

Workshop Seminar

사용후핵연료 건식저장을 위한 진공건조 과정과 잔류수 종합평가

Vacuum drying process and
comprehensive evaluation of
residual water for dry storage of
spent nuclear fuel

발표자: 임지환 (한국원자력연구원)

운반저장기술개발부

2025년 05월 21일 (수) 4:20~4:50 PM

사용후핵연료의 안전한 저장을 위한 준비

제주국제컨벤션센터 2층 202B호

*jlim@kaeri.re.kr





목차



사용후핵연료 건조



진공건조 관련 리뷰



KAERI 진공건조 시험



결론 및 제언

This work was supported by the Institute for Korea Spent Nuclear Fuel (iKSNF) and National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT, MSIT) (No. 2021M2E1A1085226).



사용후핵연료 건조

About Spent Nuclear Fuel Drying

- 연구배경과 연구 필요성
- 사용후핵연료 건조란 무엇인가?
- 사용후핵연료 건조는 왜 중요한가?
- 사용후핵연료 건조 방법들
- 사용후핵연료 건조 관련 규제



KAERI

한국원자력연구원

Korea Atomic Energy Research Institute



연구배경과 연구 필요성

사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언

❖ 미국의 건식저장 프로젝트



목표: 건식저장시스템의 열제거 성능과 차폐성능의 실증 및 안정성 평가 해석모델 검증

- 저장용기, 시설의 제열성능
- 저장절차 별 피폭선량 조사
- 열수력 해석코드 검증



목표: 건식저장시스템의 안정성 및 회수성이 연장된 인허가 기간 연장을 위한 데이터 확보

- NWPA 기반 인허가 연장
- INL: 외관검사, 구조진단, 방사선 탐사, 용기 내 가스분석
- ANL: 피복관 상태 정밀 조사



목표: 고연소도 연료의 건식저장 인허가의 갱신 및 저장기간 연장의 필요성

- 열화관리계획 (AMP) 수립위함.
- 저장인허가 연장을 위한 과학적 신뢰를 구축
- 장기저장 후 수송 가능성에 대한 확증적 데이터 확보

*NWPA: Nuclear Waste Policy Act

01 건식저장 초창기의 실증연구 (1978~1984)

참여 기관, 배경

Cask 검증

코드 검증

- 1982 제정 NWPA* 기반, DOE와 발전사업자들 간의 협력에 의해 네바다 Surry 발전소, 로빈슨 발전소, INL 등에서 수행
- WH사의 SSC 제외, 상용으로 개발된 저장용기가 연구에 활용됨.
- COBRA-SFS, HYDRA와 같은 열전달 해석코드를 검증하는데 활용됨 (PNNL의 주도 하에 진행). → **설계기준 만족, 해석, 결과 맞음.**

02 건식 저장 특성평가 과제 (DCSCP, 2000년대 초 추정)

참여기관, 배경

연구 기저 가정

결론

- DOE와 EPRI, NRC 공동 추진 과제
- 15년: 열화 메커니즘 발현 충분 기간 → 20~40년에도 안전할 것.
- Surry 발전소 평균 35GWd/MtU 연소도 활용
연료봉 크리프 0.1% 이내, 봉내압 변화없음, 피복관 어닐링 없음, 크리프 변형을 여유 있음. → **데이터 근거하여 인허가 연장**

03 고연소도연료 실증 데이터 확보 프로젝트 (2014 말 추정 ~)

고연소도 연료

전 과정 데이터

진공건조 영향

- 고연소도 연료의 기계적 물성치는 저연소도와 다름: 특히 수소화물 재배열로 인한 파괴인성 저하, 연성-취성 온도 (DBTT) 탐구필요
- 건식으로 저장되는 전 과정을 재현하며 매과정마다 데이터 확보
- **진공건조과정을 수행하고 가스 조성 확인, 잔존수 확인을 통한 수분과 산소 등을 정량화해 이들이 열화에 미치는 영향 파악**

Lee, S., & Yook, D. (2017). JNFCWT, 15(2), 135-149.

미국은 고연소도연료 실증 데이터 확보 프로젝트 이후 진공건조 모사연구의 필요성을 느끼고 **진공건조과정을 수행하고 가스 조성 확인, 잔존수 확인을 통한 수분과 산소 등을 정량화해 이들이 열화에 미치는 영향 파악하고자 하였음.**



❖ 미국의 건식저장 프로젝트

건식저장 초창기의 실증연구 (1978~1984)
건식 저장 특성평가 과제 (DCSCP, 2000년대 초 추정)

Figure. Dry Storage Casks at the Idaho National Laboratory INTEC Site [1]



- 의의: DCSCP는 15년의 저장기간을 거친 용기와 연료를 대상으로 실증 데이터를 확보함.
- 건식저장의 중요 프로세스 중 하나인 **진공건조 과정이 생략** 됨. → 잔류수분의 존재 하에 발현되는 열화 메커니즘에 대한 충분한 검토가 이뤄질 수 없었음.
- 연료봉의 상태를 확인하여야 하나, 연구의 초점이 용기 성능에 맞춰 있었기 때문에 저장 전 데이터 확보에 실패.



고연소도연료 실증 데이터 확보 프로젝트 (2014 말 ~)

그림

의의

한계

한계 극복

Table. Available High Burnup Fuel Assembly Types for demonstration [2]

Cladding Material	Burnup Range (GWD/MTU)	Number of Assemblies Available	Last Irradiation	Manufacturer	Assembly Type
Standard/ Low-tin Zircaloy-4	53-58	3	1989	Westinghouse	Lo-Par
Zirlo	51-55	20	2004-2007	Westinghouse	V5H
M5	52-67	11	2001-2010	AREVA	AMBW
Low-tin Zircaloy-4	49-50	3	1994	Westinghouse	V5H

- 의의: 사용후핵연료가 건식으로 저장되는 전 과정을 발전소에서 수행되는 그대로 재현하여 매 과정마다 저장용기 내 온도 등의 데이터를 확보하도록 계획 됨.
- 저장 개시 전 데이터 확보를 위하여 자매 연료봉을 미리 확보하여 실증 시험 전 특성을 평가하는 계획이 수립됨.
- 피복관 온도가 150도 이하로 떨어지는 시점과 최근 NRC에서 고연소도 규제입장 ISG-24에 따르면 최소 10년 이상은 진행될 것임.

[1] HANSON, Brady, et al. Gap analysis to support extended storage of used nuclear fuel, Rev. 0., 2012.

[2] Lee, S., & Yook, D. (2017). JNFCWT, 15(2), 135-149.

미국은 고연소도연료 실증 데이터 확보 프로젝트 이후 진공건조 모사연구의 필요성을 느끼고 **진공건조과정을 수행하고 가스 조성 확인, 잔존수 확인을 통한 수분과 산소 등을 정량화**해 이들이 열화에 미치는 영향 파악하고자 하였음.



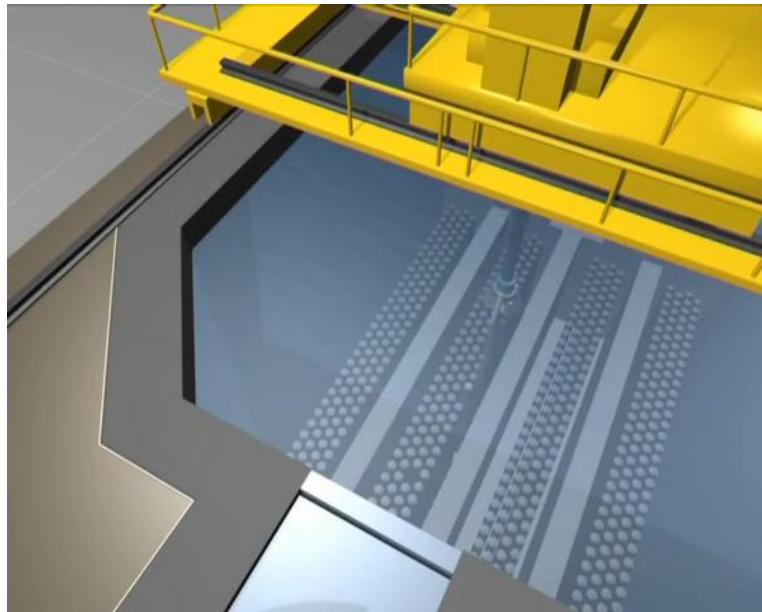
사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언

- **사용후핵연료 건조:** 건식 저장하기 전에 연료 주변의 수분을 제거하는 공정임.
- **진공건조(vacuum drying):** 진공 펌프로 용기 내부 압력을 낮추면 물의 끓는점이 감소하여 잔류 수분이 증발·기화됨. 봉피 열→가열 장치 없이도 낮은 압력에서 수분을 제거.



- (1) 초기 배수 단계: 배수 밸브, 사이폰 펌프 또는 질소/헬륨 블로우다운 등을 사용하여 가능한 모든 물을 배출
- (2) 진공 감압 및 유지: 진공펌프와 배관, 밸브, 압력계, 필터 및 콜드 트랩(cold trap) 등의 장비로 구성된 건조 시스템을 캐니스터에 연결 후 압력을 천천히 단계별로 낮춤. 홀드 포인트)를 3~7회 거친 후, 최종적으로 3 torr 이하의 압력을 달성
- (3) 건조 확인 및 반복: 목표 진공도에 도달하면 시스템을 격리하고 일정 시간 압력이 다시 상승하지 않는지 확인
- (4) 헬륨 충전 및 밀봉: 충분히 건조되었다고 확인되면, 캐니스터 내부를 최종적으로 헬륨 기체로 채워 대기압 수준으로 올림.
* 헬륨은 열전달이 잘 되고 화학적으로 비활성이며 산소가 없기 때문에, 이후 저장 중 연료나 내부 구조물의 산화·부식을 억제하고 방사성분해 가스로 인한 가연성 위험을 낮춤.



사용후핵연료 건조는 왜 중요한가?

사용후핵연료 건조

건조건조 관련 리뷰

KAERI 건조건조 시험

결론 및 제언

❖ 왜 중요한가? 이론상 물이 어느 정도 존재할 수 있는가?

캐니스터 모델	제조사/기관	용도	내부 부피 (리터)	출처
Holtec HI-STORM 100	Holtec International (미국)	건식 저장용 (다목적 시스템)	6484	NRC FSAR (Holtec 설계) [1]
NAC UMS (Universal MPC)	NAC International (미국)	건식 저장/운반 겸용 (듀얼 퍼포즈)	2100	NRC MAPS 보고서 [2]
Orano TN-24 시리즈	Orano TN (프랑스)	건식 저장/운반 겸용 (듀얼 퍼포즈)	10900	NRC 분석자료 [3]
GNS CASTOR V/21	GNS (독일)	건식 저장/운반 겸용 (듀얼 퍼포즈)	12000	연구보고서 [4]
KBS-3 처분 캐니스터 (PWR용)	SKB/Posiva (스웨덴/핀란드)	최종 처분용 (지질 심층처분)	1656	학술연구 [5]

표. 부피별 3 torr 압력 조건 하 이론상 존재할 수 있는 최대 물의 양 (이상기체 방정식)

부피 (리터)	물수 (mol)	질량 (g)
1	1.612×10^{-4}	2.9×10^{-3}
500	0.0806	1.45
1000	0.1612	2.9
1500	0.2418	4.35
2000	0.3224	5.8
2500	0.403	7.25
3000	0.4836	8.7
3500	0.5642	10.15
4000	0.6448	11.6
4500	0.7254	13.05
5000	0.806	14.5
5500	0.8866	15.95
6000	0.9672	17.4
7000	1.1284	20.3
8000	1.2896	23.2
9000	1.4508	26.1
10000	1.612	29

KAERI 실험 장비의 캐니스터 부피

Lab-scale 캐니스터: 98 리터 (0.285g)
 Lab-scale 캐니스터: 196 리터 (0.570g)
 ½ 다발 캐니스터: 260 리터 (0.755g)

◆ 1. ppm (parts per million)

- 기본 개념: 백만 분율. 어떤 물질이 전체 중 백만 분의 몇을 차지하는지를 나타내는 단위입니다.
- 의미: 일반적으로 ***농도***를 표현할 때 사용합니다. 예: 1 ppm = 0.0001% = 1 mg/kg (농도에 따라 다름)

◆ 3. ppmv (parts per million by volume)

- 정의: 부피 기준 ppm (기체 농도에서 주로 사용)
- 표현:

$$\text{ppmv} = \frac{\text{부피 (volume) of component}}{\text{부피 of mixture}} \times 10^6$$

(1) HI-STORM FSAR REPORT HI-2002444

(2) Managing Aging Processes In Storage (MAPS) Report Draft Report for Comment, NUREG-2214

(3) Effects of Residual Water on Storage Canister Internal Components, Milestone No. M3SF-20SR010207025, SRNL-STI-2020-00428

(4) Transnuclear Handouts – Part 4 of 6 - 10/07/09 Public Meeting (Draft SAR changed pages – non-proprietary)

(5)

https://www.academia.edu/21247322/Spent_fuel_canister_for_geological_repository_inner_material_requirements_and_candidates_evaluation#:~:text=used%2C%20the%20void%20space%20is,filled%20with%20groundwater%20once%20corrosion



사용후핵연료 건조는 왜 중요한가?

사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언

❖ 왜 중요한가? 실제로는 물이 어느정도 있는가?

연구 / 사례	건조 방식 및 연료	잔류 수분 결과	측정 기법
고연소도 데모 (미국, 2014)	고연소도 PWR 연료에 표준 진공 건조 (지르칼로이 피복)	건조 12일 후 수증기 약 17,400 ppmv (~0.1L) 검출 - 예상보다 10배 많음. 액상수는 없음 (탈착/방사선분해 기인)	헬륨 백필 가스 시료 채취 후 질량분석기 및 감마분광분석

Table 5. Results of HBU Demo Gas Sample Water Analyses.

Sample #	Collection Time	Dominion	SNL [†]	
		~25°C	~25°C	65°C
#1	5 hrs	1,633	2,097*	
#2	5 days	8,896	~6,600*	~10,000*
#3	12 days	8,300	11,200	17,400

*Samples were compromised; values are minimums

[†]Uncertainties are estimated, based on analysis of standards, to be ±10%

Table 4. Results of HBU Demo Gas Sample Analyses.

Gas Species	Sample 1	Sample 2	Sample 3
Sampling time	5 hrs	5 days	12 days
Bulk gas composition, %			
He	Confirmed balance gas		
H ₂ O (est.)	0.46%	1.8%	2%
N ₂	0.39%	0.07%	0.07%
Measured trace gases, ppmv			
H ₂	46	287	498
CH ₄	< 1	9	22
CO	nm	34	25
N ₂	off scale	630	680
O ₂	680	38	134
Ar	49	8	9
CO ₂	103	751	930

열화 현상	SNF에 미치는 영향
수소화물 재배열 (HR)	방사형 수소화물은 연성을 저하시켜 취성 파괴 위험 증가. 지연 수소균열(DHC) 가능
피복관 크리프 및 응력	응력 완화 효과도 있으나 과도 시 두께 감소 및 결함 확대 위험. 고연소 연료에 더 민감
피복관 산화 (내부/외부)	소량 수분일 경우 수십 년간 산화층 수 마이크론 증가 예상. 국지적으로는 연료 팽창, 부식 유발 가능
연료 펠렛 산화 및 팽창	연료 분열 및 팽창으로 피복관에 압력 가해 파손 가능. 과거 습식 저장 사고에서 발생 사례 존재
방사분해 및 가스 생성	H ₂ 축적 가능. 산소 유입 시 연소 위험. 또한 장기적으로 Zr 산화물 등에서 수소 추가 방출 가능

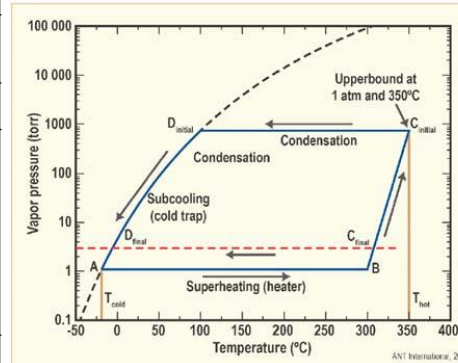
Bryan, C. R., Durbin, S., Lindgren, E. R., Ilgen, A. G., Montoya, T., Dewers, T., & Fascitelli, D. G. (2019). SNL Contribution: Consequence Analysis for Moisture Remaining in Dry Storage Canisters After Drying (No. SAND-2019-8532R). Sandia National Lab.(SNL-NM), Albuquerque, NM (United States).



❖ 헬륨강제순환건조와 진공건조의 차이

Table 2-1. Comparison of Vacuum Drying and Forced Helium Dehydration Methods		
Drying Method	Vacuum Drying	Forced Helium Dehydration
Criterion	Maintain vacuum of 3 torr for 30 minutes	Exit recirculating gas temperature of -6°C [$\leq 21^{\circ}\text{F}$] for ≥ 30 minutes* Estimated to be 16 to 38 hours†
Efficiency/Process Time	Estimated time range of 30 to 65 hours	Estimated to be 16 to 38 hours†
Advantage	<ul style="list-style-type: none"> - Industry standard and accepted method of drying‡ - Simple air-cooled vacuum drying systems eliminate need for external heating and cooling units - Less expensive to purchase and maintain 	<ul style="list-style-type: none"> - Eliminates the possibility of ice formation in canister - Maintain cladding temperature due to heat transfer of recirculating gas
Disadvantage	<ul style="list-style-type: none"> - Uncertainty of possible formation of ice in canister - Difficult to judge whether there has been sufficient time for sublimation of ice - Note: At pressures below 4.7 torr, ice may form in canister requiring 3 to 4 times longer for removal§ 	<ul style="list-style-type: none"> - Internal configuration (e.g., basket structure) may prevent adequate flow or circulation of gas over all surfaces in canister - May have difficulty with pooled water in canister bottom - Requires more complicated equipment setup (e.g., helium circulator), preheat and chiller module
References *Holtec International. "Final Safety Analysis Report for the Hi-Storm 100 Cask System." Rev. 4. USNRC Docket No. 72-1014. West Marlton, New Jersey: Holtec International. April 4, 2006. †Bencel, K. "TAD/STC Drying and Inerting Calculation." 000-M0C-MR00-00100-000-00A. Washington, DC: Office of Civilian Radioactive Waste Management. 2007. ‡NRC. NUREG-1536, "Summary Review Plan for Dry Cask Storage Systems." Washington, DC: U.S. Nuclear Regulatory Commission. 1997. §Kelly, J.G. "The Myths and Realities of Vacuum Drying." Dry Storage Information Forum, May 15-17, 2007. Clearwater Beach, Florida: Published on CD ROM. Washington, DC: Nuclear Energy Institute. 2007. Note: [1 torr = 1 mm Hg] [1 $^{\circ}\text{F}$ = 1.8 $^{\circ}\text{C}$ + 32]		

헬륨강제순환건조



진공건조

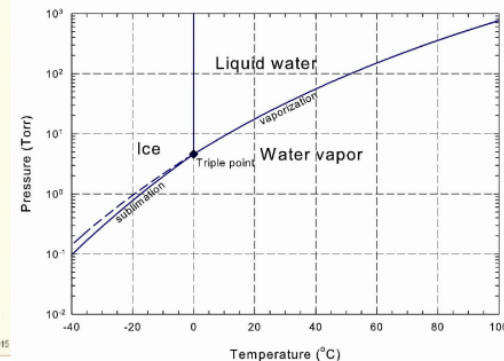


Fig. Pressure-temperature cycle of helium drying Process (Left), Pressure-Temperature phase diagram for pure water (Right)

Table 1. Multi-purpose canister (MPC) cavity drying limits

Fuel Burnup (GWd/MtU)	MPC type	MPC Heat Load (kW)	Method of Moisture Removal
All assemblies ≤ 45	MPC-37	≤ 47.05	VDS or FHD
	MPC-89	≤ 46.36	
One or more assemblies > 45	MPC-37	≤ 29.6	VDS or FHD
	MPC-89	≤ 30.0	
One or more assemblies > 45	MPC-37	≤ 47.05	FHD
	MPC-89	≤ 46.36	

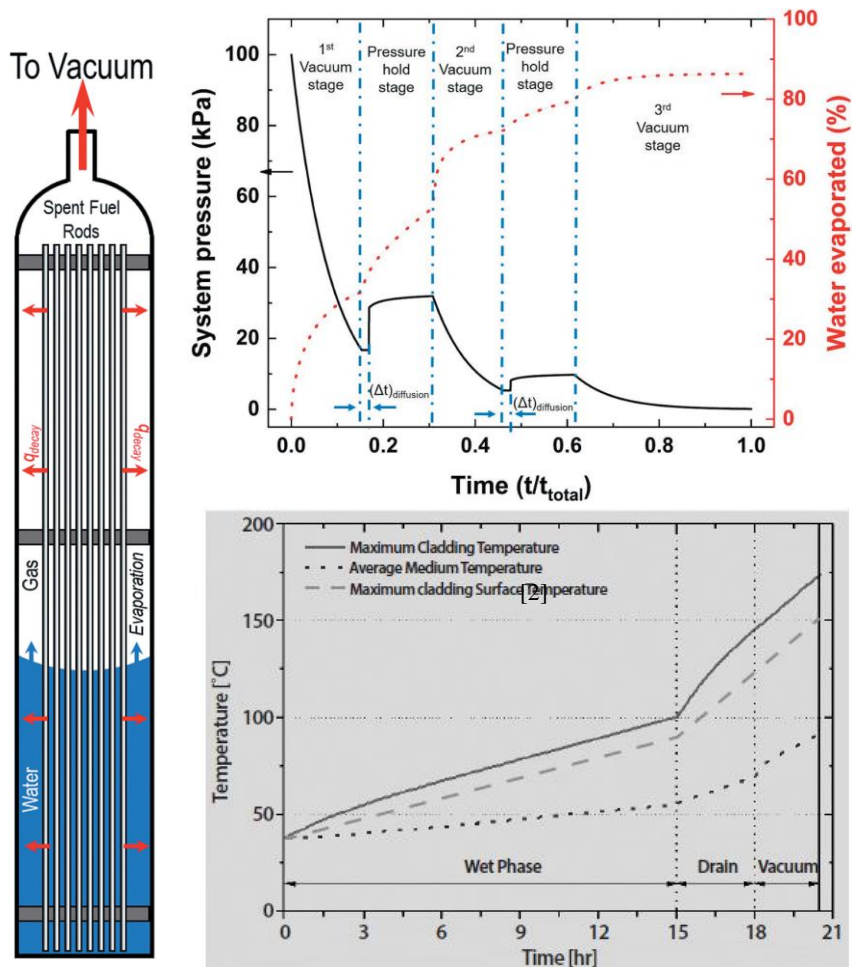
* VDS (Vacuum drying system), FHD (Forced helium dehydration system)

Chae, G. S., Shin, K. W., Park, B. M., Han, J. H., Lee, G. H., & Park, J. S. (2017). JNFCWT, 15(4), 403-409.

진공건조 방식은 헬륨강제건조에 비해 건조시간이 적게 소요되고, 시스템 구축 및 유지보수 비용이 적다는 강점을 가지고 있다.



❖ 진공건조 공정



진공건조공정 [2]

- 1) 헬륨공급 장치를 캐니스터 상부 배기 커넥터에 연결하고, 배수장치를 배수 커넥터에 연결하여 헬륨을 주입 하며 캐니스터 내부의 탈염수를 배수한다.
- 2) 배수공정 완료 후, 헬륨공급 장치 및 배수장치를 분리한다.
- 3) 진공건조장치(vacuum drying system)를 배기/배수 커넥터에 연결한 후 가동하여 캐니스터 내부의 **결빙에 주의하며** 압력을 단계적으로 3 torr까지 낮춘다.

※ 참고: 캐니스터 내부의 압력이 **3 torr가 되면 배기계통의 밸브를 잠그고 30분 동안 관찰한다.** 이때 압 력에 변화가 없으면 내부가 건조된 것이고 만 일 압력이 증가하면 건조작업을 반복하여 수 행한다[1].

- 4) 진공건조 완료 후, 진공건조장치를 분리하고 배기 커넥터에 헬륨공급 장치를 연결한다.
- 5) 헬륨 공급밸브를 개방하여 캐니스터 내부에 헬륨을 대기압으로 채운다.
- 6) 헬륨 공급 이후, 헬륨공급 장치와 캐니스터 배기/배수 커넥터를 분리한다.

Fig. Temporal evolution of system pressure and percentage of water evaporated for a multistage pressure variation [1]

Fig. Schematic of a spent nuclear fuel storage canister exposed to vacuum drying [1]

[1] Saha, Sudipta, et al. Nuclear Technology 208.3 (2022): 414-427.
[2] Baeg, Chang-Yeal, and Chun-Hyung Cho. JNFCWT 14.4 (2016): 435-443.



사용후핵연료 저장, 운반, 건조 관련 규제

사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언



저장 관련 법규^[1]

■ 10 CFR 72.122

- 10CFR.122(h): SNF 피복관은 저장기간 동안 광범위한 파손을 야기할 수 있는 열화로부터 보호되어야 함.
- 허용한계 이상의 방사선 피폭 없이 취급과 회수가 가능하게 해야 함.

→ **회수가능성(ready retrievability)**

■ SFST-ISG

- ISG-(2): 회수성 기능적 정의: 처분을 위하여 안전하게 저장상태로부터 제거하는 능력, 정상 조건 제거 이송만 포함.
- ISG-(11): 저장 전 온도제한조건 제시: (1) 적재 중 **피복관 < 400°C, 후프 응력 < 90 Mpa, 65°C 이하 열주기 < 10회.**

■ NUREG-1536

- 사고조건에서 민간의 건강과 안전에 위해가 되지 않도록 회복성 (Recovery)이 있어야함. **사고시 피복관 < 570°C.**



운반 관련 법규^[1]

■ 저장의 회수성과 운반성

- 운반성 (Transportability)는 회수성과 같은 개념은 아니나, 매우 큰 연관이 있음.
→ 가장 큰 기술적 이슈: 저장기간동안 발생가능한 열화로 인하여 피복관이 수송과정 동안의 충격으로 파손.

■ 10 CFR 71.55(d) (1)과 (2)

- 핵분열성 물질을 운반하는 용기는 정상운반조건 하에 미임계를 유지하고 그 형상이 크게 변하지 않게 설계되어야 함.

■ 저장과 운반의 차이

- 저장:** 저장 직후 연료다발 인출하여 수송용기에 장전 가능한 상태여야 함.
- 운반:** 수송 조건내 연료 형상 변화 없어야 하고 동시에 추후 작업 진행 가능함.



**회수성보다 운반성이
더 기계적으로 엄중한 조건임.**



건조 관련 법규^[2]

■ NUREG-1536 R1

- 건식저장을 위한 피복관 안전성기준

■ ASTM C1553-16

- NUREG 기준을 만족하는 온도, 압력, 열주기 제한치 조건을 만족 하에서 건조 합격 기준을 만족해야 함.

■ 건조 합격 요건

- 진공건조
→ 사용후핵연료 다발을 수용하는 캐니스터 내부가 격리된 상태, 즉 진공펌프가 작동 정지한 이후 **30 분 동안 3torr** 압력 이하를 만족 해야함.
- 헬륨강제순환
→ 진공 건조와 같이 3torr 압력 하에 30분 유지 조건을 공유하되, HI-STAR 모델의 경우 이와 상응하는 조건으로 제습장치 **출구 온도가 30분 이상 -6.1°C 유지 혹은 출구 이슬점 온도 5°C 이하를 제시.**

Lee, S., & Yook, D. (2017). JNFCWT, 15(2), 135-149.
Chae, G. S., Shin, K. W., Park, B. M., Han, J. H., Lee, G. H., & Park, J. S. (2017). JNFCWT, 15(4), 403-409.



진공건조 관련 리뷰

About Review on Vacuum drying

- 잔류수 측정 사례 비교
- 국가별 사용후핵연료 건조방식 비교
- 을 최대화할 수 있는 구간
- 국가별 사용후핵연료 건조방식 비교
- 증발량을 최대화할 수 있는 구간

2



잔류수 측정 사례 비교

사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

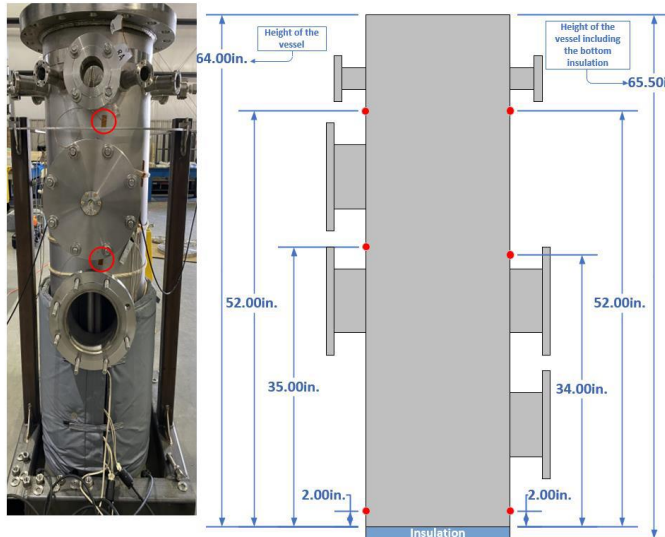
결론 및 제언

❖ 주요 연구 프로젝트와 잔류수 직접 측정 시도

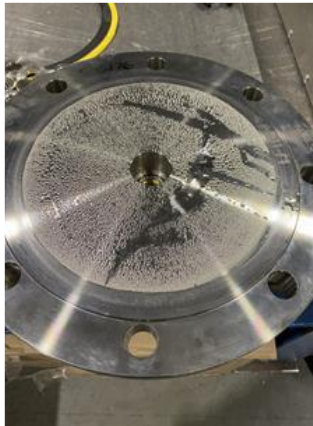
연구 / 사례	건조 방식 및 연료	잔류 수분 결과	측정 기법
고연소도 데모 (미국, 2014)	고연소도 PWR 연료에 표준 진공 건조 (지르칼로이 피복)	<ul style="list-style-type: none"> 건조 12일 후 수증기 약 17,400 ppmv (~0.1L) 검출 - 예상보다 10배 많음. 액상수는 없음 (탈착/방사선분해 기인) 	헬륨 백필 가스 시료 채취 후 질량분석기 및 감마분광분석
INL 연구로 연료 건조 시험 (2010년대)	알루미늄 합금 연구로 연료 진공 건조 (저열)	<ul style="list-style-type: none"> 진공 격리 후 압력 재상승 확인 - 극히 낮은 수분(수 g 미만)으로 완전한 재상승률 달성 	압력 상승 모니터링 (‘감속률’ 기준)
GNS Quiver 손상 연료 (독일, 2018)	손상된 PWR 연료봉이 포함된 Quiver 캐니스터에 열보조 진공 건조	<ul style="list-style-type: none"> 자유 수 없음, 6일 건조로 압력 유지 기준 충족. 실제 연료의 압력 곡선이 모사 시험과 일치 	여러 개의 고정밀 압력계 사용, 장시간 안정 저압 유지로 확인
Holtec FHD 운전 사례 (미국, ~2000)	PWR 연료(일부 누설봉 포함)에 FHD 적용 (Trojan 발전소)	<ul style="list-style-type: none"> 진공 건조가 어려웠던 누설 연료봉 내부의 수분도 제거. NRC 건조 기준 모두 충족 	헬륨 루프 내 압력/이슬점 모니터링
Sandia 소형 시험 (2020)	모의 캐니스터에서 제어된 수분량(100g)으로 실험실 진공 건조	<ul style="list-style-type: none"> 약 4시간 내 대부분 수분 제거. 최종적으로 화학흡착 상태의 수분만 남음. 상변화 중 약간의 압력 변동 발생 	수분 측정용 질량분석기, 이슬점 센서, 유량계 및 트랩으로 직접 수분 질량 측정
Hanford MCO 건조 (1998)	열화된 금속 우라늄 연료 (N-Reactor) 진공 건조	<ul style="list-style-type: none"> 95° C 이상 진공 건조 시 자유 수 최소화 예측. 실제로 응축수 수집을 통해 확인. 건조 후 점화나 부식 문제 없음 	수산화화물의 열중량 분석(TGA) + 트랩 수분 무게 측정



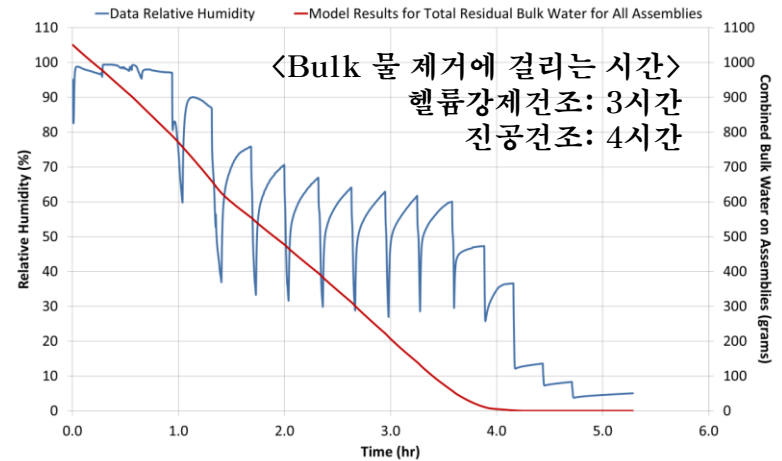
Experiment Report (No. INL/EXT-21-62416). Idaho National Lab.(INL)



Viewpoint에서 관측된 Bulk 물

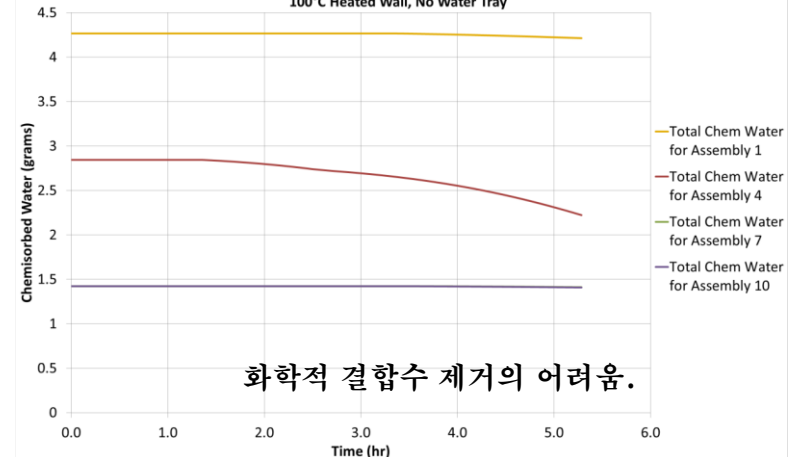


Experimental Relative Humidity Compared to Model Results for Residual Bulk Water for All 10 Assemblies (Vacuum Drying Test 8)



- (1) 해당 프로젝트는 알루미늄 피복 사용후핵연료(ASNF)의 장기 건식 저장 준비를 위해 강제 가스 및 진공 건조 공정의 상대적 효과를 평가하기 위해 수행됨.
- (2) Bulk 물 (105ml)의 대부분이 헬륨강제건조(FHD)에서는 3시간, 진공 건조에서는 4시간 만에 제거됨을 확인함.
- (3) 건조 전후 질량손실 열중량분석(TGA): 화학적 결합수 정량화
- (4) SEM 이미지 분석: 화학 흡착수 제거를 시각적으로 확인
- (5) 육안상의 물이 모두 제거되어도 View point에 bulk 물이 남아 있을 수 있음.

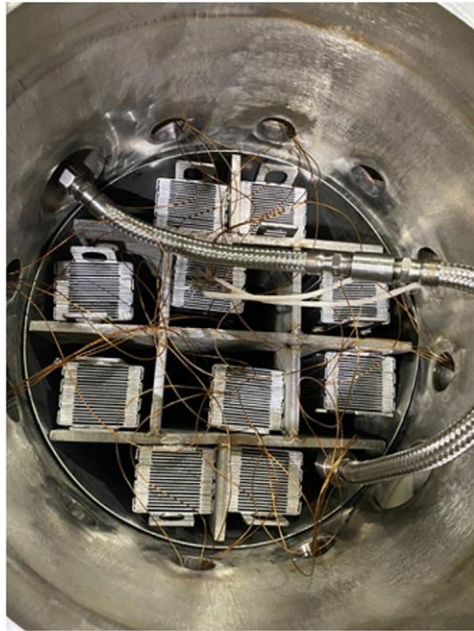
Residual Chemisorbed Water Remaining
Model Results for Vacuum Drying Test 8: 15min Pressure Sequence Holds, 100°C Heated Wall, No Water Tray





Journal of Nuclear Materials 577 (2023): 154299 (INL, SRNL).

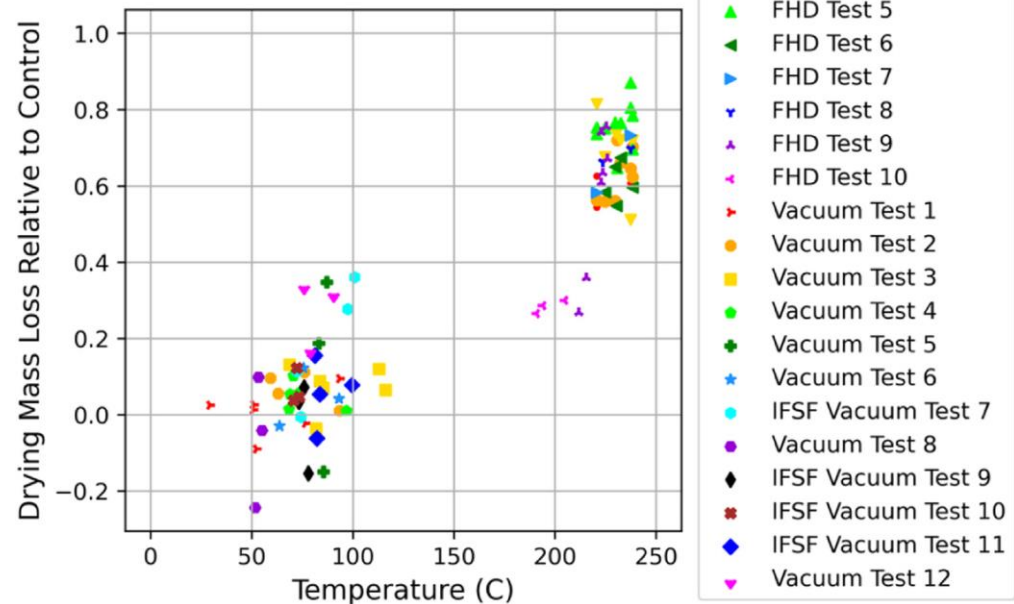
Task 5 – oxide layer response to drying: Aluminum clad spent nuclear fuel (ASNF)



소규모(즉, 높이의 1/3 크기) 건식 저장 캐니스터

Fig. 7. Mock ATR assemblies loaded into the basket within the mock canister, with a siphon tube connected to a canister vent port.

Fig. 15. TGA results representing the mass loss of dried samples (using FHD, or vacuum drying according to industry standards or INL's CPP-603s IFSF procedures)



(1) ASNF 건식 저장 조건화의 효율성을 평가하고, 고온 건조가 (산소)하이드록사이드 층의 특성과 거동에 미치는 최종적인 영향을 조사하기 위한 실험이 수행 (조사에 사용된 방법에는 진공 건조와 FHD가 포함)

(2) Bulk 물 제거: FHD와 진공 건조 실험을 다양한 열 조건에서 수행한 결과, 건조 과정이 시작된 후 각각 3~4시간 내 제거

(3) 화학 흡착수 제거: FHD는 화학흡착수의 상당 부분을 제거하는 등 더 우수, 가장 많이 방출되는 온도: 200~300°C 사이

국가별 사용후핵연료 건조방식 비교

사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언

❖ 주요 국가별 사용후핵연료 건조 연구 사례

국가/지역	일반적인 건조 방식	주요 사례 또는 프로젝트	건조 기준
미국	표준 진공 건조; 일부 부지에서는 강제 헬륨 건조 (FHD) 사용	1986년 이후 2000개 이상 캐스크 적재. 손상/부식 연료에 진공 적용 (Hanford K-Basin, TMI-2), 고연소도 데모 캐스크 사용	3 Torr 이하, 시간당 압력 상승 <~1 Torr. ASTM C1553 가이드 존재. NRC는 '사실상 건조' 상태 요구
독일	보조 가열과 함께 진공 건조, 철저함을 위해 긴 건조 시간 허용	1995년 이후 모든 SNF를 이중목적 캐스크에 저장. 손상 연료용 GNS Quiver 시스템 적용(2018-2020)	엄격한 압력 유지 시험 (mbar 단위), 배출구 이슬점 측정. 내부 이슬점 -20 ° C 이하 목표
영국	Sizewell B에서 PWR 연료에 FHD 사용 (진공 건조는 과거에 없음)	Sizewell B(2017~)에서 FHD로 건조. 구형 연료(AGR/Magnox)는 습식 유지 또는 재처리	FHD 진행 시 수분이 사실상 제거될 때까지. 구체적인 정량 기준은 공개되지 않음
캐나다	CANDU 연료에 진공 건조 사용, 초기에는 온풍 블로워다운 병행	1990년대부터 모든 CANDU 발전소에 현장 저장소. 수십만 다발 건조	내부 이슬점 -40 ° C 이하 (약 1000 ppmv 이하 수분). 육안상 물 없음
프랑스	대부분 재처리, 이론적 건조 방식은 진공 건조 (보완 기술로 getter 개발)	거의 모든 연료 재처리됨. 일본 포함 전 세계에 진공 건조 기술 제공. 제한된 시간 내 건조 위해 getter 개발	IAEA 지침에 따라 심각한 손상/압력 상승 방지를 위한 수분 제거. 미국/유럽 수준 기준과 유사할 것으로 추정
일본	진공 건조 후 헬륨 백필 (해외 공급업체 기술 도입)	2020년 Mutsu 중간 저장소 운영 시작 (AREVA TN 캐스크), 소량의 오래된 연료는 현장 보관	보수적 기준: 일부 보고서에 따르면 수분 농도 <30,000 ppmv 또는 상대습도 <50%
러시아	혼합 방식: 초기에는 가열 가스 건조, 최근에는 FHD 및 진공 병행	Chernobyl ISF-2(2020): FHD로 RBMK 연료 약 21,000다발 건조. 기타 부지에서는 VVER 연료 진공 건조	'비결합수' 제거 요구. 서방과 유사한 압력감소 기준 사용 가능성, 수소 발생 방지 목적



크러드 물리적 흡착 & 화학적 결합수 제거

- There are three primary forms of water that could remain within the canister following drying: free or unbound bulk water, physisorbed water, and chemisorbed water.
- 400°C for commercial reactor SNF (250°C for ASNF)
- hoop stress would not exceed 90 MPa.
- Important considerations in drying include characteristics of the fuel assemblies and canister internal components, such as their surface areas, which can hold physisorbed and chemisorbed water.

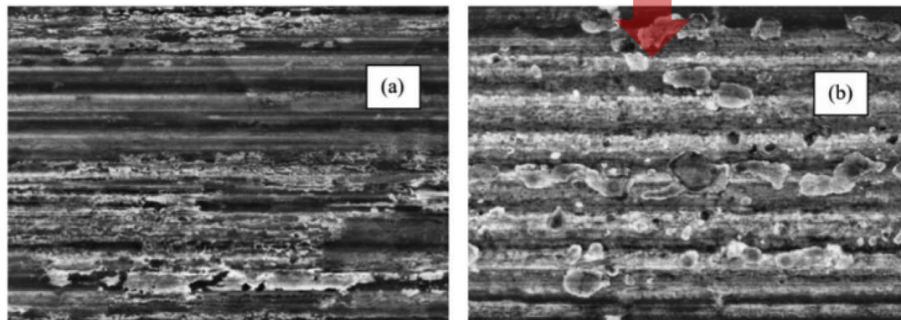


Fig. 2. Examples of observed crud: (a) is noted as a thin peeling crud and (b) is a heavier flaky deposit on top of a thick oxide

결함핵연료 내부 잔류수 제거

- ~5,400 LWR fuel rods that developed leaks during reactor operation of the >19 million rods operated.
- ~4,200 remain in the spent fuel pool,
- ~1,200 are in dry storage canisters.

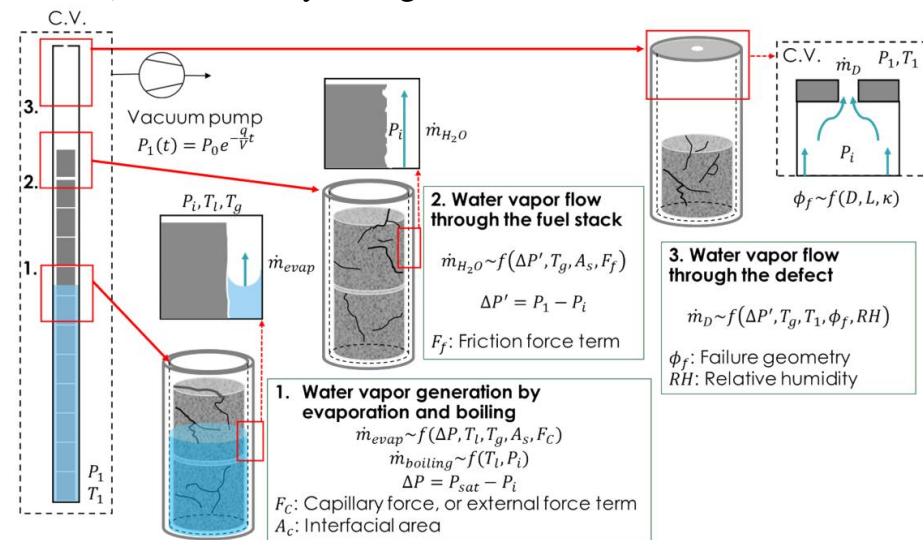


Figure 1 A schematic of the drying phenomena that occur during vacuum drying of a failed fuel rod.

- reactor-induced breaches (~1-mm holes): small release (<1 g)
- drill holes of 1 mm or 2.4 mm: small release (<1 g)
- 5.5 mol → break (breached fuel)

최신의 사용후핵연료 건조 관련 연구 중에는 크러드 내 물리적 흡착수, 화학적 결합수 제거 및 결함핵연료 건조 관련된 연구가 많음.



KAERI 진공건조시험

About Vacuum drying test at KAERI

- 진공건조장비 및 실험방법
- 잔류수 증발효율 증진 및 건조방법 최적화
- 배수홀 모사구조에서의 진공건조 시험
- 모의 손상핵연료 진공건조 시험

3

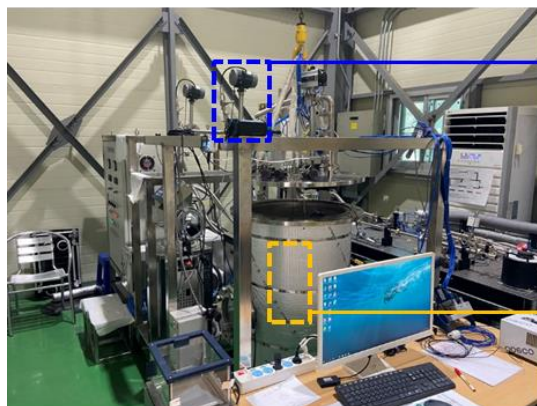


❖ 랩스케일 진공건조설비 설계 및 제작

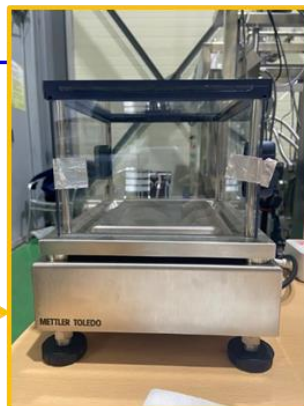
- **Canister height:** 0.5m, 1m, **Beaker capacity:** 600 mL, **TC interval:** 4.5 mm
- **Initial water height:** 1.8 cm, **Inner diameter of the beaker:** 88 mm
- **Vacuum pump capacity:** 100, 200, 400, 600 L/min
- **Initial conditions of water:** 40°C, 100g, • **Evaporation area:** 6082.12 mm²
- **Vacuum stage presence:** presence or absence of stages, stage holding time
- Other physical properties used in calculations are based on NIST data

직접적인 잔류수 측정: 정밀 질량 저울을 통한 측정

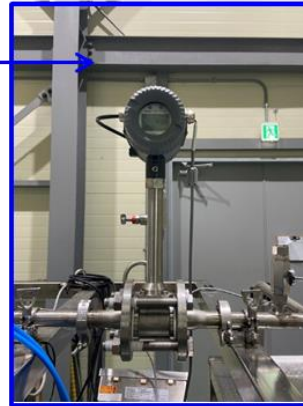
간접적인 잔류수 추정: 초기 질량 대비 배출되는 유량을 고려한 잔류수 정량화 방안



〈진공건조 시험 측정 장비들 모습〉



〈정밀 질량 저울〉



〈스팀 볼텍스 유량계〉

잔류수를 정량화 (정밀저울 및 이슬점 등)할 수 있는 진공건조 설비를 제작하고 다양한 펌프 용량에 따른 잔류수 증발을 분석함.



잔류수 증발효율 증진 및 건조방법 최적화

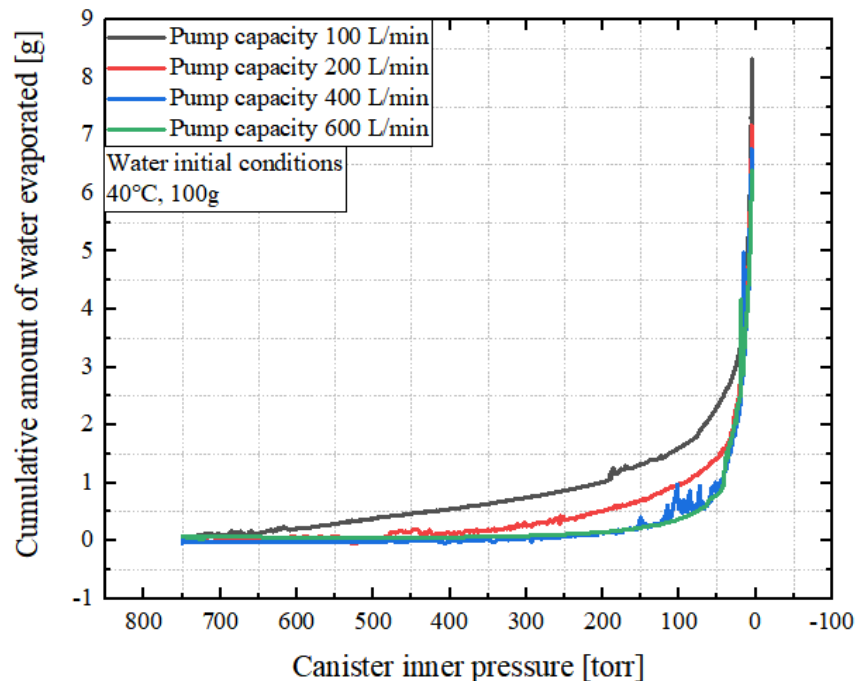
사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

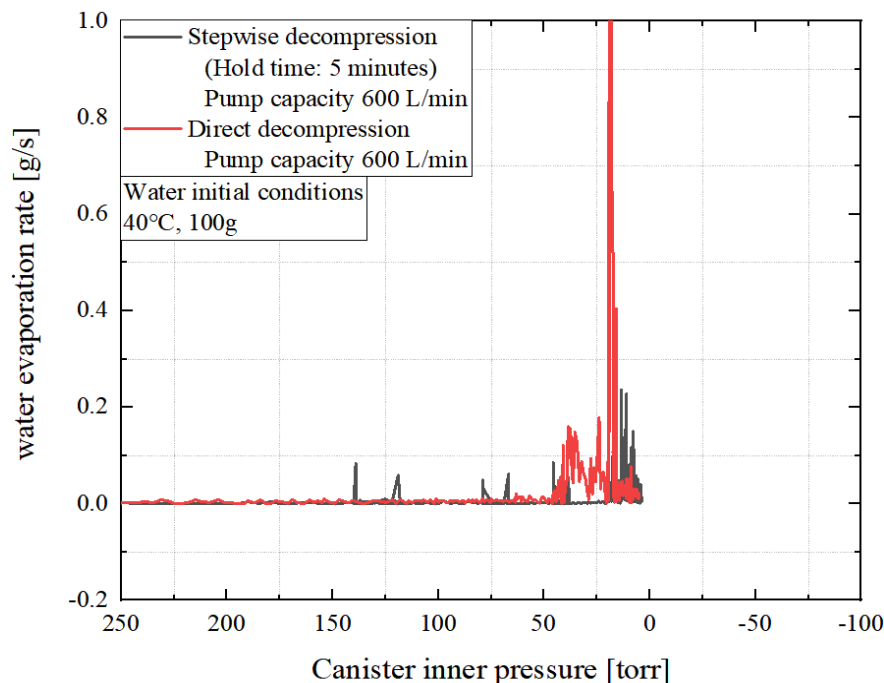
KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언

Direct 감압상태에서의 누적 잔류수 증발량 변화



단계적 감압상태에서의 누적 물 증발량 변화



펌프 용량에 따른 잔류수 누적 증발량 분석

- 모든 실험 케이스에서 **40-50 torr 압력 조건에서 급격한 물의 증발**이 관측됨.
- 이는 잔류수가 상변화경계선을 지날 때임.

진공방식에 따른 잔류수 누적 증발량 분석

- Direct 감압방식과 단계적 감압 방식의 누적 잔류수를 평가했을 때, 40-50 torr 압력 조건에서 급격한 증발이 관측됨.
- 홀드타임 동안의 증발은 전체 증발량에 비해 크지 않음.



잔류수 증발효율 증진 및 건조방법 최적화 (2)

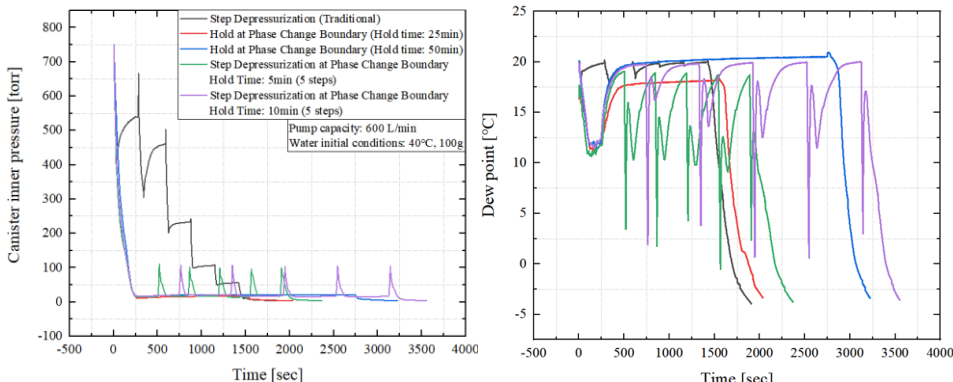
사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

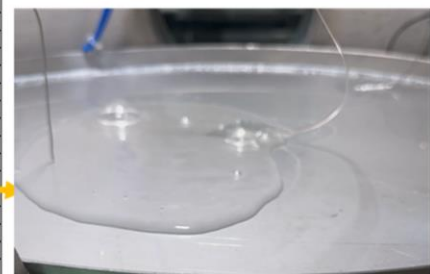
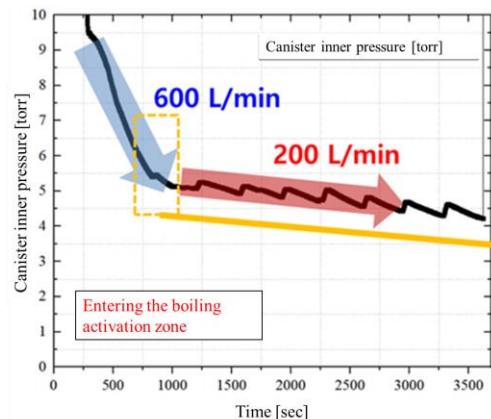
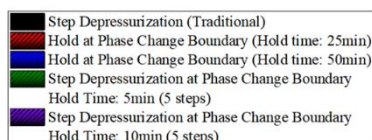
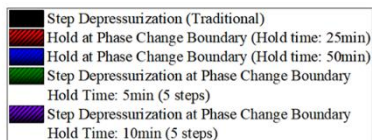
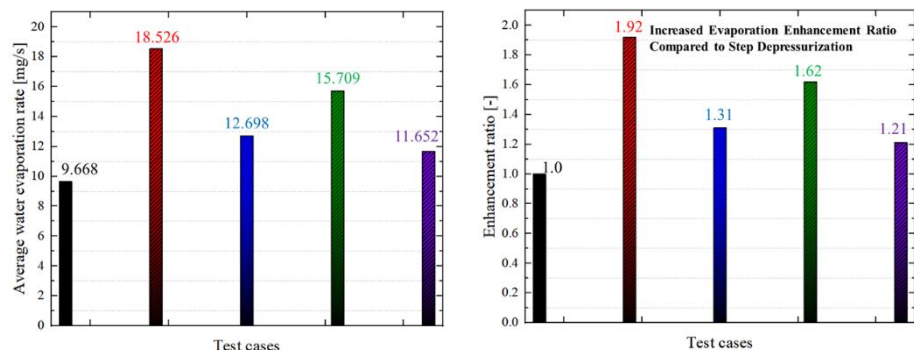
KAERI 진공건조 시험

결과 및 제언

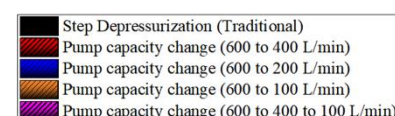
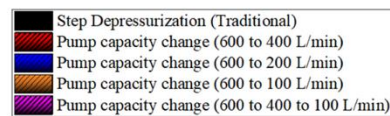
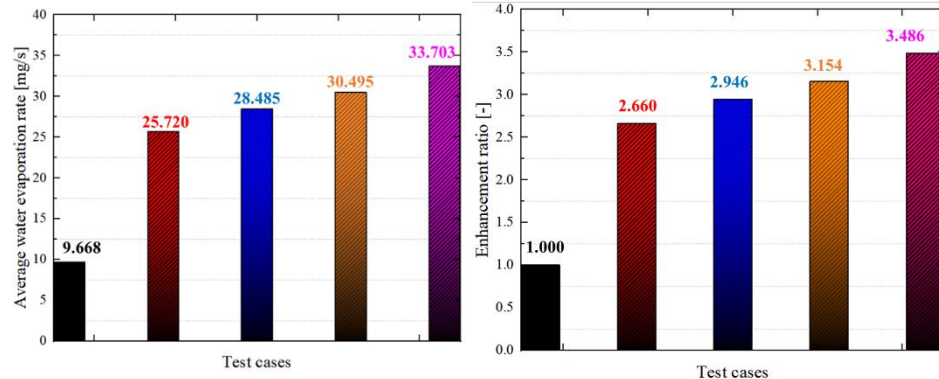
- 상변화경계선에서 급격한 잔류수 증발이 있음을 실험적으로 확인하고 이를 극대화 함.
- 본 진공건조방식 최적화를 통해 건조 시간을 대폭 줄일 수 있을 것으로 기대함.
- 실제 산업에서 작업자의 피로량과 작업시간을 고려하여 하루 이상의 장시간의 작업진행이 힘들으나, 본 방식이 산업에 적용된다면 이를 해결할 수 있음.



홀드타임 조율을 통한 증발효율 증진: 최대 1.92배



펌프성능 조율을 통한 증발효율 증진: 최대 3.49배





배수홀 모사구조에서의 진공건조 시험

사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언

❖ 배수홀 모사구조에서의 진공건조시험

- 캐니스터 바닥의 배수홀 (10mm 높이, 100mm 직경)을 모사한 구조를 설치 후 진공건조 시험진행.
- 해당 구조내에 존재할 수 있는 최대 잔류수 양인 **77.9g**을 개발된 방식으로 완전건조 시키는데 성공.



	총 시험 시간 [sec.]	펌프용량 [Liter/min]		질량 [g]	효율 [g/sec.]	증진 비율 (전통 방식 대비)
77.9g 배수관 모사 시험	1811	600	변경 없음.	51.46	28.41524	2.93
	4240	600	100 (at 10 torr)	60.29	14.21934	1.47



모의 손상핵연료 진공건조 시험

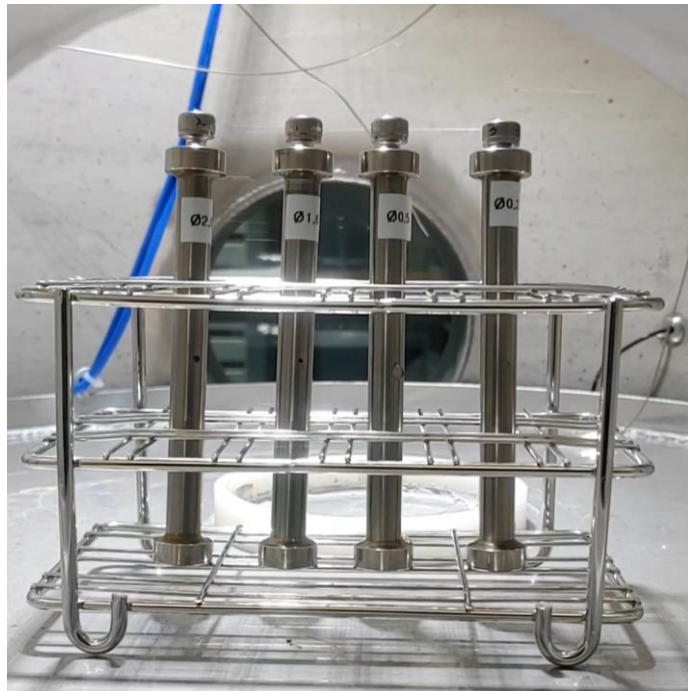
사용후핵연료 건조

진공건조 관련 리뷰

KAERI 진공건조 시험

결론 및 제언

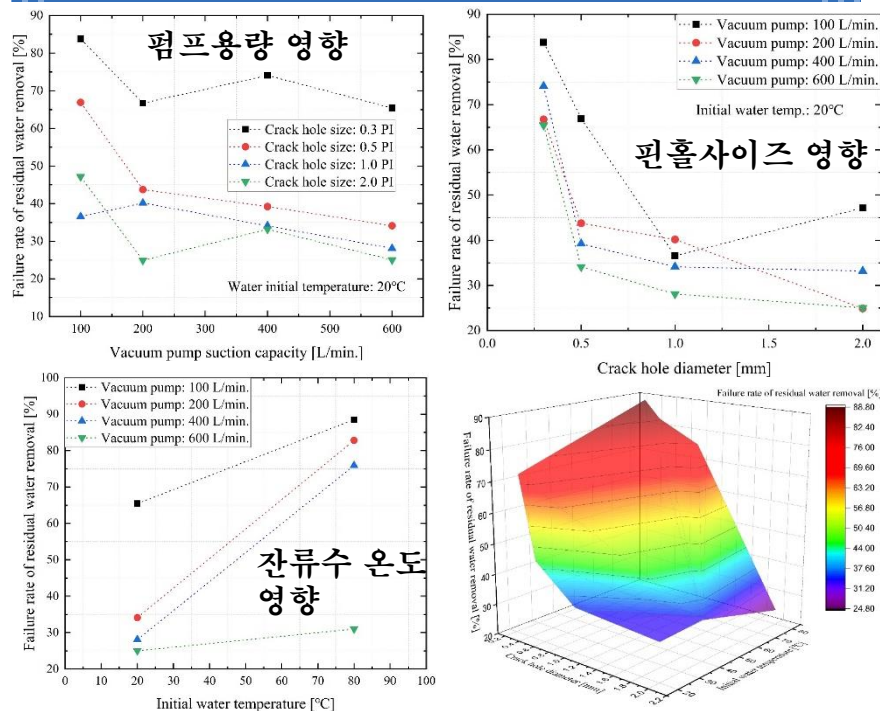
핀홀사이즈 별 배출되는 물의 양 차이



모의손상핵연료 (PLUS7) 진공건조시험

- 2g의 물을 넣은 이후 진공건조완료 조건 (3torr 30분)을 만족시킬 때 까지 건조를 진행함.
- 핀홀사이즈가 클수록 더 많은 물을 상변화경계선에서 배출함.

주요변수 영향도 분석



펌프용량, 핀홀사이즈, 잔류수 온도가 진공건조 이후 남아있는 잔류수에 미치는 영향분석

- 펌프용량이 높을 수록 건조 실패율이 낮아짐.
- 핀홀사이즈이 클수록 건조 실패율이 낮아짐
- 잔류수 온도가 높을 수록 건조 실패율이 증가함.



결론 및 제언

About Conclusion and Suggestions

- 요약 및 결론

4



결론 및 요약

진공건조 관련 리뷰

- 사용후핵연료 건조의 중요성
 - 최신의 미국 DEMO 연구: **예상치 10배 관측**
- 연구 프로젝트와 잔류수 직접 측정 시도
 - 200~300℃에서 화학적 결합수 제거효율증진
- 국가별 사용후핵연료 건조 연구 사례 분석

KAERI 진공건조 시험

- 잔류수 증발효율 증진 및 건조방법 최적화
 - 기존대비 건조 효율 **최대 3.49배** 증진 달성
- 배수홀 모사구조에서의 진공건조 시험
 - 배수홀 내부 **77.9g의 물 완전건조 성공**
- 향후 KAERI 진공건조시험 계획
 - **붕괴열 및 내부구조물 모사**된 건조시험 예정
 - 파일럿 스케일 및 실규모 진공건조 시험 예정

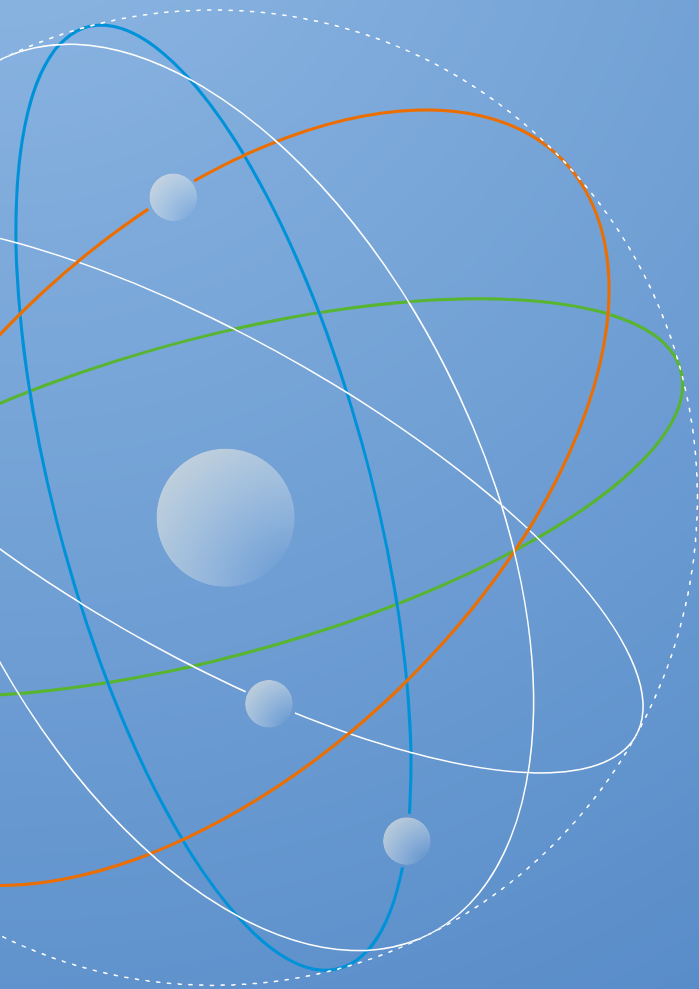
제언

실제 사용후핵연료를 모사한 진공건조

- **붕괴열, 내부구조물 등이 모사된 환경**에서의 진공건조가 필요함.
 - 내부 구조물 사이에 물이 갇히는 상황이 발생할 수 있음.
 - 붕괴열의 정도에 따라 진공건조 특성이 달라질 것이 예상됨.
- 손상핵연료 진공건조 시 핵연료 내부에 물이 남아있어도 완료조건을 충족할 우려가 있음. → 주의 필요

진공건조 완료 이후 잔류수 정밀 정량화

- 진공건조요건 만족 이후 캐니스터 내부에 있는 잔류수를 **직접 측정하여 정량화** 필요.
- 잔류수가 핵연료 열화 등에 미치는 영향을 상세 분석하고 이를 바탕으로 규제 기준을 검토(혹은 마련)할 필요가 있음.



더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원



감사합니다.



한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute

Funding: This work was supported by the Institute for Korea Spent Nuclear Fuel (iKSNF) and National Research Foundation of Korea (NRF) grant funded by the Korea government (Ministry of Science and ICT, MSIT) (No. 2021M2E1A1085226).