



# CANDU 원자로에서의 Co-60 생산

Michel Ross · Christian Lemire  
캐나다 Hydro-Quebec사

## 중성자원으로서의 CANDU

CANDU 원자로를 이용하여 Co-60을 매우 효율적으로 생산할 수 있고, 상당한 투자 수익도 거둘 수 있다. 이 논문은 CANDU 원자로에서 Co-60 생산 체계를 갖추기 위하여 무엇이 필요한가에 대하여 기술한다. 즉 무엇이 다르며, 어떤 안전성 검토가 필요하며, 어떤 물리적 설계 변경이 요구되며, 발전소의 참여 범위는 어느 정도 인가에 대하여 기술한다. Co-60을 생산하고 있는 Hydro-Quebec 발전소의 과거 10년간의 경험을 토대로 사고와 전력 생산 손실에 대한 위험 관리 및 발전소와 종업원의 혜택을 검토한다.

### 서론

Co-59는 원래 수 세기 동안 안료로 사용되어 왔던 보잘 것 없는 금속이었으나, 오늘날 Co-60으로 전환되면서 전례없는 가치를 갖는 방사성 원소가 되었다.

Co-60은 의학 분야에서 악성 종양 치료에 이용되는 것으로 잘 알려졌다. 병원에서 사용된 갖가지의 의료 폐기물을 살균하고 약품과 화장품들을 위생 처리하는 데 사용되고 있다. 또한 Co-60은 식품 분야에서 수확물을 저장하고 식품에 기생하는 병균을 억제하기 위한 새롭고 효과적인 방안이기도 하고, 인체에 해롭거나 발암성으로 추정되는 특정의 가스나 화학 제품을 유용하게 대체할 수 있음이 입증되었다. 이외에도 플라스틱의 경화, 하수 슬러지 처리, 해충 구제 등 여러 분야에 이용되고 있다.

반감기가 5.3년인 Co-60은 자연에 존재하지 않는 금속 원소로 Co-59의 안정 핵을 중성자에 쏘여 만들어지는 방사성 동위원소이다. 방사성 붕괴 과정에서 고에너지의 감마선을 방출하고 다시 안정한 상태로 돌아간다. Co-60을 생산하는 데 필요한 중성자원을 가장 잘 제공할 수 있는 것의 하나가 원자로이다.

CANDU는 캐나다가 개발한 중수 감속, 천연 우라늄 사용, 가압 중수 냉각의 원자로로 가압 용기 대신에 가압관 개념을 채용하고 있다. 이 원자로는 대형 원통 용기(칼란드리아라고 부름)를 관통하는 압력관들의 배열로 되어 있다.

칼란드리아에는 감속재와 반사체의 중수가 차 있고 압력관에는 핵연료가 들어가 있다. 가압된 중수 냉각재가 펌프에 의해 압력관 내로 흘러 핵연료로부터 나오는 열을 증기발생기로 전달한다.

반응도를 제어하기 위해 액체와 고체의 중성자 흡수 장치들이 설치되어 있다. 정상 운전중에는 흡수봉·조정봉과 영역 제어봉으로 반응도를 제어한다. 비정상 또는 비상시에는 정지봉을 원자로심에 떨어뜨려, 감속재 내로 액체 중성자 흡수제를 주입하여 원자로를 신속하게 정지시킨다.

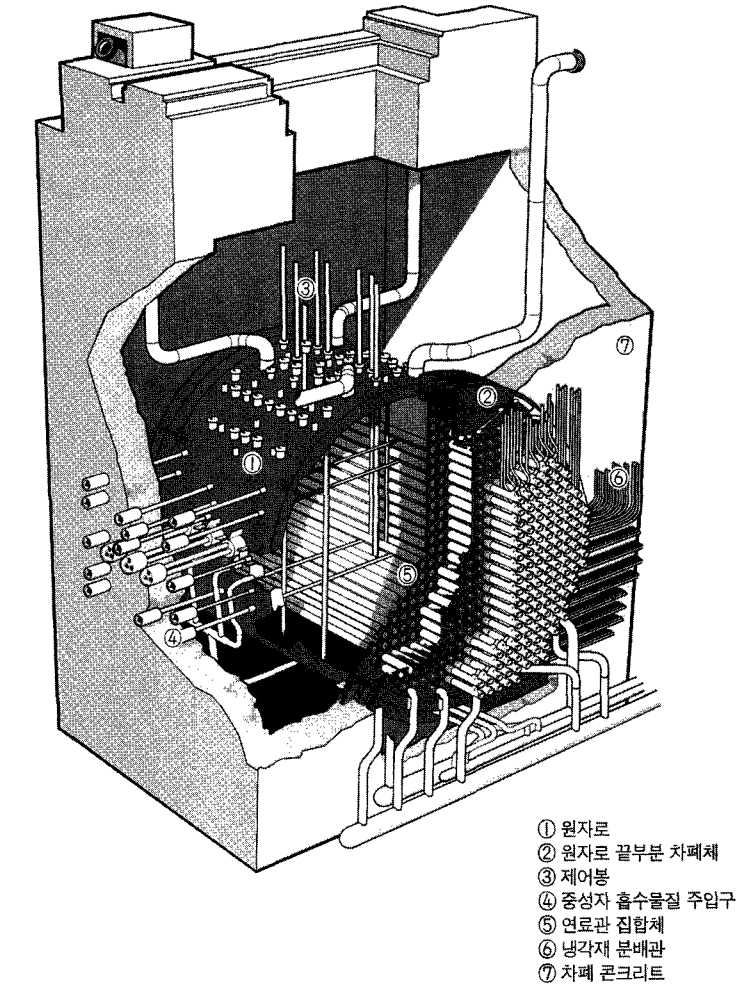
CANDU-6 원자로에는 21개의 조정봉이 수직으로 설치되어 있다. 각 조정봉은 가운데에 한 개의 스테인리스 스틸봉을 끼운 튜브형의 스테인리스 스틸 흡수체, 수직 안내관, 구동장치로 구성된다. <그림 2>는 한 개의 조정봉 구성을 보여준다.

조정봉은 원자로 내에 삽입되어 있을 때 중성자 출력 분포를 평탄하게 하여 원자로 출력과 연료 연소도를 최적화하고, 원자로로부터 인출되어 있을 때 출력 감발 후의 Xenon 중성자 흡수를 극복하기 위하여 잉여 반응도를 제공한다.

설계 변경을 조금만 하면 CANDU 원자로는 아주 효율적으로 대량의 Co-60을 생산할 수 있다. Co-60을 생산하기 위하여 현재의 스테인리스 조정봉과 이 봉의 연결부를 Co-59 다발 집합체로 교체한다. 원자로 내에서 Co-59 조정봉은 스테인리스 조정봉과 동일한 효과를 갖는다. 그러나 Co-59는 중성자를 흡수하여 인위적으로 생산되는 인공 방사성 동위원소인 Co-60이 되는 것이다.

### Hydro-Quebec

Hydro-Quebec은 퀘벡주 정부가 단독으로 운영하는 공기업으로 발전·송전·배전을 아우르는 종합 발전 회사이며 350만의 고객에게 전력을 공급하고 있다. 또한 이 회사는 10개의 행정 기관, 캐나다 동부



- ① 원자로
- ② 원자로 끝부분 차폐체
- ③ 제어봉
- ④ 중성자 흡수물질 주입구
- ⑤ 연료관 집합체
- ⑥ 냉각재 분배관
- ⑦ 차폐 콘크리트

<그림 1> CANDU 원자로의 구성

와 미국 북동부의 15개 전력 회사, 여러 미국 전력 도매업자 등에 전력을 공급하고 있다.

Hydro-Quebec은 Churchill 수력발전소를 위시하여 시설 용량 38,000MW인 세계적 전력 회사이다. 평균 가동률하에서 매년 190TW의 에너지를 생산한다. Hydro-Quebec은 북미 지역의 최대 전력 공급 회사의 하나로 총자산이 600억 캐나다 달러에 이른다.

Hydro-Quebec은 1,554,000 평방 킬로미터의 지역에 전력망을 설치하고 있다. 이 전력망은 고압 송전

선 32,000km와 배전선 106,000km로 구성되어 있다. 2000년에는 전력의 75%를 퀘벡 지역에 공급했고 총 207TW의 전력을 판매하여 114.29억캐나다달러의 판매고와 10.78억캐나다달러의 순이익을 올렸다.

### Co-60 변환 과정

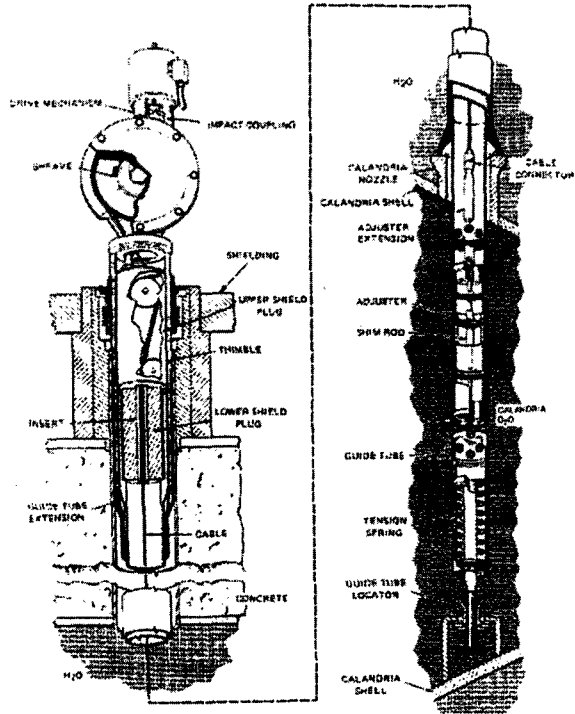
1983년 CANDU-6 원자로가 설치된 Gentilly-2 원자력발전소의 상업 운전 직후부터 Hydro-Quebec은 이 발전소에서 Co-60을



생산하는 것을 생각했다. 제일 먼저 발전소와 설계 회사인 AECL이 합동으로 기술적 타당성 연구를 시작했다. 1983년 말 이 연구에 의해 스테인리스 스틸 조정봉을 Co-59 조정봉으로 바꾸어도 원래의 조정봉 구성상의 성능·기능·신축성 등은 유지되는 것으로 확인되었다.

Gentilly-2 원자력발전소의 전기 생산에 지장을 초래하지 않고 Co-59의 중성자 조사가 가능할 것이라는 결론이 나왔다. 조사된 Cobalt가 노심에 있다고 해서 원자로 출력과 운전 여유도가 제한되거나 감소되지 않을 것이고 정상 운전 또는 정상 정비의 계획이 영향받지 않을 것이라고 확인되었다. 이 연구에서 조정봉 설비, 원자로 반응도 제어 설비 데크, Cobalt 운반통, 소내 운반통 수송기, 바닥에 내충격 패드가 박히고 Cobalt 봉 처리장치가 설치될 출하 베이 등에 대한 설계 변경이 검토되었다. 안전성과 운영 허가 관련 문제들을 다루었고 원자로 건물 크레인 현황을 검토했다.

또한 예비 부품, Cobalt 생산 관련 발전소 필수 장치의 유지, Co-59봉의 구매 QA, 원자로에서의 검증 및 시험 요건, 발전소 설비 및 절차서의 변경, 안전 운영 기술 지침서의 변경, 운전 요원의 교육, 조정봉의 인출 및 삽입 관련 소프트웨어, 사업 일정, 사업 비용 등에 대해서도 검토를 수행했다.



〈그림 2〉 조정봉의 구조

기술적 타당성 연구로부터 긍정적인 결과를 얻은 Hydro-Quebec은 Co-60 생산 5개년 계약에 대한 자체 평가와 이 타당성 연구에 근거한 사업을 착수했다. Hydro-Quebec은 내부 비용과 제한 사항을 고려했다. 이 사업은 1984년 중반 이사회에서 승인되었고 당시의 AECL Radiochemical(지금의 MDS Nordion)과 Co-60 생산 계약을 체결했다.

Hydro-Quebec은 모든 필수 설비 개선의 수행 및 시운전뿐만 아니라 관련 설계 및 안전성 검토, 자재 및 장비의 구매, 새로운 Co-59 조정봉에 대한 QA를 직접 수행하거나 외주를 주었다. 이후 정부 규제 기관

의 승인을 받아, 1984년에 Co-59 조정봉이 처음으로 원자로심에 장착되었고, 1985년에 처음으로 Co-60이 인출되어 처리되었다.

1989년까지 Gentilly-2는 계약에 따라 5년간 Co-60을 생산했다. 이 계약은 그 당시 시장 수요의 부진으로 갱신되지 못했고, 따라서 원자로심에는 아무런 설비 개선 없이 스테인리스 스틸 조정봉이 재장착되었다. Gentilly-2 원자로에서 Co-60을 다시 생산하는 것에 대한 새로운 논의가 1994년 말에 시작되었다. 1997년 초에 Hydro-Quebec은 MDS Nordion과 5년간의 계약을 새롭게 체결했다. 정부 규제 기관의 요구에 의해 안전성 분석을 전반적

으로 새롭게 했다.

원자로심에서 1년간의 조사를 시킨 후, 1998년에 Co-60을 처음으로 인출했다. 올해에 다섯 번째의 Co-60 인출이 완료되게 되어 있고, 이미 6년간 Co-60을 추가로 생산할 수 있는 새 계약을 체결했다.

**안전성 검토**

안전성 검토에 의해 다음의 사항들이 확인되어야 한다. 원자로의 핵적 성능에 영향이 없도록 Co-59 조정봉은 기존의 스테인리스 스틸 조정봉과 중성자 흡수 능력이 같게 설계되어야 하고, 반응도 제어 기구 데크를 추가로 차폐하여 Co-60의 고방사선장을 적절하게 차단해야 하며, 원자로 내의 머무르는 위치에서 조정봉의 운전 온도가 냉각수로 강제 냉각하지 않아도 걱정 범위 내에 있어야 한다.

가장 기본적인 기준은 Co-59 조정봉이 스테인리스 스틸 조정봉의 충반응도 값과 동일한 중성자 흡수 능력과 다른 종류의 흡수봉 또는 벅크와 연계된 동일한 중성자 흡수 분포를 가져야 한다는 것이다.

두 가지 조정봉의 다음과 같은 잠재적인 차이가 안전성에 관한 주된 관심 사항이다.

① 중성자 흡수 특성 예측의 정확도 및 중성자속 분포와 최대 핵연료 출력에 대한 중성자 흡수 특성의

잠재적 영향.

② 정상 운전중 또는 중성자 감속재 상실 사고시 감속재 상층 가스에서의 폭연 가능성과 관련한 조정봉의 내부 열 발생률과 각 위치별 최고 온도에 미치는 열 발생률의 영향.

안전성 분석에 의해 다음의 결과를 얻었다.

① 폭연의 위험을 방지하기 위하여 스테인리스 스틸 조정봉과 동일한 운전 제한치를 적용한다.

② Co-59 조정봉의 설계는 스테인리스 스틸 조정봉과 대등하고 설계 후의 모의 계산 값들은 측정 오차 범위 내에 있다.

③ 2년 이상의 조사도 가능하다.

④ 전 출력에서 고정 위치의 조정봉은 발화원이 될 가능성이 없다.

⑤ 원자로가 정지되었을 때, 조정봉은 감속재 밖으로 노출되더라도 발화원이 될 가능성이 없다.

⑥ 감속재 상실 사고시, 조정봉이 감속재 밖으로 노출되기 전에 국부 과출력(ROP)이 먼저 원자로를 정지시킨다.

그러나 Gentilly-2 발전소는 다음의 방침을 채택하기로 했다.

① Cobalt 조사 최대 기간은 전출력 운전(FPY) 2년으로 제한한다.

② 용존 중수소 농도 제한치를 강화하여 이 값을 넘으면 원자로를 정지한다. 즉, 상층 가스의 중수소 농도를 on-line으로 측정하고 0.5% /volume을 초과하면 최초 경보가

울리도록 하며, 또한 감속재의 중수소 농도도 on-line으로 측정한다.

③ 운전 철차서를 수정하여 인출 또는 인입되는 도중 조정봉의 동작을 멈추지 않게 한다. 즉, 조정봉의 동작 모드를 수동과 자동으로 하고 조정봉 벅크의 부분 삽입은 원자력 출력 변화시의 짧은 기간만 허용한다.

또한 다음의 사항들을 확인했다.

① 상층 가스 또는 중수의 중수소 농도가 1.6%/volume을 초과한 경우, 지정된 시간 내에 복구 조치를 완료할 수 있는가.

② 조정봉이 중간 위치에서 차단되거나 정지되고 상층 가스 또는 중수의 중수소 농도가 4%/volume을 초과했을 때, 지정된 시간 내에 복구 조치를 완료할 수 있는가.

③ 상층 가스 또는 중수의 중수소 농도가 6%/volume을 초과했을 때 조정봉이 중간 위치에 있다면, 원자로의 출력 운전을 할 수 없게 되는가.

④ 고방사성 물질을 운송하는 요건은 만족하는가.

**설비 개선 사항**

기존의 CANDU-6를 Co-60 생산 체제로 전환시키는 데는 그리 많은 설비 개선이 요구되지 않는다. 그러나 다음 사항들을 고려해야 한다.

① 스테인리스 스틸 조정봉을



Co-59 조정봉으로 바꾸는 것, 하부 차폐 마개의 변경 및 도르래 외부판에 점검구 추가.

② 방사성의 Co-60을 용이하게 빼내기 위하여 21개의 조정봉 각각의 주위 발판 위에 5cm 두께의 납벽돌을 지진에 견딜 수 있도록 까는 것. 약 350개의 벽돌이 소요됨.

③ 감속재 상층 가스에 중수소 분 석용 채취관 설치. 감속재 수위가 칼란드리아 상부보다 높을 때 안내관 내에 정체된 상층 가스를 분석하고 배출할 수 있음. 또한 Co-60 인출 작업중 감속재 상층 가스를 감압 상태로 유지시켜 삼중 수소 흡수 위험을 최소화함.

④ 원자로 건물 기중기의 단일 고장 안전성(single failure proof) 제고 비용 대비 위험도.

⑤ 조정봉의 원자로심 내 설치, 원자로심 밖으로의 인출 및 수송 용기에의 장입에 필요한 특수 장비 추가.

⑥ 원자로로부터 처리 / 반출장까지의 Co-60 운반 용 18톤 7.5m 길이의 수송 용기.

⑦ 기존 반응도 장치 수송 용기의 운반기를 새 cobalt 수송 용기에 적합하도록 개선.

⑧ 수송 용기 낙하 사고에 대비해 충격 패드를 처리 / 반출장(실제 핵연료 송출 수조)의 벽과 바닥에 설치.

⑨ 조정봉을 분해하고 중앙봉으로

부터 cobalt 다발을 떼어내며 수송 용기에 이 다발을 장입하기 위한 수조 내 cobalt 처리 장치 및 장비의 추가.

⑩ Cobalt 처리 / 반출장에 상하 구동 판과 현수 발판을 추가하여 운전원이 상하 구동판을 조작하고 이 판 위에서 조정봉 처리 작업을 할 수 있음.

⑪ 공기 순환과 방사선 방호를 개선하기 위해 기사용 연료의 수납 수조(Reception Bay)와 반출 수조(Expedition Bay)에서의 작업 공간 구조 변경.

⑫ 조사되는 cobalt의 방사능을 계산하고 한 주기 동안의 물리적량을 추적하는 소프트웨어 개발.

⑬ 각 운전 모드에 대한 안전 해석에 따른 안전 운영 기술 지침서, 운전 절차서 및 화학 지침서 변경.

다음은 시험으로만 입증될 수 있는 사항이다.

① 원자로심 내에서의 새로운 Co-59 조정봉 실제 위치 검증.

② 새 Co-59 조정봉 교체 후의 기동 중 중성자 흡수 능력의 동일성 확인 및 교정. 이 교정에는 전 조정봉의 완전 삽입과 완전 인출에 대한 총체적 교정, 한 बैं크 씩의 बैं크별 교정 및 한 개 조정봉 씩의 조정봉별 교정 등이 포함된다.

또한 다음의 절차서가 추가되어야 한다.

① 스테인리스 스틸 조정봉 제거.

② Co-59 조정봉의 실제 위치 검증을 포함한 설치 방법.

③ 원자로 기동 중 조정봉 중성자 흡수 능력 검증 및 교정.

④ 조사된 Co-60 조정봉의 제거.

⑤ 수조에서의 Co-60 봉 처리 및 저장.

⑥ 발전소로부터의 Co-60 반출.

### Hydro-Quebec의 경험

Hydro-Quebec의 Gentilly-2 발전소는 cobalt 조정봉을 장착했음에도 잘 운전해 오고 있다. 1984년부터 1989까지 Co-60을 생산했고 1997년 이래 이를 생산해 오고 있다. <표 1>은 이제까지의 Co-60 생산 실적을 보여 주고 있다.

일단 Co-60 생산 체제로 바꾸기로 결정하면 최초의 Co-59 조정봉이 원자로심에 들어가기까지 약 14개월이 걸린다. 이것은 다음의 사항을 수행하는 데 필요한 시간이다.

- ① 안전성 분석과 허가 취득.
- ② Co-59 조정봉 구매.
- ③ Co-59 조정봉의 원자로심 장착 장비 설계 및 구매.
- ④ Co-59 조정봉 장착 후의 운전을 위한 발전소 설비 변경 준비.
- ⑤ 필요한 모든 절차서의 작성.
- ⑥ 운전원 교육.
- ⑦ 반응도 제어 기구 데크에의 차폐 추가를 포함한 발전소 설비의 변경.

〈표 1〉 Gentilly-2 Co-60 생산 실적

항목	일차 계약	이차 계약
	1984~1989	1997~2002
총생산량 (Mci)	1707	1897
인출 회수	4	5
최소 조사 일수 (EFPD)	134	237
최대 조사 일수 (EFPD)	578	319
비방사능 (ci/gr)	46-168	80-106
총평균 비방사능 (ci/gr)	106	94
EFPD : Equivalent Full Power Days		

⑧ Co-59 조정봉 제거 및 장착 장비의 시운전.

⑨ 스테인리스 스틸 조정봉 제거 및 Co-59 조정봉 최초 장착.

Co-59가 원자로심 내에서 조사 되는 기간을 이용하여 다음의 사항을 추가적으로 수행한다.

- ① Co-60 조정봉을 제거하고 처리하기 위한 장비의 설계 및 구매.
- ② 상기 장비의 설치 및 시운전.
- ③ 필요한 절차서의 작성.
- ④ 처리원 교육.

최초 설치를 위한 발전소 정지 기간은 이후의 정상적인 조정봉 교환에 소요되는 기간과 다르지 않다. 발전소 설비 변경은 출력 운전중에 수행할 수도 있고, 정지 중에 수행하더라도 정지 공사의 임계 공정(critical path)상의 시간을 조금도 잠식하지 않는다.

반응도 제어 기구 데크에 차폐 벽돌을 까는 작업도 아무런 방해도 없고 준비가 적절하고 계획과 일정이 잘 짜져 있으면 24시간 작업으로 3일에 끝낼 수 있다. 결코 정지 공사의 임계 공정에 영향을 미치지 않는다.

스테인리스 스틸 조정봉을 Co-59 조정봉으로 처음 교체하는 데 소요되는 시간도 조사된 Co-60 조정봉을 새 Co-59 조정봉으로 교체하는 데 소요되는 시간과 다르지 않다. 21개 조정봉 각각을 원자로에서 교체하는 데 한 개 작업조로 12시간 이

상 소요되지 않는다.

그러므로 원자로 건물 내의 다른 어떤 작업과도 간섭이 되지 않는다는 가정하에 잘 훈련된 작업자 6명의 두 개조가 작업을 병행한다면, 만 7일 이내에 전체 교체 작업을 완료할 수 있을 것이다.

정지 중 다른 작업이 Co-60 작업에 우선해야 하는 것은 당연하다. Gentilly-2 발전소에서는 Co-60 조정봉을 교체해야 했던 정지 공사 때마다 이 원칙이 적용되었다. 〈표 2〉는 지난 5년 간의 결과를 보여준다. Cobalt 조정봉 설치 및 교체가 정지 공사의 임계 공정에 영향을 준 일이 절대 없다.

Gentilly-2에서는 공사 계획과 일정이 아주 잘 맞게 짜여져, 반응도 제어 기구 데크에서의 중성자 출력 밀도 측정기 교체를 포함한 정지 공사의 다른 작업들과 어떤 간섭도 없이 언제나 cobalt 조정봉을 교체할 수 있었다.

〈표 2〉에는 cobalt 조정봉 설치 또는 교체를 한 작업자들의 총피폭 선량이 나와 있다. 이 피폭 선량은 주로 원자로 건물 내의 공기 중 삼중

수소에 의한 것으로 Co-60봉의 gamma 조사에 의한 것이 아니며, 조정봉 교체 과정에서 방출된 삼중수소에 의한 것은 더구나 아니다. 이 피폭 선량은 아주 작으며, 표준 정지 공사에서의 man-rem 목표치가 100 rem 이상인 것과 비교하면 무시할 만한 양이다.

교체를 마무리하기 위해서 다음 단계로 조정봉의 교정이 원자로 기동 후 0.05%의 전출력 부근에서 12~13 시간 수행된다. 이후 10%와 25%의 전출력에서 추가 교정이 수행된다.

이전의 정지 공사들에서는 시간이 좀 더 걸리긴 했으나 언제나 여러 기동 절차를 동시에 수행했다. 2000년에 이 절차들을 처음으로 따로 수행하게 되어 cobalt 조정봉 시험이 임계 공정에 영향을 주었다. 이것이 Gentilly-2 발전소에서 cobalt 생산이 처음으로 전력 생산을 지연시킨 사례이다.

원자로로부터 인출된 Co-60봉은 처리/반출장에서 처리되어 구매자에게 운송된다. 시간이 촉박한 경우가 처리는 7명의 작업자가 24시간



〈표 2〉 Gently-2 Cobalt 조정봉 교체 내역

연도	소요 일수	소요 인원(명)		총조사량(rem)	비 고
		낮 근무	밤 근무		
1997	25	-	감독자 : 1 작업자 : 6	2.9	R-501의 Manbridge 고장으로 지연
1998	21	감독자 : 1 작업자 : 6	감독자 : 1 작업자 : 6	1.8	SLAR 작업에 의한 간섭
1999	26	감독자 : 1 작업자 : 6	감독자 : 1 작업자 : 6	1.7	스트라이크에 의한 작업 중단과 SLAR 간섭에 의한 지연
2000	12	감독자 : 1 작업자 : 6	감독자 : 1 작업자 : 6	0.4	작업자 일부 플라스틱옷 착용
2001	16	감독자 : 1 작업자 : 6	감독자 : 1 작업자 : 7	1.2	- SLAR 간섭 - 작업자 일부 플라스틱 옷 착용

\*Cobalt 제거 작업은 SLAR에 의한 연료 교환과 동시에 수행되지 않음.

작업을 하여 9일만에 마칠 수 있다.

Gently-2 발전소에서는 보통 정지 공사 완료 직후에 낮 근무만으로 처리 작업을 착수하여 4~5 주에 마무리했다. 처리 작업에 의한 총 피폭 선량은 1 man-rem 이하이고, 이것은 Co-60의 감마선에 의한 것이라기보다 기사용 연료 저장조의 공기 중 방사선 선량에 의한 것이다.

Co-60 생산 전환 사업의 최초 주기에서의 발전소 참여량은 변경 사항과 관련 설비의 설계·구매·안전 해석 등을 의주해도 최소 12 man-year 가량으로 계산된다. 발전소가 해야 할 주요 사항은 규제 기관의 허가 취득, 절차서의 작성과 교육, 조작 및 처리 장비의 성능 확인, 스테인리스 스틸 조정봉의 제거 및 CO-59 조정봉의 설치, 최초 주기 후의 Co-60 조정봉 제거, 이 Co-60의 처리 및 출하 등이다. 이후의 교환·처리·출하에는 6 man-year 이하

가 소요된다.

기사용 연료 수조에서 취급과 처리와 관련하여 지금까지 아무런 문제가 발생되지 않았고, 고방사성의 Co-60을 이 수조에 저장하는 데도 또한 아무런 문제가 없었다. 방사성 폐기물에 관련해서는 0.3m<sup>3</sup>의 아주 적은 양이 지난 10년 간 처리 수조에서 발생되었다. 사용이 끝난 cobalt는 Gently-2 발전소로 회송되지 않고 MDS Nordion으로 돌아온다.

Co-60 생산은 짜릿한 기술적 도전이고 작업에 참여하는 사람에게 부가적인 지식과 숙련도를 제공한다. 또한 반응도 제어 기구 데크에서 이루어지는 어떠한 작업도 해결할 수 있는 강력한 팀을 만든다.

건강 산업을 위한 Co-60 생산의 또 다른 국면은 일반인으로부터 얻을 수 있는 긍정적 관점이다. 일반인들은 Co-60이 현대 의학에서 중요

한 도구라고 인식하고 있다. 물론 가장 잘 알려진 것이 암의 방사선 치료이다. 그러나 현재 전세계의 병원에서 사용되는 의료 물품의 30%가 Co-60의 감마선으로 살균되고 있다. 이 의료물품들을 예로 들면, 수술용 장갑·봉합사·수술용 붕대·주사기 및 기타 광범한 용품 등이다.

일반인들은 건강에 관련된 것이 아니면 어떤 것에도 민감하며 그래서 Hydro-Quebec이 세계인의 건강에 공헌하고 있는 것을 매우 감사하고 있다.

### 위험 관리

위험 관리는 cobalt 생산에 대한 발전소의 결정에서 가장 중요한 부분을 차지한다. 왜냐하면 전기의 생산이 발전소의 제일의 사명이기 때문이다. 이 기본적인 사명이 저해될 위험을 최소화하지 않으면 안된다. 다음의 위험과 대책이 면밀히 검토되어야 한다.

① 감속재 가스 계통의 가스 폭염 안전성 분석과 간단한 설계 변경으로 이 위험은 완전히 제거된다. Gently-2 발전소에서는 발생한 적이 없다.

② 반응도 제어 기구 데크에서의 사고

원자로 건물 기증기를 단일 고장 안전성(single failure proof)을 갖도록 설계 변경하고 원자로 위에서

운송 용기를 기중기의 hook에 항상 매달아 놓으며 절차서를 엄격하게 지킨다면, 중량 기기를 잘못 다루어 반응도 제어 기구 데크를 손상시키는 일은 없을 것이다. Gentilly-2 발전소에서는 발생한 적이 없다.

③ Cobalt 조정봉의 제거 및 설치 시 반응도 제어 기구 손상

잘 훈련된 작업자가 작업을 하고 적절한 도구와 절차서를 사용해 이 가능성을 최소로 한다. Gentilly-2 발전소에서 발생한 적이 없다.

④ 감속재 내부로의 이물질 유입에 의한 손상

조정봉 안내관으로 이물질이 유입된 가능성은 잘 훈련된 작업자에 의한 작업과 적절한 도구 및 절차서의 사용으로 무시할 수 있다. Gentilly-2 발전소에서는 발생한 적이 없다.

⑤ 정지 공사의 지연과 전력 생산의 차질

cobalt 작업이 반응도 제어 기구 데크에서 수행되는 다른 작업 또는 원자로 기중기를 사용해야 하는 다른 작업과 간섭을 일으킬 가능성이 존재한다. 그렇지만 고도화된 계획과 일정의 작성, 입증된 절차서와 작업 방법, 철저한 작업자 훈련 등이 cobalt 생산 작업을 비임계 공정 항목의 정비 작업과 잘 조화시킬 수 있다. 임계 공정 항목의 정비 작업과는 연계시키지 않는다. Gentilly-2 발전소에서는 발생한 적이 없다.

⑥ 감속재 상층 가스의 중수소 제

한치 강화 및 조정봉 운전 모드의 수동 전환

이것으로 인해 출력이 제한된 적이 Gentilly-2 발전소에서는 없었다.

⑦ 정지 공사 후의 출력 상승 중 노물리 시험에 의한 전력 손실

Gentilly-2 발전소가 운전 절차서를 계속 개선했기 때문에 아주 낮은 출력에서 12~13 시간만 출력을 정체를 시킬 수 있게 되었다. 이 부분은 Co-60 생산 갱신 계약의 가격 협상에 언급되었다.

**수익적 측면**

수익적 측면은 두 가지 다른 관점에서 고찰될 수 있다. 회사의 관점과 발전소의 관점이다. 회사의 관점에서 보면 분명히 Co-60의 생산이 이익이 되는 사업이어야 하고 투자 수익이 전력 손실 위험을 상쇄해야 하는 것이다.

Co-60 구매자와 여러 가지 계약이 협의될 수 있다. 예를 들면, 초기 자본 투자를 구매자가 할 것인가 발전소 소유 회사가 할 것인가, 사용 후의 cobalt를 구매자가 처분할 것인가 회사가 할 것인가, 구매자가 회사에 어떤 수준의 서비스를 제공할 것인가 등이다. Co-60에 지불되는 가격은 이것을 모두 고려한다.

Hydro-Quebec은 초기 전환 사업에 일일이 참여하기로 결정하고

초기 투자비를 대었다. 이 초기 투자비는 최초의 5개년 계약에 전부 계상하여 약 3년만에 회수되었다. 이로서 이 계약의 연평균 투자 수익이 13.6%로 줄었다.

그러나 2차 5개년 계약에서는 안전성 분석의 재수행과 장비 및 도구의 개선에 상당한 투자를 다시 했음에도 불구하고 사정이 나아졌다. 새 투자비는 약 일년만에 회수되었다.

최근 2년간 설비 운영비에는 상당히 증가된 cobalt 작업과 조정봉 교체 후 출력 상승시의 노물리 시험에 따른 12~13시간의 출력 손실이 반영되었다. 그럼에도 불구하고, 5년간에 걸쳐 연평균 20.1%의 투자 수익을 거두고 있다. 다음의 6개년 계약에서는 Hydro-Quebec에게 좀 더 나은 투자 수익을 올려 주리라고 예상된다. Co-60 생산은 장기적인 사업으로 간주될 만하다.

다른 두 가지 국면이 투자 수익에 아주 크게 영향을 미칠 수 있다. 하나는 생산 주기의 길이이다. Gentilly-2 발전소는 1년 주기로 Co-60을 생산한다. 만약 이 주기가 18개월로 늘어난다면 투자 수익은 1.5배로 된다.

다른 하나는 원자로심에서 조사를 완료한 시점과 납품 시점과의 시간차이다. Co-60이 감쇄하여 판매 Ci량도 그만큼 줄어들기 때문이다. Gentilly-2 발전소에서는 통상적으로 3개월 이내에 선적을 마칠 수 있





었다.

발전소의 추가적인 노고가 운영 예산에 반영되어야 하고 그래서 발전소의 경영진과 직원이 cobalt 생산에 열성적으로 참여하려는 강력한 동기를 만들어내야 한다는 것이 Gentilly-2 발전소의 생각이다. 그래서 본사와 발전소가 cobalt 판매로부터 나오는 순수익을 다음과 같은 방식으로 나누고 있다.

① Co-60 판매의 총 수익은 발전소가 관장한다. 총당금으로 cobalt 생산에 관련된 연간 비용을 제한다. 즉, 일년간의 봉급, 자재비 및 감가상각비를 제한다. 그리고 나서 본사에 고정된 순이익금을 보낸다. 실제로 이 금액은 발전소의 운영 예산에서 상쇄된다.

② 본사 분의 순수익은 이용률 70%와 cobalt 생산의 연평균 운영비를 기준으로 한 cobalt 판매 평균 순수익이다. 만약 발전소가 더 높은 이용율을 내거나 운영비를 절감하면, 발전소에 돌아가는 순수익은 증가하고 그래서 이것이 실적 향상에 대한 장려금이 되는 것이다.

### 성공의 조건

Hydro-Quebec의 경험으로 Co-60 생산 체제를 성공적으로 갖추고 수년에 걸쳐 생산을 지속하려면 몇 가지 조건이 충족되어야 함을 알 수 있다.

① 발전소 종사자들의 두려움과 걱정을 무릅쓰고 cobalt 생산에 뛰어들 선도자가 회사 내에 있을 필요가 있다. 운전부서 사람들은 추가적인 책임과 인지된 새로운 위험을 떠안는 것을 언제나 꺼려한다. 이 선도자는 Co-60 생산의 긍정적인 면을 계속적으로 부각시켜야 한다. 왜냐하면 그들은 추가되는 부담에 주기적으로 저항하는 경향이 있기 때문이다.

② 고위 경영층이 회사가 세계 건강 산업에 참여하고자 한다는 분명한 메시지를 전달할 필요가 있다.

③ Cobalt 생산의 직접적인 혜택이 발전소 종사자들에게 돌아가야 한다.

④ 계획과 일정이 아주 세심하게 세워져야 한다. 그래야 정비 공사 정지 중과 정비 공사 완료 후 상업용 원자력발전소의 본연의 의무인 전력 생산과 관련된 작업과 간섭을 일으키지 않는다.

⑤ Cobalt 작업을 모두 충분히 입증된 절차와 작업 방식에 따라 수행되어야 한다. 이 절차들은 항상 면밀하게 실시되고 감시되어야 한다.

⑥ 오류를 범하지 않고 세련된 cobalt 생산 작업을 할 수 있도록 이 생산 작업에 참여하는 모든 사람들을 잘 훈련시키고 또한 매년 재훈련시켜야 한다.

⑦ 물론 CO-60의 가격도 적정해야 한다.

### 결론

CANDU 원자로는 매우 인상적인 잠재적 중성자원이며 압력관 설계로 되어 있어 스테인리스 스틸로부터 CO-59로의 조정봉 변경이 손쉽다.

단점도 있다. 정지 공사 지연의 매우 적은 가능성, 사고 발생의 추가적인 극히 적은 가능성, 조정봉 위치의 미소한 제한과 감속재 상층 가스의 중수소 농도에 관련된 약간의 운전 불편 및 조정봉 교체 후 출력 상승 중 12시간정도의 출력 정체 등이 단점들이다.

이 단점들은 미미한 것이고 기존의 적절한 안전성 분석, 관련 설비 변경, 입증된 절차서, 충분한 개인 훈련, 정확한 예방 정비, 고도화된 계획 작성 및 CO-60의 적정 가격 등에 의해 충분히 상쇄될 수 있는 것이다.

Hydro-Quebec은 핵에너지의 평화적 이용에 의해 세계적인 건강 관리 산업에 공헌하고 있음을 기쁘게 생각한다. 지금까지 10년간 생산된 CO-60의 양으로 1백만㎡의 의료물품을 충분히 멸균할 수 있다.

우리의 경험으로 보건대 유리한 점이 불리한 점을 훨씬 상회하며 투자 수익도 뛰어나다. Hydro-Quebec은 앞으로 6년간 CO-60을 생산할 수 있는 계약을 얼마 전에 갱신했다. ☞