

原子力船의 運航과 安全性

鄭 雲 赫

韓國海洋大學

(접수 : 1976. 11. 15)

原子力船의 運航에 있어서 무엇보다도 重要한 問題는 放射線에 대한 安全策이라고 할 수 있다. 이것은 人間의 生命과 직접 關係되는 問題이므로 商船에 있어서 生命이라고도 할 수 있는 經濟性 보다도 먼저 解決해 놓아야 할 課題이기도 하다.

原子爐에서 나오는 각 種의 廢棄物 및 放射線은 乘員 뿐만 아니라 公衆에게 가지도 막심한 被害를 줄 우려가 크다. 또 原子力船이 定常運航할 때 발생하는 災害 뿐만 아니라, 한번 原子爐事故가 발생했다하면 乘員 및 公衆에게 주는 災害는 거의 致命的인 선까지 이룰 수 있다. 따라서 原子力船의 放射線危險에 대한 安全策은 乘員과 公衆, 또 定常運航時와 事故發生時에 대해서 별도로 確保되어야 한다.

이러한 放射線安全策의 重要性을 감안하여, 本論文에서는 原子力船의 運航에 따르는 몇 가지 問題點과 그의 解決策에 대해서 간단히 記述하고자 한다.

1. 公衆의 安全

原子力船의 排出空氣 중에 含有되어 있는 放射性物質에는 H^3 , N^{16} , O^{17} , O^{18} 등의 放射化物質과 Kr, Xe, I 의 核分裂生成物이 있다. 放射化物質은 水 및 空氣가 中性子를 吸收해서 生成된 것이고, 核分裂生成物은 우라늄이 核分裂을 이뤘을 때 생기는 分裂破片이다. 核分裂生成物은 주로 두 가지의 뜻하지 않은 原因을 통해서 冷却材 혹은 爐心밖으로 새어나오게 된다. 즉, 첫째로 燃料棒外面에 微量이나마 부착된 우라늄에 中性子が 作用하여 核分裂을 이뤘으면 거기서 생긴 核分裂生成物이 冷却材 안에 섞여들어간든지 혹은 밖으로 빠져나온다. 둘째로 燃料棒에 작은 구멍의 결함이 있어서 燃料棒 안의 核分裂生成物들이 冷却材 안에 새어들어가거나 혹은 밖으로 빠져나온다. 이와 같은 放射性物質이

冷却材 중에 섞여질 때는 原子爐를 運轉하는 동안 淨化系나 혹은 廢棄物處理系를 써서 이들을 계속적으로 除去해 주지 않으면 안된다.

公衆의 被曝線量을 陸上原子力發電所에 대해서 예를 들면, 100만kW級에 대해서 境界地域에 사는 住民이 받는 被曝值가 5mrem/年이 되도록 設計하는 것이 보통이다. 그러나 실제 境界地域에서의 線量은 보통 0.02 mrem/年 정도에 지나지 않는다. 이것은 公衆에 許容되고 있는 個人線量인 500mrem/年에 비하면 무시할 정도로 작다. 또한 이것은 自然放射能과 비교해도 아주 작은 값이다.

原子力船에 있어서도 公衆에 대한 線量은 陸上發電所의 水準으로 하는 것은 충분히 가능하다. 原子力船에 있어서 放射性氣體를 排出할 때에는 風向을 고려하여 실시한다. 특히 原子力船이 港에 停泊 중에 있을 때는 排出은 될 수 있는 한 하지 않기로 되어 있다.

原子爐事故가 발생했을 때, 大氣 중에 核分裂生成物은 公衆에 막심한 災害를 준다. 즉 公衆은 汚染된 空氣에 의해서 全身被曝을 받게 되고 汚染된 空氣의 吸收에 의해서 體內被曝, 특히 放射性沃素의 沈着에 의해서 甲狀腺이 被曝되며, 汚染農産物의 攝取에 의해서 體內被曝등을 받게 된다.

일단 原子爐事故가 일어났을 때에는 公衆의 安全에 被曝許容值라는 것은 원칙적으로 없다. 다만 될수 있는 한 작은 被曝을 받도록 하는 것이 放射線安全에 제일가는 方策이다. 그러나 만일의 事故를 가상해서, 原子力船을 停泊 및 航行할 때 船을 公衆으로부터 어느정도 격리시키면 좋은 가를 판단하기 위해서 標準線量이라는 것을 설정하고 있다. 이것은 醫學적으로 放射線障害가 檢知되지 않는 狀態를 기준으로서 다음과 같은 線量值를 설정하고 있다. 重大事故時에는 公衆에 放射線障害를 주지 않는 것을 目標로 해서 個人에 대해서 全身

25rem, 甲狀腺은 小兒 150 rem, 成人 300rem으로 한다. 또 國民遺傳線量の 견지로 부터 충분히 작은 値로서 集團에 대해서 200만人 rem으로 한다.

2. 乘員의 安全

原子力船이 定常運航할 때의 乘員의 安全에 대해서는, 乘員은 遮蔽壁, 換氣 및 行動制限등에 의해서 乘員의 職種 別로 주어진 許容值 이하로 충분히 억제할 수가 있다.

原子力機關의 事故, 특히 燃料棒이 破損되어 燃料棒 중에 존재해 있는 核分裂生成物이 棒으로 부터 나와서 船內外에 放散하는 事故는 乘員 및 旅客에 대해서 큰 災害를 준다.

事故에 대한 安全確保에는, 첫째 燃料棒의 破損이 일어나는 여러가지 事故를 想定한다(想定事故), 둘째 이 想定事故가 發生하는 可能性을 極小로 하기 위한 手段을 實行한다(事故發生防止手段), 셋째 만일의 想定事故가 일어날지라도 放射物質이 原子爐室 內外로 放散하지 않도록 하는 手段을 實行한다(事故擴大 및 災害擴大防止手段) 넷째 想定事故 및 事故發生防止手段에 대비해서 設計된 安全防護施設이 효과적으로 작용하지 않는 것을 예상한 防護手段을 마련한다(最大想定事故), 다섯째 乘員의 安全에 대해서는 遮蔽, 換氣, 및 行動制限으로, 公衆의 安全에 대해서는 原子力船을 住民區域으로 부터 어느 距離만큼 격리시켜 災害를 주지 않도록 한다.

乘員의 被曝限度는 事故時의 計劃被曝線量 全身 12 yem, 甲狀腺 30rem이다. 이 線量이하로 억제하기 위해서 行動의 制限과 防護具의 着用이 요구된다. 遠隔地에로의 移動에 필요한 補助動力源裝置도 原子爐室로 부터 떨어져서 設置할 필요가 있다.

3. 原子力船機關의 想定事故

原子爐의 想定事故를 대별하면 反應度事故와 機械的 事故가 있다. 지금까지 世界的으로 就航된 原子力商船, 즉 美國의 Savannah號, 西獨의 Otto Hahn號, 및 日本의 Mutsu號에서 취급된 原子爐想定事故는 表1과 같다.

反應度事故는 爐의 出力을 變更하는데 필요한 反應度 이상의 超過反應도가 가해진 事故이다. 따라서 中性子數가 급증, 核分裂이 왕성하여 燃料棒의 發熱溫度上昇을 수반한다. 機械的事故는 機械 및 配管의 破損, 故障 등의 機械的인 原因에 의한 事故이다. 이 경우에는 中

表 1. 原子爐想定事故의 例

想定事故		Mutsu	Savannah	Otto Hahn
反應度事故	冷態起動事故	○	○	○
	溫態起動事故	○	○	○
	出力時制御棒事故	○	○	○
	蒸氣需要過大事故	○		
	給水弁全開事故	○		
	冷水事故		○	○
	Xc의 燃燒事故		○	
	制御棒驅動裝置故障	○	○	
	機械的事故	主蒸氣管破斷事故	○	
蒸氣發生器細管破斷事故		○		
主冷却水流量喪失事故		○	○	○
主冷却水喪失事故		○	○	○
燃料要素破損事故			○	○
主冷却水漏出事故			○	
制御計裝事故			○	
格納容器內壓力誤指示事故			○	
交流電源喪失事故			○	

性子數의 급증은 없으나 冷却不足등으로 부터 燃料棒의 溫度가 상승하고 파손된다.

Savannah號에서는 想定事故를 포함한 어떠한 原子爐 事故도 없었으며 乘員의 放射線被曝도 충분히 許容值 이하 이었다. 1965년 8월 부터 1966년 3월까지 6개월간 에 158人的 平均 被曝量은 31mrem, 최고는 保健物理 擔當員의 870mrem, 다음에 一等機關士의 495mrem이었다.

4. 海難에 대한 原子力機關의 安全策

原子力船은 火災 및 爆發, 座礁, 衝突 등의 海難이 생겼을 때 수반하는 放射能事故에 대비해서 安全策을 강구하지 않으면 안된다. 座礁事故時의 放射線安全策으로 二重底 또는 三重底로써 格納容器와 그 외의 중요한 原子爐機器를 보호하므로써 耐座礁構造를 마련한다. 衝突海難에 있어서는, 대체로 船體中央部(37%)가 船首尾(63%)에 비해서 衝突件數가 적다. 또 경험에 의하면,

船艙으로부터 약 0.2B (B는 船의 幅)쯤 內側에 爐室을 위치하는 것이 가장 安全하다. 衝突을 당했을 때 받는 外力이 原子爐室에 큰 영향을 주지 않도록 耐衝突構造를 설치해야 된다. 美國의 原子力商船 Savannah號 (1970년 退役)의 耐衝突構造는 Minorsky의 公式에 기초를 두고 있다. 衝突海難에 있어서 衝突時의 에너지와 破壞 사이의 관계(Minorsky公式)는

$$E=175.8R_T+12,400 \text{ (ton}\cdot\text{kt}^2)$$

으로 주어진다. 여기서 E는 衝突時의 에너지로서 兩船의 排水量과 速度, 衝突角度에 관계된다. 이 에너지는 吸收되어 바로 船體의 파손을 초래케 한다. R_T 는 抵抗係數로서 여러가지 因子들에 의해서 좌우된다.

5. 非常推進動力源

이것은 原子爐가 정지 되었을때, 船 자체 또는 公衆의 安全을 확보하기 위해서 비상용 動力을 공급한다. 특히 動力源은 船이 港內를 航行하다가 原子爐가 꺼졌을 때라든지, 大洋航行 중에 原子爐가 運轉不可能한 경우에 필요하다. 非常用動力源으로서는 보통 boiler나 혹은 Diesel을 채용한다.

6. 原子力船의 乘員教育

原子力船에 있어서는 新職種으로 保健物理職이 있다. 保健物理主任은 船內의 각 區域, 水, 空氣등의 放射線測定, 分析, 乘員의 健康管理등의 放射線安全防護管理를 위한 활동을 한다. 原子力船의 乘員은 在來船의 乘員資格을 가지고 原子力船에 관한 教育訓練을 받은 者로 한다. Savannah號, Otto Hahn號, 및 Mutsu號의 乘員에 대해서 실시된 教育訓練課程은 다음과 같다.

- 機關長, 機關士 : 學科 6월, 學習 1~3월
- 船長, 航海士 : 學科, 實習 2~3월
- 機關部員 : 學科, 實習 3월
- 保健物理員 : 學科, 實習 3~6월
- 그의 乘員 : 學科, 實習 1~2월

7. 原子力損害賠償

지금까지 就航된 原子力商船에 대해서 保有國들의 原子力損害賠償策은 대략 다음과 같다.

原子力船은 國內의 港灣內에서 일어나는 災害에 대해서 不可抗力의 天災地變 또는 戰爭등의 社會的動亂을 제

表 2. 非常用推進動力源의 例

	航海速度	非常推進力速	主機馬力	非常用力
Mutsu號	16.5kt	10kt	10,000	1,400
Savannah號	15.75	8.5	10,000	2,000
Otto Hahn號	21.0	6	22,000	850

하고는, 그 災害에 관해서 運航者에 과실이 있건 없건 運航者는 賠償의 責任을 진다. 이것을 실행하기 위해서 運航者는 原子力損害賠償責任保險契約 및 原子力損害賠償契約을 체결하지 않으면 안된다. 前者는 民間保險會社와 계약하고, 後者는 保險契約으로 應당하지 못할 경우에 政府가 보상하기 위해서 運航者가 미리 政府와 계약을 해 놓는 것이다. 이 損害補償으로도 부족할 경우에는 政府가 運航者를 원조해 주도록 되어 있다.

國際航海에 있어서의 損害賠償을 살펴보면, 자기 나라의 原子力船이 外國港에 入港하는 경우이건, 또는 外國 原子力船이 자기 나라의 港에 入港하는 경우이건 간에 國際協約에 따르지 않으면 안된다. 國際協約의 하나로써 1962년에 채택된 Brussel 條約이 있다.

- 1) 戰爭, 內亂, 叛亂등에 의한 경우를 제외하고는 그의 災害에 관해서 運航者의 과실이 없어도 運航者는 賠償의 책임을 진다.
- 2) 他的 故意的인 행위에 의해서 損害가 생겼을 경우에는 運航者는 후에 求償할 권리를 보유한다.
- 3) 運航者의 損害賠償額에는 한도를 설정한다. 그 한도는 1 原子力事故당 15億프랑(Franc)으로 한다.
- 4) 賠償請求權은 原子力事故日로부터 10年以內 유효하다.
- 5) 運航者에 대한 損害賠償의 請求訴訟은 運航許可國 또는 損害發生國의 裁判所에서 행한다.

Brussel條約에서 原子力船의 定義는 軍艦도 포함된 것으로 1968년에 Portugal 만이 비준하고 있어 현재까지 충분히 발효되지 않고 있다. Savannah號 및 Otto Hahn號는 外國港에 들어갈때에는 相對國의 入港協定(二國間協定)을 개별적으로 체결하는 것이 필요했다.

8. 放射性廢棄物의 처리

放射性廢棄物에는 氣體, 液體 및 固體 형태의 것이 있다. 氣體廢棄物은 보통 放出口에서의 濃度를 許容值 이하로 억제하여 大氣 중에 放出處分한다. 液體廢棄物을 처분하는데는 두가지가 있다. Savannah號와 Otto

Hahn호와 같이 航行중 海洋에 放出하는 경우도 있고, Mutsu호와 같이 海洋에 버리지 않고 陸揚하는 경우도 있다. Savannah호가 1965년 8월 부터 1966년 3월까지 海洋投棄한 總量은 60,817gal (5,906 μ Ci)이었다.

液體廢棄物의 海洋投棄에 관해서는 현재 國際基準은 없으나, 海域을 구분하고, 그 海域의 海水중의 各放射性同位元素의 最大許容濃度를 결정해서 어느 期間의 許容投棄量을 구한다. 海域을 구분하는데는 國際原子力機構의 報告에서는 3區分으로 하고, 美國原子力委員會에서는 5區分으로 하고 있다.

i 의 放射性元素의 그 海域의 許容投棄總量 M_i 은 다음 식으로 주어진다.

$$M_i = \frac{\tau \cdot V \cdot (PPC)_{si}}{4t_h}$$

여기서 M_i 는 i 核種의 許容投棄總量(Ci), τ 는 投棄期間(日), V 는 海域의 海水容積(cm^3), t_h 는 海水의 切半이 주위의 海水와 교환하는데 요하는 日數, $(PPC)_{si}$ 는 海域의 最大許容濃度이다.

固體廢棄物의 처분은 船內에서 행하지 않고 보관했다가, 入港한 후 廢棄物 Service船 또는 陸上處理施設로 移送한다.

9. 船內區域의 設定

乘員 및 旅客이 받는 放射線量을 될수 있는 대로 낮게 억제하기 위해서 船內區域을 보통 다음과 같이 區分한다.

1) 制限區域

이 區域은 放射能이 높아서 原子爐運轉중에는 들어갈 수 없다.

2) 管理區域

이 區域은 放射線業務에 종사하는 者가 수시로 출입하는 곳으로, 線量率은 30 mrem/週이다.

3) 周邊監視區域

이 區域은 非居住區域으로서 線量率은 10mrem/週 이하이다.

4) 安全區域

이 區域은 居住區域으로서 周邊監視區域의 外側에 있으며, 線量率은 10 mrem/週 이하이다.

5) 汚染管理區域

이 區域에서는 汚染空氣의 吸入에 의해서 線量率은 30mrem/週이 된다.

6) 汚染安全區域

여기는 行動制限이 없는 區域이다.