

《기술보고》

# 月城原電의 重水管理 體系와 實績分析

(A Review on the Heavy Water Management Program and Operating Experience at WOLSUNG N.P.P.)

李 柄 玉  
(韓國電力公社 月城 原子力 發電所)  
(1986. 6. 5 접수)

## I. 序 論

加壓重水爐인 CANDU(Canadian Deuterium Uranium)는 1962. 8 NPD(22MW) 발전소가 상업운전을 개시한 이래 캐나다 국내는 물론 月城 1호기를 비롯하여 해외에도 여러 基의 發電所가 建設 혹은 運轉중에 있어 PWR과 함께 그 信賴性과 安全性이 立證되어 세계 원자력 산업에 중대한 위치를 차지하고 있다.

특히 국내에 유일한 CANDU형 發電所인 月城 原電은 1983. 4. 22 준공이래 그 운전 실적이 계속 改善되어 작년 이용률 94.4%를 달성하여 세계 제 5위의 實績을 올렸던 것은 우리나라 原子力産業의 획기적인 기록이 아닐 수 없다.

CANDU原子爐는 천연 우라늄을 燃料로써 사용하기 때문에 중성자 경제성을 고려하여 核의 特性이 가장 우수한 重水を 減速材와 冷却材로 사용하고 있다.

重水是 자연수중에 1/7000 정도 함유되어 있어 그 생산이 어려우며 에너지 소비가 많기 때문에 그값이 굉장히 비싸며 운전중 고의적인 損失 내지는 사고에 의한 損失을 피할 수 없기 때문에 그 在庫管理上 어려움이 따르게 된다. 따라서 CANDU 原子力 發電所에서는 重水管理 技術이 개발되고 별도의 系統이 추가되며 技術 專擔 機構를 두어 과학적관리를 하고 있다. 月城의 경우 발전에 사용되고 있는 중수의 총량이 총 건설비의 12% 이상을 차지하며 금액상으로 수십억원에 상당한다.

重水是 보통의 물과 똑같이 系統에 장입되어 高溫高壓 상태에 운전되고 있으므로 蒸氣상태로의 누설 혹은 설비의 결함에 의한 누설에 의하여 항상 損失이 발생하며 品質의 低等級化에 의하여 경제적 損失이 따른다. 重水是 그 經濟性을 고려하여 철저히 回收되며 재사용

을 위하여 原子爐級으로 昇級된다. 중수 관리기술은 중수의 導入, 系統 장입, 사용, 이동, 누설 및 回收, 在庫測定, 損失測定, 昇級等에 관련된 諸般 업무 수행과 자료의 分析 評價 등을 총 망라한 것이다. 本稿에서는 重水管理 技術의 分析과 系統 장입 이후부터 1985년 말까지의 實績을 종합 평가하고 외국의 同型 發電所의 實績과 비교함으로써 참고자료를 提供하고 미래의 設計에 도움을 주고자 한다.

## II. 重水 管理 사이클

原子爐級 重水是 드럼에 들어있는 상태로 外資 購買되어 직접 系統에 장입되거나 저장 탱크에 저장된다.

저장중수는 減速材와 冷却材 系統에 이송되어 사용되며 운전중 蒸氣 혹은 액체상태로 漏泄되거나 설비사고 등에 의하여 系統 밖으로 빠져 나오며 혹은 補修를 위하여 배수 하는 경우가 발생한다.

따라서 증기 혹은 액상의 重水是 발전소 煙突 혹은 액체 廢棄物 排出 系統을 통하여 損失이 발생한다. 회수된 重水是 불순물이 함유되거나 低等級化하여 洗淨

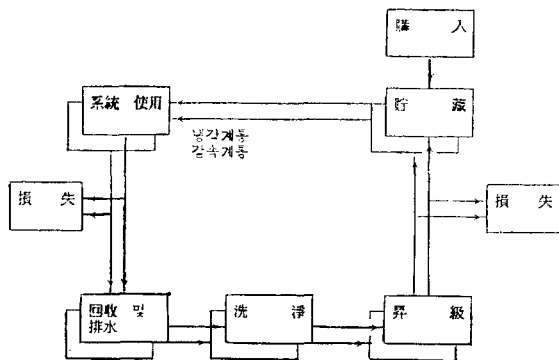


그림 1. 重水の 循環 사이클

處理를 거쳐 原子爐級으로 昇級하여 재사용을 위하여 저장하며 昇級工程에서 극히 적은 양이지만 손실이 발생한다. 앞장의 그림 1은 發電所내의 重水循環 싸이클을 나타낸다.

### Ⅲ. 重水 在庫 管理

#### 1. 重水 在庫 分類

重水の 재고관리는 簿記 重水와 實測 重水로 구분 관리하며 전자는 회계관리 측면에서 장부상으로 있어 야할 重水量이고 후자는 운전조건을 감안하여 실제로 測定된 重수량이다. 簿記 重水는 총 도입 重수에서 損失累計를 除한 것이며 實測重水는 매월 말 정기적으로 그 사용 기능에 따라서 그 당시의 운전상태를 고려하여 測定한 것이다.

1) 使用 機能에 따라서

가) 系統 重水: 계통에 들어있어 운전에 직접 사용되고 있는 重수

나) 豫備 重水: 중수 공급 계통, 세정 계통, 승급 계통등에 들어 있어 운전 여유분(비사용 포함) 重水

2) 重水 純度에 따라서

가) 原子爐級 重水: 純度 99.75Wt% 이상으로서 원자로 계통에 사용할 수 있는 重수

나) 低等級 重水: 경수의 유입에 의하여 純度가 낮아져 昇級을 필요로 하는 重수

3) 三重 水素 농도에 따라서

가) 減速材 重水: 삼중수소가 2.0 Ci/kg-D20 이상으로 감속제로만 사용되는 重수

나) 冷却材 重水: 삼중수소가 2.0 Ci/kg-D20 이하로써 냉각재에 사용되는 重수

重水の 在庫測定은 각 기기의 水位, 壓力, 溫度, 중수농도 등의 여러가지 요인 때문에 오차가 발생하며 실제적으로 부기 重수량과 실측 重수량 차이는  $\pm 0.6\%$  정도이다.

#### 2. 重水 在庫 實測 方法

重水の 在庫 測定은 각 계통에 따라서 減速材 주계통, 칼란드리아, 減速材 보조 계통, 冷却材 주계통, 重水 貯藏 탱크, 기타 보조 계통 등으로 구분하여 실시되고 있으나 운전 상태의 변화에 따라서 實測이 가장 어려운 冷却材 주회로의 實測 方法에 대하여 살펴본다. 冷却系統은 저온 정지 상태와 고온출력 상태의 두 경우로 구분해야 하며 정확한 중수량 산출을 위하여 溫度 및 壓力 條件이 相異한 Cold Leg와 Hot Leg의 두 그룹으로 구분하여 算出한다.

다음은 重水量 算出에 사용되는 각 計算 要素의 記

號이다.

$Dtf$ , kg/l: 온도  $Tf$ 에서의 重水액체의 比重

$Dtg$ , kg/l: 온도  $Tg$ 에서의 重水蒸氣의 比重

$F$ , kg/sec: 원자로 통과 冷却材 重水 流速

$Hc$ , BTU/kg: Cold Leg의 엔탈피

$Hh$ , BTU/kg: Hot Leg의 엔탈피

$Hr$ , BTU/kg: 原子爐에서 加해진 엔탈피

$Jc$ : 原子爐 出力

$Pcs$ , bar(g): Cold Leg의 포화 壓力

$Phs$ , bar(g): Hot Leg의 포화 壓力

$Poh$ , bar(g): 原子爐 Outlet Header 壓力

$Tih$ , °C: 原子爐 Inlet Header 溫度

$Vcf$ , l/kg: Cold Leg액체 比溶績

$Vhf$ , l/kg: Hot액체 比溶績

Leg  $Vhg$ , l/kg: Hot Leg스팀 比溶績

$Wc$ , kg: 全體 Cold Leg 重水量

$Wg$ , kg/kg, lb/lb: Moisture 1 lb당 스팀의 重량

$Wh$ , kg: 全體 Hot Leg의 重水量

$Whr$ , kg: Hot Leg 重水量 誤差

$Wt$ , kg: 全體 Cold Leg 및 Hot leg의 重水量

1) 低溫 停止 狀態

가) Cold Leg

$$Wcn = 15959.9 \times \rho(Tihn)$$

여기서  $n=1, 2, 3, 4$

$\rho(Tihn)$ 는 原子爐 Inlet Header의 온도별 重水 비중

$$Wc = \sum Wcn = \sum 15959.9 \times \rho(Tihn)$$

나) Hot Leg

$$Whn = 14324.9 \times \rho(Tohn)$$

여기서  $n=1, 2, 3, 4$

$\rho(Tohn)$ 는 原子爐 Outlet Header의 온도별 重水 비중

$$Wh = \sum Whn = \sum 14324.9 \rho(Tohn)$$

2) 高溫 出力 狀態

• Cold Leg

가) Cold Leg의 壓力( $Pc$ )

$$Pc \text{ (Bars, g)} = Poh + 12.41$$

나) Cold Leg의 比溶績( $Vcfn$ )

$$Vchn \text{ (l/kg)} = 1.5257 \times 10^{-5} \times (Tihn)^2 - 5.2926 \times 10^{-3} \times (Tihn) + 1.5014$$

여기서  $n=1, 2, 3, 4$

$$Tih1 = 63331 \quad T27$$

$$Tih2 = 63331 \quad T28$$

$$Tih3 = 63331 \quad T29$$

$$Tih4=63331 \quad T30$$

다) Cold Leg의 포화 압력 ( $Pcsn$ )

$$Pcsn(\text{Bars, g})=6.1005 \times 10^{-3} \times (Tihn)^2 - 2.4259 \times (Tihn) + 264.86$$

라) Cold Leg의 重水量 ( $Wcn$ )

$$Wcn(\text{kg}) = \frac{15959.9}{Vcfn \times \{1 - 0.000168 \times (Pohn + 12.41 - Pcsn)\}}$$

여기서  $Poh1=63332 \quad P31$

$$Poh2=63332 \quad P32$$

$$Poh3=63332 \quad P33$$

$$Poh4=63332 \quad P34$$

마) Cold Leg의 總重水量 ( $Wc$ )

$$Wc(\text{kg}) = \sum_{n=1}^4 Wcn = \sum_{n=1}^4 \frac{15959.9}{Vcfn \times \{1 - 0.000168 \times (Pohn + 12.41 - Pcsn)\}}$$

• Hot Leg

가) 冷却材 流量

(1) 原子爐 출력  $J$  및 3312-PM1, PM2, PM3, PM4 ON-OFF의 調査

(2) 冷却材 流量( $Fn$ )의 초기값 부여

(가) 어느 한 Loop의 두개의 Pump Moter가 모두 OFF이고  $J < 0.02$ (운전 정지 상태)이면  $Fn = 0$

(나) 어느 한 Loop의 두개의 Pump Motor가 모두 ON 일때에는  $Fn = 2052.5$

(3) 冷却材 重水 스팀 質  $Wgn$ 조사 및  $Fn$  값 결정

(가)  $Wg1, Wg2 \leq 0$  또는  $Wg3, Wg4 \leq 0$ 인 경우  $Fn = 3157.9 - 1.0647\bar{H}h + 0.8659\bar{H}r$

(나)  $Wg1, Wg2 > 0$  또는  $Wg3, Wg4 > 0$ 인 경우  $Fn = 3157.9 - 1.0647\bar{H}h + 0.8659\bar{H}r - 1690.5\bar{W}g$

\*註: 어느 한 Loop에서 오직 한개 펌프만 運轉中인 경우는 고려하지 않았음.

나) 原子爐에서 加한 엔탈피  $Hrn$

$$Hnr = 4.89329 \times 10^5 \times J / Fn$$

다) Cold Leg의 엔탈피  $Hcn$

$$Hcn = 4.5592 \times Tihn - 144.58$$

라) Hot Leg의 엔탈피  $Hhn$

$$Hhn = Hcn + Hrn$$

마) 스팀의 질  $Wgn$ 을 계산

$$Wgn = \frac{Hhn + 1.0858 \times 10^{-2} \times (Pohn)^2 - 6.0364 \times Pohn - 791.87}{1.6986 \times 10^3 - 5.8011 \times Pohn - 1.433 \times 10^{-3} \times (Pohn)^2}$$

바) Hot Leg의 증수량  $Wgn$

(1)  $Wgn \leq 0$ 인 경우

$$Whn(\text{kg}) = \frac{14324.9}{Vhfn \times \{1 - 0.000262 \times (Pohn - Phsn)\}}$$

여기서

$$Vhfn(\text{l/kg}) = 2.99272 \times 10^{-7} \times (Hhn)^2 - 2.08092 \times 10^{-6} Hhn + 0.83591$$

$$Phsn(\text{Bars, g}) = 1.7653 \times 10^{-4} \times (Hhn)^2 - 0.1939 Hhn + 57.12$$

(2)  $Wgn > 0$ 인 경우

$$Whn(\text{kg}) = \frac{14324.6}{Wgn \times (Vhgn - Vhfn) + Vhfn} + Whern \times \{1 + 0.063 \times Wgn \times (98.7 - Pohn)\}$$

여기서

$$Vhgn(\text{l/kg}) = 2.6376 \times 10^{-3} \times (Pohn)^2 - 0.7352 Pohn + 62.858$$

$$Vhfn(\text{l/kg}) = 3.0484 \times 10^{-3} Pohn + 1.02326$$

한편  $Whern$ 의 값은  $Wgn$ 의 값에 따라 다음과 같이 구분된다.

(가)  $Wgn > 0.04173$ 인 경우

$$Whern = 1751.3 \times (Wgn - 0.04173) + 919.4$$

(나)  $0.04173 \geq Wgn \geq 0.02423$

$$Whern = 7970.0 \times (Wgn - 0.02423) + 780.2$$

(다)  $0.02423 \geq Wgn \geq 0.00738$

$$Whern = 17719.5 \times (Wgn - 0.00738) + 481.3$$

(라)  $Wgn \leq 0.00738$

$$Whern = 65226.7 \times Wgn$$

사) Hot Leg의 총 증수량  $Wh$

$$Wh(\text{kg}) = \sum_{n=1}^4 Whn$$

단, 각 온도 압력에 따른 물리적 자료는 重水蒸氣表에 의하여 계산함.

## IV. 重水 管理 實績 分析

### 1. 重水 損失 측정

증수의 손실 경로는

1) 煙 突

2) 液體 廢棄物 排水 系統

3) 蒸氣 및 給水 系統

4) 器機 冷却 循環水 系統

5) 기타 등 5가지로 구분되며 연돌의 경우는 원자로 건물 내부의 排氣에 포함된 증수 증기가 증기 회수 계통에서 완전히 회수되지 않고 일부분이 빠져 나온 것이다. 煙突損失 측정은 아래 그림 2와 같이 연돌 배기 계통에 실리카 젤 칼럼을 설치하여 배기증의 습분을 吸着후 그 습분을 응집 포집하여 다음 節次에 의하여

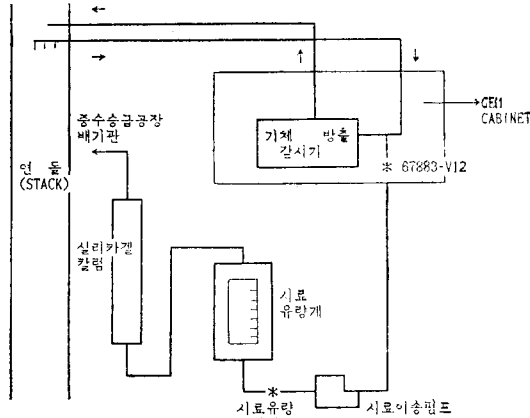


그림 2. 排氣중의 損失 測定

重水 損失을 算出한다.

- (1) 실리카 겔 약 250~400cc를 취하여 오븐속에 넣고 110°C에서 1~2시간 정도 乾燥한다.
- (2) 乾燥된 실리카 겔을 건조된 비커에 넣은 다음 무게  $Mdb(kg)$ 를 잰다.
- (3) 비커속의 실리카 겔을 깔때기를 이용하여 유리 칼럼에 옮겨 넣은후 비커의 무게  $Mb(kg)$ 를 잰다.
- (4) 건조된 실리카 겔이 들어있는 칼럼을 조심스럽게 취급하여 GEM(기체 유출물 감시기)에 가져가서 칼럼을 설치한다.
- (5) 시료펌프의 입구 출구측 밸브를 열고 펌프를 작동한다.

(6) 시료 유량을 1.8~4.2l/min 범위에서 조절 한 다음 시료유량  $Fi(m^3)$ 와 그때의 시간  $ti$ 를 기록한 다음 GEM의 적산유량계 표시판의 단추를 눌러 적산 연돌 배출량  $Qi(\times 10^4 m^3)$ 을 기록한다.

(7) 칼럼설치후 24시간이 경과하면 칼럼을 제거하여 그 적진 시료 유량  $Ff(m^3)$ 과 시간  $Tf$ , 그리고 적산 유량  $Qf(\times 10^4 m^3)$ 를 기록한다.

(8) 증발용 플라스크가 충분히 건조한지 확인 한 다음 빈 플라스크의 무게  $Mf(kg)$ 를 잰다.

(9) 칼럼 속의 濕한 실리카 겔을 플라스크에 옮긴 다음 무게  $Mwf(g)$ 를 잰다.

(10) 플라스크를 증발-응축 장치에 설치한후 150~200°C에서 가열 하면서 증발-응축하여 시료수를 얻는다

(11) 시료수의 중수함량을 分析하여 다음식에 의하여 중수 손실량을 산출한다.

$$L(kg-D20) = M(kg) \times \frac{Q(m^3)}{g(m^3)} \times \frac{I(\%D20)}{100}$$

여기서  $Q$ =연돌 배기량( $m^3$ ,  $Qf-Qi$ )

$g$ =시료 총유량( $m^3$ ,  $(Fi+Ff)(Tf+Ti)/2$ )

$M$ =시료량( $kg$ ,  $(Mwf-Mf)-(Mdb-Mb)$ )

$I$ =중수 농도( $Wt\%D20$ )

## 2. 重水 損失 實績分析

CANDU-600MW의 경우 設計上 정상운전을 기준하여 하루 총 손실을 14.3kg으로 보증하고 있다. 다음 표-1은 중수의 계통 장입 이후부터 1985년 말까지의 중수 손실을 정리한 것이다. 표에서 본바와 같이 1984. 11

표-1. 年월별 重水 損失量(kg-D20)

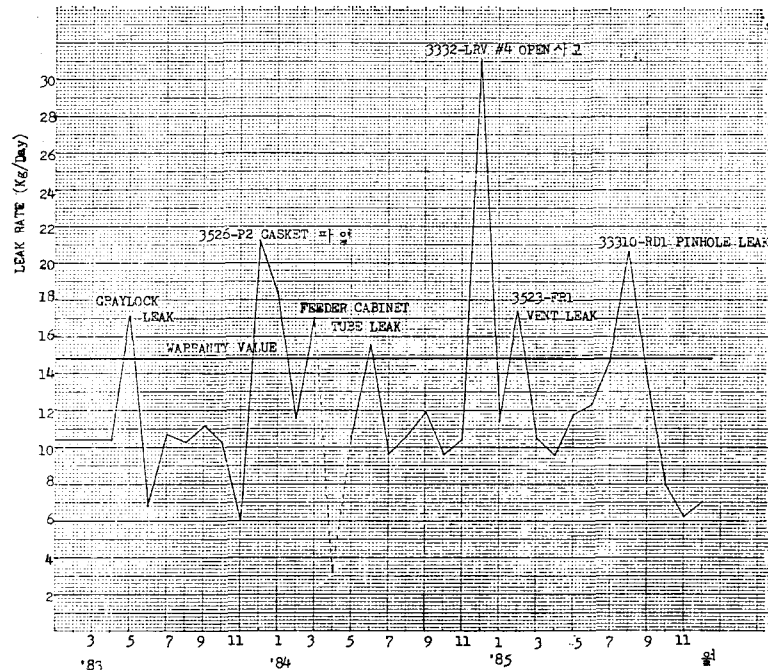
年월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계
1982	—	—	—	—	—	—	—	100	230	320	310	320	1,280
1983	320	290	320	270	570	200	330	320	390	320	180	660	4,170
1984	569	309	530	98	376	430	318	288	372	303	247	1,554	5,394
1985	210	482	324	288	367	385	447	658	405	244	189	213	4,212

표-2. 경로별 중수 손실량

단위 : kg-D20

年 道 경 로	연  돌	액체폐기물	스  팀	냉각수계통	기  타	계
82	710	490	40	—	40	1,280
83	2,950	870	60	—	290	4,170
84	4,317	652	51	2	372	5,394
85	3,718	364	71	7	52	4,212
계	11,695	2,376	222	9	754	15,056
분율 %	계 85년	78	16	1	0	100
		88	9	2	0	100

1983~1985년 월별 중수 손실 그래프



중수 누출事故만 除外하고 대개의 경우 연간 4mg으로서 설계 보증치 이하로 유지되고 있다.

다음에 1983~1985년의 각 월별 손실측정 결과를 그래프에 표시해 보면 많은 Peak가 나타나는데 대체로 중수 누출사고와 일치하고 있음을 알 수 있다.

한편 각 경로별 손실을 分析해 보면 손실이 가장 많은 경로는 煙突로서 총손실의 78%를 차지하며 다음은 방사성 액체 폐기물 排水系統을 통한 손실로서 16%이며 나머지 6%는 冷却水 순환 계통 및 증기 발생기 튜브 표면으로의 Permeation에 의한 손실등 기타 경로를 통한 손실이다. 앞장의 표-2는 경로별 중수 손실량을 나타낸다.

외국의 Candu 발전소의 경우 많은 운전경험과 설비 개선으로 중수 손실을 最小化하고 있으나 누출事故와 직접 영향있으며 측정 방법의 차이 때문에 직접 비교는 어려우나 Candu-600MW급 평균 3.9Mg/년, Ontario Hydro 평균 4.3Mg/년을 기록하고 있어 月域과 유사함을 알 수 있다. 각 경로별 손실은 암발제와 월성의 경우 82%가 排氣煙突을 통한 손실이고 약 15%는 방사성 액체 배수 계통을 통한 손실이며 나머지 3%가 기타 손실로써 평가된다.

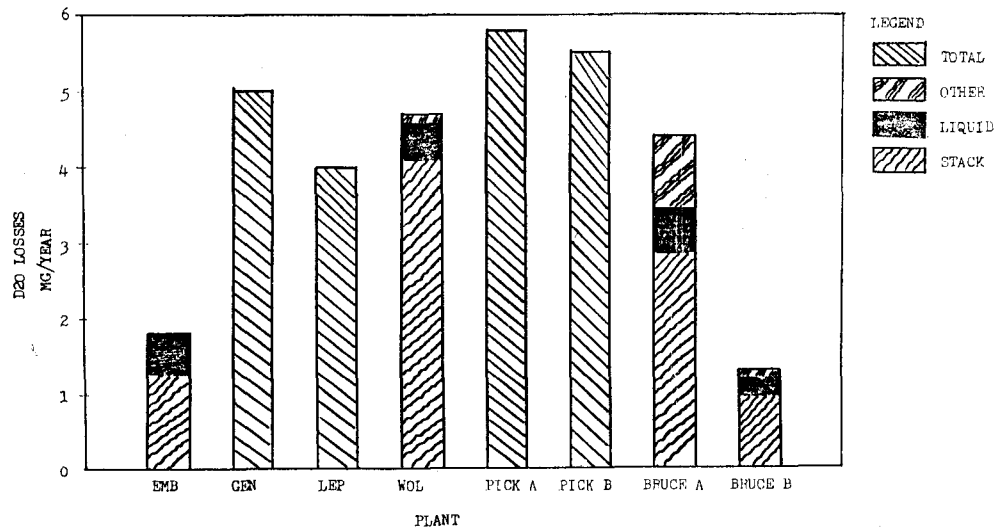
Ontario Hydro와 비교하면 총 손실량도 적은 편이며 각 경로별 손실도 연돌, 액체 배수 계통, 기타의 각각 66%, 13%, 20%로서 아주 다른 값을 보여주고 있다.

기타의 경우 Candu-600의 Incoloy-800보일러 튜브와, Ontario Hydro의 Inconel-600튜브의 Permeation율이 3배이상 차이가 있기 때문이며, 설비가 다르기 때문이며, 손실측정법이 차이가 있기 때문이다.

아래 표-3은 Candu발전소의 연간 경로별 중수손실 비교를 보여주며 다음장의 그림 2는 각발전소별 손실 비교 Graph이다.

표-3. Candu 발전소 重水損失比較(mg/a)

	煙突	액체排水계통	기타	計
<b>Candu-600</b>				
Embalse	1.3	0.5	0.0	1.8
Gentilly	—	—	—	5.0
Point-lep	—	—	—	4.0
Wolsung	4.0	0.5	0.2	4.7
Candu-600 평균	2.7	0.5	0.1	3.9
경로별 손실율(%)	82	15	3	—
<b>Ontario Hydro</b>				
Pickering A	—	—	—	5.8
Pickering B	—	—	—	5.5
Bruce A	2.8	0.6	1.0	4.4
Bruce B	1.0	0.2	0.1	1.3
Hydro 평균	1.9	0.5	0.6	4.3
경로별 손실율(%)	66	13	20	—



GENTILLY, POINT LEPREAU AND PICKERING REPORT TOTAL LOSSES ONLY.

그림 2. Candu 발전소 重水 損失 Graph

### 3. 重水回收 및 低等級化 損失

중수의回收은 손실과 마찬가지로 중수누출의 크기와 頻度에 영향을 받는다. 그러나 중수누출과 상관없이 機器의 운전, 補修 또는 시료채취 등 필요에 의해 서계통에서 排水하는 경우도 많으므로 중수누출 빈도 100%와 관련은 없으며 운전년수에 따라서 사고에 의한 回收量은 감소한다고 볼 수 있다. 시운전중인 1983년은 빈번한 보수에 의하여 다른 해의 같은 기간에 비하여 회수량이 많은 편이며, 1984년은 11월 말의 대형, 冷却材 漏泄事故 때문에 회수량이 급증하였다. 다음 表-4는 경로별 회수량을 나타낸다.

액체회수는 정상회수인 경우와 비정상회수인 경우로 구분되며 지금까지의 운전경험상 40%정도가 정상회수로 평가된다. 한편 기체회수는 重水蒸氣를 Molecular Sieve Drier에 의하여 吸着回收한 것이며 대기중의 습도와 온도의 영향을 받아 계절에 따라 회수중수의 농도가 다르며 정상운전시는 1~2wt%를 나타내어, 상기 표는 중수관리 편의상 100wt%중수로 환산한 량이다.

중수가 회수될 때는 항상 純度低下를 가져온다. 이

표-4. 경로별 연간 중수 회수량 단위: kg-D2O

	액체	기체	계	회수율 kgD20/hr	비 고
1983	8,610	2,980	11,590	1.3	6월 이후 회수실 적 집계
1984	27,237	5,576	32,813	3.7	
1985	9,156	4,205	13,361	1.5	
계	45,003	12,761	57,764	2.26	

표-5. 回收중수의 低等級化損失 kg-D2O

년월	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	계
1984	101	111	145	61	165	270	191	128	184	194	142	536	2,173
1985	78	284	173	74	91	97	100	114	100	84	59	401	2,292

는 공기중의 습분과 건물 바닥등에서 경수와 혼합되기 때문이다.

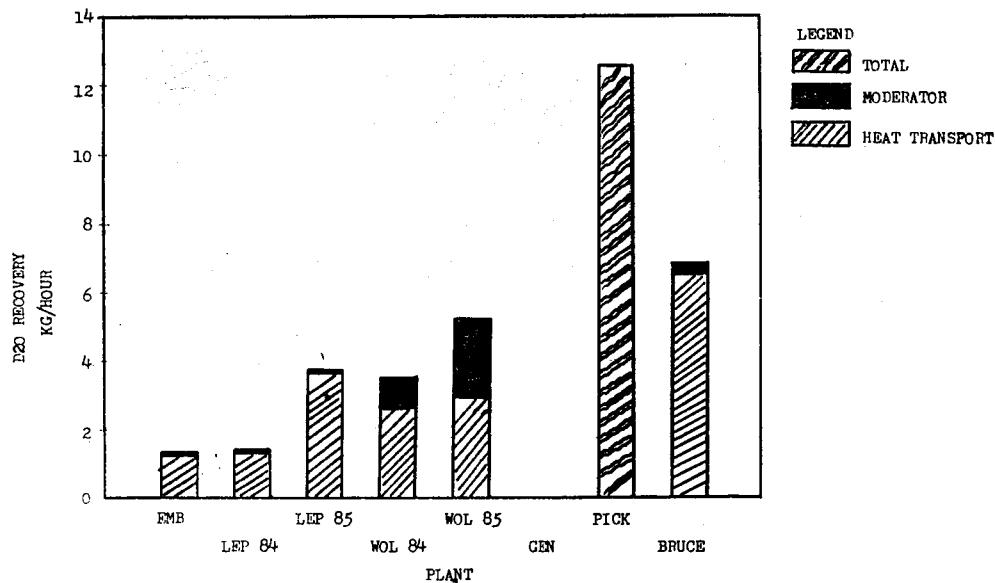
따라서 중수농도 저하는 原子爐級으로 昇級하는데 따른 경제적 손실이 發生하며 이러한 損失을 低等級化 損失이라하며 kg-D20단위로 표시한다.

表-5는 1984, 85년도 저등급화 손실을 나타낸다.

상기 表4~5에서 보는바와 같이 중수의 회수량 즉 누출이 많으면 적, 간접 손실이 많아진다는 것을 알 수 있다.

표-6. Candu-600의 回收率 比較

년도	발 전 소	냉각계통 회수율 kg/hr	감속계통 회수율 kg/hr	총 회수율 kg/hr
1984	Embalse	1.25	0.05	1.3
	Point lep	1.3	0.1	1.4
	Wolsung	2.6	0.9	3.5
1985	Point lep	3.6	0.1	3.7
	Wolsung	2.9	2.3	5.2
Candu-600 평균		2.3	0.7	3.0
Candu-600 평균비율		77%	23%	—



GENTILLY 2 DATA NOT AVAILABLE

그림 3. Candu 발전소 重水 回收 比較 Graph

외국의 Candu-600과 비교하면 앞장의 表-6에서 볼 수 있듯이 중수의 계통 이탈률은 1.3~5.2kg/hr이며 평균이 3kg/hr임을 알 수 있으며 75% 이상이 冷却系統에서 回收됨을 알 수 있다. 상기 그림 3은 각 발전소별 回收率比較 Graph이다.

#### 4. 總維持費(Up-Keep)

Up Keep은 중수손실과 저등급화 손실의 합으로서 중수재고수준과 품질을 유지하는데 드는 총 비용이며

표-7. 月別 D2O Up Keep kg-D2O

구분 월	84			85			비고
	직접 손실	저등급 화손실	Up Keep	직접 손실	저등급 화손실	Up-- Keep	
1	569	101	670	210	78	288	
2	309	111	42	482	284	766	
3	530	145	675	324	173	497	
4	98	6	104	288	74	362	
5	376	165	541	366	91	457	
6	430	270	700	386	97	483	
7	318	191	509	448	100	548	
8	288	128	416	658	114	772	
9	372	184	556	405	100	505	
10	303	194	497	244	84	328	
11	247	142	389	189	59	248	
12	1,554	536	2,090	211	40	251	
계	5,394	2,173	7,567	4,212	1,292	5,504	

중수량 혹은 금액으로서 나타내며 중수비용이 발전원가에 미치는 영향을 분석할 수 있다.

앞의 表-7은 1984, 85년도의 Up Keep을 나타낸다.

1985년도는 전년도에 비하여 重水漏出이 減少하여 직접 손실 및 저등급화 손실이 많이 감소하였다. 즉 중수손실은 1,182kg-D2O가 감소하여 22%, 저등급화 손실은 881kg-D2O가 감소하여 41%가 감소하였고 전체적인 Up Keep의 감소량은 27%에 해당하는 2,063kg-D2O이나 되었다.

또한 '84, '85년도의 Up-Keep비용은 최근의 중수구매 단가 195\$/kg을 적용하여 각각 13.1억원과 9.6억원에 달한다. 한편 '85년도의 경우 총 발전량 56.1억 KWh의 원가에 미치는 영향이 0.17₩/KWh로서 '85년도 月城發電原價 23.76₩/KWh의 약 0.7%에 相當한다.

#### 5. 重水漏出事故

중수의 누출은 통상 急性과 慢性의 두가지로 구분되고 있다. 만성적인 누출은 고질적으로 계속적으로 발생하는 소규모의 누출이며, 급성누출은 대개의 경우 사고에 의하여 流出速度가 10kg-D2O/hr이상으로서 100kg-D2O 이상이 漏出된 경우를 말한다.

月城의 경우 중수의 계통장입 이후부터 大, 小 총 누출 건수는 47건이며 75% 이상이 시운전기중증인 '83년 이전에 발생하였다. 그이후는 '84.11의 대형 누출사고를 제외하고 운전년수에 따라서 각설비의 결함보완

표-8. 重水漏出 統計表

누출량(단위 mg-D2O)	82	83	84	85	계	년평균
0.1	2	25	6	—	33	8.3
0.1~0.5	1	5	1	1	8	2.0
0.5~2	1	1	—	1	3	0.7
2~4	—	1	—	1	2	0.5
4~6	—	—	—	—	—	—
22~24	—	—	1	—	1	0.3
계	0	4	32	8	3	47
	0.5	1	2	1	2	6

혹은 운전경험에 의하여 현저히 감소하였다.

다음 표-8은 重水漏出統計를 나타낸다.

중수누출의 경우는 90%이상이 회수되며 나머지는 排氣, 排水계통 혹은 除染廢棄物에 의하여 損失된다.

가장 대표적인 3건의 누출사고와 회수관계를 보면 다음 표-9와 같다.

한편 同型 Candu-600인 Pt. Lep의 경우 1982~84년 통계에 의하면 0.5Mg 이상의 누출 사고만 4.0회/년, 평균 누출 크기는 8.2Mg/건으로서 月城의 경우 1.5회/년과 5.9Mg/건 보다 훨씬 높다는 것을 알수 있으며 다음 표-10은 Pt. Lep의 누출통계를 보여준다.

표-9. 누출 사고와 회수 관계

발생일	사 고 원 인	누출량 (kg-D2O)	회수량 (kg-D2O)	손실량 (kg-D2O)	회수율 (%)
83. 12. 2	3526-P2 흡입측 Check Valve의 Gasket 파열	3,400	3,092	308	91
84. 11. 25	3330-LRV #4 시험중 Valve가 개방되어 냉각재 중수가 중수저장탱크의 RD를 통하여 누출	23,475	22,219	1,256	95
85. 2. 13	3523-FR 1의 배기관이 진동 및 Stress에 의하여 균열 발생	5,608	5,081	527	91

표-10. Pt. Lepreau의 누출 통계

년도	82	83	84	계	년평균
누출량					
0.5~2	1	3	—	4	1.3
2~4	2	—	—	2	0.7
4~6	1	—	—	1	0.3
6~8	—	1	—	1	0.3
8~10	—	1	—	1	0.3
10~12	1	—	—	1	0.3
20~22	1	—	—	1	0.3
34~36	1	—	—	1	0.3
계	6	6	—	12	4.0

을 배우고 연구하여 損失의 最小化와 再使用, 回收의 極大化를 이루어야 한다.

따라서 중수의 재고 및 손실측정, 回收技術, 再處理昇級등 관련자료를 分析하여 현재의 未備點을 보완하고 설비를 개선하는 노력이 따라야 한다.

한편 현재 중수는 공급과잉으로 그 價格이 다소 하락하는 추세이나 우리가 수입에만 의존하기는 어려우며 사고에 대비하여 많은 량을 현장에 備蓄함은 경제적 손실이다. 따라서 장기적 안목에서 기술축적과 자체 공급을 위하여 소규모의 生産技術自立이 요구된다.

## 參 考 文 獻

## V. 結 言

Candu 原子力發電所에서 核燃料과 함께 補助燃料로써 사용되고 있는 중수는 發電媒體로서의 중요성과 經濟性 및 삼중수소에 의한 방사선 피폭관리 측면에서 완벽하게 관리되어야 한다.

月城의 경우 몇년간의 운전경험에 비추어 그 기술이 계속 개선되어 자료관리를 위한 電算化가 추진중에 있으며 量的 管理와 質의 향상을 위하여 프로그램을 개발중에 있다. 지금까지 운전실적을 分析해 본 결과 경험은 많은 캐나다보다 나은점이 있으나 보다 先進技術

1. J.P. Van Berlo Candu 600 Station Performance with Heavy Water Management, 1985.
2. AECL. D20 Loss Warranty Test Procedure, 1984.
3. D. Barber. Tritium Generation in Candu
4. Ontario Hydro. Cns. Optimization of the Tritium Displacement Program
5. 月城原子力 技術 報告書, 중수관리 현황분석보고 1986.
6. 月城原子力 重水損失 측정節次書, 1985.
7. Ontario Hydro Heavy Water Reference, 1971.
8. J.A. Ayres. Heavy Water Properties. Usaec Rea-



- ctor Handbook. Ch. 35.
9. H.C. Urey. The Thermodynamic Properties of Isotopic Species, 1947.
10. 月城原子力 月重水現況 報告. 1983~1985.
11. 月城原子力 技術報告書, 重水 在庫 算出式 1985
12. AECL. Heavy Water Buletin. 1984.