

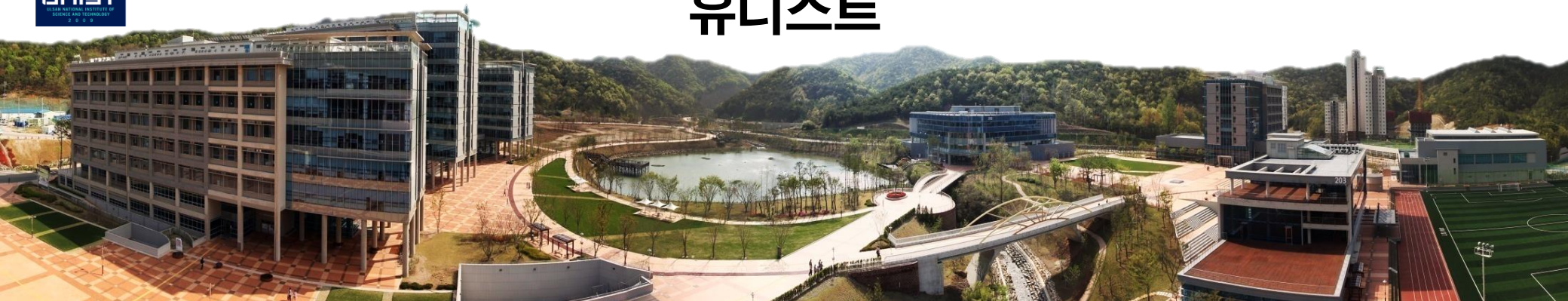


수중 현장 베타방사능 모니터링 기술 개발 현황

김희령

2018. 10.24

유니스트



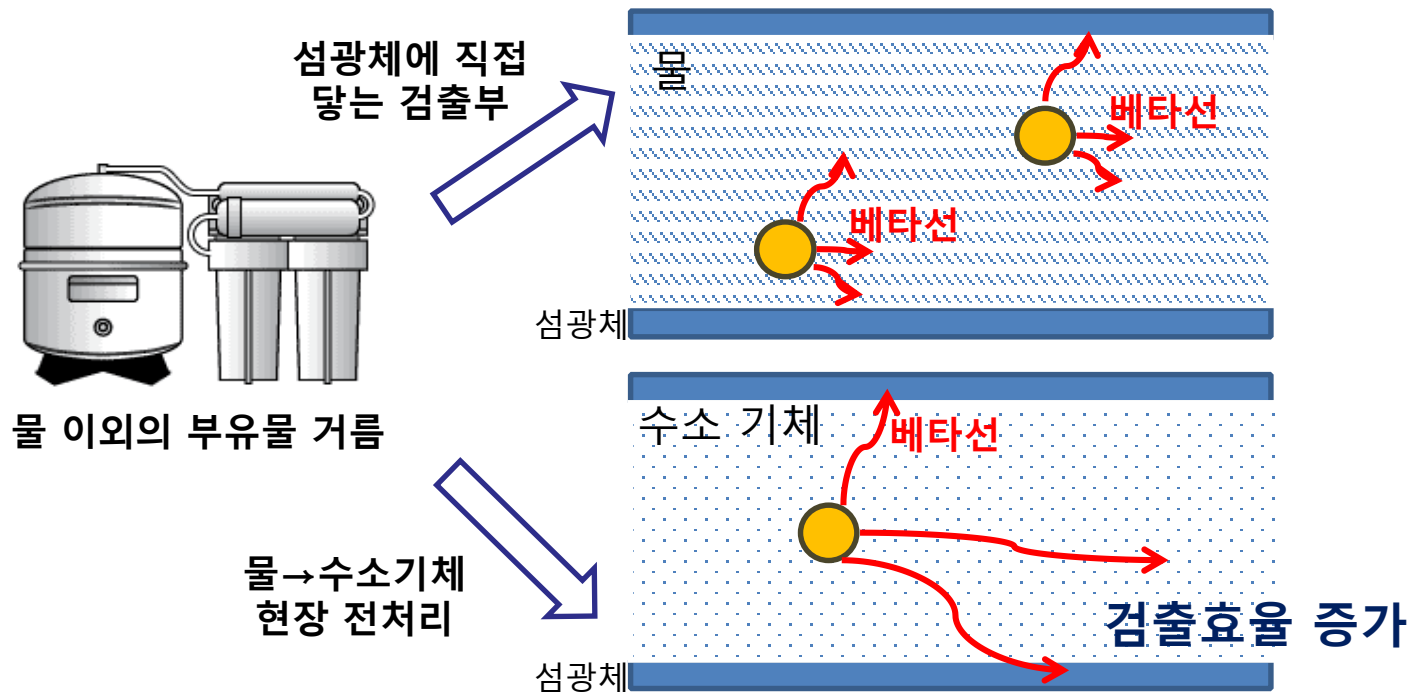
목 차

- 연구개발 개요
- 연구목표 및 연구개발 범위
- 섬광체 기반 수중 전베타 감시
- 수중 삼중수소 감시
- 연구 결과
- 향후 계획 및 활용 방안

연구개발 개요

해체부지 지하수 수중 현장 방사능 모니터링 기술 개발

- 짧은 비정의 베타선 계측을 위하여 방사선과 반응하는 섬광체와 방사선원이 직접 닿는 검출부 설계
- 현장 오차 요인 분석 및 노이즈 최소화를 위한 소프트웨어 설계
- 물에서 **기체로 변화시키는 전처리**를 통한 **삼중수소 검출효율 증가**
- 수중 베타 방사선 모니터링 시스템 구축



연구목표 및 연구개발 범위

목 표

원자력시설 해체 부지 수중 방사능 모니터링을 위한 섬광체 기반 **민감도 향상 현장 수중 베타 방사선 모니터링 시스템 개발**

연구 범위

섬광체 기반 수중 베타 검출 특성 분석 및 모듈 구출

- 섬광체 기반 수중 베타 핵종 검출 특성 분석
- 베타 에너지에 따른 섬광체 선정
- 수중 베타선 섬광체 **광 수집 최적화** 해석
- **유량율**에 따른 수중 전베타 및 삼중수소 검출 특성 및 정량화

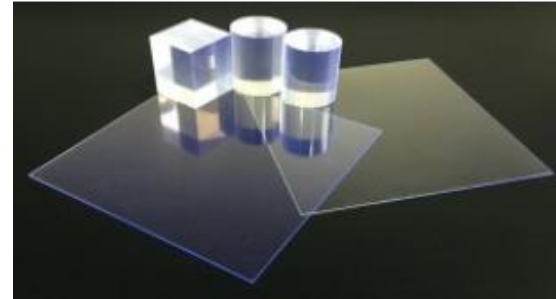
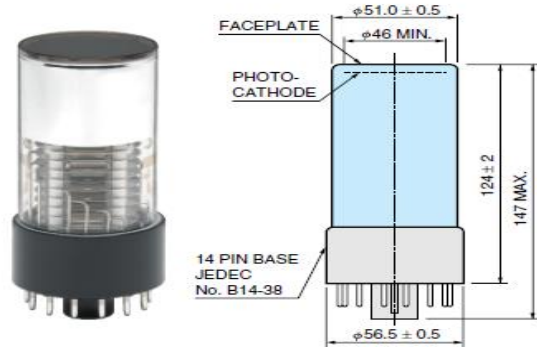
현장 수중 베타 방사선 통합 모니터링 시스템 특성평가

- 검출효율 향상(기존 방식 대비 10,000배 이상)을 위한 전기분해 기반 전처리 수중 삼중수소 검출 시스템
- 현장 백그라운드 차폐 및 노이즈 제거 알고리즘 개발
- 현장 수중 **전베타 검출 모듈** 설계 제작 및 특성 실험: ^3H (MDA: 10 Bq/g), ^{90}Sr (MDA: 0.1 Bq/g)
- 현장 오차 요인 분석 및 보정
- **현장 수중 베타 방사선 모니터링 시스템** 설계제작 및 특성 실험

섬광체 기반 수중 전베타 감시

◆ 제염해체 부지 현장의 주요 수중 베타 핵종 특성 및 검출 시스템

➤ 현장 삼중수소 방사선 측정을 위한 플라스틱 섬광체 기반 계측기 설계

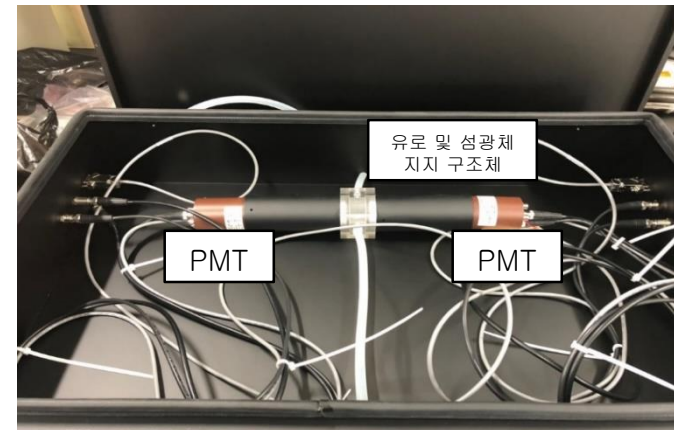


< PMT R878 크기 및 구조 (좌) 및 플라스틱 섬광체의 외경 (우) >

➤ 다중 섬광체 잡음 제거 기반 수중 전베타 검출부

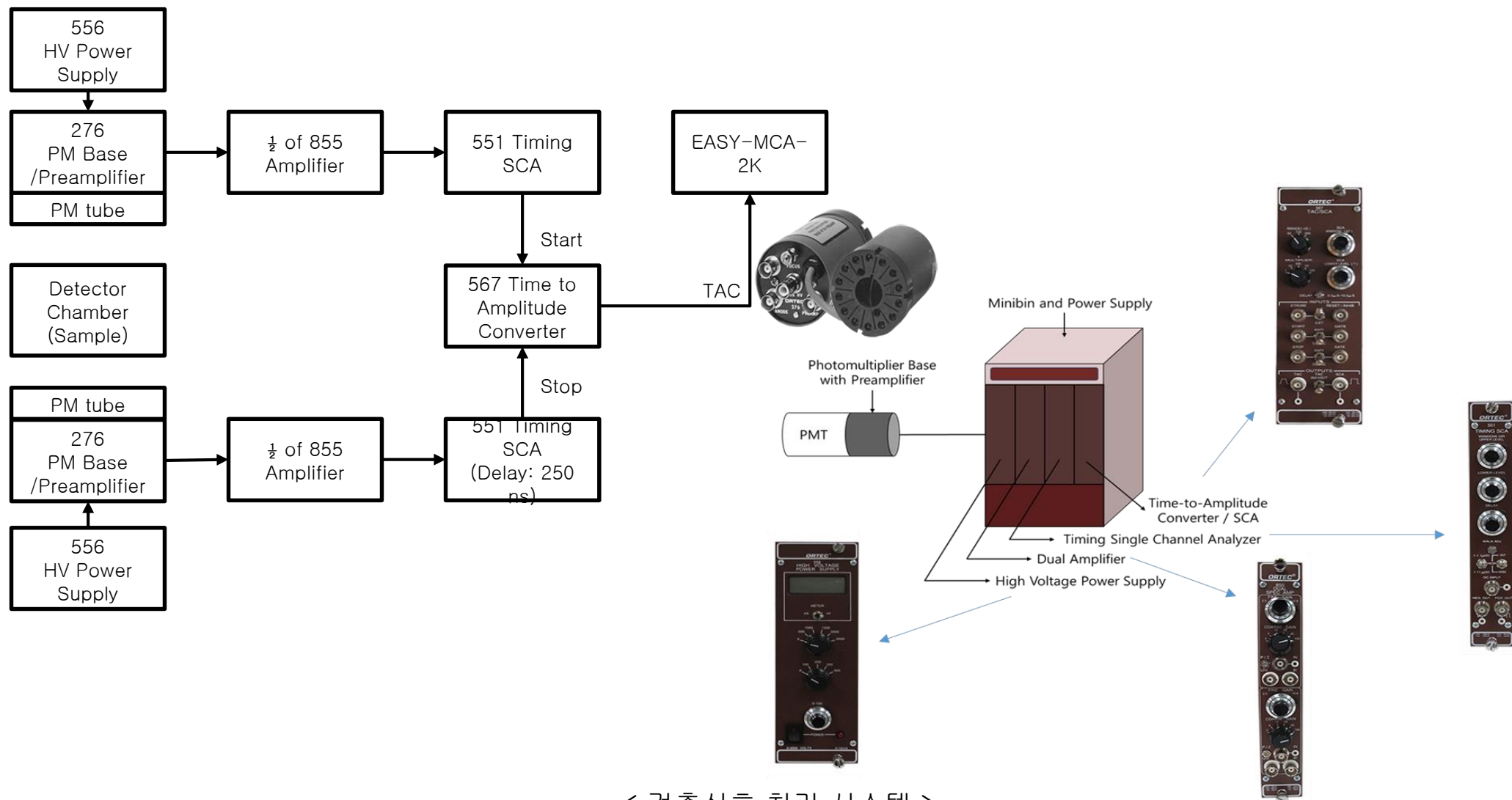


< 암실 상자 >



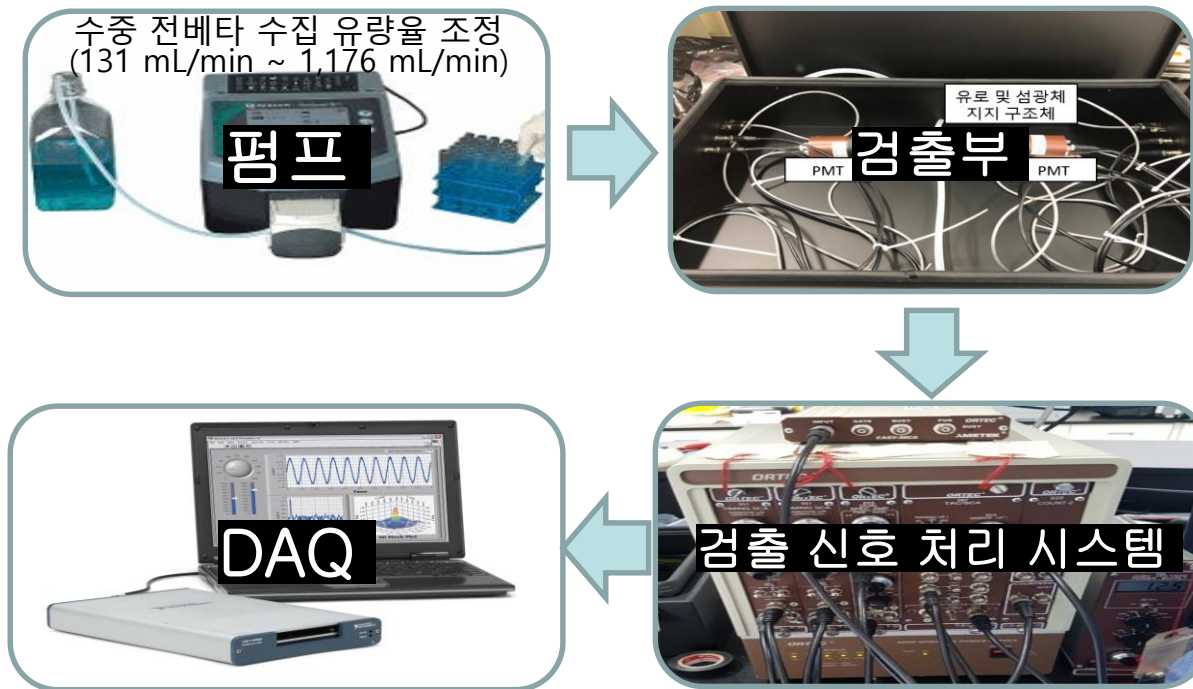
< 검출부 >

▶ 검출 신호 처리 시스템



< 검출신호 처리 시스템 >

➤ 해체 부지 수중 전베타 모니터링 시스템



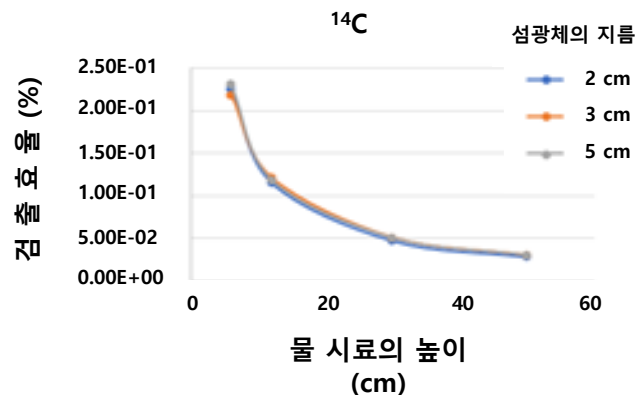
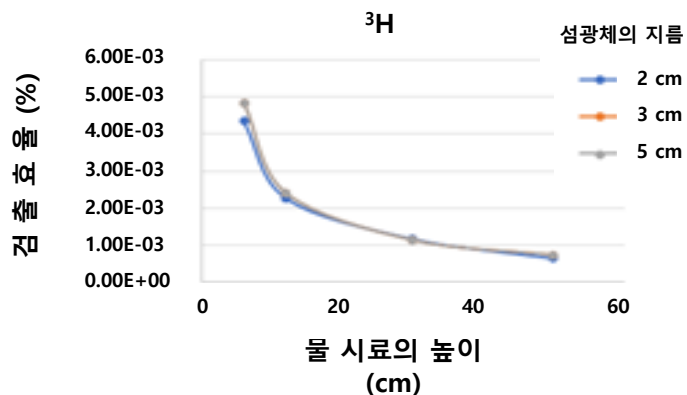
➤ 방사선원

	C-14			
초기 방사능 (Bq)	3,907.00	3,907.00	3,907.00	3,907.00
질량 (g)	5.00	5.00	5.00	5.00
제조일자	2018.03.15	2018.03.15	2018.03.15	2018.03.15
방사능 농도 (Bq/g)	782.03	782.03	782.03	782.03
시료 추출량 (g)	0.25	0.50	0.75	1.00
추출 방사능 (Bq)	195.51	391.02	586.53	782.03
물+시료 질량 (g)	71.00	71.00	71.00	71.00
희석 후 방사능 농도 (Bq/g)	2.75	5.51	8.26	11.01

	Sr-90			
초기 방사능 (Bq)	3,863.00	3,863.00	3,863.00	3,863.00
질량 (g)	5.00	5.00	5.00	5.00
제조일자	2018.03.15	2018.03.15	2018.03.15	2018.03.15
방사능 농도 (Bq/g)	767.81	767.81	767.81	767.81
시료 추출량 (g)	0.25	0.50	0.75	1.00
추출 방사능 (Bq)	191.95	383.91	575.86	767.81
물+시료 질량 (g)	76.50	76.50	76.50	76.50
희석 후 방사능 농도 (Bq/g)	2.51	5.02	7.53	10.04

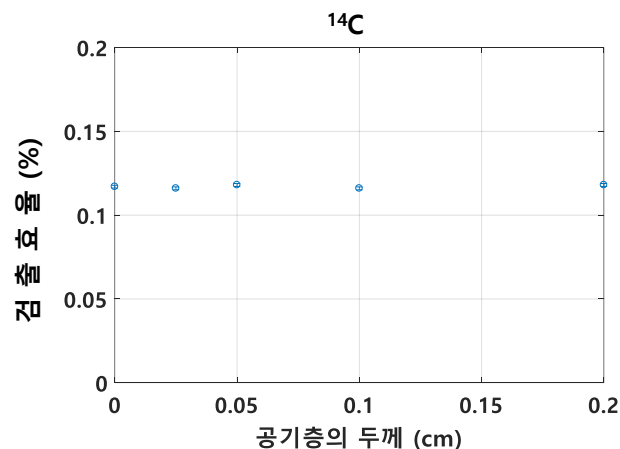
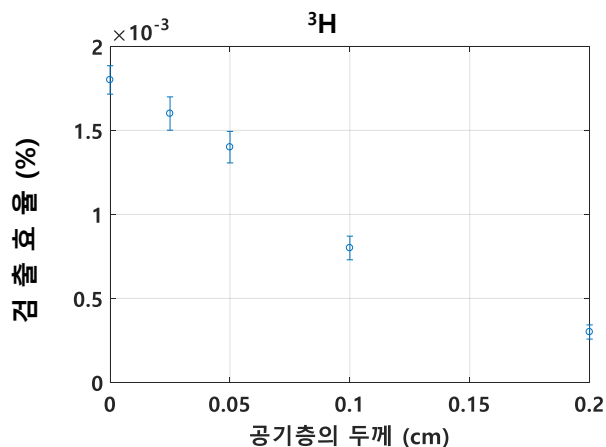
	H-3			
초기 방사능 (Bq)	393,700,000	393,700,000	393,700,000	393,700,000
질량 (g)	5.00	5.00	5.00	5.00
제조일자	2018.03.15	2018.03.15	2018.03.15	2018.03.15
방사능 농도 (Bq/g)	77,481,275.2	77,481,275.2	77,481,275.2	77,481,275.2
시료 추출량 (g)	0.25	0.50	0.75	1.00
추출 방사능 (Bq)	19,370,318.8	38,740,637.6	58,110,956.4	77,481,275.2
물+시료 질량 (g)	76.50	76.50	76.50	76.50
희석 후 방사능 농도(Bq/g)	253,206.78	506,413.56	759,620.35	1,012,827.13

◆ 수중 베타선 섬광체 광 수집 최적화를 위한 효율 특성 변수 도출



- MCNP 6를 통해 핵종 별 섬광체의 지름과 물 시료의 높이에 따른 검출효율 도출

- 물 시료의 높이가 증가할수록 검출효율 감소 경향 도출, 섬광체의 지름의 영향은 무시 가능함

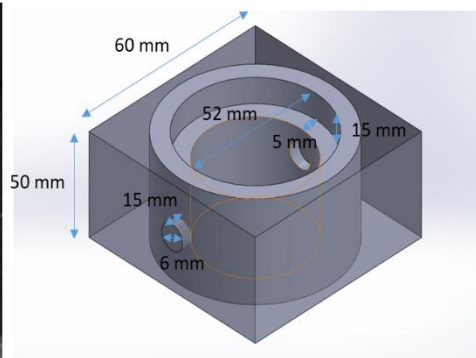
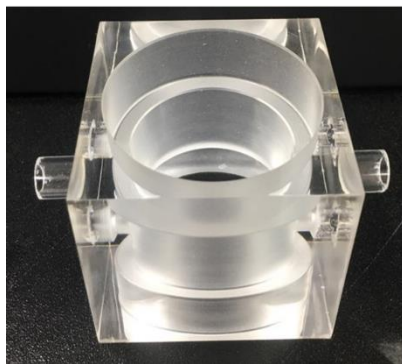


- MCNP 6를 통해 핵종 별 공기층의 두께에 따른 검출 효율 도출 (공기층을 포함한 물 시료의 높이는 1.2 cm로 고정)

핵종	검출 효율 (%)	에러 (%)
^3H	0.002	0.047
^{14}C	0.107	0.007
^{32}P	5.650	0.001
$^{90}\text{Sr}/^{90}\text{Y}$	4.620	0.002

- MCNP 6를 통해 핵종 별 섬광체의 두께 1 mm와 5 mm에 대한 검출 효율 도출
- 1 mm, 5 mm에 대한 효율이 동일하게 나왔으며, **효율은 섬광체 두께의 영향을 받지 않음**
- 1 mm 이하의 경우는 플라스틱 섬광체의 기계적 강도의 한계로 사용 불가

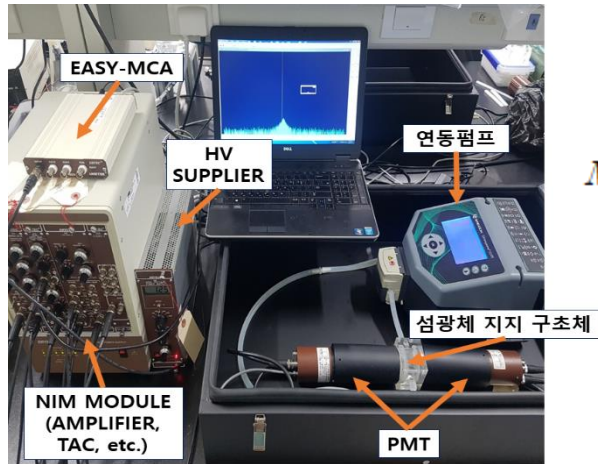
◆ 수중 베타선 섬광체 광 수집 최적화 설계



- 공기층의 두께는 물 시료와 섬광체가 직접적으로 닿을 수 있도록 0 cm로 설정
- 섬광체의 지름은 PMT의 면적을 전부 활용할 수 있도록 5.2 cm로 설정하였으며, 두께는 1 mm 사용

- 섬광체 기반 수중 베타 핵종 검출 특성 분석에 따라 **유로 및 섬광체 아크릴 지지 구조체 제작**
- 물 시료의 높이는 실리콘 튜브를 사용할 수 있는 공간을 고려하여 2 cm로 설정

◆ 섬광체 기반 수중 삼중수소 포함 베타 핵종 검출 모듈 설계 제작



$$MDA = \frac{2.71 + 4.65 \times \sqrt{N_b}}{T \times \epsilon / 100 \times V_c}$$

MDA : 최소검출가능 방사능 (Bq/g)

N_b : 백그라운드 카운트 (#)

T : 시료 측정 시간 (sec)

ϵ : 검출효율 (%)

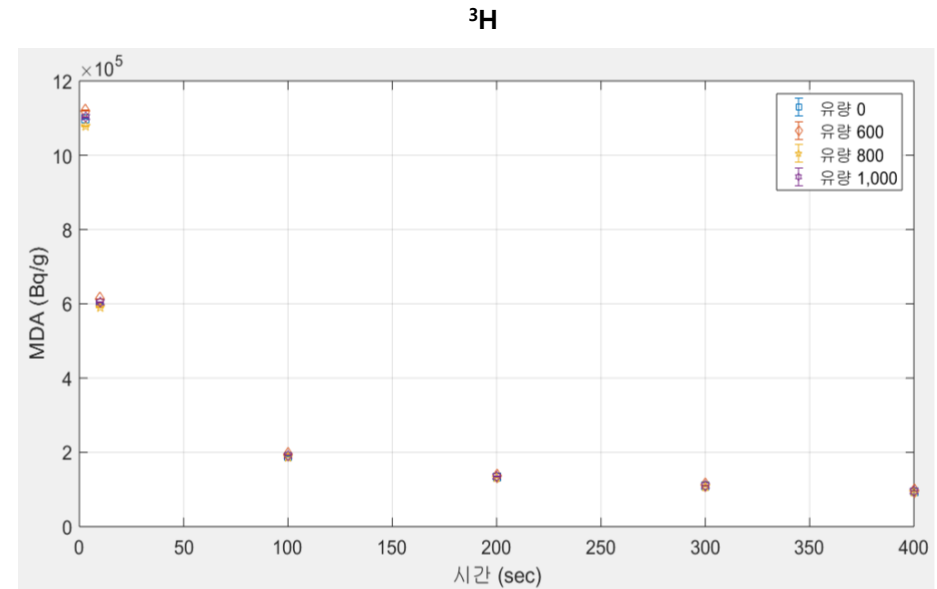
V_c : 시료의 부피 (밀도: 1.0 g/cm³)

신뢰구간 95 % 기준

- 수중 전베타 모니터링 검출 설계 최적화 특성 분석 모듈 설계 제작품
- 동시합산 회로를 구성하여 노이즈 신호 제거
- 유량율 및 증폭기의 증폭도에 따른 MDA 특성 도출

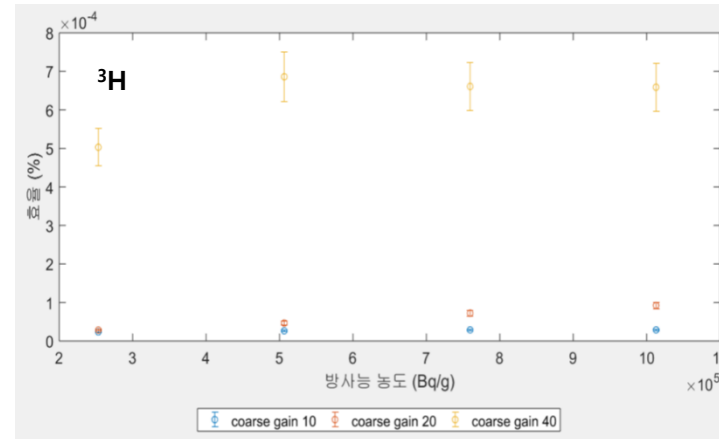
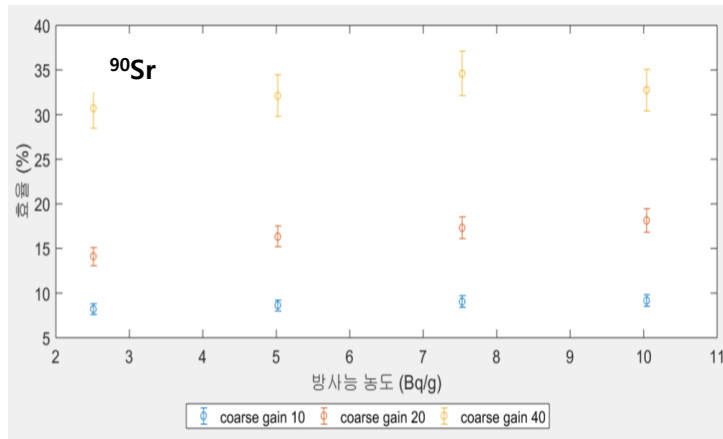
➤ 펌프 유량 변화에 따른 영향

- 유량율의 변화에 따른 MDA는 일정한 값을 가지며 유량율에 따른 **의존성은 없음.**



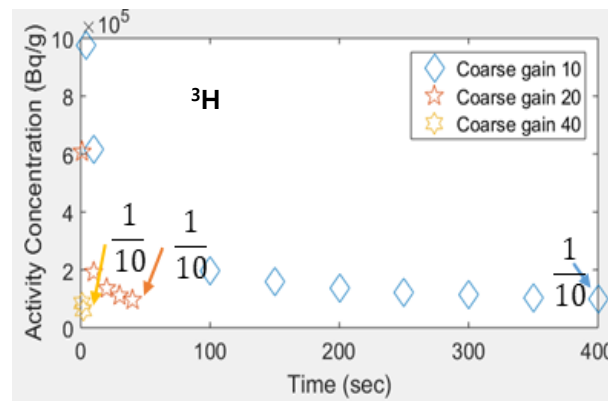
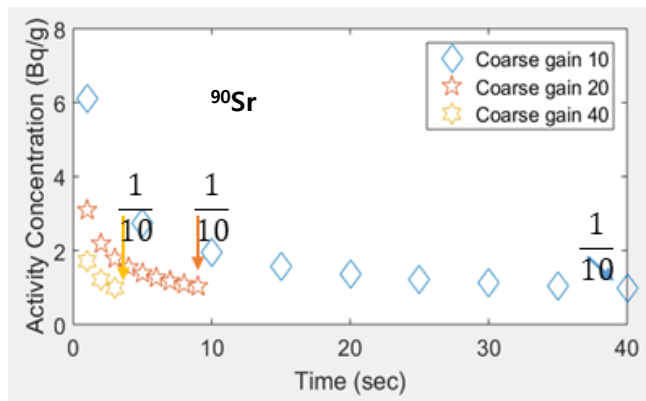
◆ 유량을, 증폭도에 따른 수중 베타 핵종 검출 특성 도출

➤ 증폭도에 따른 검출 효율



- ⁹⁰Sr과 ³H 모두 증폭도 40일 경우 농도 증가에 따라 효율 감소 현상 발생
=> 증폭도가 증가함에 따라 백그라운드 또한 증가
- ⁹⁰Sr과 ³H 모두 **증폭도의 증가에 따라** 효율 증가 -> **검출 시간 단축**

➤ 증폭도 증가에 따른 검출 시간



- ⁹⁰Sr과 ³H 모두 **증폭도의 증가에 따라 MDA 도출 시간 감소**



- ◆ 원자력시설 해체 전/후 주기적인 부지 지하수 모니터링 필요
- ◆ 특히, 해체부지 복원 후 1,000년 동안의 기간에 걸친 선량 평가 요구

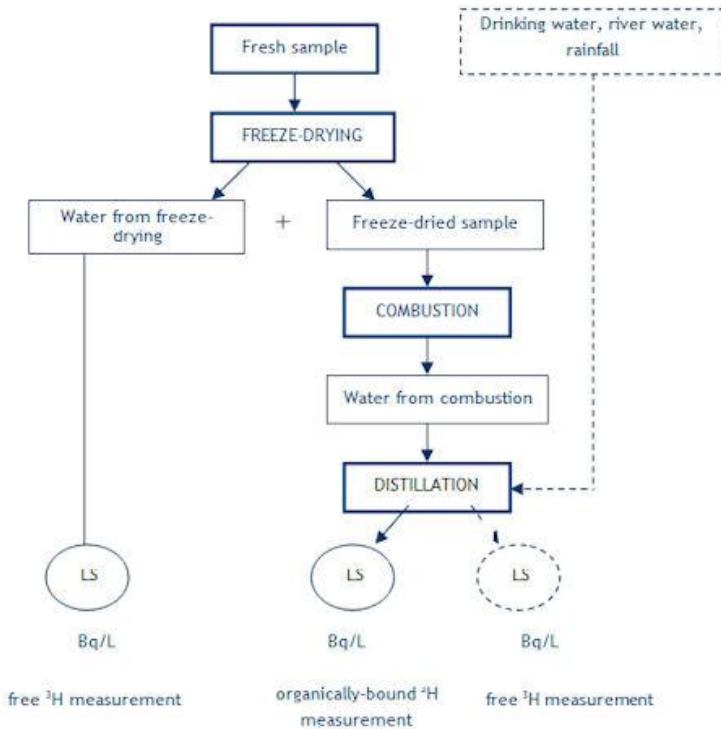
★ 삼중수소

- 반감기: 12.4년
- 방사성 붕괴: ${}^3H \rightarrow {}^3He + \beta^-$ ($E_{max} = 18.6 \text{ keV}$) (100%)
- 자연 생성: 우주선(cosmic-ray)과 대기의 상호작용 (용존 리튬과 중성자의 반응으로 생성)
- 인공 생성: 핵실험, PWRs



◆ 삼중수소 방사능 계측

- 샘플을 채취해 (~100 L) 실험실로 옮겨와 전처리와 농축을 거쳐 액체섬광계수기 (liquid scintillation counter)를 사용하여 계측
- 장점: 환경 수준의 낮은 MDA
- 단점: 샘플링과 전처리 등에 인력 및 시간이 많이 소요됨, 유기폐기물



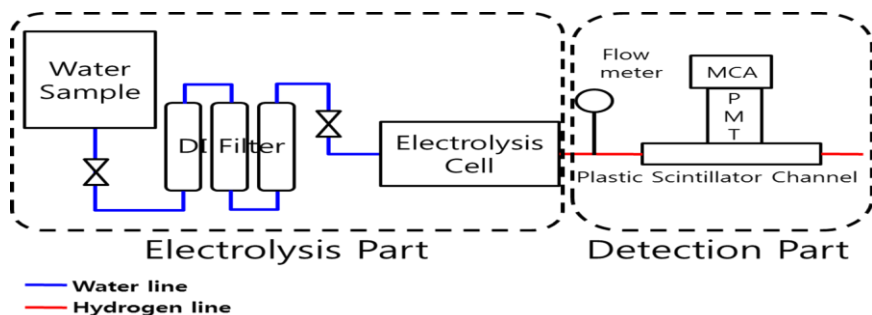
< 삼중수소 전처리 절차 >



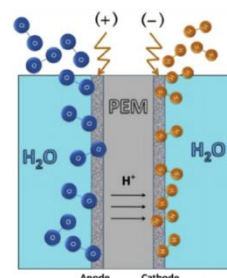
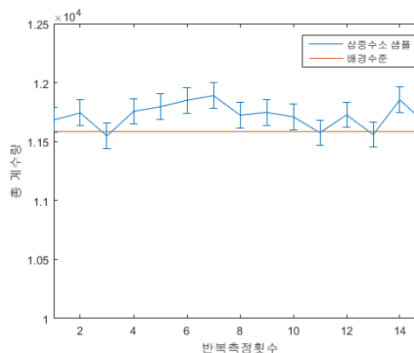
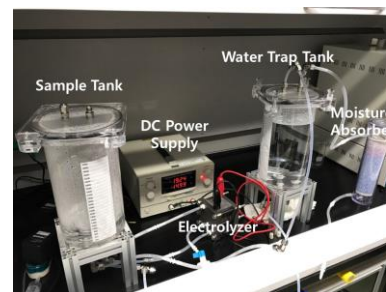
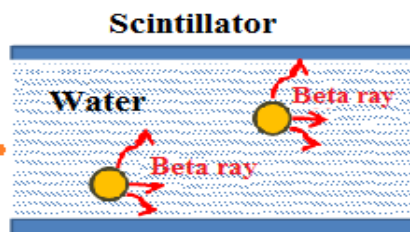
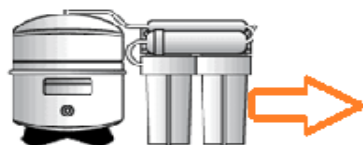
< 액체섬광계수기 >

◆ 전기분해 기반 삼중수소 계측

➤ 실시간 수중 삼중수소 모니터링 기술 개발



**Directly attached
to scintillator**



Anode Reaction:
 $H_2O \rightarrow 0.5O_2 + 2H^+ + 2e^-$

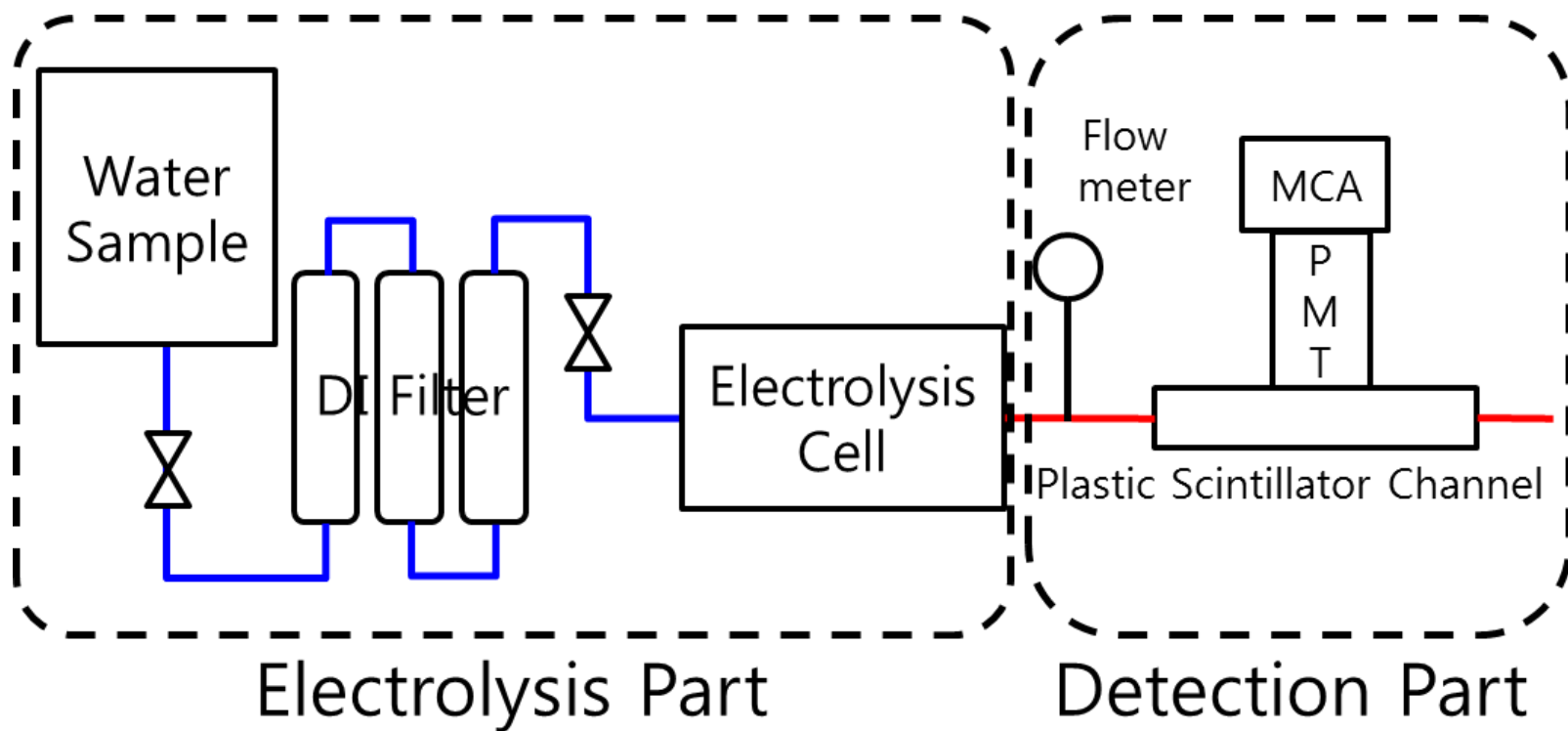
Cathode Reaction:
 $2H^+ + 2e^- \rightarrow H_2$

Total Reaction:
 $H_2O \rightarrow 0.5O_2 + H_2$

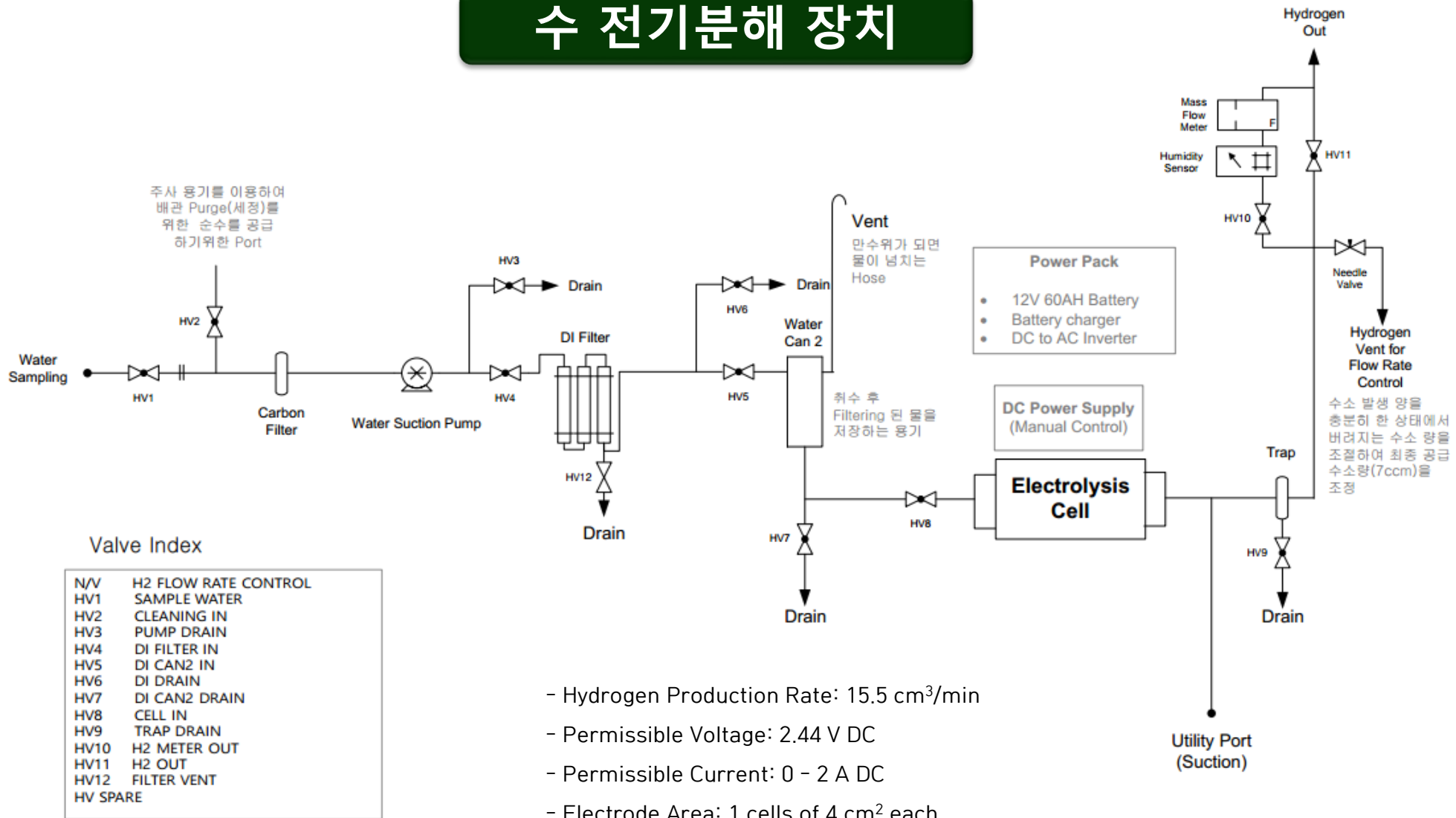
$V_{rev} = 1.23$ @STP

Endothermal Reaction





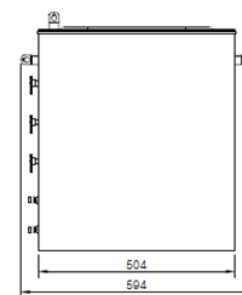
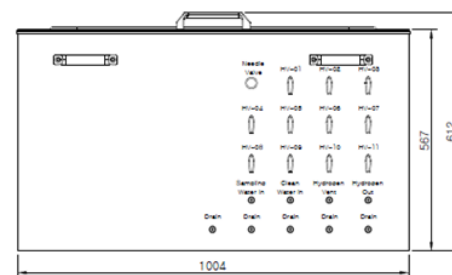
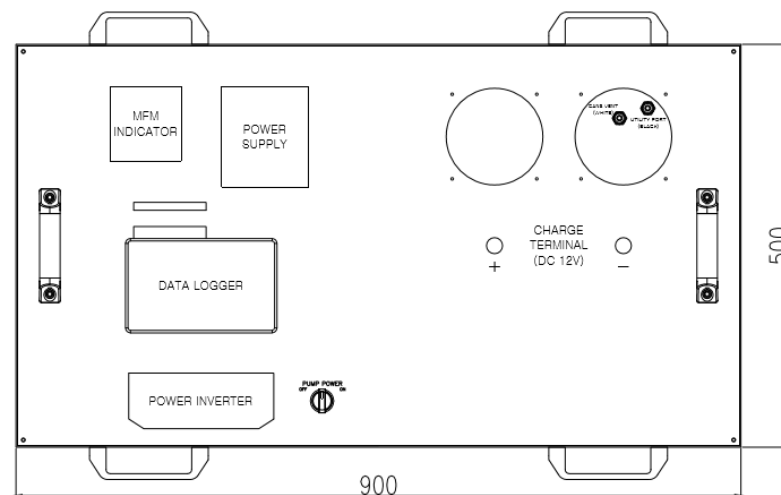
수 전기분해 장치



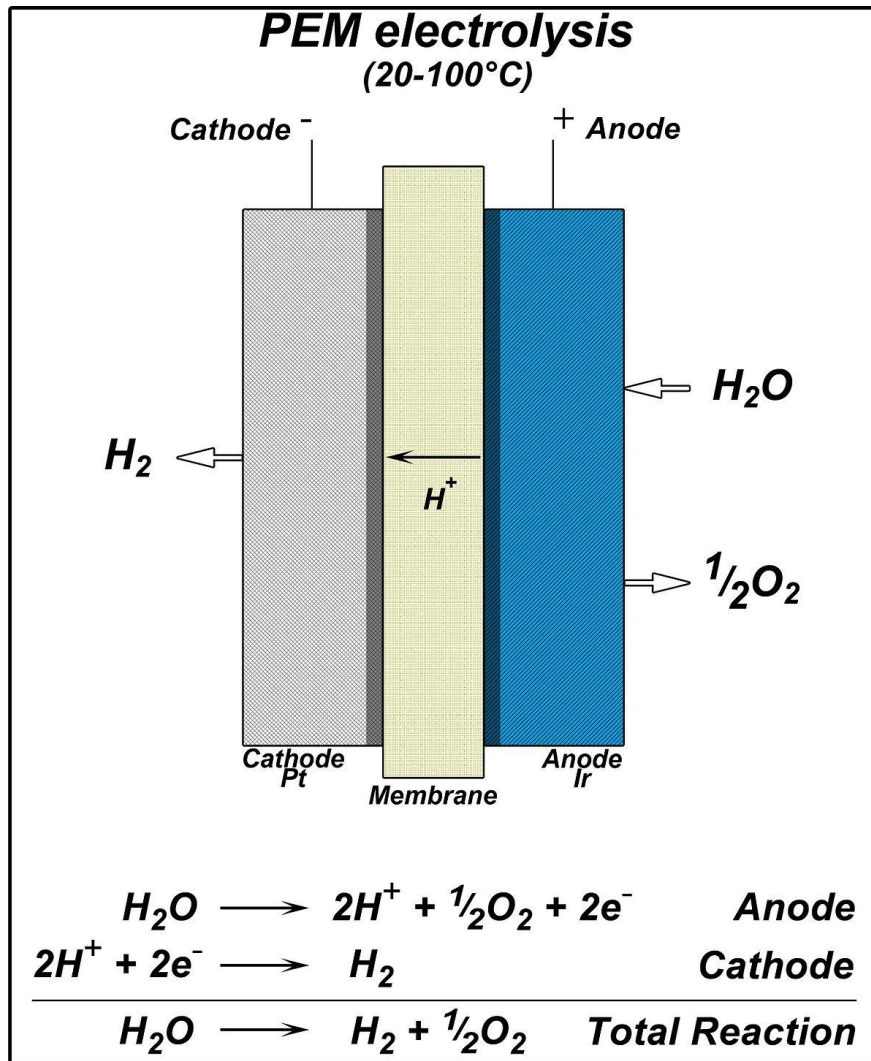
- Hydrogen Production Rate: 15.5 cm³/min
- Permissible Voltage: 2.44 V DC
- Permissible Current: 0 - 2 A DC
- Electrode Area: 1 cells of 4 cm² each



- 1) Water Can2
- 2) DI Filter
- 3) Mass Flow Meter
- 4) Electrolysis Cell
- 5) Carbon Filter
- 6) Water Trap
- 7) Water Suction Pump
- 8) Humidity Sensor



Proton Exchange Membrane (PEM) Electrolysis



- Cathode와 anode 전극에 각각 Pt, Ir 촉매를 사용하고 양성자 교환막을 이용하여 전기분해
- 멤브레인 방식의 전기분해는 전해질을 섞어줄 필요가 없기 때문에 즉각적인 수소생산에 용이
- 셀 수명을 위해서 탈이온수 사용 권장

◆ 삼중수소의 전기분해

➤ 기체 상태에서의 삼중수소 농도

$$T_{gas} = T_{liquid} \times \frac{1}{\kappa} \times \frac{1}{\beta} \quad (1)$$

- T_{gas} : 기체 샘플에서의 삼중수소 농도 [Bq/L]
- T_{liquid} : 액체 샘플에서의 삼중수소 농도 [Bq/L]
- κ : 수소 부피 보정 요소 (~1234)
- β : 삼중수소 선택도 (Fractionation factor)

➤ 전기분해가 진행에 따른 액체 샘플의 삼중수소 농도 변화 고려

$$T_{gas} = T_{liquid} \left(\frac{V_0}{V} \right)^{1 - \frac{1}{\beta}} \times \frac{1}{\kappa} \times \frac{1}{\beta_e} \quad (2)$$

- β_e : 증발에 의한 요소를 고려하지 않은 fractionation factor



➤ 측정 기체 샘플의 MDA [Bq/L]

$$MDA_{gas} = \frac{2.71+4.65\sqrt{B_{cps}\times T}}{T\times V\times\frac{\varepsilon}{100}} \quad (3)$$

- B_{cps} : 백그라운드 계수율 [cps]
- T : 측정 시간 [s]
- V : 검출 챔버의 부피 [L]
- ε : 검출 효율 [%]

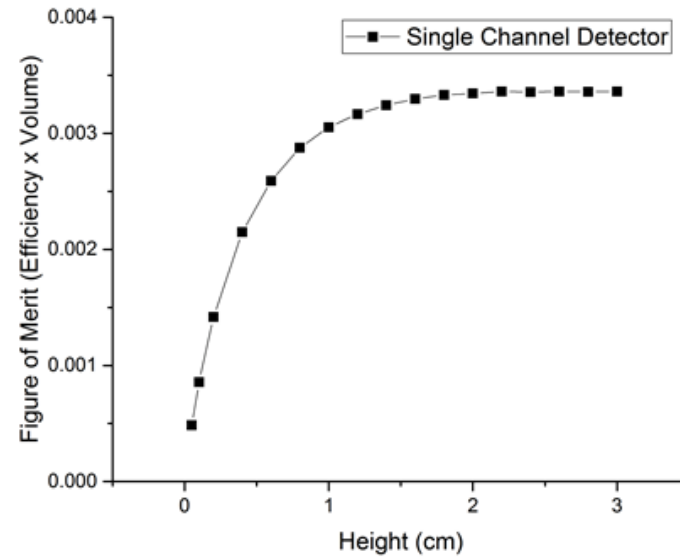
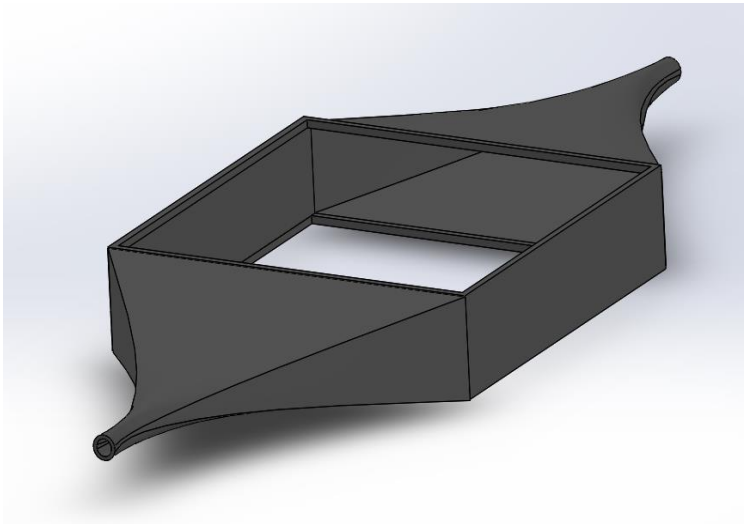
➤ 액체 샘플의 MDA

$$MDA_{liquid} = \frac{2.71+4.65\sqrt{B_{cps}\times T}}{T\times V\times\frac{\varepsilon}{100}} \times \kappa \times \beta \times \frac{1}{1000} \quad (4)$$

- κ : Hydrogen volume correction factor (~1234)
- β : Fractionation factor (~5.85)



◆ 삼중수소 검출부 설계

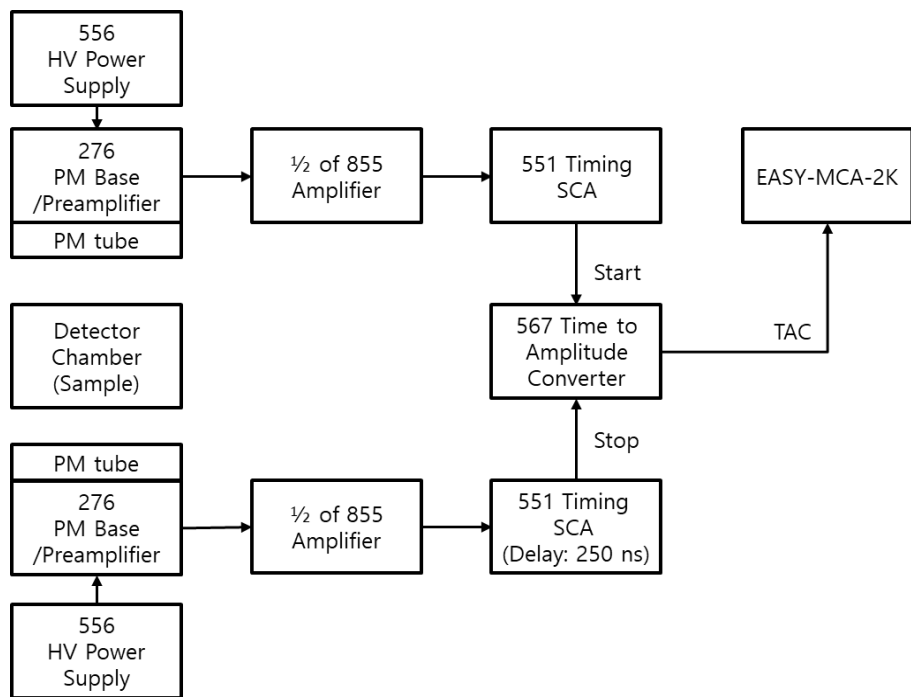


< 검출부 CAD 설계 도면(좌)과 MCNP 전산모사를 통한 효율 계산(우) >

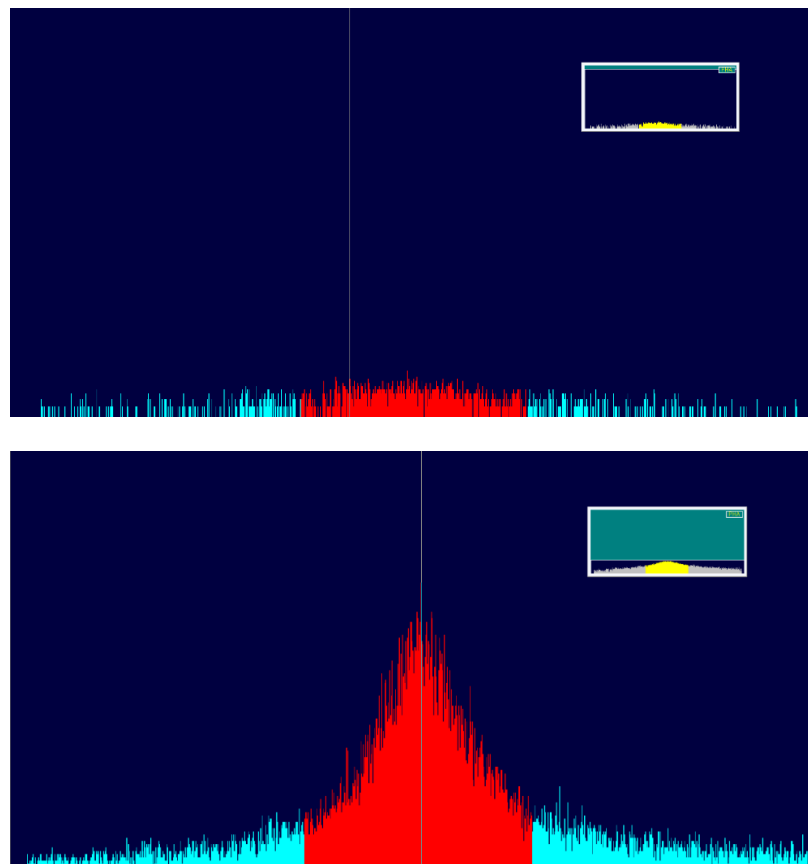
- 2개의 플라스틱 섬광체사이의 거리에 따른 검출 효율 × 검출부 체적 최적화



◆ 신호 처리 장치

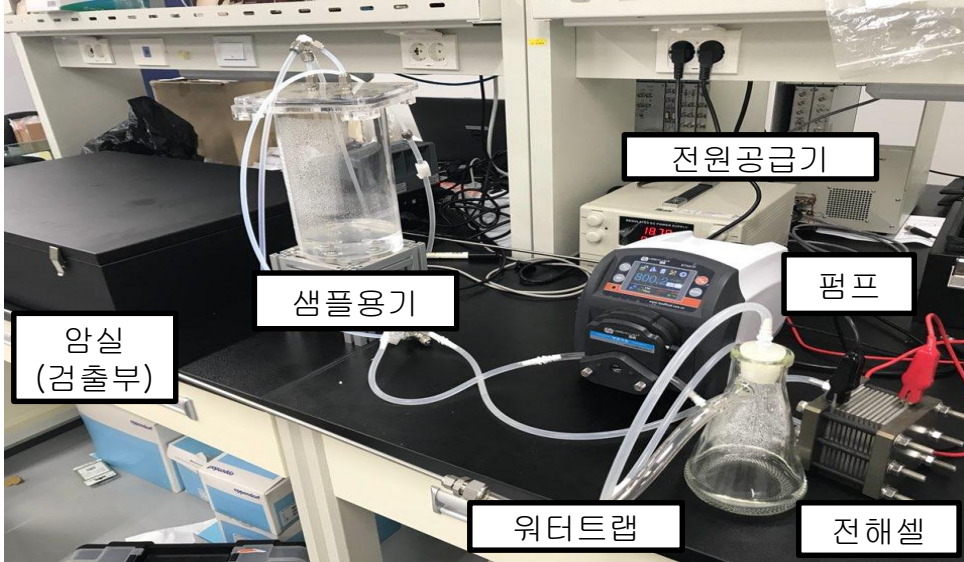


< 검출신호 처리 시스템 구성도 (동시합산회로) >



< 섬광체가 없을 때의 TAC 출력 스펙트럼 (상) 및
삼중수소 검출 시 TAC 스펙트럼 (하) >

◆ 전기분해 기반 실시간 삼중수소 검출 시스템 설계 제작

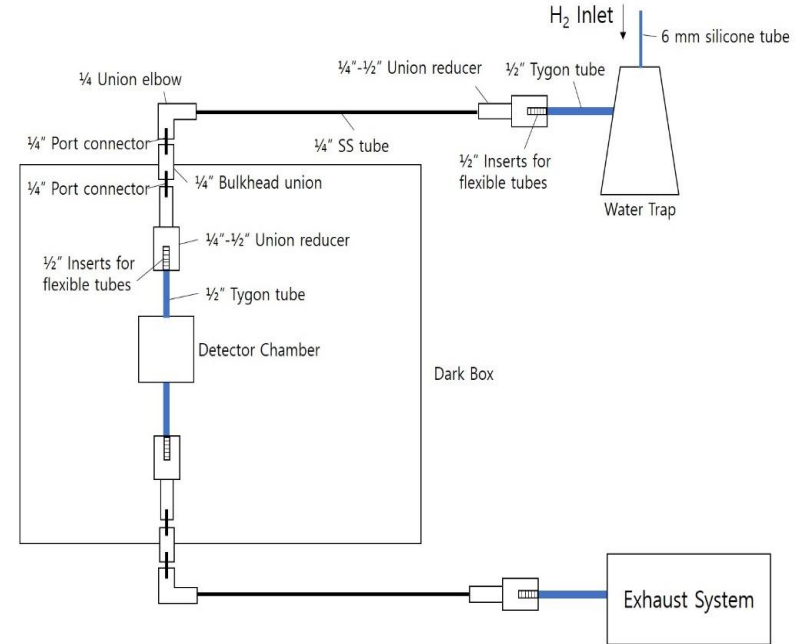


< 실시간 삼중수소 검출 시스템 >

➤ MDA : 17.9 Bq/g

★ MDA 저감 방안

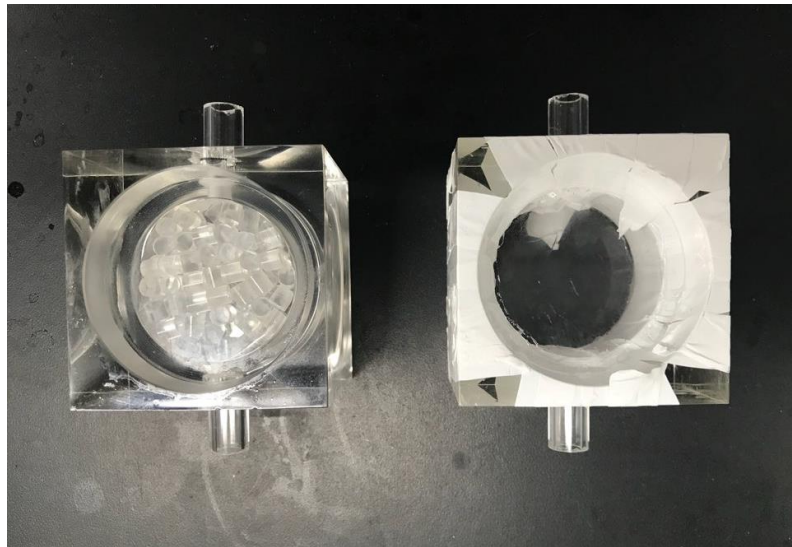
- 백그라운드 저감 방법 (현장 백그라운드 차폐 및 노이즈 제거 알고리즘)을 통해 백그라운드 카운트를 약 1/5 수준으로 저감
- 검출부의 반응 면적을 넓히고 검출효율이 좋은 PMT를 사용하여 검출효율을 약 2배 증가
- 지지 구조체의 내부 부피를 4배 증가시키며 광가이드 적용
- 삼중수소의 경우 **전기분해**를 사용함으로써 효율 약 10,000배 향상
- 이와 같이 함으로써 삼중수소 및 ^90Sr 의 MDA를 만족하는데 걸리는 시간을 **5분 이내로 단축**



< 암실 (검출부) 내부 개념설계도 및 외형 >



◆ 챔버 형태에 따른 삼중수소 측정



< 검출 챔버 Type A (좌) 와 type B (우) >

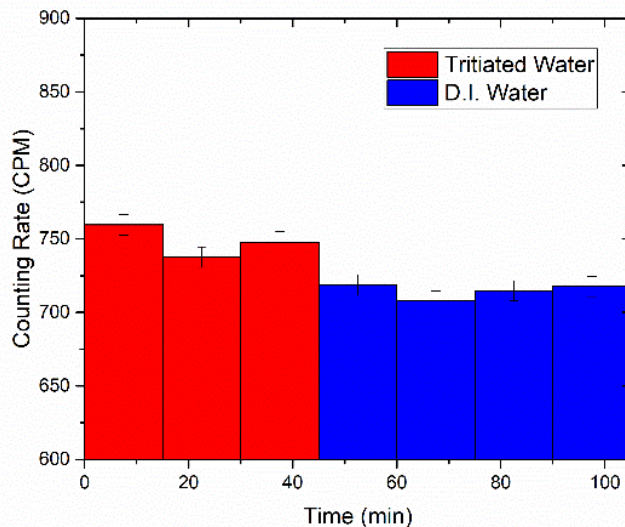
- 2가지 타입의 (Type A, Type B) 챔버 제작
- Type A: 기존의 검출부에 섬광체 펠렛 (5 mm (Φ) × 5 mm (h), 원기둥 형태)을 채워 넣어 삼중수소와 실질적으로 반응할 수 있는 단면을 늘이는 방법
- Type B: 기존의 검출부 내부에 광수집 효율을 높이기 위해 백색 테프론 테이프 부착

➤ 측정 효율

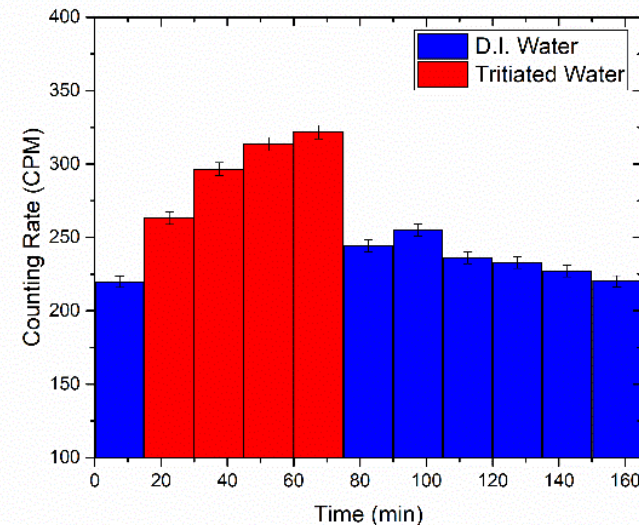
검출 챔버 타입 별 검출 효율 평가

Coarse Gain: 20, Fine Gain: 5/7

Detector	Net Counting Rate (cps)	Tritium Concentration (kBq/m ³)	Volume of the chamber (m ³)	Tritium Activity in Chamber (Bq)	Detection Efficiency (%)
Type A	0.56	1600	1.96×10^{-5}	31.4	1.78
Type B	1.70	1020	3.93×10^{-5}	40.1	4.25



< Type A 연속 검출 실험 결과 >



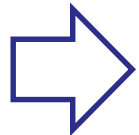
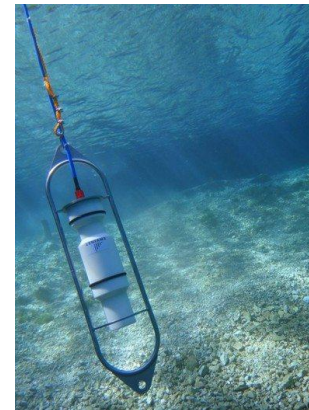
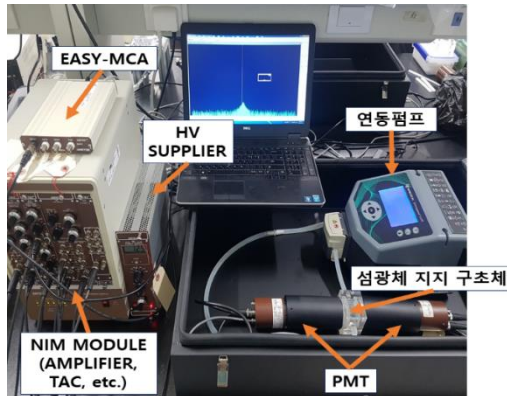
< Type B 연속 검출 실험 결과 >

- Type A에 비하여 type B가 약 3배 높은 계수율을 나타냄.
- Type B의 경우 최대값이 될 때까지 일정한 시간 소요
- 삼중수소와의 반응 단면적 확대에 따른 검출 효율 증가
- 광신호 수송시 loss 저감 중요

- ◆ 수중 베타 핵종 검출을 위한 플라스틱 섬광체 기반의 전베타 검출 모듈 구축
- ◆ 물 시료의 높이, 공기층의 두께, 섬광체의 지름 및 두께 등 검출 효율 인자에 대한 광 수집 최적화 특성 도출
- ◆ PMT 기반의 백그라운드 및 잡음 제거 동시 합산회로에 의한 수중 삼중수소 검출 모듈 특성 도출
- ◆ MDA 도달 시간 (^3H 은 약 400초, ^{90}Sr 은 40초)은 유량을 변화에 대하여 영향을 받지 않음.
- ◆ 증폭도가 증가할수록 삼중수소를 포함한 전베타 MDA 도달 시간 단축 (증폭도 4배: MDA 도달 시간 약 1/550로 감소)

향후 계획 및 활용 방안

연구목표	연구개발 내용
현장 수중 전베타 및 삼중수소 검출 특성 평가	현장 전베타 및 삼중수소 오염 모니터링을 위한 일체형 방사능 검출 모듈 설계 제작 실험
현장 수중 민감도 향상 전베타 및 삼중수소 모니터링 모듈 개발	현장 검출 오차 요인 실험적 도출 및 분석 보정
현장 수중 베타/감마 방사선 통합 모니터링 시작품 개발	현장 수중 베타/감마 방사선 통합 모니터링 시작품 설계·제작 및 특성 실험
베타 및 감마 방사선 분포 현장 및 본부 동기화 모니터링 기술 개발	무선통신을 이용한 현장 및 감시본부 동시 모니터링 네트워크 구축



- 제염·해체 부지의 환경복원시 부지 지하수 수중 방사능 감시에 활용
- 해양 환경삼중수소 베타 방사능 현장 감시에 활용

감사합니다

