

UNIST 핵연료실험실 구축 및 연구 현황

안 상준*

울산과학기술원 | 원자력공학과 | 핵연료 재료 연구실

2019. 10. 23.

*UNIST RAdioactive NUclear Materials (URANUM) Laboratory

울산과학기술원 원자력공학과 URANUM 실험실 소개



UNIST RAdioactive NUclear Materials (**URANUM**) Laboratory

The URANUM is an experimental lab dedicated to nuclear fuel engineering and radiation materials science at Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST), Department of Nuclear Engineering. We are mainly interested in metallurgy, thermophysics, and irradiation behavior of uranium alloys and compounds as nuclear fuel in and outside of nuclear reactors. Some other materials that have to suffer radiation damage are also of our interest, such as zirconium alloys, stainless steels, and Al-B4C metal matrix composite (MMC) neutron absorbers.

- ❖ 핵연료 공학 및 방사선 재료 과학 연구 수행
 - 주로 실험, 간혹 코드.
- ❖ 우라늄 합금 및 세라믹
 - 제조공정 개발;
 - 미세구조 관찰;
 - 열물성 측정;
 - 상평형도 검증;
 - 이온빔 조사 후 시험
- ❖ 피복관 및 중성자흡수재
 - 조사저항성
 - 재료양립성
 - 조사가속부식 특성

우라늄/토륨 사용 허가 획득 및 우라늄 도입 (2015 ~ 2018)

❖ 2015. 2. 26. UNIST 핵연료 재료 연구실(NFL) 설립

❖ 2016

- 11. 16. UNIST 2차 BTL 준공 및 실험실 지급 (1년 9개월 경과)
- 11. 19. KINS에 핵연료물질 사용허가 신청

❖ 2017

- 대략 5차에 걸친 신청 서류 수정·보완
 - 허공에 흩날리는 감손우라늄 4 kg/년(+토륨 3 kg/년)의 임계도 계산 등

❖ 2018

- 3. 8. 원안위로부터 핵연료물질사용등 허가 획득 (미통보)
- 4. 9. 핵연료물질사용등 허가 획득 사실 인지 (전자민원)
 - Industrial Package- I (IP-1) 용기 제작 및 관련 행정 처리에 4개월 소요
- 8. 10. KAERI에서 감손우라늄 3 kg 도입 (총 3년 6개월 경과)
- 10. 22. 핵연료 제조 및 우라늄 취급 실험 안전교육(Dr. Luis Ortega from Texas A&M)

HR-TEM 및 FIB-SEM 사용을 위한 수정 허가 신청 중

❖ 2018년 최초 허가의 문제점

- “...전자현미경 사용시설(연구장비 공용시설중 1곳 지정)에 한한다”
 - 핵연료 제조, 물성 측정, 성능 실험에 필요한 공용 시설 내 장비 일체(TEM, FIB, SEM, XRD, AFM, Dilatometer 등)에 대해 사용 허가를 신청하였으나, “전자현미경” 또는 “전자현미경 시편 제작 장비” 중 “1가지”만 사용 가능하도록 허가됨.
 - FIB를 사용하여 전자현미경 시편을 제작하면 전자현미경을 사용할 수 없고, TEM을 사용하려면 전자현미경 시편을 제작할 수 없는 상황.
 - 수 차례 유선상으로 “사실상 공용장비 사용을 불허한 조건”이라고 설명하였으나...
 - 가능성: 1) TEM & SEM 차이; 2) TEM시편 제작 시 시편 제작 장치 필요성; 3) 연구 필요성.

❖ 2019년 10월 현재

- 투과전자현미경 및 ‘전용 시편 제작 장비’ 동시 사용을 위한 수정 허가 신청 진행 중
 - 별도 안전관리자 선임 문제로 인해 수정 허가 신청 지연

우라늄 합금 및 세라믹 이온빔 조사 실험 여건 구축

❖ 다양한 핵연료 재료의 방사선조사손상 특성 연구 필요

- 대학에서 연구용 원자로 사용 조사후실험(PIE) 수행 불가능 (연구비 부족)
- **KAERI-KOMAC 금속/기체/탄뎀 이온가속기 사용 실험이 현실적인 대안**
 - (신고사항) 연간 300g 미만 우라늄 사용 (계량관리 필수)
 - 협의를 거쳐, 현재 금속/기체 가속기용 우라늄 이온조사 전용챔버 제작 중 (탄뎀은 미정)
 - **시편 온도 최대 700 °C; 기계 인장 최대 100 MPa (3점 굽힘 방식)**
 - 최대 핵연료 성능, 최소 핵연료 재료 물성 및 조사 특성 연구에는 충분할 것(= 대학의 역할?)

❖ FIB-SEM, HR-TEM/EDS, *in-situ* heater & nano(pico)-indenter 필요성

- 방사선 조사로 인한 재료 나노구조 및 성분 변화 추적 (with HT-XRD)
- 원자로 운전 환경 (및 사용후핵연료 저장 환경) 재료변성 (가속) 모사 필요
 - *In-situ* heater: 고온 상변이 및 조사손상구조 관측
 - Nano(pico)-indenter: 조사 경화에 따른 기계물성 변화 측정 필요
 - 시편 전체 조사가 어려운 이온빔 조사 실험 특성 상, 아마도 유일하게 측정 가능한 기계 물성이 Nano-hardness일 것. 향후 나노 경도와 기타 기계물성 관계식 연구 가능성.

핵물질 전용 챔버 스펙 및 사용 계획

❖ 한국원자력연구원-양성자가속기연구센터 내 기체/금속 이온빔 장치에 설치

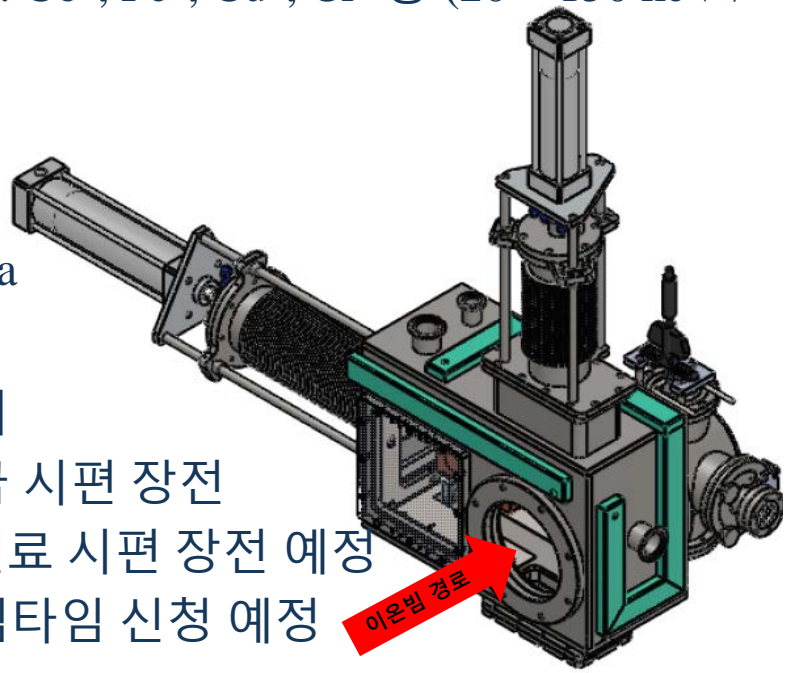
- 조사가능 기체 이온: H^+ , He^+ , N^+ , O^+ , Kr^+ , Xe^+ 등 (20 ~ 200 keV / ~ 5 mA)
- 조사가능 금속 이온: Co^+ , Fe^+ , Cu^+ , Cr^+ 등 (20 ~ 150 keV / ~ 1 mA)

❖ 챔버 스펙

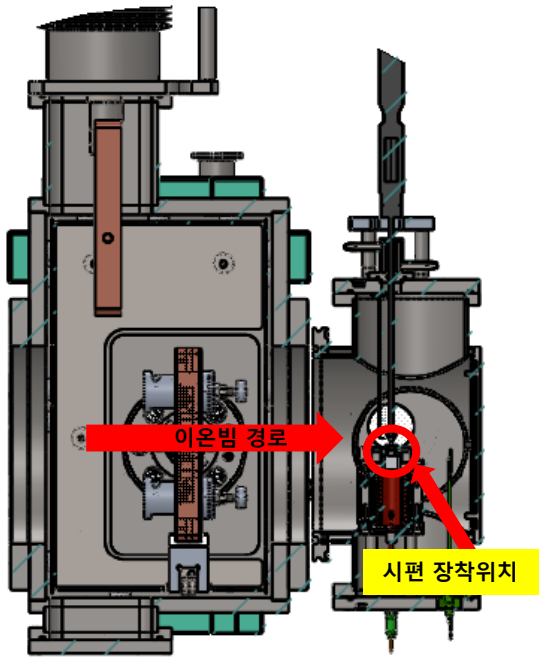
- 제작 업체: NVS
- 최고 온도: 700 °C
- 최대 응력: ~100 Mpa

❖ 챔버 사용 계획

- 11월 중순 예비 설치
- 12월 중순 Zr-U 합금 시편 장전
- UN, U_3Si_2 등의 핵연료 시편 장전 예정
- 2020년 모든 주기 빔타임 신청 예정



이온 챔버 전체 조감도



시편 장착부 단면

우라늄 실험실 설립 시 필수 요소: 인내심, 그리고...

❖ 우라늄 사용 허가 및 반입 요건

- 독립 실험실 (벽체 설치 비용)
 - (개방형) 실험실 공간 공유 불가 + 완충 공간 (필수 X)
- 실험실 별도 배기 (공사 비용)
 - + RI필터 (매년 교체 비용 발생)
- 별도 폐기물 보관소 (공간 소요)
 - + 원자력환경공단 지정 용기(후일 이송 및 인계를 위함)
- 별도 안전관리자 선임 (인건비 부담)
 - 우라늄 사용 시설의 경우 여타 동위원소 사용 실험실과 중복 임명 불허 (KINS 방침?)
 - + 최근 관련법 개정에 따라 40일 이상 출장·휴가 시행 불가
- 우라늄 운송 용기 (IP-1)
 - + 운송 차량 (방사능 마크 스티커로 해결)

❖ 전용 장비 (공용 장비 사용 사실상 불허)

- SEM/EDS; DSC-TGA; HT-LFA; HT-XRD; SPS/CS/MWS/Arc-melter; GB w/ furnaces.

URANUM 실험실 전경



Waste Storage



Radioactive Hood



HT-XRD



Conventional Sinter



Spark Plasma Sinter

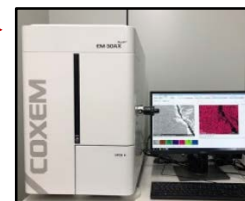
Arc Furnace



- 100 m²; 별도 배기; 오물방지도장; 경보기(H₂ / CO); etc.
- 핵연료 실험실

- » Rad hood
- » Non-rad hood
- » GB w/ 2 furnaces
- » SPS; MWS; CS.
- » Arc furnace
- » 2 Metallurgy sets
- » O/M
- » XRD (1500 °C)
- » Waste Storage

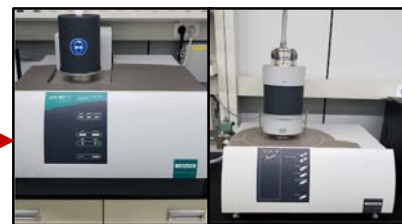
Hydraulic Press



SEM/EDS



GB with 2 furnaces



HT-LFA

DSC/TGA

- 항온항습실 (폐지)
- » LFA (1250 °C)
- » DSC/TGA
- » SEM/EDS
- Buffer zone
- » OSL
- » Manuals; PC; etc.

URANUM 실험실 주요 실험 역량

합금 핵연료(Zr-U) 및 세라믹 분말 제조 및 열처리



High T. Tube furnace



Glove Box - Tube furnace

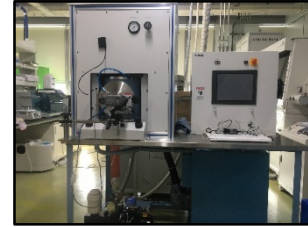


Arc Melter

세라믹 (복합) 핵연료 (UO_2 , U_3Si_2 , UN 등) 제조



Hot isostatic press



Spark Plasma Sintering System



Cold press (10t)

열물성 측정 및 상평형도 검증

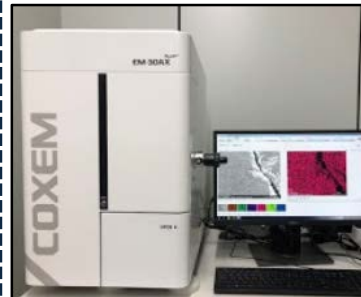


DSC-TGA



Laser Flash Analyzer

미세조직 관찰 및 결정구조 특정



SEM-EDS



High T. XRD



Optical Microscope

국내·외 사용자 시설 활용

❖ UNIST Central Research Facility (UCRF)

- FIB-SEM + HR-TEM/EDS (규제기관 승인 대기 중), Dilatometer, AFM, etc.

❖ KAERI-KOMAC

- 최대 200 keV, 700 °C, 100 MPa 에서 기체/금속 이온빔 조사 실험 (전용 챔버 사용)



Metal ion-beam

Gas-ion beam

Vertical ion beam

One of seven Texas A&M accelerators



❖ Texas A&M, Dr. Lin Shao 교수 실험실 (NSUF)

- 일반 재료 고온 응력 하 조사 실험 시 활용

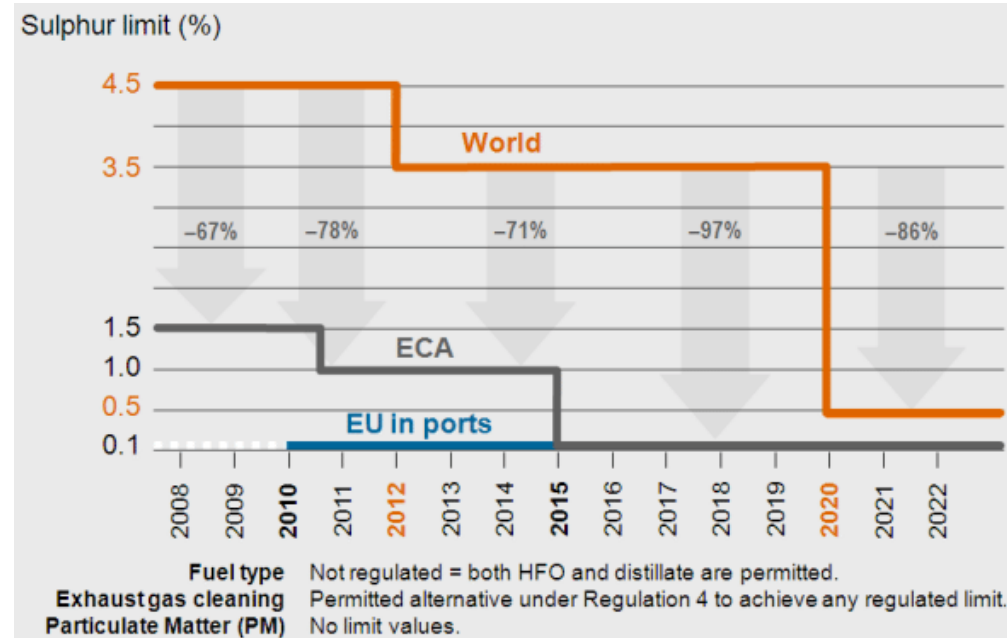
❖ Nuclear Science User Facility (NSUF)

- 핵물질 해외 배송 실험
 - Dr. Rory Kennedy (NSUF director)와 논의 → 시기상조 결론 / 추후 추진 가능성.

(선박용) 고밀도 사고저항성 핵연료 (Zr-lean δ -UZr_{2-x} fuel)

❖ 연구 배경

- 디젤 엔진 사용 선박에 의한 심각한 환경오염
 - 선박에 의한 이산화탄소 및 황산화물 방출량은 대한민국 총 방출량의 16배 가량
- 국제해사기구(IMO)는 2020년부터 황화물 배출 규제 기준치 강화 예정 (7배)
 - LNG 선박 수주 증가 원인 중 하나.
- 느린 디젤 선박 (Max 40 km/h)
- 원자력 추진 선박 보급 가능성(?)
 - 자율운전 원자로 개발 필수
 - 원자로 운전 인원 인건비 절감
- 러시아 잠수함 사고 경험
 - LOCA로 인한 UO₂ 핵연료 용융
 - 이후 금속핵연료 사용 (Zr-U)
- 핵비확산 (RERTR → M³)
 - 저농축우라늄 연료 사용 필수
 - 연료 내 Zr 함량 감소 필요



<https://gcaptain.com/international-chamber-shipping/>

고밀도 사고저항성 핵연료 (계속)

❖ 연구 목표

- Zr함량 감소에 따른 Zr-U핵연료 조사저항성(치수안정성) 및 부식저항성 감소 평가
- xZr-U($x = 40 \sim 65$ wt%Zr) 합금 열전도도/상변이 온도 등 열물성 DB 구축 및 검증
- Zr-U 합금 핵연료 성능 및 안전성 평가

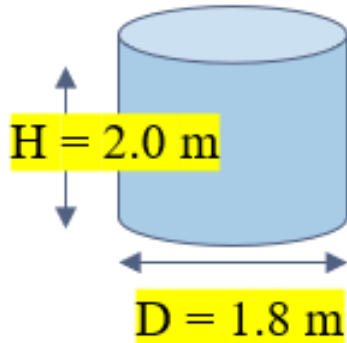
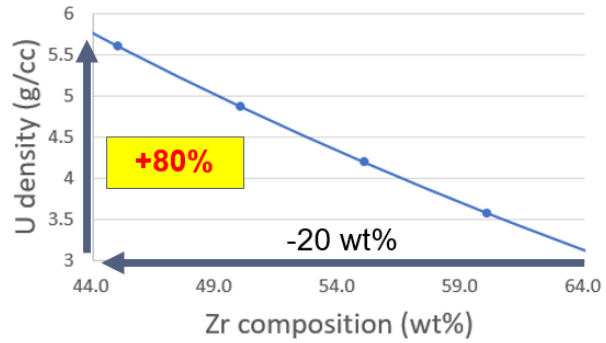
❖ 실험 계획

- 열전도도 측정 (Laser Flash Analysis, LFA)
- 상평형도 검증 (Differential Scanning Calorimetry, DSC)
 - δ -UZr₂ 형성 온도 범위 검증
 - Zr-U 합금 고상선 온도 검증
- 확산열전쌍을 사용한 핵연료-피복관 화학반응 연구 (ZIRLO & HANA)
- 부식저항성 평가를 위한 Zr-U 합금 산화실험 (Thermo-Gravimetric Analysis, TGA)
- Zr성분 별 기체 및 (자가)금속 이온빔 조사 실험 (KAERI-KOMAC)

고밀도 사고저항성 핵연료 (계속)

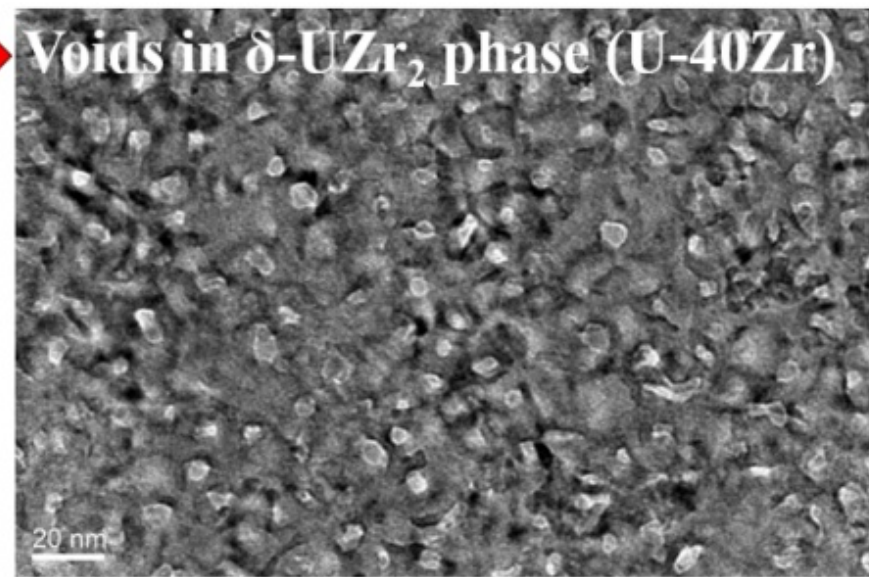
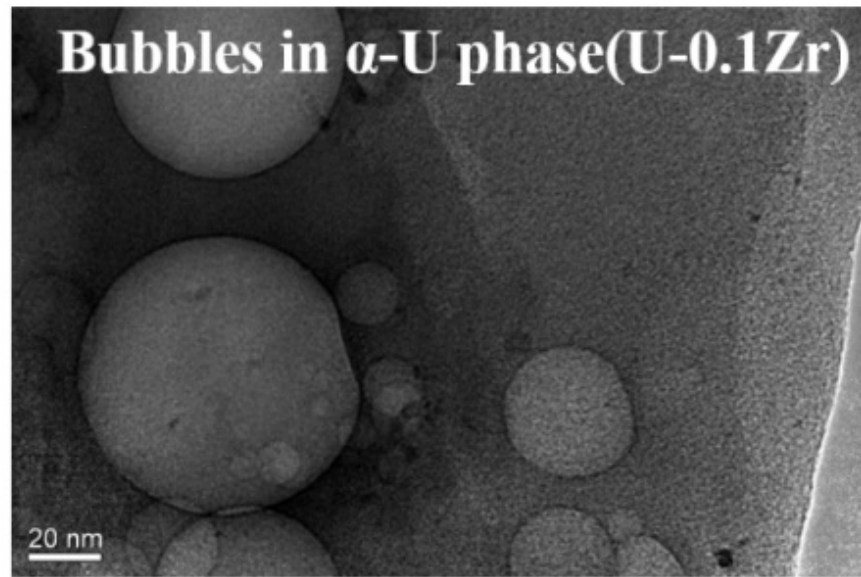
❖ 미래 원자력 사용 확대 기반 마련

- 현재 선박용 연료 설계: 고농축 우라늄 (노심 소형화) + 높은 Zr 함량 (안전성 확보)
 - 금속핵연료 고유 안전성 (UO_2 대비 4~15 배 높은 열전도도)
 - LOCA 시 Zr-U 핵연료 최대 온도는 500 °C 미만 (Lightbridge simulation 결과)
 - U-Zr 합금 대비 훨씬 낮은 조사팽윤율/연소도 (금속간 화합물인 $\delta\text{-UZr}_2$ phase 특성)
 - U-10Zr: ~30 vol% swelling at 1 %BU / U-50Zr: ~1 vol% swelling per 1 %BU
 - 그러나, Zr 함량이 너무 높아서 고농축 우라늄 사용이 필수에 가까움 (핵확산 우려)
- 설계 변경 목표: 저농축 우라늄 (핵확산저항성) + ~45wt%Zr-U (성능 검증 필요)
 - Zr함량 20 wt% 감소 시, SMART 크기 노심에 3.7 MTU 핵연료 추가 장전 가능



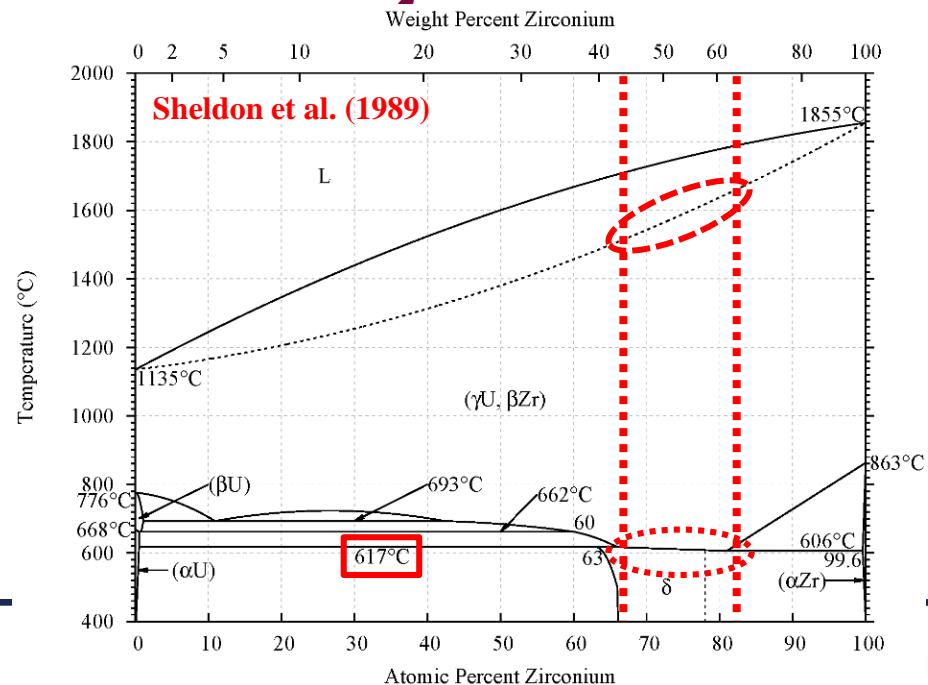
	U	Zr-U
Low density	4.4 MTU	12.2 t
High density	8.1 MTU	14.4 t
Increase	84%	19%

(참고) α -U 대비 δ -UZr₂ 치수 안정성 예시

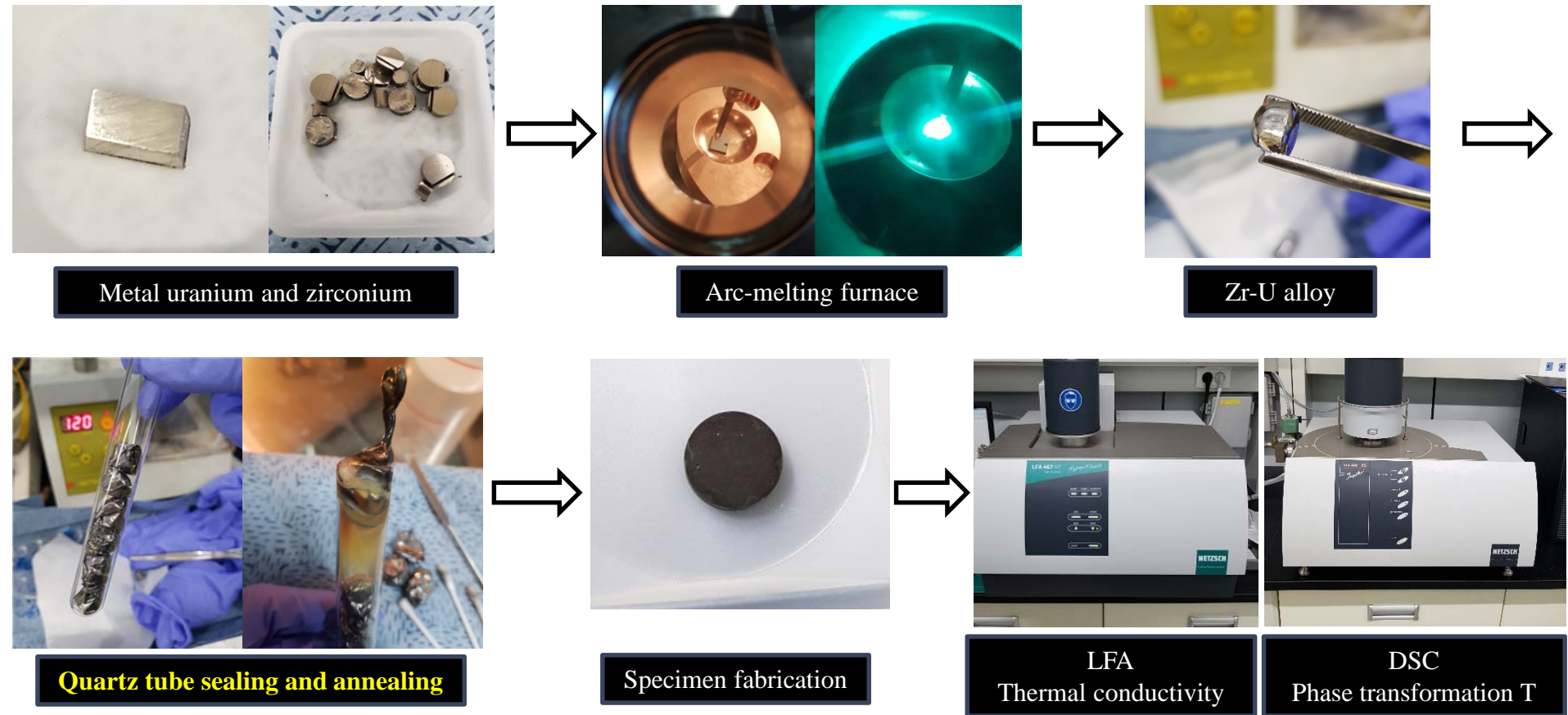


Phase-dependent bubble and void formation in U-Zr alloys irradiated at the same dose of 5×10^{16} He⁺ ions/cm²

- ❖ 여러 상평형도에서 δ -UZr₂ 형성 온도 불일치 (593 °C ~ 606 °C ~ 617 °C)
 - 노심 내 γ -U 형성 방지 필수 / 성능 코드 개발 시 안전 여유도 계산에 필수 참조값
- ❖ 불확실한 Zr-U합금 고상선 DB 재검증 필요
 - 현재 대부분 상평형도에 점선으로 표시된 고상선
- ❖ 단상으로 화학량론 변화에 의한 녹는점 변화가 적은 UO₂ 핵연료에 없던 문제

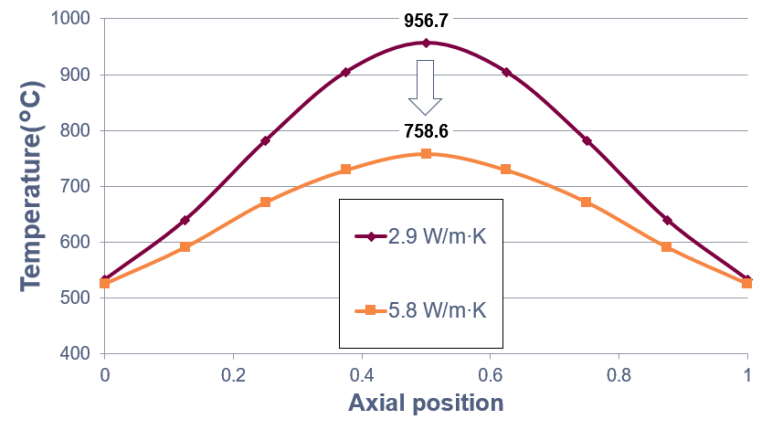
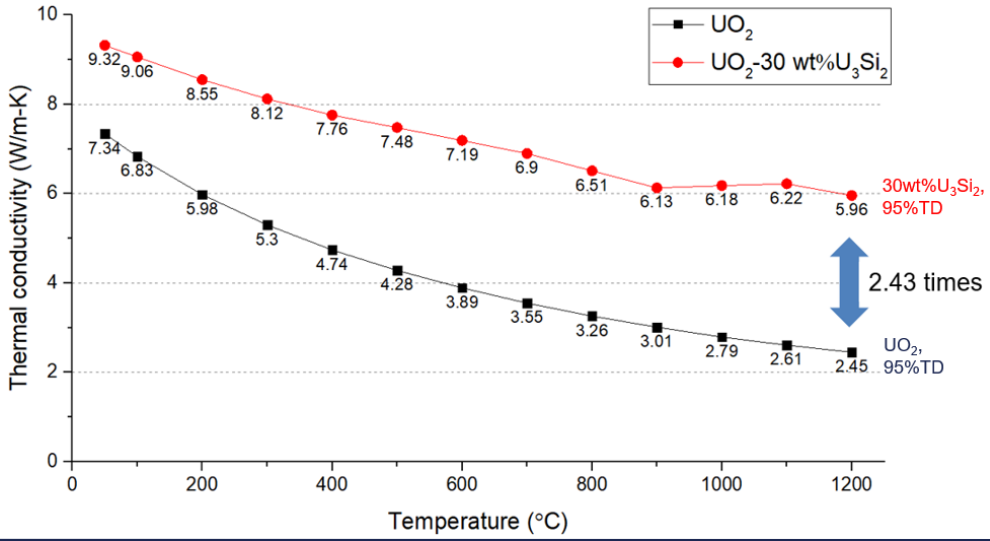


아크 퍼니스를 사용한 Zr-U 합금 제조 및 열물성 측정



자율 일일부하추종운전용 고열전도 복합 세라믹 연료

- ❖ 자율 일일부하추종운전이 가능한 무붕산 노심 설계
 - 기존 원전 핵연료 대비 평균온도가 최소 200 °C 이상 내려간 핵연료 개발 필요.
- ❖ $\text{UO}_2\text{-U}_3\text{Si}_2$ 복합 핵연료 채택
 - 고열전도 + 핵분열성 물질 밀도 증가 및 부식저항성 감소 최소화 도모
 - 고밀도 (90%TD) 핵연료 소결 및 반응층 발생 최소화를 위해 SPS 사용 필수
 - 추가 초과반응도 장전을 위한 CSBA 포함 핵연료 제조 및 열응력 피로 파단 실험 수행

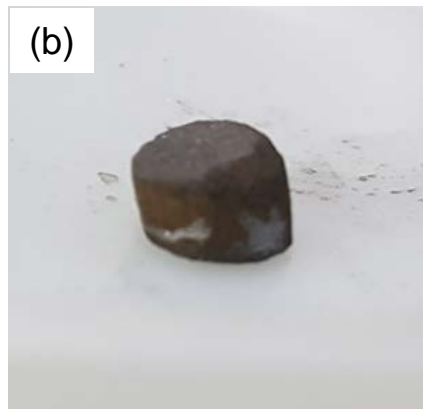
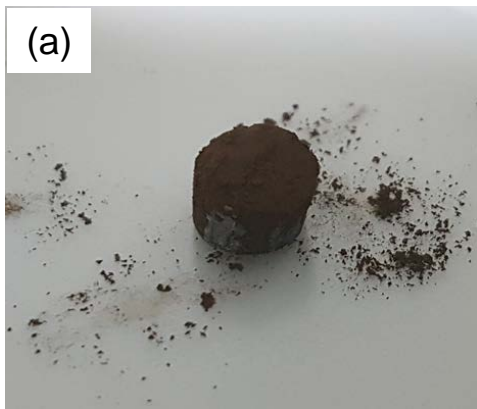


Ab-initio calculation of fuel temperature with increasing thermal conductivity using FRACPON 4.0 code

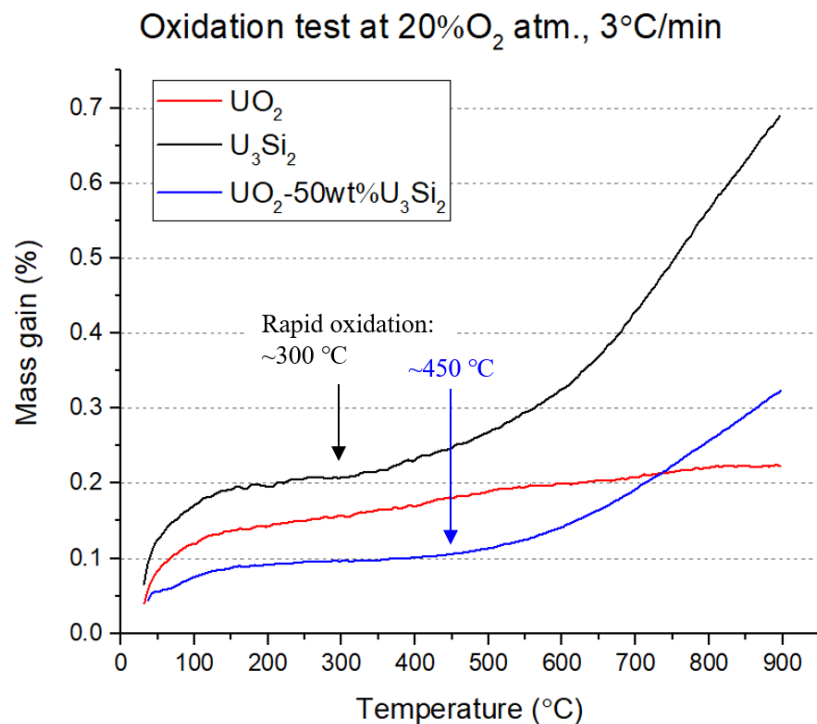
UO₂-U₃Si₂ 복합 핵연료 부식저항성 실험

❖ U₃Si₂ 대비 부식 저항성 향상

- 'Breakaway' 산화 온도 증가
- 산화 속도 저하



TG samples after oxidation (a) U₃Si₂, (b) UO₂-30wt%U₃Si₂

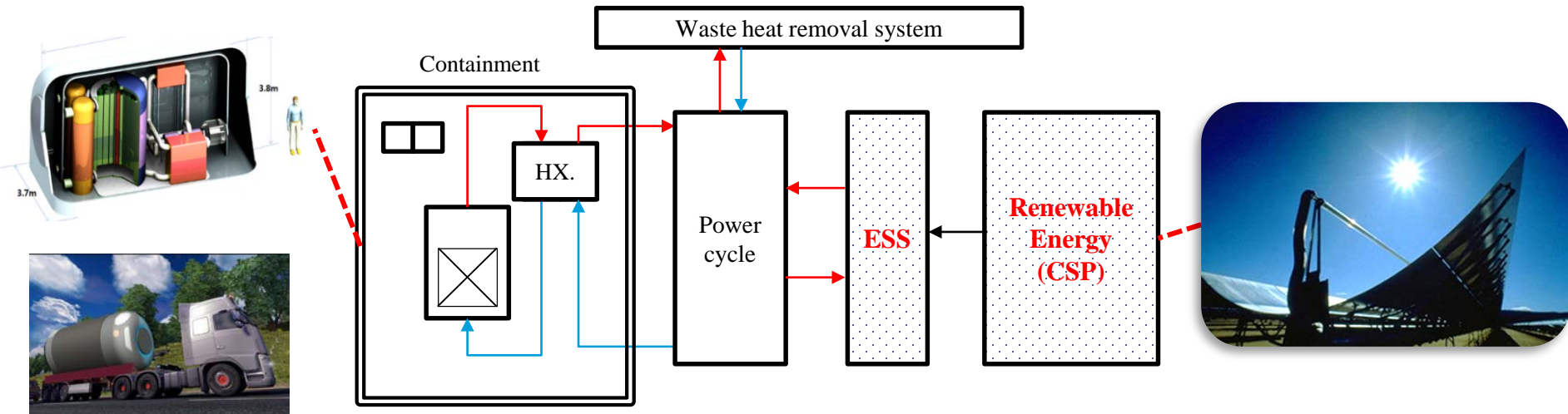


TG graph of UO₂, U₃Si₂, and UO₂-50wt%U₃Si₂

신재생 결합형 초소형 모듈형 원자로 (H-MMR)

❖ 초소형 모듈형 원자로(MMR) + 신재생에너지 + 에너지 저장장치(ESS)

- 부하추종 운전을 위한 자율형 원전
- 히트파이프 사용 피동 냉각 시스템



신재생 결합형 초소형 모듈형 원자로 (H-MMR) 핵연료

❖ UN 핵연료 선택

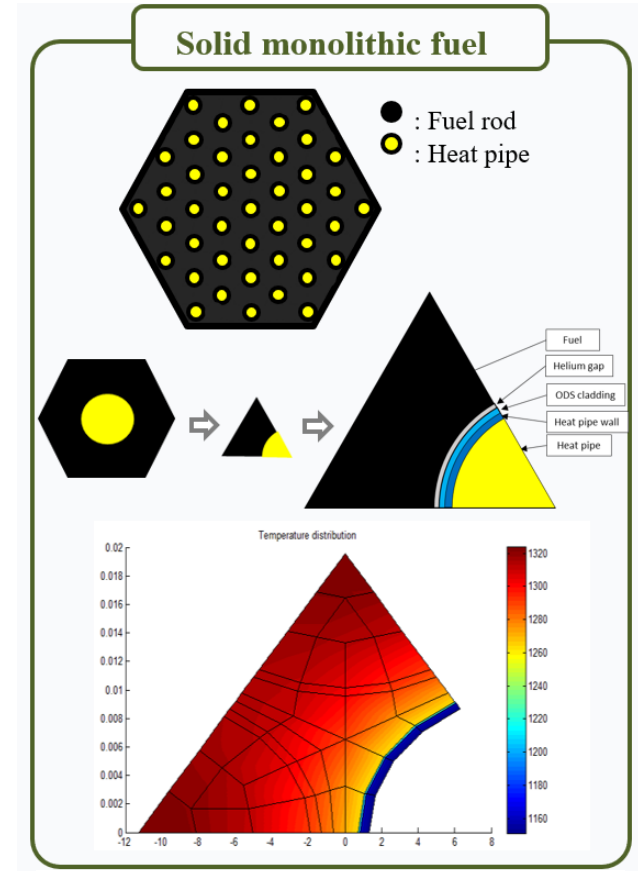
- 열물성 DB 구축 및 검증
 - 열전도도, 비열 등
- 연료 합성 및 제조 방법론 분석
 - 합성: Hydride-nitride process
 - 최적 연료 밀도 (92 ~ 96 %TD)

❖ 핵연료 기계 건전성

- Hexa-monolithic (십구공탄) UN 핵연료
 - 빈번한 출력 변화 시 Thermal crack resistance 확인

❖ 재료양립성 평가 실험

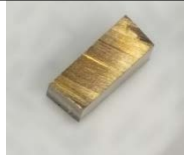
- 확산열전쌍 활용 소결체-피복관 반응 실험



< Fuel design for H-MMR >

스파크 플라즈마 소결법 (SPS) 활용 UN 핵연료 제조

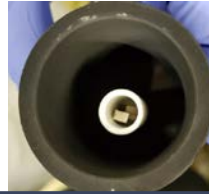
UN powder synthesis



Metal uranium



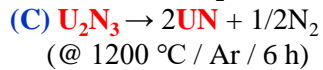
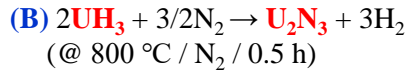
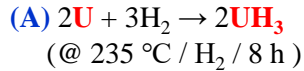
Metal uranium
(Oxide layer removed)



Graphite (outer) &
Al₂O₃ (inner) crucible



Heating furnace



(A)



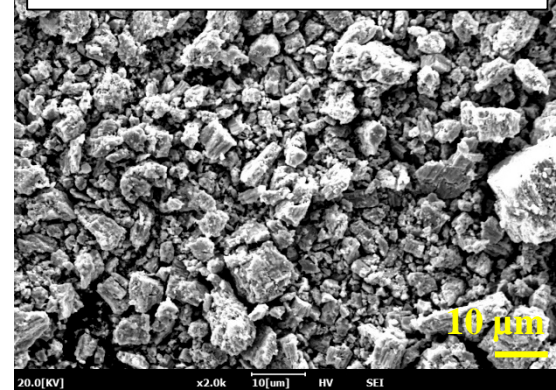
Uranium hydride (UH₃)

(B), (C)

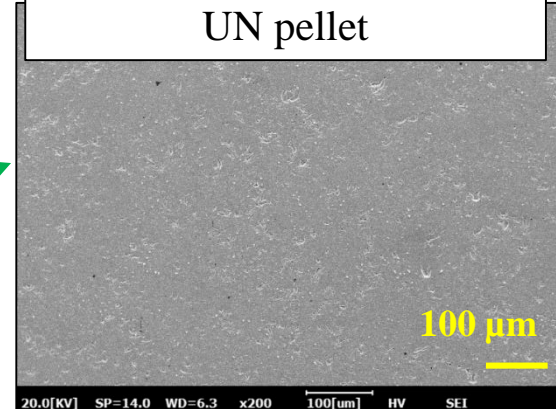


Uranium nitride (UN)

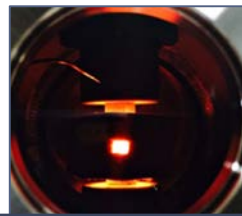
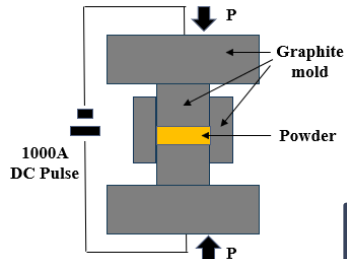
UN powder morphology



High density (~94 % TD) UN pellet



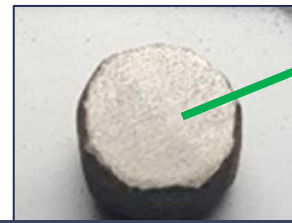
UN pellet sintering



SPS sintering



@ 40 MPa;
1800 °C;
40 min;

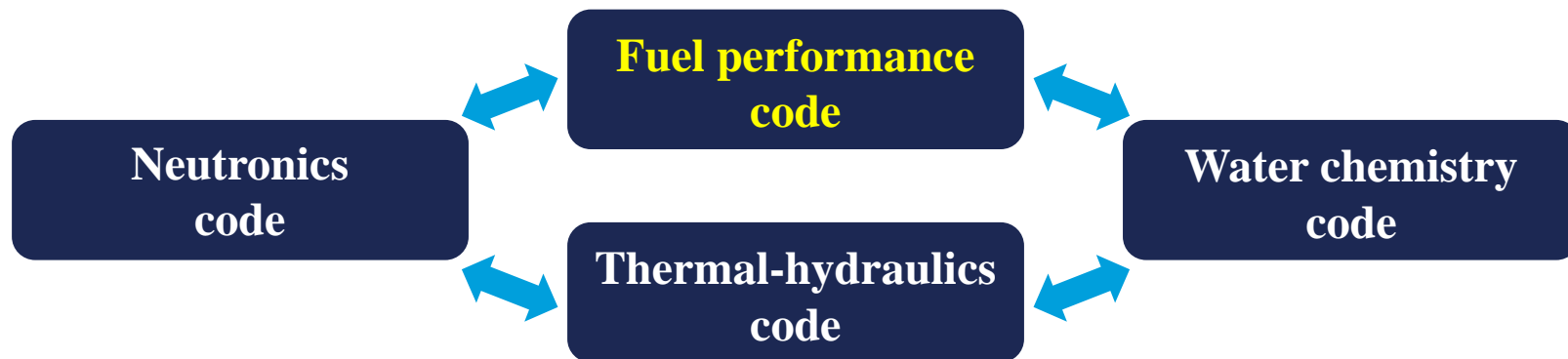


Sintered Pellet

유한요소법 기반 핵연료 성능 코드 개발

❖ 연구 배경

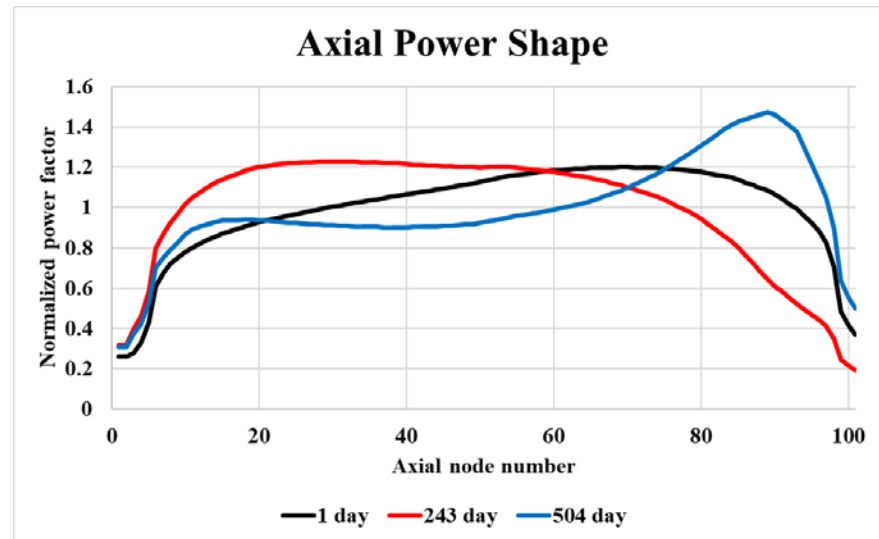
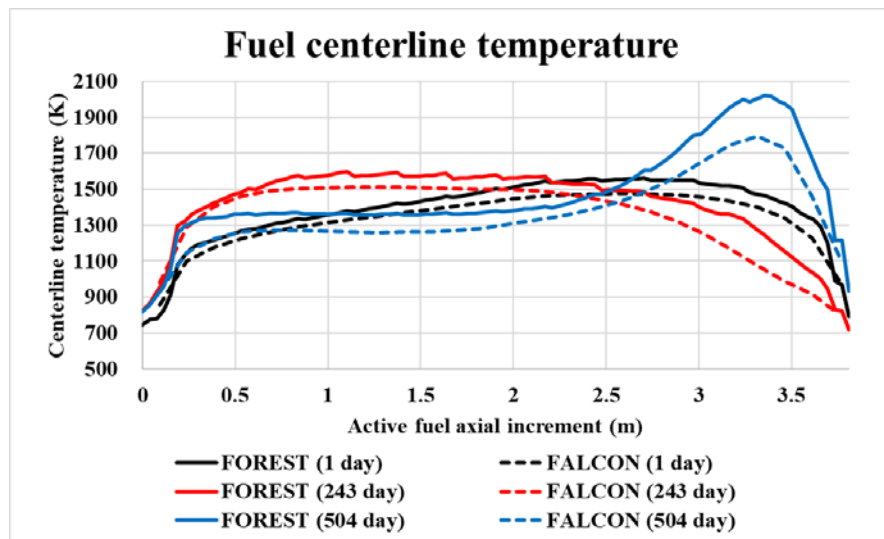
- 후쿠시마 사고 이후 규제 강화 (DG-1327, 2016.12.)
 - 수소 농도에 따른 핵연료 엔탈피 제한치 강화 (U.S. NRC)
 - 냉각재상실사고(LOCA) 및 반응도부가사고(RIA) 해석 시 최적해석 방법론 사용이 요구됨.
- 노심환경 악화: 장주기 운전; 출력 최적화; 아연 주입; S/G 관막음률 증가 등.
 - 크러드 침착에 의한 비정상축방향출력분포편차(AOA) 발생 가능성 증대
- 규제 및 노심환경 악화 대응 위해 기존 핵연료 코드 개선 필요
 - 비대칭 출력 분포 및 노심 국부 현상 해석 능력 확보를 위해 유한요소법 기반 코드 필요



유한요소법 기반 핵연료 성능 코드 개발

❖ 개발 목표

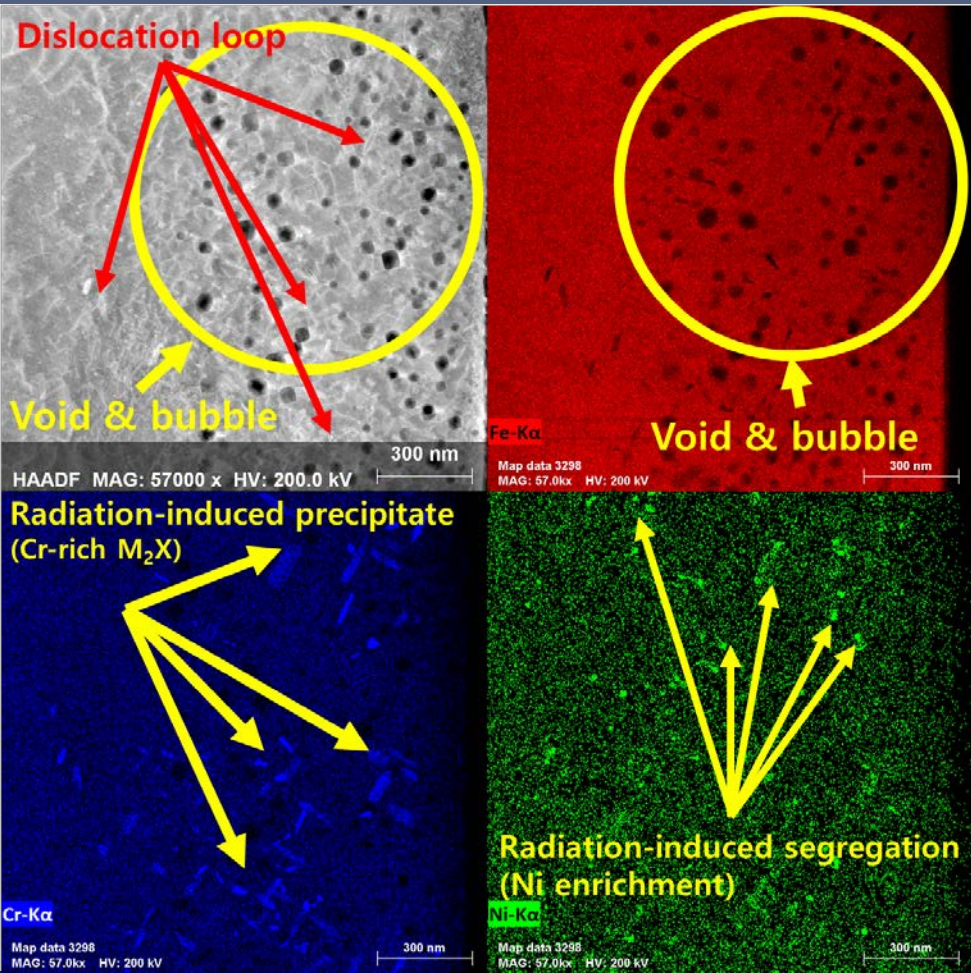
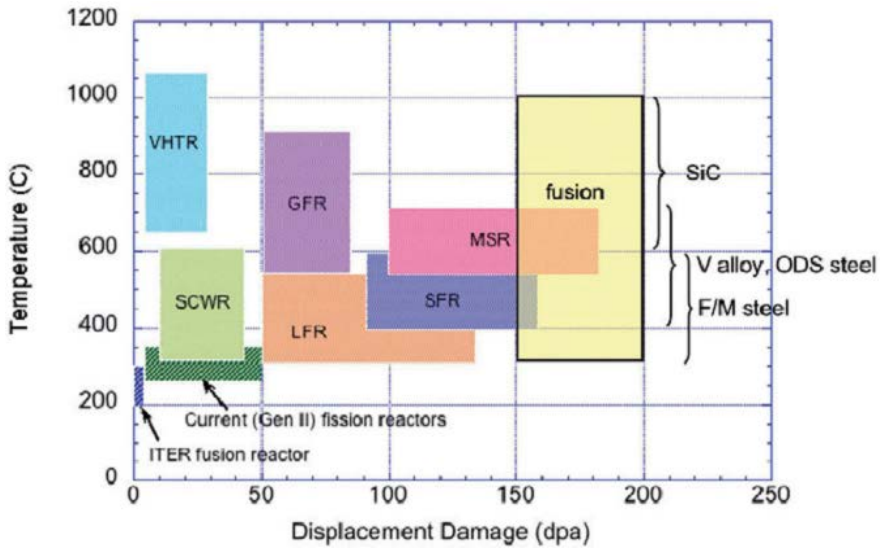
- 2차원 유한요소법 사용으로 전산모사 정확도 향상 도모
- 노심 코드와 연계 기능 확보
- 알고리즘 최적화 및 병렬 계산을 통한 전노심 계산 구현
- 최신 실험 자료 및 FALCON 코드와의 벤치마킹을 통해 코드 유효성 검증



고속로 피복관 재료 조사손상 열화 모사 실험

❖ 고속로 내 재료 성능 열화 현상

- 고온(~500 °C) & 고조사손상(>200 dpa)
 - cf. APR-1400: 50 dpa / ~330 °C
- 방사선 조사에 따른 미세구조 변화
 - 팽윤, 조사유기결석 및 편석, 전위 루프 형성
- 형태 · 체적 변화, 열·기계 물성 열화



이온빔 가속기 활용 조사 손상 모사 연구

상온
기체 조사

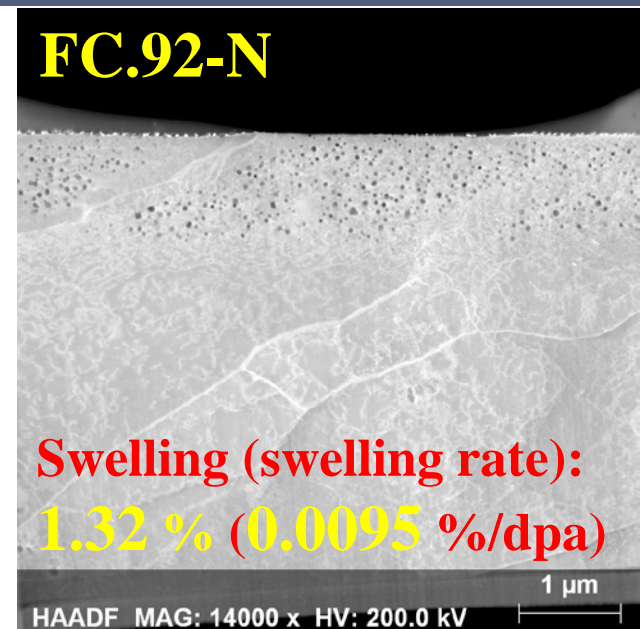
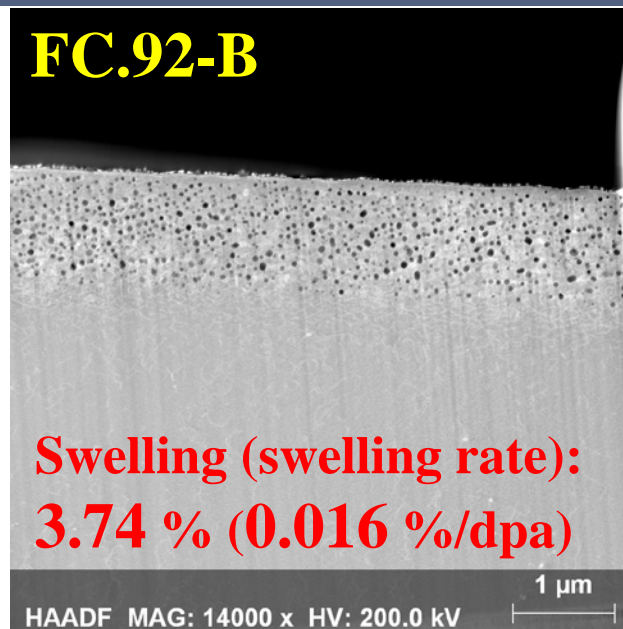
자가 이온
고온 조사
(노내 환경 모사)

기계 응력 & 고온
자가 이온 조사
(FCMI 상황 모사)

- 조사 후 시편 방사화 (거의) 없음
- 시간/비용 측면 효율적
 - FM 합금강 내 100 dpa 달성에 2 일간 500 달러
 - 중성자 조사 대비 10 만 배 높은 조사 선속
- 다변수 실험 수행에 최적화
 - 온도/선량(율)/에너지/이온 종류/기계응력 등
 - 재료 손상 원리 규명 및 모델 개발에 적합

- 신합금 조사 성능 평가
- 조사저항성 FMS
개발 원리 규명

3.5 MeV Fe⁺⁺ 이온 고온 조사 실험 결과



❖ FC.92: 한국원자력연구원 개발 국산 FM 합금강

- 크립 저항성 측면 HT.9 대비 30 % 개선 → BOR-60 노내 조사 실험 중
- FC.92-N: HT.9 대비 5 % 가량 개선된 팽윤 저항성
 - 조사 실험 조건(온도 / 조사손상도 / He 농도): 475 °C / 480 dpa / 1 appm/dpa
 - HT.9 을 비롯한 FM 합금강 중성자 및 이온 조사 시 통상적 swelling rate: 0.01 ~ 0.02 %/dpa

요약: 과거, 현재, 미래.

❖ 과거

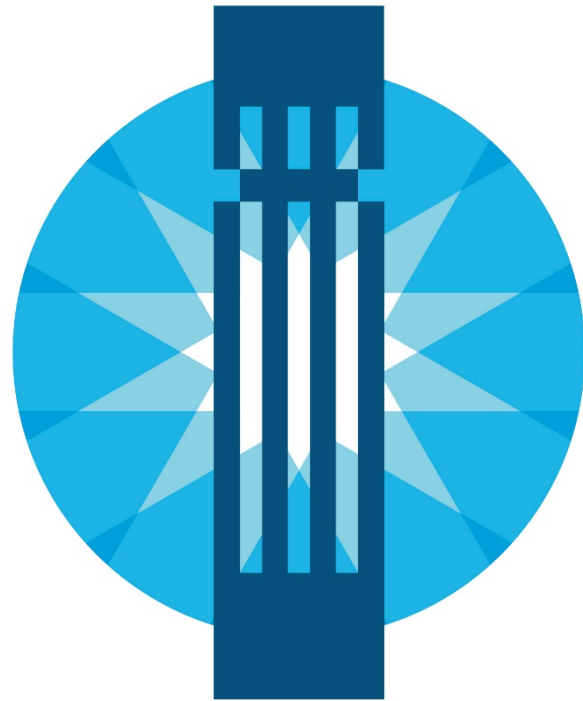
- 우라늄/토륨 사용 허가 취득 및 핵연료 물질 사용 실험실 구축 (기반 시설 및 장비)
- 금속핵연료 피복관(FC. 92-N/B) 및 대체물질 (CeO_2 , Ce_3Si_2) 실험
- IAEA 현장사찰용 열전도도 기반 UO_2 화학량론 측정 기술 개발
- 유한요소법 기반 핵연료 성능코드 개발

❖ 현재

- SMR/MMR용 핵연료 ($\text{UO}_2 + \text{U}_3\text{Si}_2$ 또는 UN)
- 사고저항성 고열전도 고밀도 핵연료 (Zr-U) 및 핵연료-피복관-냉각재 재료 양립성
- 중성자 흡수재 조사가속부식 실험 및 관련 코드 개발

❖ 미래

- 용융노심-콘크리트 반응 실험 (MCCI) ($\text{UO}_2 + \text{ZrO}_2 + \text{Concrete} + \text{etc.}$)
- 신형 중성자 흡수재 개발(?)
- 조사저항성 반도체 개발(?)



URANUM
NUCLEAR FUEL LAB

울산과학기술원 원자력공학과 URANUM 연구실
연구 장비 목록 및 성능 상세



*UNIST RAdioactive NUclear Materials (URANUM) Laboratory

Equipment for Fabrication & Heat Treatment

❖ Pellet sintering, ceramic synthesis, alloy fabrication, long term annealing, etc.



High T. Tube furnace

- $T_{\max} : 1650\text{ }^{\circ}\text{C}$
- Ceramic(UN, UC) synthesis
- Annealing
- Conventional sintering



Microwave furnace

- $T_{\max} : 1600\text{ }^{\circ}\text{C}$
Max ramping rate:
 $100^{\circ}\text{C}/\text{min}$
- Rapid sintering within 1/20 time of conventional sintering using microwave.



High Temperature Vacuum furnace

- $T_{\max} : 1900\text{ }^{\circ}\text{C}$
Max vacuum : 10^{-5} torr
- Heat treatment
- Powder synthesis
- Alloy fabrication

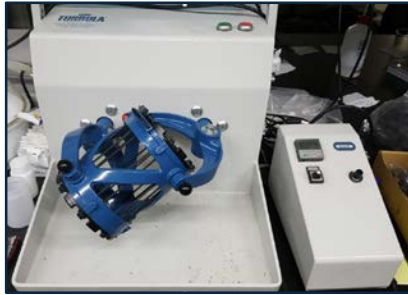


Arc Melter

- Power: 20 KW
Max vacuum : 2×10^{-5} torr
- Ceramic synthesis
- Alloy fabrication

Equipment for Powder Metallurgy

❖ Synthesis, Milling, Homogenization, and Fabrication of Ceramic Fuel



Tubular 3D Mixer

- Powder homogenization



High Energy Ball Mill

- Powder milling
- Ceramic powder synthesis

Pressing & Fabrication system

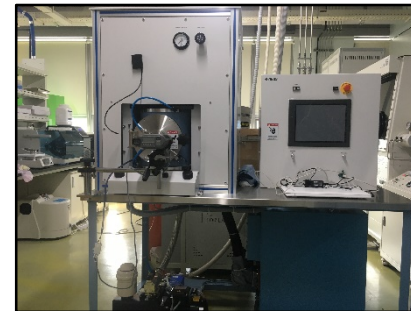


Cold press (10t)



Hot isostatic press

T_{\max} : 2000 °C
Max. pressure: 5 ton/cm²
Max. vacuum: 5×10^{-2} torr



Spark Plasma Sintering System

Max. pressure: 2 ton/cm²
Max. vacuum: 5×10^{-2} torr

Equipment for Metallurgy Sample Preparation

❖ Sample preparation for SEM, TEM, LFA, etc.



Precision Diamond cutter

- Left for general & cladding material (Zircaloy, Stainless steel, etc.)
- Right for radioactive material (Uranium, Thorium, activated material, etc.)



Automatic Mounting Press



Auto-polisher



Optical Microscope

Leica DM2700M

- Sample surface inspection



Equipment for Quality Control

❖ Prevent oxidation/reaction of specimen, secure high fidelity



Glove Box - Tube furnace

- T_{\max} : 1650 °C
- Heating Zone:
180 × 180 × 250 mm
- Ar, N₂, H₂ atmosphere
- Heat treatment for oxidizing/inflammable material



PO₂ Monitoring System

- Operating T: 800 °C
- O₂ sensor: 8-YSZ
- Detection Range: $-25 < \log(P_{O_2}) < 0$
- Accuracy: < 1%
- Gas quality inspection
- Oxidation reaction assessment



High Vacuum Pumping Station

- Pumping speed: 84 L/s
- Ultimate vacuum pressure:
 3.7×10^{-8} torr
- High vacuum pumping for metal alloy fabrication

Equipment for Thermophysics

❖ Thermophysical properties measurement, phase transformation investigation, 2nd phase identification



Laser Flash Analyzer
Netzsch LFA467HT

- Specific heat, ΔH_{trans} measurement
- Mass change measurement
- T_{max} : 1500 °C

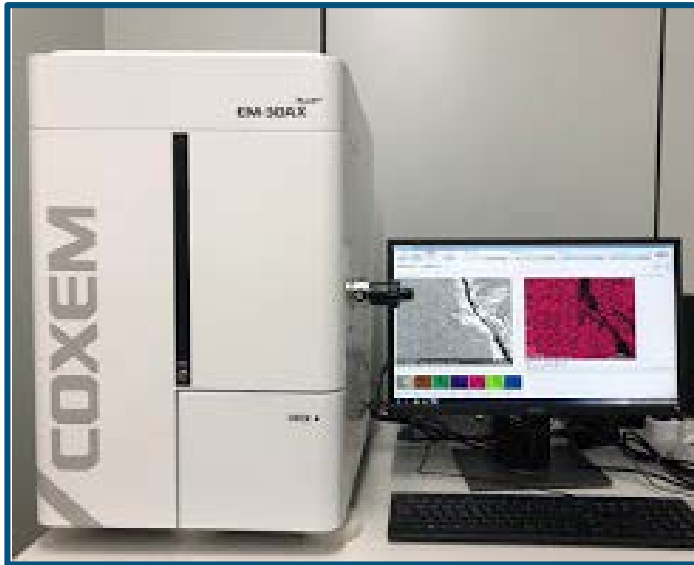
- Accurate measurement of thermal diffusivity and thermal conductivity.
- T_{max} : 1250 °C



DSC-TGA
Netzsch STA449F5

Equipment for microscale metallurgy & crystallography

❖ Microstructure analysis, compositions measurement



SEM-EDS
EM-30AX Plus

- X-ray generator : 3kW(sealed tube) / 9kW(rotating anode)
- T_{\max} : 1600 °C
- Goniometer radius : 300 mm
- Min. step : 0.0001 °

- Magnification: **x150,000**
- Accelerating Voltage: 1~30 kV



HT XRD
SmartLab