

2021년 한국원자력학회 춘계

Development of Concentrated Waste Drying Treatment System Designed to be Mobile and Compact for Radioactive Liquid Waste Treatment in NPPs

2021.05.

원전 농축폐액 처리를 위한 이동형/소형 건조처리설비 개발

CONTENTS

I. 연구 개요

II. 연구 내용

1. 연구개발 설비 및 개발 순서
2. 예비시험 설비 제작 및 성능시험
3. 시제품 설계 및 제작
4. 농축폐액 건조설비 성능 및 실증시험

III. 결론

I . 연구 개요

☑ 연구 필요성

- 한울원전 제3발전소 액체폐기물 소형증발기에서 발생한 농축폐액을 건조할 설비 필요
- 한울 3발 운영여건상 공간이 협소하므로 설비 규모가 15 m³ 이하이어야 함
- 국내 기존원전에 사용중인 설비는 37 m³ 이상으로 도입이 어려움
 - 파라핀 고화를 위한 건조설비(CWDS) : 37.44 m³
 - 고리 1발 등 6개 발전소
 - 폴리머 고화용 건조설비(CTS) : 41.94 ~ 65.91 m³
 - 새울 1발 등 4개 발전소

☑ 연구 개발 목표

- 설비규모 15 m³ 이하의 이동형/소형 농축폐액 건조설비 개발
- 건조성능 일일 500L(8시간) 이상인 설비 개발
- 액체 방사성폐기물 처리설비의 기술기준에 적합한 설비 설계 및 제작

※ CWDS : Concentrated Waste Drying System, 파라핀 고형화를 위한 농축폐액 건조설비

※ CTS : Concentrate Treatment System, 폴리머 고형화를 위한 농축폐액 건조설비

II. 연구 내용

1. 연구개발 설비 및 개발 순서

☑ 사이클론을 이용한 원심박막 증발건조 방식의 설비 개발

- 설비형태 : 수직형(Vertical Type) 원통 건조기
- 농축폐액 건조성능 : **500 L/day** (8시간)
- 설비규모(용적) 최소화 : **15 m³** 이하
 - ➔ 기존 설비 규모의 약 **1/3** 크기로 축소
 - ➔ 기존 설비 대비 건조효율이 3배 이상인 건조방식 선정
- 설비 유지보수 **편의성** 반영
- 작업자 방사선 **피폭선량 최소화** 반영

☑ 연구 개발 순서

- 예비 시험설비 제작 및 성능시험
- 시제품 설계 및 제작
- 시제품 성능시험 및 실증시험

2. 예비시험(Pilot Test) 설비 제작 및 성능시험

1) 예비시험 설비 제작

예비시험 설비는 상용화 설비와 동일한 방식의 건조설비를 축소 제작하여 성능 및 기능 확인 후 시제품 제작

▣ 예비 시험설비 규격

- 방식 : 수직형 원심박막 증발 건조
 - 사이클론핀이 회전하며 원심력에 의해 농축폐액을 가열면에 박막을 형성시켜 건조
- 규모 : 상용화 설비의 약 30%
- 건조 용량 : 120 L/day (목표용량 500 L/day의 약 25% 수준)



항목	규격
모터감속기	2.2 kW × 380 V × 60 Hz
송풍기	1.0 m ³ , 700 mmAq
건조기	테프론코팅
건조기 성능	20 kg/h
원료함수율	25.55%
건조함수율	10% 이하

2) 성능시험 모사시료 제조

▣ 원전 농축폐액 성분분석

- 건조설비의 성능시험을 위하여 원전 농축폐액과 유사하게 제조
- 원전 농축폐액 성분분석 결과를 활용하여 각 원소별 구성비와 동일하게 제조

※ 봉산 농축폐액 유리화 타당성 연구(한수원, 2009)

>> 원전 농축폐액 건조분말 성분분석 결과

성분	B	Na	K	Ca	Zn	Mg	Si	Fe	Li	Al	Ni	Mn	Co	Cr	합계
함량 (ppm)	195,333	76,000	2,333	1,600	583	495	391	230	127	77	38	35	<10	<10	291,905

성분	B ₂ O ₃	Na ₂ O	K ₂ O	CaO	ZnO	MgO	SiO ₂	Fe ₂ O ₃	Li ₂ O	Al ₂ O ₃	NiO	MnO ₂	유기물	H ₂ O	합계
함량 (%)	62.941	10.243	0.282	0.224	0.073	0.082	0.084	0.033	0.027	0.015	0.005	0.006	1.466	24.52	100%

>> 발전소별 농축폐액 붕소농도

한울 제1발전소	한울 4호기	한빛 4호기
30,000 ppm	15,780 ppm	19,064 ppm

※ 모사시료 : 원전 농축폐액과 성분이 유사하도록 제조한 시료

▣ 농축폐액 모사시료 제조

- 원전 농축폐액 건조분말 성분 14개 원소중 함량이 매우 적은 Co, Cr을 제외한 12개 원소
- 화학약품을 사용하여 원전 농축폐액과 유사하게 원소별 무게 계산
- 원전 농축폐액 중 붕소농도가 가장 높은 30,000ppm을 기준으로 농축폐액 모사시료 제조
 - 12개 화학약품을 용매(물)에 녹여 저온진공농축기를 사용하여 농축

>> 붕소농도별 용질 무게 (모사시료 20 L)

No.	시 약	함량(ppm)	1L 기준 용질무게(g)	붕소 30,000 ppm의 용액 20L 용질 무게(g)
1	H ₃ BO ₃	195,333	1117.247	3431.822
2	NaOH	76,000	132.231	406.163
3	KOH	2,333	3.348	10.284
4	CaCl ₂	1,600	4.431	13.607
5	ZnCl ₂	583	1.215	3.731
6	MgCl ₂ ·6H ₂ O	495	4.140	12.748
7	SiO ₂	391	0.836	2.567
8	Fe ₂ O ₃ ·7H ₂ O	230	1.177	3.515
9	LiCl	127	0.776	2.382
10	AlCl ₃ ·6H ₂ O	77	0.689	2.112
11	MnCl ₂ ·4H ₂ O	38	0.137	0.418
12	NiO	35	0.045	0.137
합계		-	1266.272	3889.486

3) 예비시험 설비 성능시험

▣ 농축폐액 모사시료 건조 성능시험

- 원전 농축폐액 모사시료 20L 건조
- 예비시험 설비에 모사시료 20L를 넣고 약 1시간 건조
- 함수율 10% 이하의 미세한 분말로 건조상태 양호



▣ 건조분말 붕소함유율 분석

- 전남대학교 공동실험실습관에서 실험 분석
 - 유도 플라즈마 분광 광도계(ICP- OES) 활용
- 성분분석 결과 : 붕소함유율의 오차 약 2.6%



3. 시제품 설계 및 제작

1) 시제품 설계

▣ 설계 기준 및 설계 내용

○ 국내·외 설계 기술기준

- KEPIC NWB 2000, 4000, 5000
- ANSI/ANS-40.37(2009) 및 ANS-55.1-1992;R2000

○ 주요 설계 내용

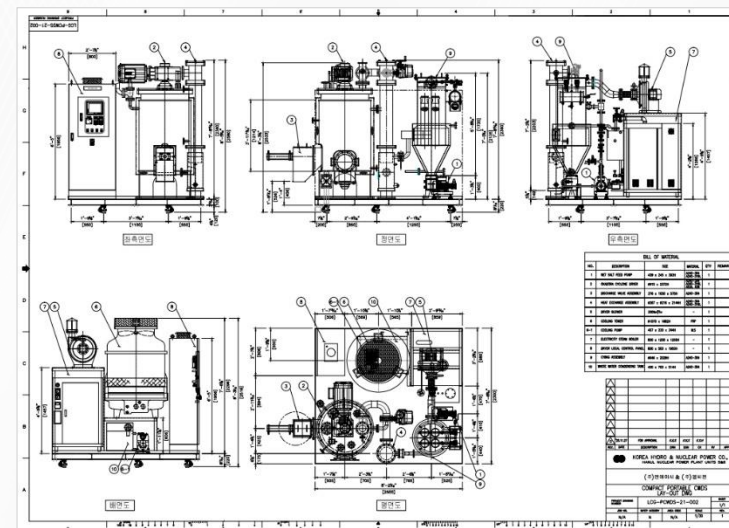
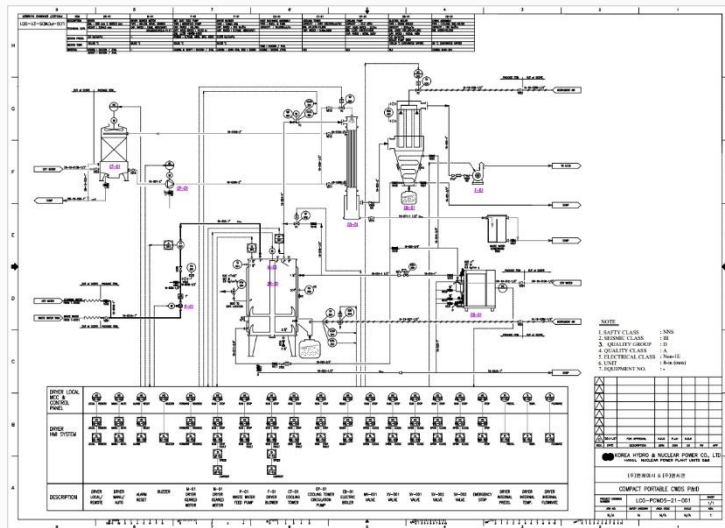
- **압력용기, 밸브 및 펌프 등 기기의 기술기준**
 - NWB 2000 '고체방사성 폐기물 처리 기기의 기술기준' 및 ANSI/ANS-40.37(2009)의 'Equipment codes'
- **배관 : KEPIC-MDF 타입 304 또는 316 스테인레스강**
 - 공정배관은 내경 3/4 inch 이상 2.5 inch 미만, 슬러리 이송 배관의 내경은 최소 1.5 inch 적용
- **기기 계측 및 제어요건**
 - NWB 2000 '고체방사성폐기물처리설비의 제어 및 계장'의 기계적 장치를 이용한 원심박막필름 증발기 설비 적용
- **환기 또는 방출 밸브 : ANSI/ANS-40.37(2009)에 따라 설계**

□ 건조설비 규격

구분		규격
크기		2.5 m × 2.3 m × 2.6 m = 14.95 m ³
건조기	건조처리량	80 kg/h(수분 80 kg/h)
	전열면적	2.9 m ²
	재질	Casing STS316L / Jacket STS304
	동력	15 kW × 480 V × 60 Hz
	회전핀	Cyclone 6단
간접 콘덴서	재질	STS304
	냉각 능력	18,000 kcal/h

구분		규격
CYBAG	성능	180 Nm ³ /h
	재질	Casing: STS304
송풍기	성능	300 Nm ³ /h
	재질	STS304 / SS400
냉각탑	성능(냉각 능력)	58,5000 kcal/h
스팀 보일러	증기온도	140 °C ~ 150 °C
	최대전력	150 kW/h
	스팀열량	129,000 Mcal/h

□ 건조설비 설계 도면



2) 농축폐액 건조설비 제작

자재 발주, 인수검사 및 제작검사 수행

▣ 자재 발주 및 인수검사

- 자재 목록 : Casing, Jacket 및 Top cover 제작에 필요한 Main plate
- 자재 검사 : 육안검사 및 시험 성적서 검토

부 품 명	재료 사양	제 조 자	비 고
■ Waste Water Dryer			
Casing	ASTM A240 316/316L, 6t	NAS	Shell
	ASTM A240 316/316L, 16t	DKC	Shell Bottom Plate
Jacket	ASTM A240 304/304L, 4t	POSCO	Jacket shell
	ASTM A240 304/304L, 16t	DKC	Jacket Closure
Top cover	ASTM A240 304/304L, 3t	POSCO	Insulation cover
■ Heat Exchange			
Heat Exchange	ASTM A312 TP304/304L, 6"x SCH10S	SeAH CSS	Shell Top Channel Shell Bottom Channel Shell
	ASTM A312 TP304/304L, 8"x SCH40S		Bottom Channel J/K Shell
Drain Tank	ASTM A312 TP304/304L, 5"x SCH40S		Support pipe



< 육안 검사 >



< 서류 및 성적서 검사 >

▣ 농축폐액 건조설비 제작검사

○ 제작 및 검사 시 적용 기준

- 모든 코드와 표준은 최신기준 적용

- ASME SEC. VIII DIV.1 Rules for Construction of Pressure Vessels (2017Ed.)
- ASME SEC. IX Welding and Brazing Qualifications (2017Ed.)
- ASME SEC. V Nondestructive Examination (2017Ed.)
- ASME SEC. II Material Specifications (2017Ed.)
- ASTM / ANSI Material Specifications

○ 검사 및 인증기관

- 검사 : ASME 인정 검사기관

- ✓ 용접부 비파괴 검사 : 코스텍(주)
- ✓ 수압 및 충수시험 : 우리이엠아이(주)

- 확인 : ASME 인증기관

- ✓ HSB(Hartford Steam Boiler)사

○ 압력용기 구조검사 및 용접검사

- 한국에너지공단 검사증 발급

■ 제작시험 입회검사

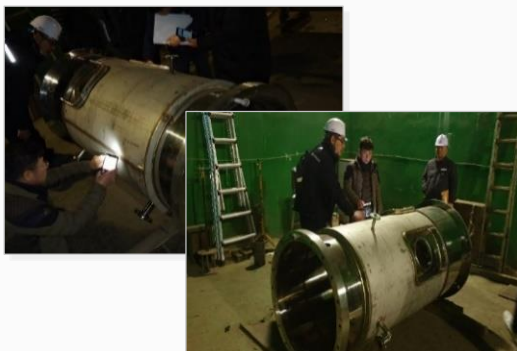
>> 간접콘덴서 제작



>> 수압 및 충수 시험



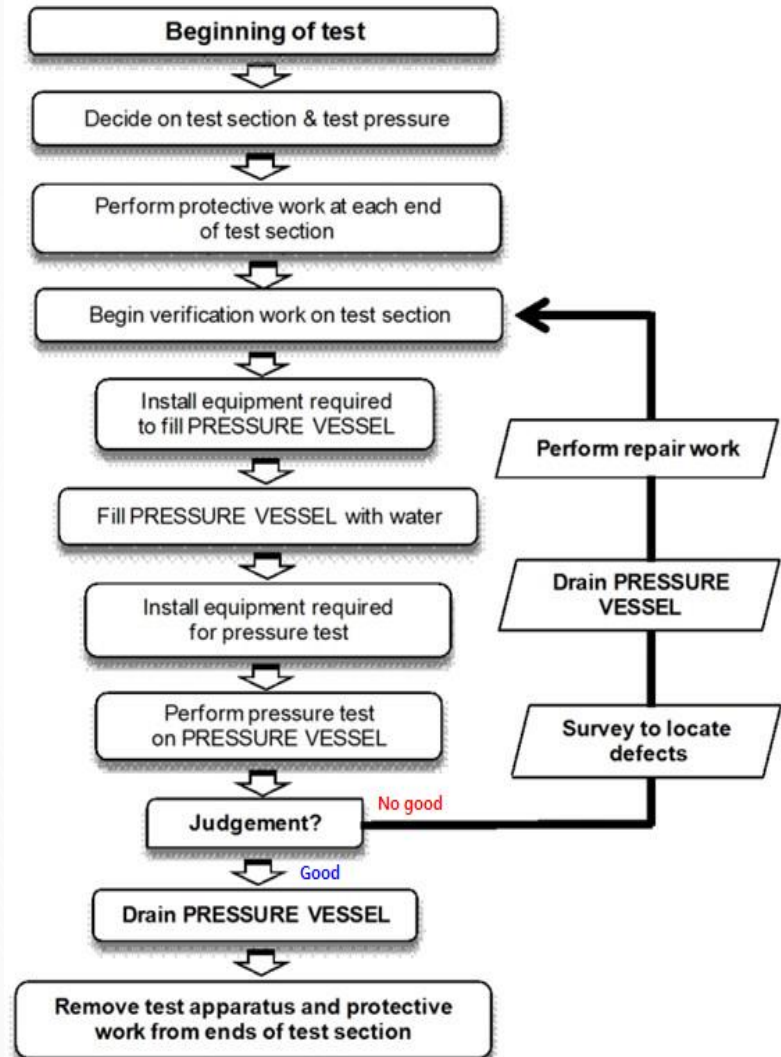
>> 건조기 및 간접콘덴서 용접부의 비파괴검사(RT, PT)



< RT (방사선투과 검사) >



< PT (침투 탐상 검사) >



< 수압 및 충수시험 절차 >

□ 검사 결과

<p>2중 압력용기 구조검사증</p> <p>발행일자: 2024.01.15 검사일자: 2024.01.15 검사장소: 서울특별시 강남구 테헤란로 123번길 100호</p> <p>검사대상: 2중 압력용기 구조</p> <p>검사결과: 합격</p> <p>한국에너지공단 사정민</p>	<p>(2)중 압력용기 용접검사증</p> <p>발행일자: 2024.01.15 검사일자: 2024.01.15 검사장소: 서울특별시 강남구 테헤란로 123번길 100호</p> <p>검사대상: 2중 압력용기 용접</p> <p>검사결과: 합격</p> <p>한국에너지공단 사정민</p>
---	---

<p>ASME PRESSURE TEST REPORT</p> <p>시험번호: 2024-01-15-001</p> <p>시험대상: 2중 압력용기</p> <p>시험결과: 합격</p> <p>한국에너지공단 사정민</p>	<p>ASME FULL OF WATER TEST REPORT</p> <p>시험번호: 2024-01-15-002</p> <p>시험대상: 2중 압력용기</p> <p>시험결과: 합격</p> <p>한국에너지공단 사정민</p>
---	--

<p>ASME RADIOGRAPHIC TESTING REPORT</p> <p>시험번호: 2024-01-15-003</p> <p>시험대상: 2중 압력용기 용접</p> <p>시험결과: 합격</p> <p>한국에너지공단 사정민</p>	<p>ASME LIQUID PENETRANT TESTING REPORT</p> <p>시험번호: 2024-01-15-004</p> <p>시험대상: 2중 압력용기 용접</p> <p>시험결과: 합격</p> <p>한국에너지공단 사정민</p>
---	---

< 압력용기 구조검사 및 용접검사증 >

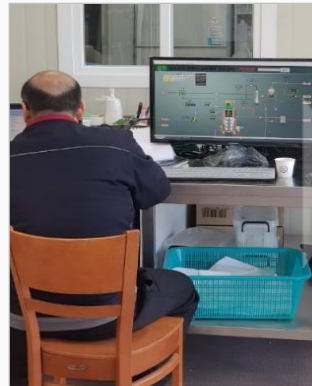
< 수압 및 충수 시험 결과보고서 >

< 방사선투과 및 침투탕상 검사 결과보고서 >

□ 농축폐액 건조설비 설치 및 기동시험



○ 배관 및 전기판넬 작업



○ 프로그램 Setting

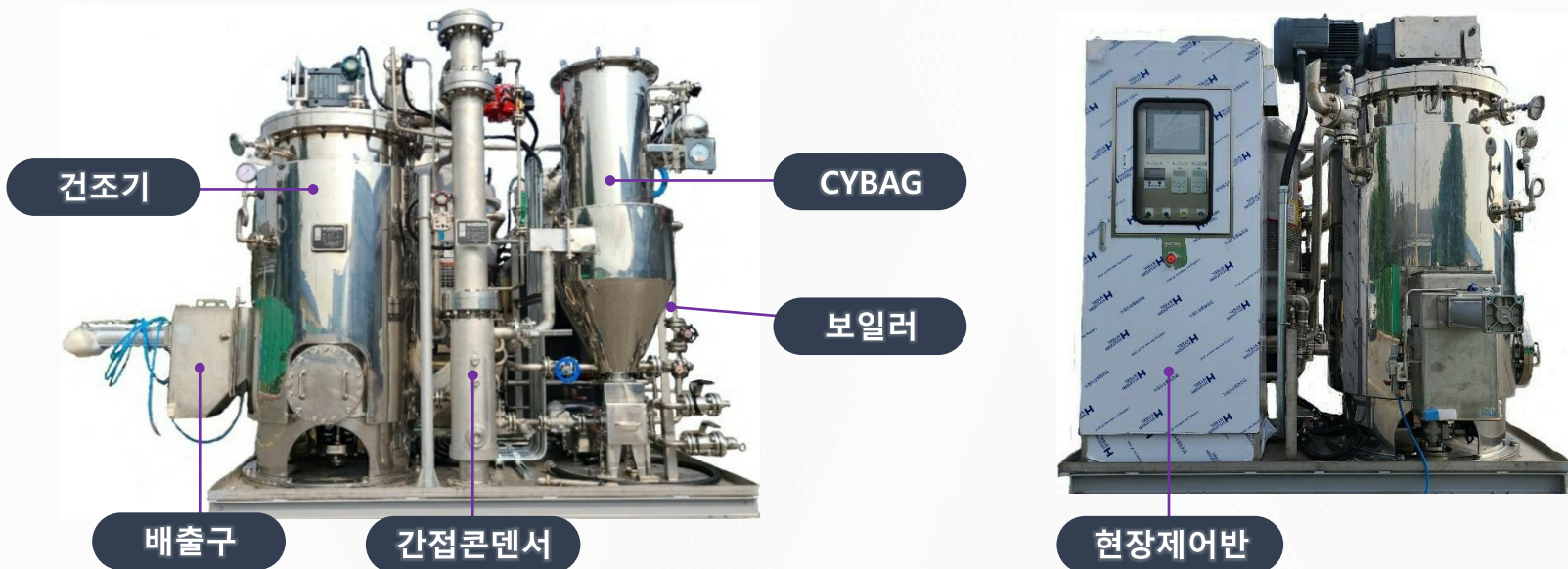


○ 기동 시험

3) 농축폐액 건조설비 개발 제품

▣ 주요 구성품

- 건조기 → 수직형으로 사이클론을 이용 원심박막 감압 진공건조
- 간접콘덴서 → 농축폐액 건조증기 응축
- 사이클론 백필터(CYBAG) → 배가스를 사이클론으로 분진 제거후 Bag filter에서 공기 정화
- 보일러 → 건조기에 가열 증기 공급
- 현장제어반 / 원격제어반 → 건조설비 현장 또는 원격 건조기 운전



4. 농축폐액 건조설비 성능 및 실증시험

1) 농축폐액 건조설비 성능시험

▣ 무부하 시험 및 물을 이용한 건조시험

- 무부하 시험 결과 시스템 작동 양호
- 물을 이용한 건조성능 시험
 - 20L 5회 실시한 결과 건조상태 양호

▣ 농축폐액 모사시료 건조 성능시험

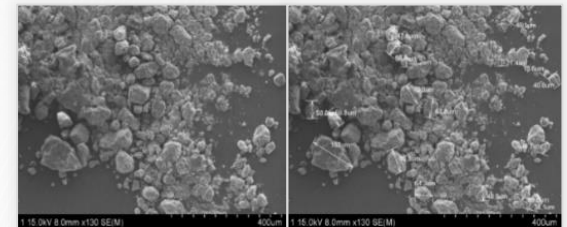
- 모사시료 65 L를 1시간 건조시 함수율 1.4%로 건조상태 양호
- 모사시료 85 L를 50분 건조시 함수율 2.1%로 건조상태 양호

▣ 건조 성능

- 85 L씩 6회(510L) 연속적으로 건조 시험결과 5시간만에 건조 완료
- 건조분말의 함수율이 3% 이하
 - 건조분말 입도 최대 162 μm
- ➔ 성능시험 결과 매우 우수



>> FE-SEM 결과



2) 농축폐액 건조설비 실증시험

실증시험은 2회 실시

- ◆ 1차 실증시험은 원전 농축폐액 모사시료를 이용하여 실시
- ◆ 2차 실증시험은 원전에 건조설비를 설치한 후 원전 농축폐액을 사용하여 실시

■ 1차 실증시험 결과 건조시간, 분말상태 및 함수율 등 건조성능 매우 우수

시험 항목	시험 기준	시험 결과
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 건조성능 ▶ 함수율 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 농축폐액 500 L 8시간 이내 건조 ▶ 10% 이하 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 5시간 만에 건조 ▶ 2.5% 이하

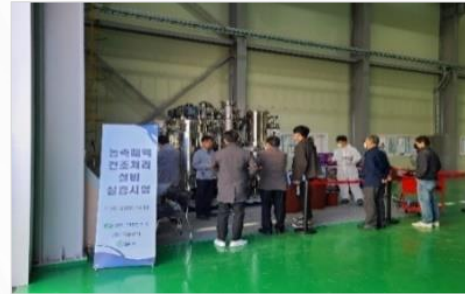
■ 2차 실증시험 결과 건조시간 및 함수율 등 성능 매우 우수

시험 항목	시험 기준	시험 결과
<ul style="list-style-type: none"> ▶ 건조성능 (증기보일러 전력량을 설비용량의 30%를 사용) ▶ 함수율 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 농축폐액 300 L 8시간 이내 건조 ▶ 10% 이하 	<ul style="list-style-type: none"> ▶ 7.5시간 만에 건조 ▶ 2.4%

>> 농축폐액 건조설비 실증시험



농축폐액 건조설비



실증시험 설명



모사시료 제조



모사시료 용해



건조설비 운전



건조된 분말



함수율 측정

3) 농축폐액 건조설비 시연회

- ▣ 농축폐액 건조설비 성능시험 및 실증시험 결과 성능이 우수함을 확인
- ▣ 원전 모든 발전소 사용 가능 여부 확인하기 위해 전원전 관련자 참석 하에 시연회 실시
- ▣ 시험결과 건조성능 및 건조분말 상태 매우 우수 확인
 - 붕소농도 10,000 ppm, 20,000 ppm, 30,000 ppm 및 한울3발 농축폐액 붕소농도 1,900 ppm

▶ 시연회 결과 : 건조 성능 및 건조분말 상태 **매우 우수**

- ✓ 농축폐액 모사시료 85 L 건조 소요시간 50 분, **건조분말 함유율 : 3% 이하**
- ✓ 원전 모든 발전소 농축폐액 모사시료 **500 L를 5시간에 건조 가능**

VI. 결론

☑ 협소한 공간에 설치 가능하도록 **기존설비의 약 1/3 크기로 건조성능이 뛰어난 설비 개발**

- 원심박막 건조방식의 **이동형/소형** 건조처리설비
- 증기보일러 히터를 **분할**하여 사용지역의 전기용량 및 폐기물량에 따라 선택 가능

☑ 농축폐액 건조설비 성능 및 실증시험 결과 **우수한 성능 확인**

- 전 원전 농축폐액 모사시료 건조 성능시험 결과 **모든 발전소 사용 가능함**을 확인
- 2회 실시한 실증시험에서 **매우 우수한 건조성능 확인**

☑ 본 연구에서는 농축폐액 건조설비의 **규모를 최소화**하고 건조성능은 뛰어나 **공간이 협소한 지역에 사용 가능하도록 이동형/소형 설비로 개발**하였으며, 개발 제작된 시제품은 실증시험 결과 **매우 우수한 결과를 얻었음**

감사합니다