
와 媒質에 따라 결정되는데 일반적으로 放射線の 에너
지가 작고 粒子가 무거울수록 크다. 放射線の LET는
表 1과 같다.

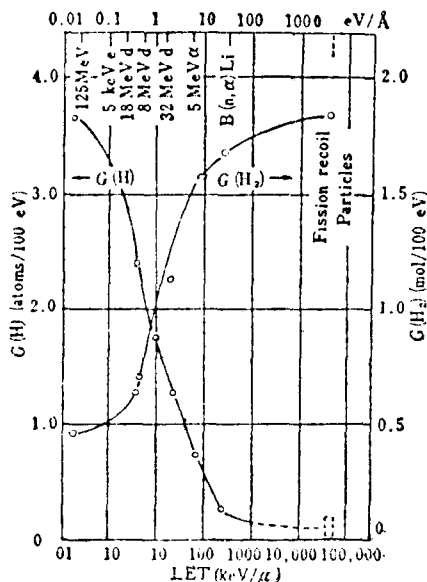
放射線이 物質에 작용하는 최초의 과정에서 1次反應
으로서 이온, 勵起分子等の 中間活性種이 생기고 이들
이 몇개씩 모여 集團을 만든다. 이들은 계속해서 2次反
應으로서 中間活性種 相互間의 反應 및 活性種과 周圍
媒質分子와의 反應을 일으키게 된다. LET가 큰 放射線
의 경우에는 活性種集團 사이의 거리가 가까워서 活性
種끼리 反應하여 活性을 잃는다. LET가 작은 放射線의
경우에는 集團에서 擴散, 外部分자와 反應하는 기회가
많다. 따라서 LET가 큰 경우에는 遊離基-遊離基反應
의 G值가 커지고 LET가 작은 경우에는 遊離基-中性
分子反應의 G值가 커진다. 여기서 G值라고 하는것은
放射線化學反應의 收率을 나타내는 값으로 吸收된 에너
지 100eV當 變化를 일으킨 分子 또는 이온의 수로서 나
타내며 核反應의 放射化斷面積에 해당된다. 1eV는
 $1.602 \times 10^{-12} \text{erg} = 3.823 \times 10^{-2} \text{cal}$ g分子當 23.06kcal이
다. 放射線에 의한 化學作用에 관여하는 中間活性種의
性質은 다음과 같다. 이온은 2~3개가 集團으로서 존재
하며 放射線化學反應의 初期過程에서 중요하다. 陽 ion

表 1. 放射線の LET值

放 射 線	LET(eV/A)
$e^- (0.01 \text{ MeV})$	0.23
$e^- (1 \text{ MeV})$	0.02
$^{60}\text{Co-r ray}$	0.02
$p (1 \text{ MeV})$	2.8
$\alpha (1 \text{ MeV})$	26.4
$\alpha (10 \text{ MeV})$	5.6

表 2. γ 線에 의한 水의 分解에 대한 pH, D_2O 및 溫度의 影響

	中 性 溶 液		0.4M 硫 酸 溶 液	
	H_2O , 25°C	D_2O , 25°C	H_2O 25°C	H_2O 65°C
G_{H_2}	0.45	~0.28	0.45	0.43
$G_{H_2O_2}$	0.73	—	0.79	0.75
G_H	2.75	~3.24	3.63	3.79
G_{OH}	2.23	—	2.95	3.16
$G(-H_2O)$ net	3.65	~3.80	4.53	4.66
$G(-H_2O)$ gross	5.0	—	6.0	6.1

第 1 圖. 여러가지 放射線에 의한 水로부터의 H_2 , H 의 初期 G值

이 陰 ion보다 關與度가 높으며 이온은 擴散 放電等에 의해서 集團적으로 移動하여 反應한다고 생각된다. 이온이 直接關與하는 反應으로서는 氣體中の 이온分子反應, 低溫에서의 放射線重合, 低溫에서의 高分子格子結合反應等を 들수 있다.

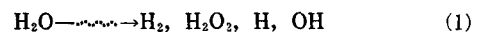
電子는 이온化 할때 떨어져 나와 物質을 通過하면서 에너지를 상실하고 陽이온과 結合하여 中性分子가 된다 水溶液에서는 H_2O 와 結合하여 H_2O^+ 가 된다.

勵起分子는 數個가 한集團을 이루고 있다. 勵起分子는 解離하여 遊離基가 되며 熱이나 빛을 내고 活性을 상실할때도 있다. 遊離基는 勵起分子의 解離에 의해서

生成되며 遊離基反應은 一般化學反應과 같다.

1.2. 放射線과 水의 相互作用

水溶液의 放射線分解生成物을 설명할때 종래에는 初期過程을 (1)式과 같이 표시하고



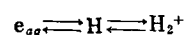
生成되는 化合物의 G值는 사용하고 있는 放射線의 種類, 에너지, 溶液의 pH, 溶質의 濃度, 溫度에 따라서 예를들면 表 2와 같이 정해져 있다고 생각하고 後續反應을 고찰해 왔다. 만일에 溶質이 없는 純水의 경우에는 (2), (3)의 連鎖反應이 뒤따라 일어나 H_2 및 H_2O_2 의 收率은 顯著하게 적어 진다고 생각해 왔다.



그러나 初期過程에서 생기는 H 나 OH 는 모두 실제의 水素原子나 水酸基이어야 할 필요는 없으며 그들과 등등한 化學反應을 일으키는 化合物이면 된다. 예를 들면 OH 는 그의 酸型인 H_2O^+ 로서도 좋을지도 모른다. 그와는 반대로 鹽基性 溶液에서는 OH 의 鹽基型인 O^- 로서 존재할지도 모른다. 또한 H 에 대하여서도 같은 모양으로 實際로는 H 의 鹽基型으로 生覺되는 水和된 電子 e_{aq} 또는 H_2C^- 와 酸型으로 生覺되는 H_2^+ 가 反應에 關與하고 있을지도 모른다. 實際로 H_2^+ 는 放射線化學 以外에서도 그의 存在가 生覺되고 있다. 以上을 整理하며는 酸化性遊離基 즉 OH 에 대하여서는



또 還元性 遊離基 H 에 대하여서는



와 같은 平衡關係를 생각할수가 있다. 各各의 遊離基에 있어서 左邊과 右邊의 相異한 點은 H^+ 를 順次로 더해 가는 것에 相當하고 있다. 이들과 같은 좀 疎遠한 遊離

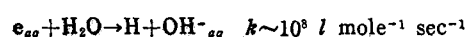
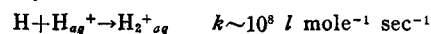
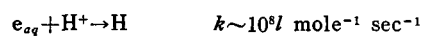
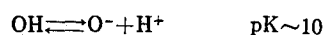
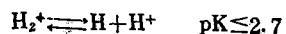
表 3. 水の放射線分解에 對한 時間의 近似的 尺度

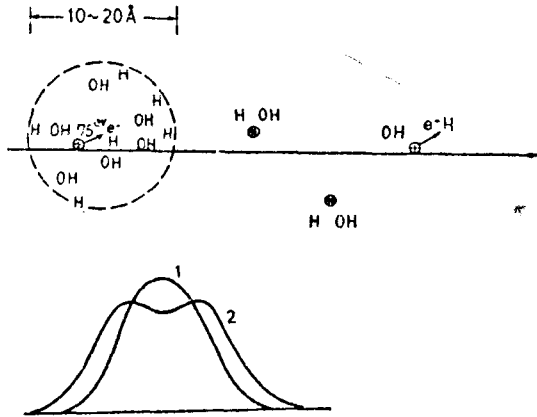
段 階	時 間 (sec)	內 容	反 應	存在하는 種類
物理的段階 (水과 1次放射線과의 相互作用)	10^{-18}	MeV 領域의 에너지의 電子가 分子의 直徑程度の 距離를 橫斷한다.		
	10^{-17}	MeV 領域의 에너지의 α 粒子가 分子를 橫斷한다.		H_2O^+ e^-
	10^{-16}	熱電子 (0.025eV)가 分子를 橫斷한다.	$H_2O \xrightarrow{\text{熱電子}} H_2O^+ + e^-$	H_2O^*
	10^{-15}	다. MeV의 에너지의 電子에 依해서 順次的으로 ion化하는 사이의 時間. 電子勵起狀態에의 垂直 勵起에 對한 時間.	$H_2O \xrightarrow{\text{熱電子}} H_2O^*$	spool 또는 飛跡帶內에 存在
物理化學的 段階 (에너지 移動, 解離, ion—分子反應)	10^{-14}	ion—分子反應 分子振動의 周期 反發狀態로 勵起된 分子의 解離	$H_2O^+ + H_2O \rightarrow H_3O^+ + \cdot OH$ $H_2O^* \rightarrow H\cdot + \cdot OH$ 溶媒內에서 일어나며 繼續해서 逆反應이 일어난다.	$\cdot OH$
	10^{-13}	2次電子가 이 時間에 熱 에너지로 減少한다. 電子捕獲 (Samul-imgee model) 높은 電子勵起狀態에서 最低狀態로 內部轉移	$H_3O^+ + e^- \rightarrow H\cdot + H_2O$	H^+
	10^{-12}	遊離基가 擴散中 뛰어넘어 移動	$e^- \rightarrow e_{aq}^-$ (Platzman model)	$H\cdot$ $\cdot OH$
	10^{-11}	水の 雙極子 配向을 爲한 緩和 時間	$e^- + H_2O \rightarrow H\cdot + OH_{cq}^-$ (Lea-Gray model)	e_{aq}^- $H_2O^*(?)$
化學的 段階 spool이나 飛跡帶內에서의 遊離基—遊離基反應에 따라서 遊離基 生成物이나 分子生成物의 液體內로의 擴散이 일어난다. 液體內에 本質的으로 均一하게 分布되어 있는 溶質과의 反應	10^{-10}	擴散이 液體中에서 反應을 制御하는 最小 時間	$H\cdot + \cdot OH \rightarrow H_2O$ $2\cdot OH \rightarrow H_2O_2$	(spool이나 飛跡帶內部 및 其 附近에서)
	10^{-9}			
	10^{-8}	1重項勵起狀態의 輻射壽命, 分子生成物의 形成이 r線 Spool內에서 完了	$2H\cdot \rightarrow H_2$	$H\cdot$
	10^{-7}	分子生成物의 形成이 α 粒子飛跡內에서 完了	$2e_{aq}^- \rightarrow H_2 + 2OH^-$ (높은 LET 粒子의 飛跡內에서는	$\cdot OH$ e_{aq}^-
	10^{-6}	遊離基가 mol 濃度の 溶質과 反應하는 時間 (5kcal/mol의 活性化 에너지)	$\cdot OH + H_2O_2 \rightarrow H_2O\cdot + H_2O^-$	$H_2O^*(?)$
	10^{-5}			H_2
	10^{-4}	MeV의 에너지의 電子의 飛跡內에서 遊離基가 spool 사이의 距離로 擴散하는데 要하는 時間 3重項勵起狀態의 輻射壽命		H_2O_2
	10^{-3}	化學變化 完了		$(H_2, H_2O_2 \text{ 및 溶質과의 遊離基 反應生成物})$
	10^{-2}			
	10^{-1}			

註) $\xrightarrow{\text{放射線}}$ 는 放射線을 吸收하는 過程을 表示한다.

※ 는 分子 또는 ion의 勵起狀態에 있음을 表示한다.

基의 存在의 可能性에 對하여서는 그 個個에 對하여 일찍부터 論議되어 왔으며 平衡定數, 速度定數에 對하여서도 다음과 같은 特定值가 주어져 있다.

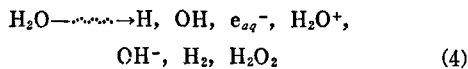




第 2 圖. 高速荷電粒子에 의한 水の 分解로 生成된 遊離基의 初期分布

그러나 수많은 연구에도 불구하고最近까지는 이들 遊離基의 明確한 區別을 必要로 하는 水溶液放射線化學의 實驗事實은 찾아낼 수 없었다. 따라서 簡單한 表現인 H와 OH를 使用해서 充分하였다.

따라서 (1) 式은 다음 (4) 式과 같이 表示할 수 있다. 即 純水 또는 稀薄水溶液에 電離放射線이 入射되려는 水の 初期分解反應으로서

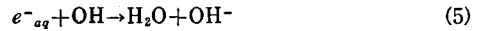


(4) 式의 反應이 일어나고 繼續해서 이들 中間體의 相互作用, 또는 溶質과의 反應이 일어난다. (4) 式의 反應은 spool內에서 短時間內에 進行되지만 放射線의 LET에 依하여 spool의 樣相이 顯著하게 다르므로 各 中間子種의 生成率에 差가 생기게 된다. (第 1 圖)

溶質이 存在하지 않을때 反應 (4)로써 生成된 分子狀 生成物은 spool밖으로 擴散 然後에 遊離基와의 反應에 依하여 最終적으로 原來의 水로 되돌아온다. 實際로 純水를 낮은 LET의 放射線으로 照射하였을 때 水の 分解는 絶보기로는 일어나지 않는다. 그러나 높은 LET의 放射線으로 照射하였을 때에는 遊離基生成物에 比하여 分子狀生成物의 收率이 높아지고 逆反應 以上으로 水の 分解反應이 일어나게 된다. 낮은 LET의 放射線에 依해서도 系가 開放되어 있을 때에는 水素의 一部가 逆反應에 依하여 分解되기 전에 氣相으로 移動하므로 水素의 發生을 볼 수 있다. 또 系內에 溶質이 存在하여 그것이 遊離基와 反應하여 逆反應을 抑制하며는 結果적으로 水の 分解가 일어난다. 液相의 水の 放射線分解에

對한 時間의 近似的 尺度는 表 3과 같다.

溶質의 濃도와 生成物收率과의 關係는 全적으로 速度論的 考察에 依하여 說明된다. 예를 들면 H^+ ion 또는 e_{aq}^- 의 捕捉劑 S의 濃도를 變化시키면 이들은 spool에서 일어나는 反應인



(5), (6) 反應과 競爭의으로 e_{aq}^- 와 反應하여 還元種의 收率을 增加시킨다. 即 (7) (8)의 反應이 일어나게 된다.



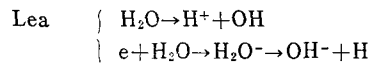
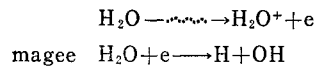
實際로는 G(red)의 急激한 上昇은 pH=3에서 일어나고 여기에서는

$K \times [\text{H}^+] = (2.3 \times 10^{10}) (10^{-3}) = 2.3 \times 10^7 \text{ l/mol} \cdot \text{sec}$ 이 된다. 따라서 spool內에서의 反應에 溶質이 關與하려면 一般的으로 $K \times [\text{S}] \geq 10^7 \text{ l/mol} \cdot \text{sec}$ 의 條件이 必要하게 된다. G(H_2)와 G(H^+)의 濃도에 있어서도 두 種類의 溶質, 하나는 e_{aq}^- 와 反應하기 쉬운 溶質, 다른 하나는 H와 反應하여 $\text{H} + \text{RH} = \text{H}_2 + \text{R}$ 에 依하여 H_2 를 發生하는 溶質을 加하므로써 調査하게 된다. 이 境遇에 G(H_2)는 다음 式으로 주어진다.

$$G(\text{H}_2) = G\text{H}_2 + G\text{H} \left[\frac{K[\text{S}]}{1 + \frac{K[\text{S}]}{K[\text{H}^+]}} \right] \quad (9)$$

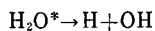
여기에서 G(H_2)는 絶보기상의 G值이고 GH₂는 初期段階의 G值를 나타낸다.

水の 放射線分解의 初期過程에서 생기는 遊離基의 分布에 對해서는 두가지 模型이 生覺되어 왔다. 即 magee 模型과 Lea 模型이 그것이다. magee 模型에서는 하나의 水分子가 放射線에 依하여 ion化되면 過剩의 運動 에너지를 가진 原子가 放出되어 이것이 衝突하면서 約 1000Å°을 달리는 사이에 몇개의 水分子를 ion化 또는 勵起시키는데 原來의 H_2O^+ 로 부터의 距離는 平均 20Å°이므로 에너지를 全部 使用한 後에 columb 引力에 依하여 H_2O^+ 로 되돌아와 最終적으로는 數雙의 H와 OH를 生成한다고 生覺한다. 그리고 其에 所要되는 時間은 10^{-13} 秒 程度이고 그사이에 溶質等과의 反應을 일으킬 可能性은 없다고 生覺하고 있다. 生成된 H와 OH의 spool內에서의 分布는 따라서 最初에는 同型이다. 第 2 圖의 曲線 1이 그에 相當한다. 한편 Lea 模型에서는 放出된 電子는 過剩의 에너지를 잃어 버릴때 까지 原來의 ion으로부터 50Å° 以上이나 떨어져 버려서 最後에는 다른 水分子에 捕捉된다고 生覺한다. 두개의 模型에 따른 反應은 다음과 같은 反應式으로 나타낼 수 있다.

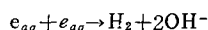


即 Lea 모델에서는 OH와 H의 초기분포가 다르다. OH의 분포를 第2圖의 曲線 1이라고 하면 H는 曲線 2라고 생覺할수가 있다.

이와 같은 분포를 가지고 生成된 遊離基가 時間과 함께 擴散하고 그 사이에 spool內에서 遊離基 相互間에 反應한 것이 G_{H_2} , $\text{G}_{\text{H}_2\text{O}_2}$ 로서 觀測되고 spool 밖으로 도망친 것이 G_{H} 및 G_{OH} 로서 觀測된다고 생覺한 것이다. Magee 모델은 Lea 모델보다 簡單하므로 많은 理論的 計算이 Magee 모델에 따라서 最近에는 電子計算器에서 行하여져서 $\text{G}_{\text{H}_2\text{O}_2}$ — G_{H_2} 의 關係, 分子收率의 溶質濃度 增大에 따른 減少等의 說明이 成功的으로 이루어 지고 있다. 그러나 한편 Magee 모델에서는 pH의 影響이나 同位體效果의 說明에는 難點이 있음이 알려졌다. 同位體效果에 對하여 생覺해 보려는 表2에 表示되어 있는 바와 같이 D_2O 로 부터의 分子收率 G_{D_2} 또는 $\text{G}_{\text{D}_2\text{O}_2}$ 와 遊離基收率 G_{D} 또는 G_{OD} 의 比와 H_2O 로 부터의 分子收率과 遊離基收率과의 比와를 比較하러는 Magee 모델에서 豫想되는 比와는 反對가 된다. 即 萬一에 H와 OH가 同型的 分포로 부터 擴散하기 始作한다고 하러는 D는 H보다 擴散이 느릴것이고 分子收率은 커질 것이다. 萬一에 現在까지 G_{H} 로서 測定되어 왔던 것이 모두 e_{aq} 를 對象으로 하고 있었다고 하러는 Magee 모델보다도 Lea 모델에 가까운 形의 새로운 模型을 생覺할 必要가 있으며 遊離基擴散理論은 大幅的인 修正을 必要로 할것이다. 아직 이런 分野에서의 研究는 없지만 가까운 將來에 急速한 發展이 豫想된다. 그리고 또 G_{H} 가 모두 e_{aq} 에 對한 것이 었다고 하면 e_{aq} 外에는 還元性遊離基는 생기지 않는 것이 되며 第2圖에 表示되어 있는 것과 같은 勵起分子로 부터의 다음과 같은 分解도 없는 것이 된다.



이렇게 생覺하게 되려는 또한 몇가지의 重要한 疑問이 생겨나게 된다. 例를 들러는 萬一에 H는 e_{aq} 와 H^+ 가 反應하여 H_2 로 生成된다고 하러는 G_{H_2} 는 도대체 무엇 을 뜻하느냐는 것이다. 이의 說明을 위하여서는 다음과 같은 反應을 考慮하지 않으면 안될지도 모른다.



또한 還元性遊離基에 對한 아직까지의 理論이 옳다고 하러는 當然히 酸化性遊離基 G_{OH} 에 對한 같은 內容의 研究가 豫想된다.

1.3. 原子爐冷却水 照射線源

^{235}U 原子 한개의 核分裂에 依하여 平均 2.5個의 中性子和 約 200MeV의 에너지가 放出된다. 이들 에너지는 여러가지 形態로 放出되어 系內에 吸收되는데 其 內譯은 表 4와 같다.

表 4. 原子爐의 熱出力內譯

에너지의種類	^{235}U 1個當의 에너지 (MeV)	百分率 (%)	吸收되는 主된 場所 (不均質爐)
核分裂粒子 (f. f.)	166±1	83.4	燃料棒
速中性子 (n)	4.8±0.1	2.4	減速材
β 線 (f. f.로부터)	7		
	13.5±0.9	3.5	燃料棒
γ 線 (f. f.로부터)	6.5	3.3	燃料棒
(核分裂)	7.2±0.8	3.6	減速材等
(n捕獲)	7.6±0.9	3.8	遮蔽材
合計(熱出力)	199±0.9	100	

不均質型原子爐를 생覺하였을 境遇 原子爐冷却水の 放射線分解는 γ 線과 高速中性子에 依하여 發生한다. 高速中性子의 境遇에는 水分子와 直接 作用하는 것이 아니고 減速材인 重水 또는 輕水에 依하여 減速되는 過程에서 水分子의 水素原子와 衝突하여 陽子 또는 重陽子를 生成한다. 따라서 高速中性子에 의한 分解는 2次的으로 生成된 陽子, 重陽子에 依한 放射線分解이다.

核分裂에 依하여 生成된 中性子の 分포는

$$N_n(E) = ae^{-bE} \sin h(CE)^{1/2}$$

으로 表示된다. 一般的으로는 近似式으로서 $a=0.484$, $b=1$, $c=2$ $E=2.0$ 이 잘 쓰인다. 이들 中性子の 에너지 分포에 따른 反跳陽子の 에너지分포는

$$N_p(E) = -\frac{1}{E} \int_E^\infty n(E) dE$$

가 되며 其의 初期 LET는

$$L_0 = \frac{1.870}{E} - \log_{10} (E/0.0303)$$

이 된다. 따라서 이들 式으로부터 얻어지는 初期 LET의 分포를 $P(L_0)$ 라고 하면 G値은 L_0 의 函數이므로 H, H_2 等의 初期 G値은

$$G = \{ \int G(L_0) P(L_0) dL_0 \} / \{ \int P(L_0) dL_0 \}$$

로 表示될 것이다.

한편 熱中性子의 寄與로서는 $H(n, r)D$, $D(n, r)T$ 等

의 반응에 의한 γ 선 및 반향粒子的 효과가 존재하지만 이들의 핵반응의 斷面積이 적기 때문에 一般적으로는 熱中性자에 의한 直接 間接의인 水의 分解는 無視된다. 그러나 原子爐의 化學制禦의 경우에는 溶質의 濃度에 따라서 其 效果는 無視할수 없을 境遇도 있다.

이에 比하여 γ 선의 寄與로서는 核分裂에 수반되는 γ 선과 短半減期の 核分裂로 生成된 核種으로 부터의 γ 선의 效果가 있다. 原子爐冷却水에 의한 γ 線吸收 에너지는 γ 線의 分布를 測定하므로써 다음式에 의하여 計算할 수 있다.

$$E(\text{eV/MW}\cdot\text{hr}) = K\rho R dV$$

여기에서 ρ : 水의 密度 (g/ml)

R : 水中의 線量率 ($\gamma/\text{MW}\cdot\text{hr}$)

V : 爐心周廻의 冷却水量 (ml)

K : 換算計數 (5.8×10^{13} eV/g·r)

吸收線量은 爐構造에 따라서 다르지만 全體 γ 線의 約 70% 程度가 一次冷却水에 吸收된다.

1.4 原子爐冷却水の 放射線分線

原子爐에서는 冷却水가 放射線에 의하여 分解하여 酸素와 水素가 發生한다. 水分子 H_2O 는 水素原子 H 와 水酸基 OH 로 2個의 遊離基로 分解된다. 이 分解에 依해서 生成된 遊離基 H 와 OH 는 其 自體가 大端히 活性이기 때문에 相互間에 反應을 일으켜서 다시 水分子를 形成하기도 하고, 水素氣體나 過酸化水素分子를 形成한다. 過酸化水素는 繼續해서 水分子와 酸素氣體로 分解한다.

이와 같은 現象을 化學反應式으로 나타내면 다음과 같이 된다.



(1) 式에서 生成된 H 와 OH 는 서로 反應하여



이 된다. 위의 反應은 Forward Reaction 이라고 불리우는 것으로 (1) (2) (3)式을 綜合하여 整理하면 다음과 같이 된다.



위의 Forward Reaction으로 生成된 H_2O_2 는 강한 放射線下에서 또는 溫度가 150°C 以上이 되면 다시 分解하여 (5)式과 같이 水分子 H_2O 와 酸素分子 O_2 를 生成한다.



即 (4)式과 (5)式을 整理하면 2個의 水分子가 分解하여

水分子와 水素分子 各 1個씩과 $\frac{1}{2}$ 個의 酸素分子를 生成하게 된다.

또한 (1) 式에서 生成된 H 와 OH 와의 사이에서의 反應은



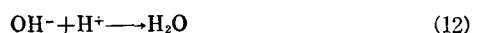
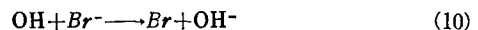
가 되는데 (4) 式에서의 生成物인 H_2O_2 및 H_2 와 反應하여



가 된다. (7) (8)式은 連鎖反應을 形成하므로 結局은 水分子 H_2O 를 生成하여 (9) 式과 같이 된다.



위 反應을 Back Reaction이라고 하며 放射線分解된 H_2O_2 와 H_2 는 다시 애당초의 水 H_2O 가 된다. 이와 같이 放射線에 의한 水의 分解는 Forward Reaction과 Back Reaction과의 平衡이 破壞되었을때 일어나게 되며 그 因子로서는 放射線의 種類, 에너지, 密度, 原子爐冷却水의 溫度, 原子爐冷却水中的 不純物, 沸騰現象 등이 있다. 예를 들면 原子爐冷却水中에 Cl^- , Br^- , I^- 등이 존재하는 이들 ion은 遊離基捕捉劑로서 作用하여 水素原子 H 및 水酸基 OH 가 ion狀의 H^+ 및 OH^- 가 되어 곧 水이 된다. 따라서 Back Reaction인 (7) (8)의 反應을 일으킬 H 와 OH 가 적어져서 平衡이 破壞되므로 分解를 促進하게 된다. 即



또한 沸騰等에 의하여 水의 分解生成物인 H_2 , H_2O_2 가 原子爐冷却水로부터 逸散하게되는 條件이 만들어 지며는 水의 分解를 助長하게 된다. 따라서 BWR型 原子爐의 境遇에는 水의 放射線分解에 의하여 多量の 酸素와 水素가 發生한다. 이에 反하여 PWR型 原子爐는 加壓 Loop이므로 沸騰現象이 없어서 BWR보다 本質적으로 水의 分解는 적다. 또한 分解하여 生成된 H_2O_2 는 原子爐冷却水系를 離脫하지 않고 다시 H_2O 가 된다. 더욱이 給水에 H_2 氣體를 添加하거나 水酸化리튬을 使用하여 pH를 10前後로 維持하고 있으므로 水의 放射線分解는 거의 일어나지 않는다. 다음에 冷却水의 照射條件의 變化에 따른 몇가지 效果에 對하여 簡單하게 記述한다.

1.4.1. 沸騰狀態에서의 分解

水を 靜止狀態 또는 密閉系에서 氣泡가 發生하지 않

게循環시키는 상태에서 γ 線 또는 原子爐의 放射線을 照射시킬때 發生하는 水素의 결보기의 G 値는 10^{-3} 수준이다. 그러나 系를 長期間 稼動시켰을 때는 水中의 水素濃度도 增加하고 水素는 遊離基 OH의 捕捉劑로서 作用한다. 따라서 全發生量은 平衡에 이르게 될것이다. 平衡値는 當然히 線量率에 依存하지만 10^6 /hr 程度에서는 10^{-4} mol/l 程度라고 推定된다. 水이 沸騰狀態에 있을 때에는 水中에 氣泡가 發生한다. 이 경우에는 1次分子生成物의 一部는 遊離基에 의한 攻撃을 받기전에 氣泡속에 擴散하고 난다. 한 實驗에서는 水中에 He氣體를 注入하여 水中에 氣泡를 發生시켜 最高値로서 $G(H_2)=0.23$ 을 얻었다. 또 Hert 등은 간단한 實驗裝置를 써서 CO_2 를 注入시켜 $G(H_2)=0.40$, $G(O_2)=0.20$ 을 얻고 있다. 即 결보기의 G 値는 氣泡속에서의 擴散과 水素의 逆反應과의 比에 따라서 定해지는 것으로서 冷却水의 狀態에 따라 $G(H_2)$ 는 10^{-3} 수준으로부터 最高 0.45까지의 값을 가질 수 있다.

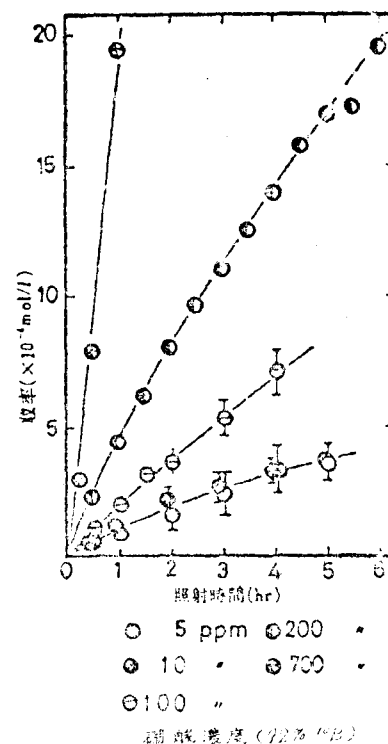
1.4.2. 爐出力變化에 의한 效果

冷却水를 純水라고 하려는 發生하는 水素는 全體가 分子狀의 生成物이다. 따라서 水素의 收率에 爐出力依存性이 나타난다면 그것은 spool의 數와 飛跡이 겹치는데 따른 效果에 의해서 說明된다. 至今 γ 線照射의 경우를 生覺해보면 spool은 直徑이 10~20Å이고 平均 2.5~5個의 遊離基를 가지고 있으며 飛程에 따라서 5,000Å 程度의 比較의 큰 間隔으로 퍼져있다. 爐出力의 增加에 따라 線量率이 增加하면 spool의 겹침현상이 發生하여 分子收率이 增加될것이 豫想된다. 實際로 LET가 낮은 放射線에서도 10^6 /min 以上の 線量率에서는 分子收率이 增加하는 것이 報告되어 있다. 그러므로 正常的인 原子爐 稼動條件에서는 單純히 線量率의 增加만을 生覺하면 充分할것이다. 實際로 JROR, EBWR, SENN, Dresden 등의 爐에서의 氣體發生量은 約 1.5l/min·Wt임이 報告되어있다. 이에 對하여 Halden의 HBWR의 試驗結果에 依하면 蒸氣中の 氣體發生量에 爐出力依存性이 보이고 있지 않다. 이 結果는 定性的으로는 爐出力의 增加에 따른 線量率의 增加와 燃料體 近傍에서의 氣泡의 增加에 의하여 說明된다. 氣泡의 增加는 水의 吸收線量을 低下시키지만 氣泡中에서의 分子生成物의 擴散效率의 增加를 가져오게 한다.

1.4.3. 不純物 및 添加物의 效果

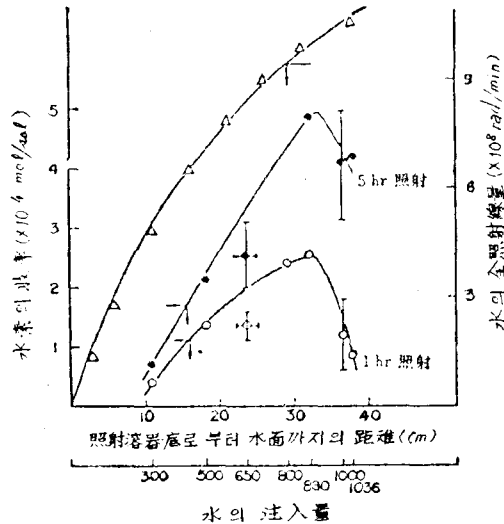
水의 放射線分解의 觀點에서 不純物로서 問題가 되는 것은 有機物外에 空氣中の 窒素의 固定化에 의한 硝酸

ion 등이 있다. 이들은 水系の 逆反應을 抑制하는 作用을 한다. 그러나 水의 精製裝置를 備置한 原子爐冷却水 中에서의 이들의 濃度는 極히 적어서 實際로는 別로 問題가 되지 않는다. 그러나 原子爐의 化學制製法으로서 硼素化合物을 添加하였을 때에는 그의 效果를 考慮할 必要가 있다. 豫想되는 效果로서는 $^{10}B(n, \alpha)^7Li$, $^{11}B(n, n\alpha)^7Li$ 의 核反應에 附隨되는 것으로서, 反跳粒子에 의한 分解 및 溶液濃度の 上昇과 化合物의 化學的 效果로서 1次分解生成物과의 反應 및 pH의 變化 등이 있는데 實際로는 核反應에 의하여 생기는 反跳粒子의 附加적인 水의 分解가 가장 重要하다. 한 예로서 ^{10}B 에 대하여 100ppm 程度의 境遇를 生覺해보면 約 0.1mol/hr의 水素의 發生이 豫想된다. 그러나 實際로는 그의 大部分은 逆反應에 의하여 分解해 버리고 100ppm 程度의 濃度範圍에서는 그의 效果는 別로 없다. (第3圖 参照) 以上



第3圖. 靜止硼酸 水溶液으로 부터의 水素의 發生量 (線量率: 1.74 Mrad/min)

原子爐冷却水의 放射線分解에 대하여 簡單하게 記述하였는바 實用爐의 實質의인 氣體 發生量은 原子爐型뿐만 아니라 運轉條件에 따라 크게 左右되므로 미리 正確하



第 4 圖. 水の注入量과 水素의 收率과의 關係
(線量率 1.74 Mrad/min)

게 豫測한다는 것은 大端히 困難하다. 第 4 圖는 內徑 20cm의 stainless steel 容器에 重水를 넣고 原子爐에서 照射하였을때의 水素의 發生量을 나타내고 있다. 發生量은 全吸收線量에 대하여 單純한 依存性을 나타내지 않는다. 상세한것은 불명확하지만 한가지 生覺할 수 있는 것은 어떤 水深 以上에서 發生한 分子生成物은 水面에 擴散하기 전에 逆反應에 의하여 水로 되돌아 가서 實際로는 어떤 水深까지의 放射線分解를 考慮하면 된다 그 有効水深은 當然히 水の 對流, 溫度等에 따를 것인데 하여간에 水の 全吸收線量을 基礎로하여 水素의 發生量을 豫測하는 것은 過大評價가 될것이다.

2. 原子爐冷却水の 放射化學管理

2.1. 原子爐冷却水中的 放射能

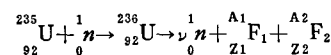
2.1.1. 核分裂反應에 基因하는 核種

Uranium의 同位體에는 質量數가 234, 235, 238의 것이 있는데 이들중에서 熱中성자에 의해서 核分裂을 일으키는 것은 質量數 235 및 234가 주이고 이들 核種의 熱中성자에 대한 核分裂의 斷面積은 대체로 400~500 barns이다. Uranium의 同位體中에서 質量數 235의 것의 天然 Uranium中의 存在量은 0.7%程度이다.

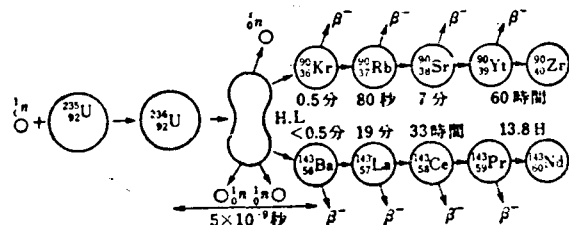
主成分인 質量數 238의 Uranium은 1MeV 以上の 中성子로서 비로소 核分裂을 일으킨다. 2.4 MeV의 中성子에 대한 ^{238}U 의 核分裂의 斷面積은 0.5 barn이다. 熱中성子에 대한 ^{238}U 의 核分裂斷面積은 $1/v$ 法則에 따라서 減少한다. 1MeV이상의 中성子로서 核分裂을 하는 것으로는 ^{238}U 이외에 ^{232}Th , ^{231}Pa 가 있다. 그리고 싸이크로트론에서 얻어지는 더욱 높은 에너지의 中성子, 重水素核, α 粒子等에 의해서 原子番號 73以上の 여러가지 核種에 대하여 核分裂이 일어날수 있음이 確認되었다. 人工放射性元素로서는 ^{233}U 이나 ^{239}Pu 과 같은 長壽命이고 또한 中성子에 의한 核分裂斷面積이 큰것이 있다. 또한 93番以上の 核種은 熱中성子로서 核分裂을 하는것이 많을뿐만 아니라 自然核分裂을 하는것이 많다.

Uranium의 原子番號, 即 核속의 프로톤의數 Z 에 대한 中성子の數 $A-Z$ 의 比는 $146\sim 143/92\approx 1.6$ 程度인데, 分裂하여 生成되는 原子番號가 58~35程度의 原子核에서는 이 比가 $46/35\sim 86/58\approx 1.3\sim 1.4$ 程度로서 1~3個의 中성子が 分裂과 同時에 放出되지만 그래도 아직 中성子が 過剩이기 때문에 分裂生成核은 原子番號에 比하여 質量數가 큰 不安定한 核이다. 이들 不安定한 核은 β 崩壊를 계속해서 2~5回 하므로써 原子番號가 質量數와 均衡이 잡힌 安定한 核이 된다. 개중의 特殊한 生成核은 中성子를 放出하는 것도 少數있다.

核分裂이 일어나는 過程은 大體로 다음과 같이 生覺되고 있다. 例를들면 처음에 $^{235}\text{U}+n$ 로서 複合核이 생기면, 이 複合核은 5×10^{-16} 秒程度의 時間사이에 2~3個의 中성子를 放出(蒸發하는 것과 같이 放出)하고 거의 이와 同時에 2個의 原子核으로 分裂한다. (第 5 圖)이 現象을 式으로 나타내면 다음과 같다.



여기에서 $\nu\approx 2.4$ 이고 $Z_1+Z_2=92$ 이다. 이때 생긴 F_1 과 F_2 는 모두 같은 質量數의 安定核種보다 n/p 의 값이 크



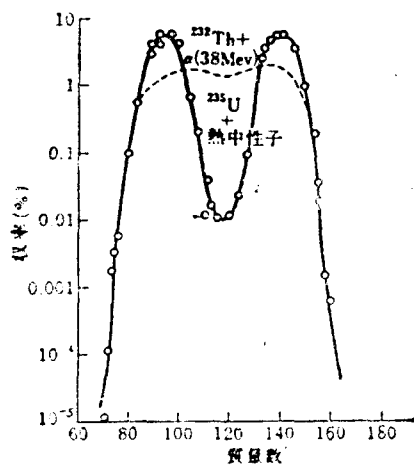
第 5 圖. ^{235}U 의 核分裂의 例

表 5. 核分裂生成物の 收率

分 裂 生 成 核			uranium pile	²³⁵ U로 부터의	²³⁸ U로 부터의	²³⁹ Pu로 부터의
元 素	半 減 期	質 量 數	로 부터의 收率 %	收 (느린中性子)	收率(느린 中 性子)	收 (느린中性子)
Zn	49 h	72	1.5×10^{-5}			
Ga	5 h	73	1.0×10^{-4}			
Ge	12 h	77	3.7×10^{-3}			
As	40 h	77	9.1×10^{-3}			
Ge	2.1 h	(78)	2.0×10^{-2}			
Se	17 m	(81)	1.3×10^{-1}			
Se	25 m	83	2.1×10^{-1}			
Br	2.4 h	83	4.0×10^{-1}		7.3×10^{-2}	8.0×10^{-2}
Br	33 m	84				
Sr	53 d	89	4.6		1.8	1.8
Sr	9.7 h	91	5.0		2.1	2.3
Y	57 d	91	5.9		2.9	2.8
Sr	2.7 h	92	5.0			
Zr	65 d	95	6		5.6	5.6
Zr	17 h	97	>4.5		5.2	5.3
Mo	67 h	99	6.2		5.9	6.1
Ru	42 d	103	3.7		5.6	5.5
Ru	4.5 h	105	9.0×10^{-1}			
Ru	1.0 y	106	5.2×10^{-1}		3.8	4.7
Pd	13 h	109	2.8×10^{-2}	2.8×10^{-2}	1.0	1.0
Ag	7.6 h	111	1.8×10^{-2}	1.8×10^{-2}	2.8×10^{-1}	2.7×10^{-1}
Pd	21 h	112	1.1×10^{-2}	8.3×10^{-2}	1.0×10^{-1}	1.0×10^{-1}
Cd	2.8 h	117	1.7×10^{-2}			
Te	90 d	127	3.3×10^{-2}			
Te	32 d	129	1.9×10^{-1}			
I	8.0 d	131	2.8	3.8	3.6	3.6
I	22 h	133	4.6		5.0	5.0
I	6.7 h	135	5.6		5.5	5.5
Xe	9.2 h	135	5.9			
Ba	85 m	139	6.3		5.2	5.4
Ba	12.8 d	140	6.1	6.1	4.9	5.3
Ce	28 d	141	5.7		4.4	4.9
Ce	33 h	143	5.4		4.3	5.1
Ce	275 d	144	5.3		3.4	3.7
Nd	11 d	147	2.6			
Pm	47 h	149	1.3			
Sm	47 h	(153)	1.5×10^{-1}	1.5×10^{-1}	3.8×10^{-1}	3.9×10^{-1}
Eu	2 y	155	3.0×10^{-2}			
Eu	1.54 d	(156)	1.3×10^{-2}	1.4×10^{-2}	1.3×10^{-2}	1.2×10^{-2}

다. 핵분열 생성물은 질량수가 95 및 140의 2개소에 頂點을 갖는 生成確率分布를 나타낸다.

핵분열로 生成된 핵은 위에서 말한바와 같이 β -崩壊를 하는 放射性核種이고 時間과 함께 原子番號가 變하지만 質量數는 不變이다. 따라서 핵분열에 의해서 어떠한 핵種이 어떤 比率로 생기는가를 나타낼때 質量數와 收率을 各 橫軸과 縱軸으로 取하며는 第6圖와 같다. 이



第6圖. 핵분열生成物の 收率

收率曲線은 熱中子로서 ^{235}U 을 핵분열시켰을 때의 曲線이 實線으로 그려져 있다. ^{235}U 또는 ^{238}Pu 을 熱中子로서 핵분열시켰을 때에도 曲線의 模樣은 別로 變하지 않고 一般의 熱中子로서의 핵분열은 같은 크기의 原子核으로 딱 2개로 分裂하는것 보다는 多少 非對稱의 分裂하는 경우가 많음을 시사하고 있다. 높은 에너지의 中子 또는 重水素核等으로 핵분열을 시키며는 꼭 같은 크기의 2개의 핵으로 分裂하는 경우가 꽤 많아진다. 예를 들면 38Mev의 α 粒子로서 Thorium 原子核을 分裂시켰을 때의 收率曲線을 第6圖에 點線으로 나타내었다. ^{235}U , ^{238}U 및 ^{239}Pu 이 핵분열하였을때 生成되는 代表的인 放射性核種의 半減期, 收率は 表 5와 같다. 핵분열을 利用하여 原子爐를 稼動시킬때 重要한 役割을 하는것 중에 中子를 放出하는 分裂生成核이 있다. 이들 핵의 中子放出現象은 一般의 原子崩壊와 本質의 異는 다르지 않지만 現在까지 알려져 있는것은 모두 短壽命의 것 뿐이다. 이들 핵種에 關한 定數는 表 6과 같다.

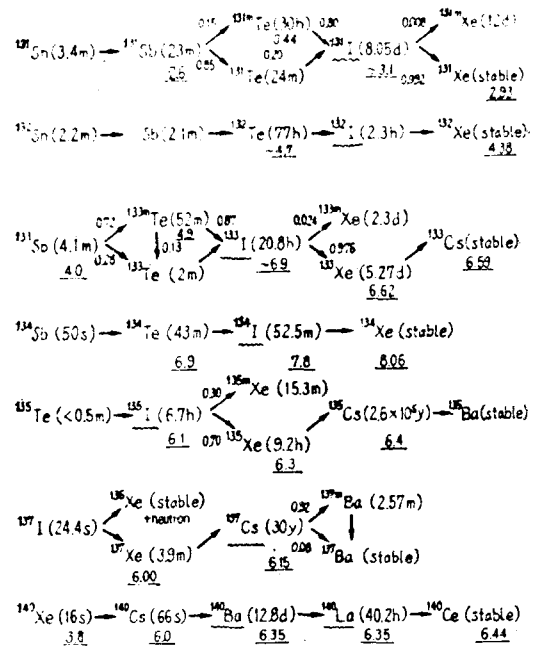
表 6. 遲發中子의 半減期와 強度

半減期	核種	核分열로 生成되는 中子에 對한 百分率
55.6 sed	^{137}Xe	0.026%
22.0 sec	^{67}Kr	0.17%
4.51 sec	Kr	0.21%
1.52 sec		0.24%
0.43 sec		0.083%

이와 같은 特殊한 핵이 생기는 경우는 全體의인 面에서 보며는 極히 적은 것으로 中子의 數로서는 핵분열과 同時에 放出되는 中子의 0.6%程度가 放射性인 핵種으로 부터 多少 늦게 放出된다.

또 ^{235}U 와 ^{238}U 은 中子照射를 받아서 (n, γ) 反應 및 β 崩壊를 거쳐서 ^{237}Np , ^{239}Np 도 生成한다. ^3H 은 Uranium

表 7. 原子爐 1次冷却水中에 溶存하는 핵분열 生成核種



의 3片核分열의 直接生成物로서도 生成되지만 PWR에서는 1次冷却水中의 硼素와 中子의 反應에 의해서도 生成된다. 이들 生成物은 普通 燒結체, 燃料被覆管에 의해서 保護되고 있지만 燃料被覆管이 破損되려는 原子爐冷却水中에 새어나온다. 原子爐 1次冷却水中에 溶存하는 핵種의 例 몇 個를 들어보면 表 7과 같다.

2.1.2. 中子放射化反應에 基因하는 핵種

物質은 熱中子를 照射하며는 放射化되어 放射能을 갖게된다. 其 程度는 熱中子의 密度, 其 物質의 原子

數. 物質固有의 放射化斷面積等에 左右된다. 即標的核種의 原子數 N 個에 熱中性子束 ϕ 로 t 秒 照射하면

$$\frac{dN}{dt} = -N\sigma\phi \quad N = N_0 e^{-\sigma\phi t}$$

여기에서 σ 는 標的核種의 放射化斷面積으로 barn이라는 單位가 쓰이고 있다.

生成核種의 原子數 n 은

$$\frac{dn}{dt} = N\sigma\phi - \lambda n = N_0\sigma\phi e^{-\sigma\phi t} - \lambda n$$

따라서 生成된 放射能의 量 A 는

$$A = n\lambda = N_0\sigma\phi(1 - e^{-\lambda t})$$

$$N_0 = \frac{W}{M} \cdot A_0 f$$

但 λ : 崩壞常數로 $\ln 2/t$ (生成된 放射性核種의 半減期)

w : 標的原子의 重量

M : 原子量

A_0 : Avogadro 數

f : 同位體 存在比

$\lambda t \rightarrow 0$ 일때 即 照射時間 t 가 $t \frac{1}{2}$ 에 比하여 大端히 적을 때 $e^{-\lambda t} \approx \lambda t$ 라고 볼 수 있으므로

$$A = \frac{W}{M} A_0 f \sigma \phi \lambda t$$

의 近似式을 使用할 수 있다.

또한 物質에 따라서는 熱中性子 뿐만 아니라 高速中性子 또는 프로톤에 의해서도 放射化된다.

原子爐冷却水系에 存在하는 放射性腐蝕生成物의 發生過程으로서는 다음의 2가지를 生覺할 수 있다.

1. 中性子照射을 받고 있지 않은 部分의 機器, 例를 들면 復水器等의 金屬材料의 一部가 ion狀 또는 懸濁狀으로 되어 于先 水로 移動한다. 다음에 爐心을 循環하는 過程에서 爐心內의 燃料被覆管 및 爐心內 機器에 折出 剝離를 되풀이 하는 동안에 中性子照射을 받아서 放射化된다.

2. 爐心內에서 中性子照射을 받아서 放射化되어 있는 機器의 金屬材料의 一部가 水로 移動한다. 放射性腐蝕生成物 以外의 것으로서는 水 또는 空氣의 構成成分인 O_2 , Ar 등이 照射되어 ^{16}N , ^{18}F , ^{41}Ar 등이 된다. 이와같은 放射化生成物은 燃料被覆管의 損傷과는 直接의 關係없이 原子爐冷却水中에 生成된다.

以上の 放射性核種中에서 Kr , Xe , Ne , Ar 등은 水에 대한 溶解도가 적어서 原子爐冷却水系로부터 排氣系에 移動한다. 放射性元素은 大部分 ion狀으로 또 Sr , Cs , Ba , Co , Mn , Fe 등의 放射性核種은 ion狀 또는 懸濁狀

으로 原子爐冷却水中에 存在하게 된다.

따라서 原子爐冷却水中의 誘導放射能을 增大시키지 않기위하여서는 水中의 不純物의 濃度를 낮게 維持하고 특히 放射化斷面積이 큰 不純物을 極力 避하지 않으면 안된다. 그러기 위하여 補給水脫鹽器에서 原水中의 不純物을 除去함과 同時에 復水脫鹽器, 淨化脫鹽器에서 腐蝕生成物을 除去하고 또한 腐蝕生成物의 生成을 抑制하기 위하여 電氣傳導度 및 pH를 適切하게 維持하여야 한다. 그러나, 各種 脫鹽器에서 純化한 水中에는 多少의 不純物 또는 腐蝕生成物이 存在하여 이들이 中性子 등의 放射化에 의하여 放射能을 갖게된다. 表 8에 1次冷却水中에 生成되는 放射能의 種類, 其의 生成核反應 및 核反應의 標的核種이되는 安全元素의 生成源을 表示하였다. 主된 放射性核種은 ^{64}Cu , ^{56}Mn , ^{18}F , ^{24}Na , ^{58}Co 및 ^{60}Co 이다.

2.2. 運轉中の 原子爐燃料被覆管의 健全性 診斷

原子爐冷却水에 放射性核種이 含有되어 있는것은 放射線 安全面에서는 바람직하지 않지만 이것을 爐心管理에 應用할 수가 있다. 即 原子爐冷却水中의 放射性核種의 種類 및 量으로부터 使用中の 燃料棒의 健全性を 推定할 수 있다. Bhrtchy는 破損燃料棒으로부터의 放射性核種의 放出狀態를 反跳, 擴散, 平衡의 세가지로 分類하고 各 境遇에 있어서 核種의 分布는 核種의 收率 및 半減期와 一定한 關係에 있음을 알아냈다. (表 9). 따라서 原子爐冷却水中의 核種分布를 調査하므로서 核種放出의 型態가 明白해지고 이로부터 燃料被覆管의 破損狀態 및 크기를 推定할 수 있다.

燃料被覆管의 健全性の 檢査에는 一般的으로 放射性沃素가 使用된다. 其 理由는 다음과 같다.

1. 沃素는 核分裂率이 比較的 크다.
2. 被覆管內部에서 沃素는 移動하기 쉽다.
3. 水에 대한 溶解도가 沃素는 크다.
4. 沃素의 同位體는 其 半減期가 適當하게 서로 다르다.

定檢時의 破損燃料檢出法으로서는 燃料棒을 둘러싸고 있는 周邊의 水를 採取하여 檢査하는 shipping法이 採用되고 있다. BWR에서는 爐停止後 1~2週間後에 爐心內에서 channel Box中の 水를 取하여 放射能의 濃度를 測定한다. 核種으로서는 原子爐冷却水中에 存在하는 長半減期核種과 區別하기 쉬운 것이 좋다. ^{132}Te 로부터 崩解된 ^{132}I (半減期 2.28 hr)가 使用되고 있다. Schröder는 放射性沃素以外에 檢出하기 쉽고 또한 直接燃料被覆

表 8. 原子爐冷却水中에서의 放射化反應과 生成核種

核 種	核 反 應	半 減 期	生 成 源
^{17}N	$^{17}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{17}\text{N}$	4.14 sec	溶 存 酸 素
^{15}N	$^{16}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{16}\text{N}$	7.4 sec	//
^{18}F	$^{18}\text{O}(\text{n}, \text{p})^{18}\text{F}$	1.87 hr	//
^{41}Ar	$^{40}\text{Ar}(\text{n}, \text{p})^{41}\text{Ar}$	1.82 hr	Ar
^{24}Na	$^{23}\text{Na}(\text{n}, \text{p})^{24}\text{Na}$	1.50 hr	水中的 Na
^{54}Mn	$^{54}\text{Fe}(\text{n}, \text{p})^{54}\text{Mn}$	303 day	鋼材 또는 inconel 中の Fe
^{56}Mn	$^{56}\text{Mn}(\text{n}, \text{r})^{56}\text{Mn}$	2.58 hr	鋼材 또는 inconel 中の Mn
^{187}W	$^{187}\text{W}(\text{n}, \text{r})^{187}\text{W}$	2.40 hr	스테라이트 中の W 또는 Zr 합금의 용접부
^{58}Fe	$^{58}\text{Fe}(\text{n}, \text{r})^{58}\text{Fe}$	45.6 hr	鋼材 또는 inconel 中の Fe
^{95}Zr	$^{94}\text{Zr}(\text{n}, \text{r})^{95}\text{Zr}$	65.0 day	爐心被覆材
^{58}Co	$^{58}\text{Ni}(\text{n}, \text{p})^{58}\text{Co}$	71.3 yr	鋼材 또는 inconel 中の Ni
^{60}Co	$^{60}\text{Co}(\text{n}, \text{r})^{60}\text{Co}$	5.26yr	鋼材 inconel 또는 스테라이트 中の Co
^{64}Cu	$^{63}\text{Cu}(\text{n}, \text{r})^{64}\text{Cu}$	12.8 hr	수에 의한 磨耗生成物 中の 銅
^{51}Cr	$^{50}\text{Cr}(\text{n}, \text{r})^{51}\text{Cr}$	17.8 d	主蒸氣管 터빈 날개
$^{110\text{m}}\text{Ag}$	$^{109}\text{Ag}(\text{n}, \text{r})^{110\text{m}}\text{Ag}$	253 d	冷却系內 使用材

表 9. 燃料被覆管破損部로 부터 原子爐冷却水中에 核分裂生成物이 漏出되는 型態

型 態	放射能 濃度	出力依存性	被覆管의 破損狀態
反 跳	$A \sim ky^{\frac{1}{2}}$	有	被覆管表面에 附着된 U에 依한
擴 散	$A \sim ky\lambda^{\frac{1}{2}}$	有	적은 구멍
平 衡	$A \sim ky$	無	보다 적은 바늘 구멍만한 구멍

A : 放射能濃度
 k : 定 數
 y : 生成核種의 收率
 λ : 生成核種의 半減期

관의 破損을 나타내는 代表核種으로서 $^{99\text{m}}\text{Tc}$, ^{239}Np 를 推獎하고 있다. PWR에서는 channel Box가 없으므로 燃料集合體를 爐心으로부터 끌어내서 燃料 Pool 中에서 shipping 容器로 옮겨서 容器內의 氣體 또는 水의 放射能濃度を 測定한다.

2.3. 原子爐冷却水系에 있어서의 放射性核種의 蓄積과 對策

輕水型原子力發電所에서는 發電所從業員의 放射線被曝量이 問題가 된다. 從業員의 體外被曝의 源泉이 되는 核種은 主로 γ 線放出核種이다. 表 10 및 表 11은 各各 Dresden 1號機 및 日本原子力發電所의 例이다. 放射性

核種의 組成에 있어서는 兩者間에 多少의 差는 있으나 모두 金屬의 腐蝕生成物中에서 半減期가 긴 核種이 主要源泉이다. 여기에서 注意할 點은 腐蝕生成物의 大部分은 放射能面에서는 無視할 수 있는 鐵의 酸化物이고 放射能의 大部分은 ^{60}Co , ^{54}Mn , ^{58}Co 等이고 이들 放射性核種의 量은 普通 化學組成도 明確하지 않을때가 있다. CRUD의 舉動과 放射性核種의 舉動이 반드시 一致되어 있다고 말할수는 없다.

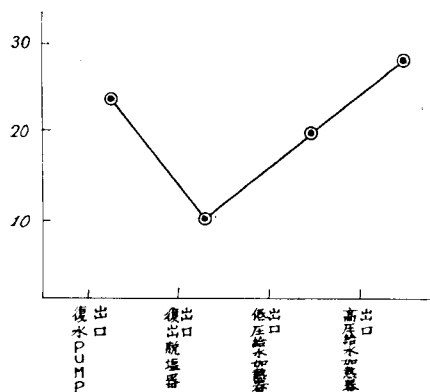
1次冷却水系の 腐蝕生成物의 舉動으로서 Fe成分의 濃度變化의 한例를 冷却水經路에 따라서 나타내면 第7圖와 같이 된다.

表 10. Dresden 1號機에 있어서의 蓄積放射性核種

核 種	放射能濃度 (Ci)	放射能濃度 (%)
^{60}Co	2,160	72.0
^{58}Co	630	21.0
^{144}Ce - ^{141}Pr	117	3.0
^{54}Mn	30	1.0
^{95}Zr - ^{95}Nb	21	0.7
^{57}Co	15	0.5
^{141}Ce	15	0.5
^{103}Ru	9	0.3
其他核分裂生成成分	3	0.1
合 計	3,000	100.0

表 11. 放射能濃도와 化學成分의 各 元素別 比率

核種 (元素名)	試料採取 個所		復水 Pump 出口		低壓給水加熱器出口	
	放射能 (%)	化學成 分 (%)	放射能 (%)	化學成 分 (%)	放射能 (%)	化學成 分 (%)
^{60}Co	40	—	39	—	—	—
^{54}Mn	34	—	38	—	—	—
^{65}Zn	12	n. d.	8	n. d.	—	—
^{59}Fe	7	97	8	100	—	—
^{58}Co	4	—	4	—	—	—
^{95}Zr	4	—	4	—	—	—
Cu	—	3	—	n. d.	—	—
Ni	—	n. d.	—	n. d.	—	—
合 計	101	100	101	100	—	—



第7圖. 給復水系에 있어서의 鐵의 舉動

이로부터 shell, hot shell等 軟鋼製의 復水器系로부터 多量の 腐蝕生成物이 發生하지만 大部分은 復水脫鹽裝置에서 除去되는 것을 알 수 있다. 其後 給水系材料로부터의 腐蝕放出에 의해서 給水系를 通過하는 사이에 腐蝕生成物의 濃度は 增加하여 爐內에 運搬된다. 第7圖로부터 爐內에 들어가는 腐蝕生成物의 大部分은 給水系에서 發生했음이 나타나고 있다. 給水系材料에는 給水加熱器管에 stainless鋼, 給水加熱器를 連結하는 配管에는 軟鐵鋼이 使用되고 있는데 冷却水中의 Fe, Ni 濃度等の 解析으로부터 Fe成分의 發生源을 찾으면 其의 主된 것은 配管系의 軟鐵鋼으로 되어 있다. 理由は 原子爐冷却水가 Fe系材料의 腐蝕抑制을 위한 最適의 pH 範圍인 9.0~9.5를 維持하지 못하고 中性條件에 있기 때문이다. 따라서 CRUD 抑制對策으로서 防蝕手法의 새로운 方案이 提唱되어 있다. 從來에 水中의 溶存酸素는 酸化劑로서 Fe^{2+} 의 酸化 即 腐蝕을 促進시키는 成分으로서 火力 plant의 경우에는 極力 除去되어 있다. 그러나 原子爐冷却水系와 같은 中性條件에서는 腐蝕에 의하여 生成된 2價의 Fe ion을 金屬面 또는 腐蝕에 의하여 生成된 酸化膜中에서 酸化하여 不溶性의 緻密한 magnetite 保護膜을 維持시키므로써 腐蝕을 抑制할 수 있다는 것이 理論的考察 및 基礎實驗等에 의하여 明白하게 되었다. 이러한 見解에 따라서 給水系에 數 10 ppb 程度의 微量의 溶存酸素를 注入하는 것이 現場에서 試驗的으로 試圖되어 CRUD 抑制에 顯著한 效果를 나타내게 되었다. 이와같은 給水系에의 酸素의 注入이 爐內에서의 放射線分解에 의해서 發生하는 酸素量에 比하여 無視할 수 있을 程度의 微量이므로 酸素의 添加에 의한 爐周邊配管類의 應力腐蝕갈라짐에의 影響은 別로 없을 것이다. 또한 이와같은 酸素의 注入法은 次後 最適注入物質과 方法 plant 停止時의 防蝕法, 起動時의 處置 等の 檢討, 詳細한 腐蝕抑制機構의 確立, 放射能蓄積에 관하여 stainless鋼으로부터의 Co成分의 溶出에 대한 溶存酸素의 影響等の 究明에 의하여 더한 層의 發展이 期待된다.

腐蝕生成物의 生成量과 淨化率は 大略 다음 式으로 表示될 수 있다.

$$A \cdot r = PC \quad (1)$$

$$C = A \cdot r / P \quad (2)$$

여기에서 A = Plant surface Area

P = Purification Flow Rate

C = Concentration of CRUD

r = Plant Corrosion product Release

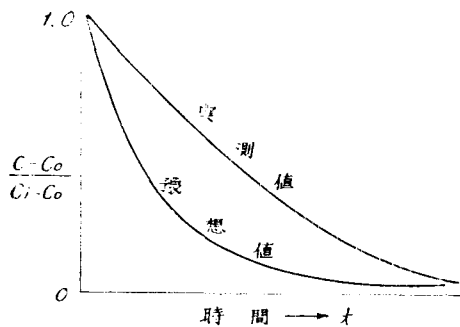
Rate, per unit/Area

여기서 보는 바와 같이 CRUD濃度は 腐蝕生成率에 比例 한다.

그런데 높은 pH에서 stainless steel이나 Carbon steel系統內에서는 正常狀態下에서 同一한 CRUD濃度を 維持하게 된다. 그리고 이 關係式은 CRUD의 總量을 計算하는 式이 아니고 系統內의 汚染程度를 나타내는 式이라는 점에 注意할 必要가 있다. 또한 이 式은 系統內에서 어떤 型態의 放射能化된 保護膜 같은것이 瞬間의 으로 떨어지는 現象에 대해서도 無關한 式이다. 이런 現象은 어느 程度 運轉이 進行된 후에야 Thermal shock 등에 依해서 나타나기 始作될 것이며 갑자기 일어나는 現象이기 때문이다.

上記 式을 淨化하는 觀點에서 式을 나타내면 다음과 같다.

$$V \frac{dc}{dt} = A \cdot r - PC \quad (3)$$



第 8 圖.

여기에서 V 는 冷却劑의 system volume이며 이 微分方程式을 풀면 (4)式이 된다.

$$\frac{C_i - C_0}{C_i - C_0} = e^{-\frac{P}{V}t} \quad (4)$$

단 여기에서

C_i = the peak concentration of the Burst

$C_0 = A \cdot r / P$ (Normal steady state Value) 이다.

이 現象을 實際로 實驗 및 經驗에 依하여 얻어진 값과 함께 나타내면 第8圖와 같다. 그림에서 보는 바와 같이 實際로 分析하여 얻어진 값, 즉 減少率이 豫測한 값 即 正常的인 減少率보다 적다. 그러므로 正常運轉中에 이와같이 豫測하지 않았던 CRUD가 發生하기 때문에 이를 處理하기 爲한 施設 即 脫鹽器 或은 蒸發器가

必要하게 된 것이다. 普通 높은 pH의 冷却劑內에서의 CRUD 濃度は 2~5ppb이고 中性에서는 0.1~1ppm 程度까지 上昇되기도 한다. 그리고 保護膜 등이 떨어져 나오면 正常値보다 10~20倍의 濃度增加를 보인다.

原子力發電所에서 非放射能物質이 放射能化하는 量은 運轉이 長期間 일수록 增加하는 것은 當然한 일이다. 物質은 熱中性子の 照射를 받으면 放射化되어서 放射能을 갖게 된다. 其 程度는 2.1.2.에서 說明한 바와 같다.

따라서 水中의 誘導放射能을 增大시키지 않으려면 水中의 不純物 濃度を 低下시키고 特別 放射化斷面積이 크고 生成核種의 半減期가 긴 不純物은 極力 避하여야 한다. 그리고 冷却劑系統內의 放射能의 量은 繼續해서 循環하고 있는 冷却劑에서는 正確히 計算하기는 困難하다. 理由로는 이 量은 腐蝕이 될 수 있거나 되지 않는 物質이 放射能化되기도 하고 繼續해서 腐蝕되어 擴散되는 것들 중에서 다시 放射能化되기도 하고 外部에서 系統內로 汚染되는 不純物에 따라서 不正確하게 作用되기 때문이다. 그러나, 放出되는 放射能은 腐蝕生成物을 除去하는 淨化施設의 容量에 依하여 影響을 받게 되고 또한 各系統에 使用되는 材質에 따라서 其 種類가 서로 相異할 것이다. 例를 들면 Zircaloy에서는 Co가 腐蝕되어 나오며 stainless steel에서는 Fe, Co, Ni, Mn 등이 腐蝕되어 나온다. 放射能이 一定한 source로부터 나온다고 假定한 關係式을 表示하면 다음과 같다.

$$VC \frac{dn}{dt} = S - PC_n - VC_n \lambda \quad (5)$$

여기에서 : S = Consequent Source of Activity

C = Steady state CRUD Concentration

P = Purification Rate

λ = Decay Constant

n = The Number of the Active Atoms per unit Quantity of CRUD

V = Coolant System Volume

t = Time

(5)式의 微分方程式을 풀면

$$n = \frac{S}{VC(\lambda + P/V)} [1 - e^{-(\lambda + P/V)t}] \quad (6)$$

(6)式을 쉽게 理解하기 爲해서 Co-60에 適用시켜 보면 半減期가 5.2年이므로 λ 는 P/V 值에 比하여 너무 작으므로 無視할 수 있을 것이다. 그러므로 (6)式 或은 (8)式을 그림으로 나타내면 第9圖의 上部曲線과 같이 된다.

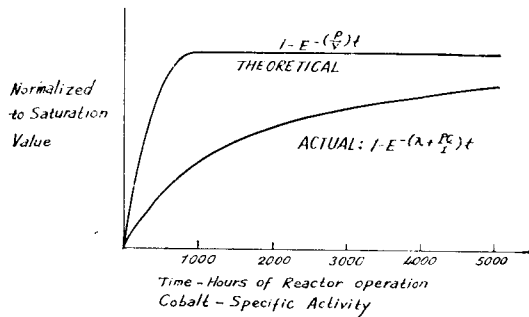
$$n = \frac{S}{Pc} [1 - e^{-(P/V)t}] \quad (7)$$

여기에서 $I=CV$: Inventory of Corroaion Products
로 하고 (6), (7)식을 다시 表示하면

$$I = \frac{dn}{dt} = S - I_n\lambda - PCN \quad (8)$$

(8) 式을 풀면

$$n = \frac{S}{I(\lambda + \frac{PC}{I})} \left[1 - e^{-\frac{(\lambda + PC)t}{I}} \right] \quad (9)$$



第 9 圖.

이다. (9)식을 그림으로 나타내면 第 9 圖의 下部曲線이 된다. 여기서 淨化가 얼마나 되는가에 대한 效率을 計算하면

$$E = 1 - \frac{\frac{S}{I(\lambda + \frac{PC}{I})} [1 - e^{-(\lambda + \frac{PC}{I})t}]}{\frac{S}{I\lambda} [1 - e^{-\lambda t}]} \quad (10)$$

$$= 1 - \frac{1 - e^{-(\lambda + \frac{PC}{I})t}}{(1 + \frac{PC}{\lambda I})(1 - e^{-\lambda t})} \quad (11)$$

가 될 것이다. 萬若 $t=0$ 이면 $E=0$ 이고 t 가 커지면

$$E = \frac{1}{1 + \frac{PC}{\lambda I}} \quad (12)$$

이 될 것이다. 實際로 運轉中인 發電所의 實驗的 結果를 보면 $PC=0.02\text{mg/cc}$, plant Inventory=3000-grams, $E=0.6$ 이며 主放射能物質로는 Co-60을 取하고 있다.

이 값들은 1個月間 正常的으로 CRUD濃度와 比放射能이 平衡을 維持할때 얻어진 값들이다. 이들 式은 Inventory와 Source의 放射能이 一定하다고 假定하였을때 成立되는 것으로 實際 運轉中에는 많은 誤差가 있을 수 있다. 그러므로 實際로 運轉中인 系統內에서 考慮될 事項은 系統內에서 숨겨져 있거나 腐蝕되어 附着된 量에 對해서 考慮해야 한다. 따라서 다시 式을 고쳐쓰면

$$I \frac{dn}{dt} = S - I_n\lambda - PCn - F_n \quad (13)$$

여기서 F 는 The rate of storage of the Material in Irreversible Inventory이다. 이것을 풀면

$$n = \frac{S}{I(\lambda + \frac{PC}{I} + \frac{F}{I})} [1 - e^{-(\lambda + \frac{PC}{I} + \frac{F}{I})t}] \quad (14)$$

또 時間이 長期化되어 平衡狀態에 이르면

$$n = \frac{S}{I(\lambda + \frac{PC}{I} + \frac{F}{I})} \quad (15)$$

가 된다. 여기서 淨化效率을 計算하면

$$E = \frac{\left[1 - \frac{S}{I(\lambda + \frac{PC}{I} + \frac{F}{I})} \right]}{\frac{S}{I\lambda + F/I}} \quad (16)$$

$$E = \frac{I}{1 + \frac{I\lambda}{PC} + \frac{F}{PC}} \quad (17)$$

가 되어 $F=0$ 일때 (12)式과 같고 F 가 大略 PC 와 같다고 보면

$$E = \frac{1}{2 + \frac{I\lambda}{PC}} \quad (18)$$

이 된다. 그래서 長期間 運轉되면 最高效率은 約 40%가 될 것이다. 여기서 同位元素로 變換되는 것에 依해서 效率은 若干 떨어질 可能性도 있다. 그리고 原子力

表 12.

Source and Reactor Full Power Hours	Fe-59	Co-58	Co-60	Mn-54	Cr-51	Hf-181	Zr-95
Shipping Port PWR-5500 (Zircaloy core)	31.9	31.6	18.2	18.6	36.8	16.4	7.62
APPR-1, 7310 (stainless core)	49	139	72	40	188	—	—

(specific Activity, 10^6dpm/mg)

發電所에 따라서材質, 出力, 表面積 및 化學處理의 差異로 腐蝕生成率이나 放射化率이 同一하지 않기 때문에 正確히 究明하는 것은 極히 어려운 問題이다. 그리고 各 Component에 接着되어 있는 放射能의 量은 表面積이나 두께 或은 絶緣된 被覆劑에 따라서 다를 것이지만 大略 主冷却劑管內에서의 放射線強度는 30~100mr程度이고 熱交換器內에서는 100~300mr이며, S/G Tube sheet에서는 3~10R이다. CRUD 分析結果의 實例를 들어보면 表 12와 같다.

CRUD는 前述 한 바와 같이 먼저 脫鹽器에서 除去하고 粒子가 큰 것은 여과기에 의해서 除去된다. 脫鹽器에는 2臺의 混床式脫鹽器와 1臺의 陽 ion 脫鹽器가 있는데 正常運轉中에는 1臺의 混床式脫鹽器로 充分하도록 設計되어 있다. 그리고 原子爐冷却水濾過器에 의해 樹脂과편이나 溶解性이 없는 粒子의 不純物을 除去하게 되고 冷却劑系統 外部로 漏水되는 冷却劑도 各 濾過器나 脫鹽器로 處理하여 再使用 或은 버리게 된다. 化學 및 休積制御系統內의 脫鹽器인 混床式脫鹽器는 陽 ion 樹脂과 陰 ion 樹脂 混合用으로서, 陽 ion 樹脂은 Li-Form의 樹脂로서 系統內의 pH를 調節하기 위해 使用되는 LiOH의 消耗를 抑制하고 陰 ion樹脂은 崩素가 飽和된 樹脂을 써서 反應度 調節用으로 使用하는 崩素의 消耗를 抑制시킨다. 그리고 陽 ion脫鹽器의 陽 ion 樹脂은 冷却劑의 pH가 높을 경우 LiOH를 減少시키기 위해서 使用하기 때문에 H-Form 樹脂을 使用한다. 이와같이 放射能物質의 生成 및 腐蝕生成物을 最小로 抑制하기 위해서는 冷却劑의 水質은 Cl^- , F^- , Na^+ , O_2 등 不純物의 濃도가 낮은 良質이어야 하고 pH가 中性보다 높아야 한다는 것은 明白하다. 그러므로 冷却劑로서 脫鹽水를 使用하고 이 脫鹽水는 또 脫氣장치에 의해서 溶존酸素를 最小로 維持되도록 한다. 이와 같이 양질의 溶수를 維持하도록 하지만 冷却劑를 汚染시키는 不純物이 있게 마련이다. 이 不純物을 除去하거나 그 影響을 적게 하기 위해서는 化學藥品에 의한 處理가 必要하게 된다. 溶존酸素를 除去하기 위해서, 原子爐機動時(冷却劑 溫度 200~250°F)에는 Hydrazine을 注入하여 除去하고 250°F 以上에서는 中性子나 γ -ray가 생겼을때를 對備하여 水素 gas를 使用한다. 그리고 適當한 pH를 維持하기 위해서는 LiOH를 注入한다. 그런데 反應度 調節을 위하여 硼酸을 使用하기 때문에 pH의 制限值(4.2~10.5) 範圍가 넓은 편이다. 이는 硼酸이 水中에서 弱한 酸性으로 나타나기 때문이다. 이 硼酸은 冷却劑內에서 化學적으로 相當히 複雜한 構造로 溶解되어 있기 때문에

正確히 規明하기는 쉽지않다. 그러나 硼酸은 腐蝕에 關與하지 않고 높은 溶解性이기 때문에 쉽게 使用할 수 있다. 이 硼素濃度는 노심수명에 따라서 점점 減少시켜야 한다. 이 硼素濃度를 減少시키기 위해서는 보통 硼素回收系統의 蒸發器를 使用한다.

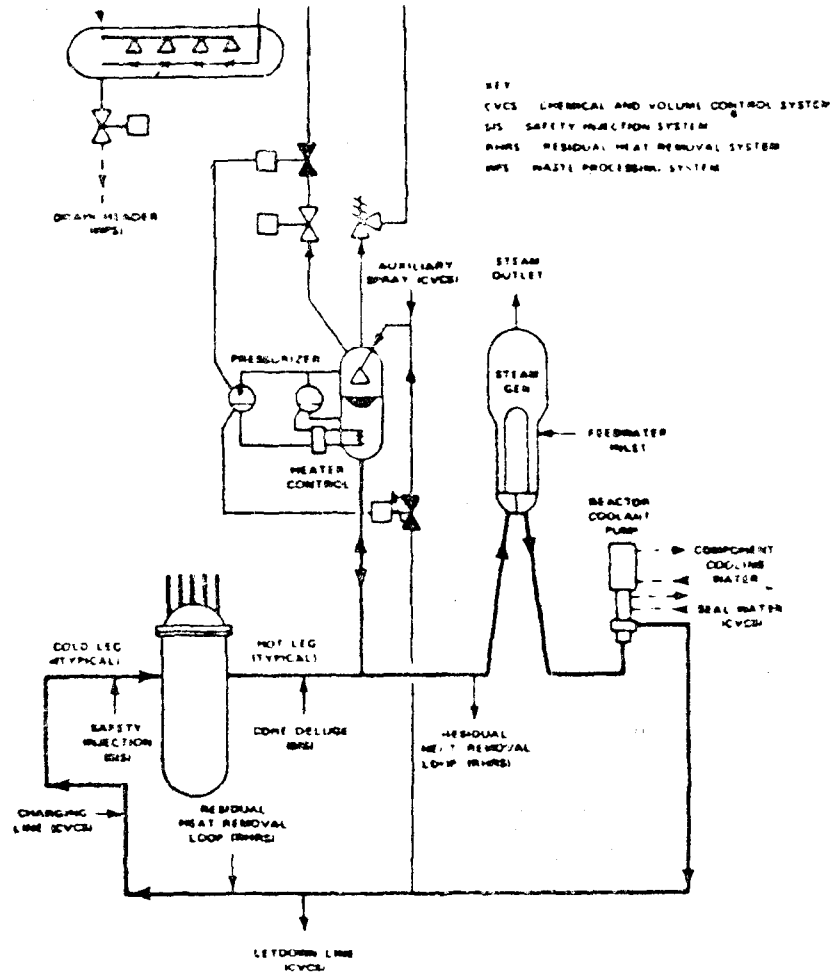
以上으로 溶解性 및 不溶性 腐蝕 및 核分裂 物質을 除去하는 淨化方法을 大略으로 言及했다.

原子爐冷却水系에 蓄積된 放射能을 除去하려면 $KMnO_4$ 등의 酸化劑 또는 EDTA, 磷酸, 拘椽酸 등으로 系統內를 洗淨한다. 即 化學除染이 必要하다. 化學除染은 아직까지는 全世界의 部分的인 經驗은 있으나 動力爐의 全系統에 대한 經驗은 아직 없다. 이 分野에 있어서는 化學除染의 時期判定, 除染方法(藥劑의 種類, 除染溫度, 壓力, 時間, 回數等) 除染後의 金屬表面의 處理, 除染廢液의 處理等 아직도 檢討해야 할 要素가 많다.

2.4. 原子爐 冷却材系統 概要 및 水質規準

2.4.1. 原子爐 冷却材系統 概要

原子爐 冷却材系統(第10圖)은 原子爐容器에 連結된 2개의 同一한 熱傳達回路(Loop)로 構成된다. 各 回路의 主要機器는 原子爐 冷却材 pump (RCP, Reactor Coolant Pump) 蒸氣發生器 (S/G, steam Generator)이며 또한 이 系統에는 加壓器(PZR, Pressurizer), 加壓器의 Safety Valve와 Relief Valve 및 Relief Tank가 包含된다. 原子爐 冷却材系統은 原子爐에서 生成된 熱을 S/G에 傳達하고 S/G는 蒸氣를 發生시켜 터빈發電機를 驅動한다. 冷却材는 普通의 水 즉 輕水이며 冷却材는 또한 中性子の 吸收材(Moderator) 및 反射體(Reflector)로서의 役割도 兼하여 同時に 中性子 吸收物質인 硼酸의 溶媒의 役割을 한다. RCS은 正常運轉 溫도와 壓力에서 冷却水를 其他의 系統과 分離하는 境界線을 形成하여 放射能物質이 2次系統이나 發電所內의 他系統에 流出됨을 防止한다. RCS의 配管은 LOCA (Loss of Coolant Accident) 時에 冷却水를 供給하여 非常爐心冷却設備系統 (Emergency Core Cooling System)의 一部로서 寄與한다. 冷却材 系統의 運轉壓力은 加壓器에 依해 調節한다. 正常運轉時의 壓力은 2,205 psig이고 溫度는 100% 出力時에 Hot Leg 606.9 °F, Cold Leg 541.2 °F, 0%出力. 時에는 兩쪽이 모두 547°F이다. 系統體積은 6,179ft³이고 流量은 67.7×10⁶ lb/hr, 3385 lb/hr/100p 이는 89,000 gpm에 相當하다.



第 10 圖.

2.4.2. 原子爐 冷却水 水質制限値 및 處理方案

調節物質	制限値	目的
O ₂	0.1ppm as O ₂ , Max	여러 形態의 腐蝕防止 및 腐蝕制限
H ₂	25—35cc/kg H ₂ O at STP	溶存酸度除去와 腐蝕防止 및 水分子分解抑制 窒酸生成防止
Cl ⁻	0.15 ppm as Cl ⁻ , Max	st. st의 腐蝕防止 (stress Cracking 및 pitting)
F ⁻	0.15 ppm as F ⁻ , Max	Zircaloy와 Inconel 腐蝕防止 (stress Cracking)
Total-Solids	1.0 ppm, Max.	不純物 縮積抑制 및 모든 元素의 濃度制限
pH	4.2—10.5 at 15°C	腐蝕抑制 및 保護幕保護 (At High pH)
傳導度	制限없음	1~40μmho/cm로 豫想하며 硼酸과 LiOH 의 濃도에 따라서 變化가 豫想됨
LiOH	0.22~2.2 ppm as Li	pH調節
硼酸	0~2500 ppmas B	反應度(Reactivity)調節

非正常濃度	原因	處理方案
High O ₂ 濃度	水素 低濃度, 補充水系統에서 汚染	VCT에서 水素壓力 上昇시킴. 하이드라진 注入 (機動時) 補充水の O ₂ 濃度 分析
High Cl ⁻ or F ⁻ 농도	補充水에서 汚染, 補充水에서 O ₂ 汚染으로 同位 元素로 변환 (For F ⁻)	補充水分析 冷却材의 水素 濃度分析 混合脫鹽器 使用여부 確認, Letdown Flow증가 시킴.
Low H ₂ 濃度	VCT 水素低壓力, 補充水에서 O ₂ 汚染	VCT水素 壓力上昇시킴. 補充水 O ₂ 濃度 分析
High H ₂ 濃度	VCT에 水素 過注入	VCT水素 壓力 下落시킴
High Total Solids	CRUD Burst, 補充水에서 不純物 汚染, 腐蝕生成物 增加	CRUDBurst의 原因分析, 腐蝕生成物分析, 脫鹽器 및 Filter 使用여부 確認, Let down Flow 增加
Low LiOH 濃度	陽 ion 脫鹽器長期間 使用	藥品混合 tank에 LiOH 注入
High LiOH 濃度	中性子에 의해서 B ¹⁰ 의 分裂로 蓄積 LiOH의 過注入	陽 ion 脫鹽器 使用
Low pH	補充水에서 O ₂ 汚染, 陽 ion 脫鹽器長期使用	補充水分析, 冷却劑에 LiOH 注入
High pH	中性子에 의한 B ¹⁰ 의 分裂로 Li 蓄積, LiOH의 過注入	陽 ion 脫鹽器 使用
High Radioactivity	CRUD Burst Fuel element Failure 補充水에서 不純物汚	CRUD Burst 原因 分析, 混合脫鹽器 使用 Let Down Flow 增加