



월성 원전 삼중수소 제거 설비(TRF)

-설치 계획 및 사업 추진 내용-

이 철 언

한국수력원자력(주) 월성원자력본부장



개요 및 추진 경위

월성 원전은 가압중수로형(PHWR)으로 원자로 냉각재와 감속재로 중수(D₂O)를 사용하는 특성 때문에 삼중수소가 발생된다. 생성된 삼중수소는 자연 붕괴로 인해 상당량 소멸되나 생성량이 상대적으로 많기 때문에 가동 기간이 경과할수록 계통 내 삼중수소 농도는 지속적으로 증가한다.

발전소 30년간 가동시 삼중수소 예상 농도는 감속재가 70~80 Ci/

kg, 냉각재가 2.0 Ci/kg이며, 삼중수소 축적량은 호기당 약 20 MCi(약 2 kg)로 평가되고 있다.

발전소 가동중에 생성된 삼중수소는 대부분 감속재 및 냉각재에 함유하고 있으며 현재 그 함유량은 (표 1)에서와 같다.

가동년수가 오래된 월성 1호기 삼중수소 농도는 예상치에 비해 약간 낮은 수준에 있다. 이는 매년 보충되는 새 중수와 과거 2호기 건설시 새 중수를 치환하여 사용함으로써 계통 내의 삼중수소 축적을 상당히 완화시킨 결과이다.

한편 정부에서는 월성 2·3·4호기 건설 인허가 과정에서 삼중수소 저감화 대책을 수립하여 추진토록 요구하였고, 한수원은 2005년까지 월성 원전 삼중수소 제거 설비(Tritium Removal Facility : TRF)를 설치하는 계획을 수립하였다.

경제성과 안전성이 고려된 동 설비는 현재 설계가 마무리 단계에 있

으며, 지난 2월 27일 월성 현장에서 지역 주민 대표, 정부 관계자, 관련 분야 전문가와 시공 업체가 참여한 가운데 기공식이 열렸다. 동 설비의 개략적인 추진 경위는 다음과 같다

- 1999년 9월 : 삼중수소 제거 설비 건설 기본 계획 수립
- 2000년 11월 : 종합 설계 계약 체결(캐나다원자력공사)
- 2002년 8월 : 백금 촉매 공급 계약 체결(한국원자력연구소)
- 2002년 9월 : 건축 허가 취득(경주시청)
- 2002년 12월 : 운영 변경 허가 취득(과학기술부)
- 2003년 1월 : 시공 계약 체결(대우건설/두산중공업 공동 도급)
- 2003년 2월 : 현장 기공식

삼중수소 생성 및 특성

삼중수소는 중수(D₂O) 중에 함유



〈표 1〉 호기별 삼중수소 현재 농도 단위

Ci/kg

구분	30년 운전 예상치	월성 1호기	월성 2호기	월성 3호기	월성 4호기
냉각재	2.0	1.72	1.50	0.66	0.49
감속재	80.0	59.2	27.70	19.95	15.6

〈표 2〉 원자로형별 삼중수소 생성량

〈표 3〉 중수로의 삼중수소 생성량

노형	생성량(Ci/MW(e)·yr)		
	핵분열	중성자 반응	합계
가압경수로	20	1	21
비등경수로	20	-	20
가압중수로	20	2,400	2,420
고속중수로	20	5	25

반응 경로	생성 속도 (Ci/MWe·yr)
${}^6\text{Li}(n, a)\text{T}$ ${}^7\text{Li}(n, na)\text{T}$	1
${}^{10}\text{B}(n, 2a)\text{T}$ ${}^{10}\text{B}(n, a){}^7\text{Li}(n, na)\text{T}$	0.0001
$\text{D}(n, \gamma)\text{T}$ - 냉각재 - 감속재	60 2,340
합계	2,400

한 중수소와 중성자와의 반응[D(n, γ)T]에 의해 생성된다.

〈표 2〉는 원자로형별 삼중수소 생성량을 보여주고 있는데, 표에서 볼 수 있듯이 중수로의 삼중수소 생성량은 경수로에 비해 월등히 많으며, 대부분 중성자와의 반응에 의해 생성된다. 〈표 3〉은 중수로에서 중성자와의 반응에 의한 삼중수소 생성량을 보여주고 있다. 대부분의 삼중수소는 감속재 중수에서 생성(약 93.4%)되며, 다른 반응에 의한 생성량은 무시할 수 있을 정도로 적다.

삼중수소는 반감기가 12.35년이며 인체에 흡수되었을 때 소멸되는 생물학적인 유효 반감기는 약 10일

정도이나 수분 섭취량 및 체외 배출량에 따라 최대 6일까지 단축될 수 있다.

삼중수소가 헬륨으로 붕괴되면서 방출되는 베타선(최대 에너지는 18Kev, 평균 에너지는 5.7Kev)은 에너지가 낮기 때문에 물에서의 최대 비정기 6μm 정도에 지나지 않아, 외부 방사선 조임량은 문제가 되지 않지만 삼중수소가 물(tritiated heavy water)이나 수증기 상태로 체내에 흡입되면 내부 방사선 조임량이 발생될 수 있다.

수소 동위원소의 모형은 〈그림 1〉과 같으며, 수소 동위원소의 특성은 〈표 4〉와 같다.

해외 TRF 설비 사례

삼중수소 제거 설비(TRF)는 중수로 원전의 방사선 영향을 줄일 수 있는 효과적인 대안으로 운영되고 있다. TRF 설비는 향후 운영의 경제성과 안전성이 고려되어 설치되고 있으며, 〈표 5〉는 각국의 삼중수소 제거 설비 현황을 보여주고 있다.

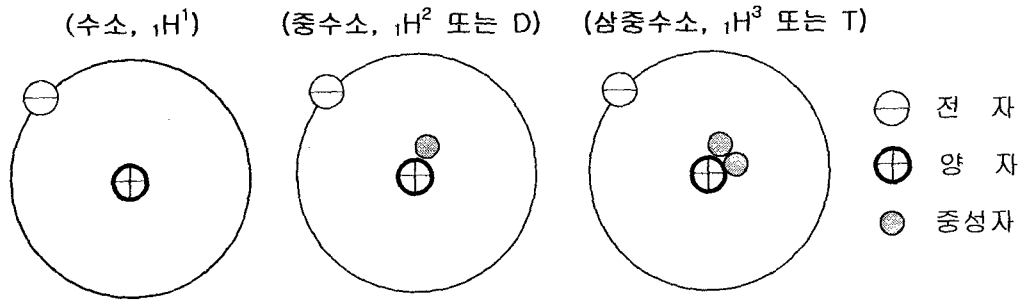
세계 최초의 TRF는 프랑스 그레노블(Grenoble)에 위치한 Laue-Paul Lanevin 연구소의 연구로에 설치되었으며, 1972년부터 현재까지 가동중인 것으로 알고 있다.

원자력발전소에 발생된 삼중수소를 상용 처리하는 설비는 캐나다 달링톤(Darlington) 원전이 최초이며 월성 원전의 경우는 두 번째에 해당한다

1980년 캐나다 OPG(Ontario Power Generation)는 작업자 보호 및 삼중수소 환경 방출량 저감을 위해 달링톤 원전에 TRF를 건설하기로 결정하였다.

이 설비는 프랑스 그레노블 TRF를 참조 설비로 하여 설계하였으며, 설계 용량은 360 kg/hr로, 연간 2,500톤의 중수를 처리할 수 있으며, 연간 20MCi(약 2kg)의 고순도 삼중수소(99.9%)를 분리할 수 있다.

달링톤 TRF는 유입 중수 중 삼중수소를 97% 제거할 수 있으며,



〈그림 1〉 수소 동위원소 모형

〈표 4〉 수소 동위원소의 특성

구분	수소	중수소	삼중수소
기호	H, H ¹	D, H ²	T, H ³
이름	Hydrogen	Deuterium	Tritium
질량(amu)	1.00783	2.01410	3.01605
존재비(%)	99.985	0.015	약 10 E-16
산소 화합물	H ₂ O	D ₂ O (HDO)	T ₂ O (DTO)

〈표 5〉 세계 각국의 삼중수소 제거 설비 현황

국가명	위치	운전년도	처리 용량 (kg/hr)	공정	
				삼중수소 분리 공정	삼중수소 농축 공정
프랑스	Grenoble	1972	20 (연구용)	기상 촉매 교환 공정 (VPCE)	초저온 증류 공정
캐나다	Chalk River Laboratory	1986	20 (연구용)	액상 촉매 교환 공정 (LPCE)	초저온 증류 공정
캐나다	Darlington	1989	360 (18개 호기용)	기상 촉매 교환 공정 (VPCE)	초저온 증류 공정
한국	월성	(2005)	100 (4개 호기용)	액상 촉매 교환 공정 (LPCE)	초저온 증류 공정

OPG 소유의 가동 원전 중수를 처리하여 감속재 삼중수소 농도를 10 Ci/kg로 유지할 수 있도록 설계되었다.

현재 OPG 소유 원전 뿐만 아니라, 캐나다 내 다른 발전소의 중수도 위탁 처리하고 있다. 현재까지 처리한 중수의 75% 정도는 달링톤 원전이 아닌 다른 발전소 중수로 알

려지고 있다.

월성원전 삼중수소 제거 설비

1. 설치 위치 및 건물 규모

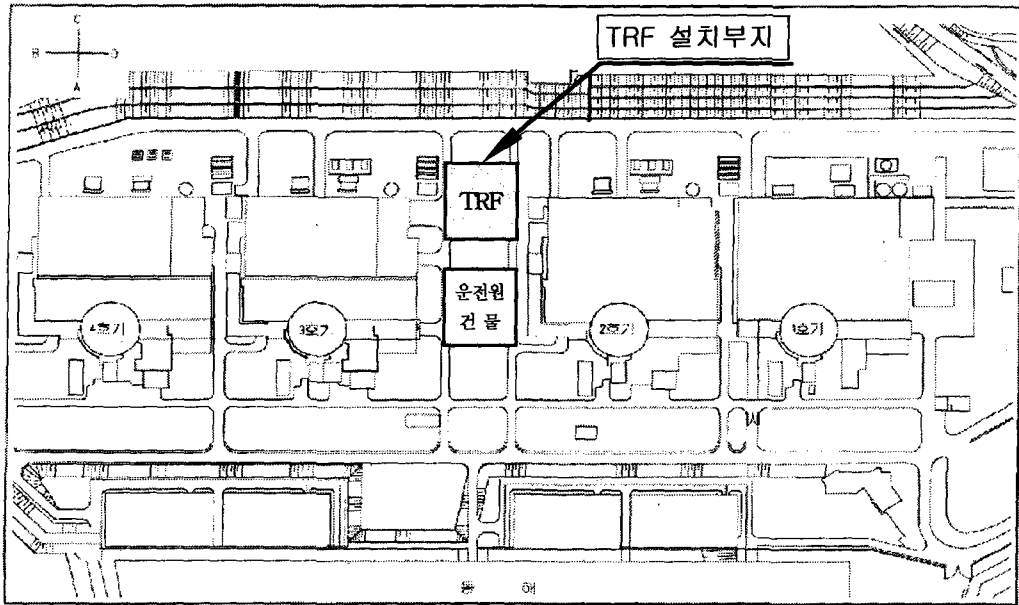
월성 전 삼중 수소 제거 설비의 설치 위치는 준공 후 중수의 배관이송, 운전에 필요한 보조 계통(전원·증기·냉각수)의 운전 편의성

과 건물 시공성을 고려하여 〈그림 2〉와 같이 월성 2호기와 3호기 사이의 중간 지점에 설치된다.

건물 규모는 34m×33m의 부지에 지하 1층 지상 3층의 지상 높이 25m에 연건평 4,130m²의 규모로 지어지고, 구조물은 지상부는 철골조, 지하부 철근 콘크리트 구조로 설계되었다.

건물 내부는 서비스 구역, 운전 구역, 공정(기기) 구역으로 3개의 주요 시설 구역으로 나누어지며, 이들 각각의 구역은 서로 격리되어 있는데 그 이유는 수소를 함유한 공정 계통의 대기가 다른 계통의 대기와 혼합되는 것을 격리시키기 위한 것으로서, 수소에 의한 잠재적인 위험성이 상대적으로 높은 작업 환경으로부터 위험성이 낮은 지역을 구분할 수 있도록 설계되었다.

기존 호기 중수 공급 설비와 월성 TRF로 오가는 중수 급수 및 냉각수 등 각종 보조 설비와의 연결 배관은 새로운 전용 터널을 만들어 설치되고 운전시는 In Line으로 중수가 이송되므로 이송중 중수의 누설 개연성이 없도록 설계하였다.



〈그림 2〉 월성 원전 삼중수소 제거 설비 설치 위치

〈표 6〉 월성 삼중 수소 제거 설비 개요

D ₂ O 급수의 중수소 동위원소비	≥99.80 mol% D ₂ O (99.82 wt% D ₂ O)
D ₂ O 급수의 삼중수소 농도	370 GBq · kg ⁻¹ ~2,220 GBq · kg ⁻¹
D ₂ O 공정 처리율	100 kg/시간
1회 처리시 삼중수소 추출률	97%
삼중수소 부산물	99.0% T ₂ (삼중수소) 이상
설계 수명	40년
설계 이용률 목표	80%

2. 설비 처리 용량 및 주요 기술 규격

월성 삼중 수소 제거 설비의 처리 용량은 중수를 시간당 100kg씩 처리 가능하고, 1회 처리를 통해 중수 중의 삼중 수소 농도는 처음 농도의 97%가 제거되고 3% 정도가 잔류하게 된다.

또한 정상 운전시 80% 이상의 가동률로 운전될 것이며, 감속재 및 냉각재 삼중수소 농도는 각각 10Ci/kg 및 1Ci/kg 이내로 유지시

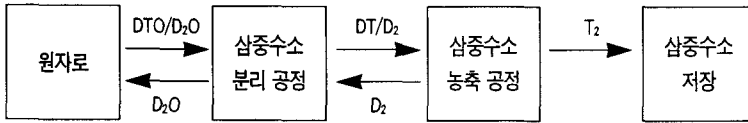
킬 수 있게 되어 월성 1호기의 삼중 수소 농도를 현재 수치의 약 1/6 수준으로 유지할 수 있게 된다.

월성 삼중 수소 제거 설비의 설비 용량은 100kg/hr으로서 캐나다 달링톤 발전소에서 설치 운영중인 삼중수소 제거 설비의 처리 용량 350kg/hr과 비교할 때 규모 면에서 다소 적으나, 달링톤의 삼중수소 제거 설비는 캐나다 내 20여기의 중수로 원전의 삼중수소를 처리하

는 것을 감안하면 월성 삼중수소 제거 설비는 4개 호기를 담당하게 되므로 설비 용량은 충분할 것으로 판단된다.

3. 처리 주요 공정

월성 삼중수소 제거 설비는 크게 3단계로 구성되어 있다. 1단계는 삼중수소에 오염된 중수로부터 삼중수소 기체 및 중수를 분리하는 삼중수소 분리 공정-액상 촉매 교환 공정(LPCE 공정)이고, 2단계는 분리된 삼중수소 기체에서 중수소 및 삼중수소를 분리하여 순수한 삼중수소로 농축시키는 삼중수소 농축 공정 - 초저온 증류 공정 계통(CD 공정)이며, 3단계는 농축된 삼중수소 기체를 안전하게 장기 저장하는 삼중수소 취급 및 저장 공정으로 분



〈그림 3〉 삼중수소 제거 공정

류할 수 있다. 월성 삼중수소 제거 설비의 주요 공정도는 〈그림 3〉과 같다.

가. 삼중수소 분리 공정

삼중수소 분리는 수소 동위원소 사이의 물리 화학적 성질이 유사하기 때문에 분리가 어렵다. 그러나 삼중수소의 형태(DTO 또는 DT)에 따라 분리 계수의 차이가 크게 되고, 방사선 위해도가 각기 다르기 때문에 삼중수소 형태에 따라 농축에 제한을 받는다는 점이 특징이다.

즉 D₂O와 DTO의 물성 차이가 매우 작기 때문에 D₂O와 DTO를 직접 분리하기가 어렵지만, 이를 D₂와 DT로 분리하면 물성 차이가 상대적으로 커져 분리가 쉽게 된다.

그리고 DTO의 방사선 위해도가 DT 또는 T₂에 비해 10,000~20,000 정도 크기 때문에 DTO 상태로 삼중수소를 고농축할 수 없다. 또한 중수 중의 삼중수소 농도가 ppm 수준으로 매우 낮기 때문에, 단일 공정만으로 고순도 삼중수소를 분리해 내는 것은 비효율적이다.

결국 DTO 상태로 삼중수소를 직접 농축하여 제거하는 것은 불가능

하므로, 이를 DT로 분리한 후 삼중수소를 농축하는 것이 경제적이다.

삼중수소 분리 공정으로 사용 가능한 공정으로는 기상 촉매 교환 공정(Vapor Phase Catalytic Exchange : VPCE), 액상 촉매 교환 공정(Liquid Phase Catalytic Exchange : LPCE), 전기 분해(Direct Electrolysis : DE)가 있다.

이들 중 월성 원전의 경우에는 국내 기술진(한전 전력연구원·한국 원자력연구소)의 공동 연구로 개발한 액상 촉매 교환 공정을 채택하였으며, 지금까지의 실험 결과는 현재 캐나다 달링턴 TRF에서 운영중인 기상 촉매 교환 공정보다 높은 효율을 보이고 있다.

과거 초기의 삼중수소 분리 공정은 기상 촉매 교환 공정을 채택하였으나, 1990년대 이후부터는 액상 촉매 교환 공정이 효율성이 보다 유리한 것으로 평가되고 있다.

나. 삼중수소 농축 공정

삼중수소 분리 공정에서 나온 기체 혼합물은 대부분 중수소이며, 삼중수소가 미량 들어 있다. 이를 고순도 중수소와 삼중수소로 분리·

농축하기 위한 공정으로는 흡착 분리법, 열확산법(thermal diffusion) 및 초저온 증류법(cryogenic distillation)이 있다.

그러나 흡착 분리법이나 열확산법은 연구 단계에 있어, 결국 현재로서는 초저온 증류법이 상용 가능하여 월성에서도 초저온 증류법을 사용한다.

초저온 증류법은 수소 동위원소 사이의 끓는 점 차이를 이용하여 분리하는 기술이다. DT와 D₂ 혼합물을 액화 온도인 -250℃로 냉각시켜 증류하면 상대적으로 가벼운 중수소는 기체로, 무거운 삼중수소는 액체로 분리 농축된다.

중수소와 삼중수소의 액화 온도를 유지하기 위한 초저온 냉매로는 액화 수소 또는 저온 헬륨 가스를 이용되는데 월성의 경우는 헬륨 가스를 사용한다.

초저온 증류탑 운전 온도가 -250℃이므로 가장 중요한 것이 단열 문제이다. 대기와의 온도차가 매우 크므로 진공 단열(10⁻⁵ torr 이하)이 필요하며, 이를 위해 초저온 증류탑은 cold box 내에 설치된다. 진공 단열 외에도 복사에 의한 열전달을 방지하기 위해 다층 반사 단열재가 설치된다.

다. 삼중수소 저장 공정

최종적으로 초저온 증류탑 하부에서 생산된 고순도 삼중수소(99% 이상)는 티타늄 스폰지에 수소화물



형태로 고정화시켜 안전하게 보관한다.

티타늄이 들어 있는 삼중수소 저장 용기는 스테인리스 스틸로 되어 있으며, 용기 한 개당 약 500 kCi의 삼중수소를 저장할 수 있다.

안정된 티타늄(Ti) 금속에 삼중수소를 흡수시키므로 수백℃의 고온에서도 안정된 금속 화합물 형태의 삼중수소화 티타늄(Ti₂T₃)을 형성시켜 스테인리스 용기 속에 안전하게 저장된다.

라. 기타 공정

중수 취급 계통, 중수 정화 계통, 방사성 폐기물 처리 계통, 중수화 탈중수화 처리 계통 등은 기존의 발전소 처리절차와 유사하게 관리되고 운영될 것이다.

사업 추진 체계 및 일정

월성 TRF는 국내 최초로 설치되는 특수성을 고려하여, 설계·시공·자재 공급이 각각 분할 발주 방식으로 추진중에 있다. 따라서 종합사업 관리 및 시운전은 한수원이 담당하고, 종합 설계 용역은 주계약자로 캐나다원자력공사(AECL)가 수행하고 있다.

AECL은 국내에서 개발된 촉매와 촉매탑을 제외한 설비 전반에 대하여 설계를 책임지고 있으며, 설계 하도급으로는 한국전력기술(주)가 토목 분야·건축 분야·보조 계통

(BSI 70000)·중수 공급 및 생산 계통 등의 설계 업무를 맡고, 캐나다 Kinectrics사가 초저온 증류 계통(Cryogenic Distillation)의 설계를 수행한다.

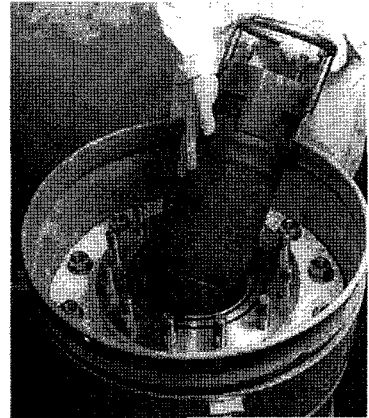
한편 국내 기술진이 개발한 촉매탑(LPCE Column) 설계는 한국전력공사의 전력연구원에서 수행하고 있으며, 촉매는 한국원자력연구소와 공급 계약을 체결하여 현재 촉매를 제작중에 있다. 월성 삼중수소 제거 설비의 종합적인 성능 보증을 AECL이 책임지고 수행하나, 촉매 및 촉매탑에 관한 사항은 국내 책임으로 수행될 것이다.

현장 설비 시공은 대우건설(주)와 두산중공업(주)가 약 80:20의 참여 비율로 수행하며, 역무 범위는 시공 분야와 비파괴 검사 용역, 시운전 정비 등이 포함되어 있다.

설비 및 각종 기자재 공급은 한수원 주도로 구매하고 있으며, 현장 시공 일정에 따라 추진중에 있다.

- 2003년 7월 : 구조물 공사 시작
- 2004년 8월 : 촉매탑과 초저온 증류탑 설치
- 2004년 10월 : 시운전 시작
- 2005년 6월 : 준공

동 설비는 국내에서는 최초로 설치되는 점과 준공 후 가동시 중수소가 발생하고 방사선 물질을 취급하는 시설임을 감안하여 시공 품질 관리 및 안전 관리에 최우선적으로 노



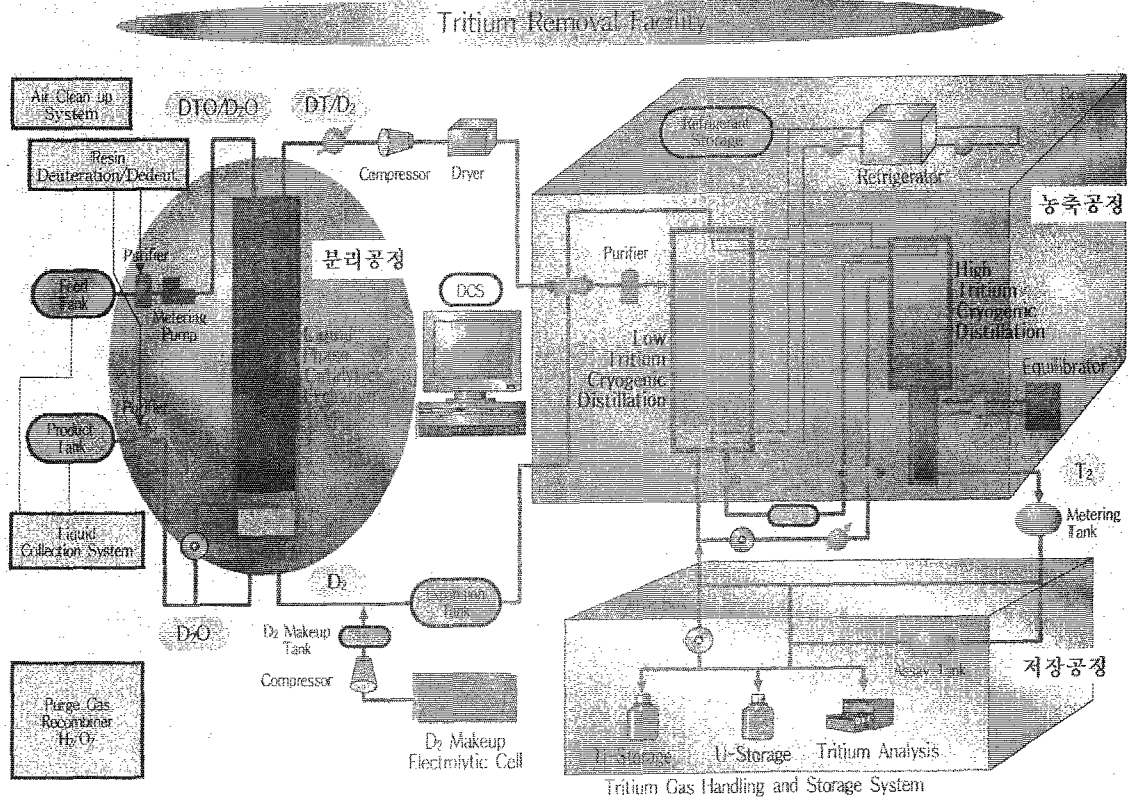
〈그림 4〉 농축된 삼중수소 저장 용기

력할 계획이고, 또한 건설 및 시운전 과정에서 발생할 수 있는 기존 호기와의 설비 간섭 사항을 철저히 사전 조사하고 대비하여 기존 발전소의 안전 운전에 영향이 없도록 할 것이다.

향후 전망

2005년 하반기부터 월성원전 삼중수소 제거 설비를 정상적으로 운전하게 되면, 삼중수소 농도가 가장 높은 월성 1호기를 우선적으로 처리될 것이며, 처리시 감속재 계통의 삼중수소 농도는 최대 약 75Ci/kg에서 10Ci/kg 이내로, 냉각재 계통의 삼중수소 농도는 약 2Ci/kg에서 1Ci/kg 이내로 각각 유지할 수 있어 상당량의 삼중수소 준위가 감소하게 될 것이다.

이에 따라 환경으로 방출되는 삼



〈그림 5〉 월성 원전 삼중수소 제거 설비 전체 공정 개념도

중수소량은 현재보다 약 80% 이상 저감시킬 수 있을 것으로 전망되며, 운전원 및 작업자 등 종사자들의 방사선 쯤임량도 기존 보다 약 50% 정도를 감소시킬 수 있을 것으로 예상된다.

또한 월성 원전의 수명 연장 및 폐로시에도 다량의 중수 중의 삼중수소를 제거함으로써 고방사선의 폐기물을 저감시키는 동시에 고가의 중수를 재활용할 수 있는 경제적인 효과도 거둘 수 있을 것으로 전망된다.

한편, 삼중수소 제거 설비를 설치 운영함으로써 연간 최대 6MCI 정도의 순수한 삼중수소를 부산물로 얻게 될 것으로 예상되는데, 삼중수소를 전량 수입에 의존하는 우리나라의 경우 월성본부에서 추출된 삼중수소는 향후 중요한 산업 자원으로서 그 활용도가 기대된다.

삼중수소의 활용 분야로는 군사적으로 사용되는 용도 이외에도, 의료 분야에서는 백혈구 검사, 의료용 추적자 등에 사용되며, 밀도 측정·야광 조명·특수 형광체 제조 등으

로 광범위하게 사용되고 있는 것으로 알려지고 있다.

동 설비가 없어도 월성 원전은 국제 기준에서 요구하는 삼중수소 배출 기준을 충분히 만족할 수 있으나, 이 설비가 가동되면 월성 원전의 주변 환경에 대한 방사선 영향이 획기적으로 저감될 뿐만 아니라 원전 종사자의 방사선 쯤임량도 현격하게 줄어들게 됨으로써 발전소 안전 운영이 한 단계 향상될 것이다.

☞