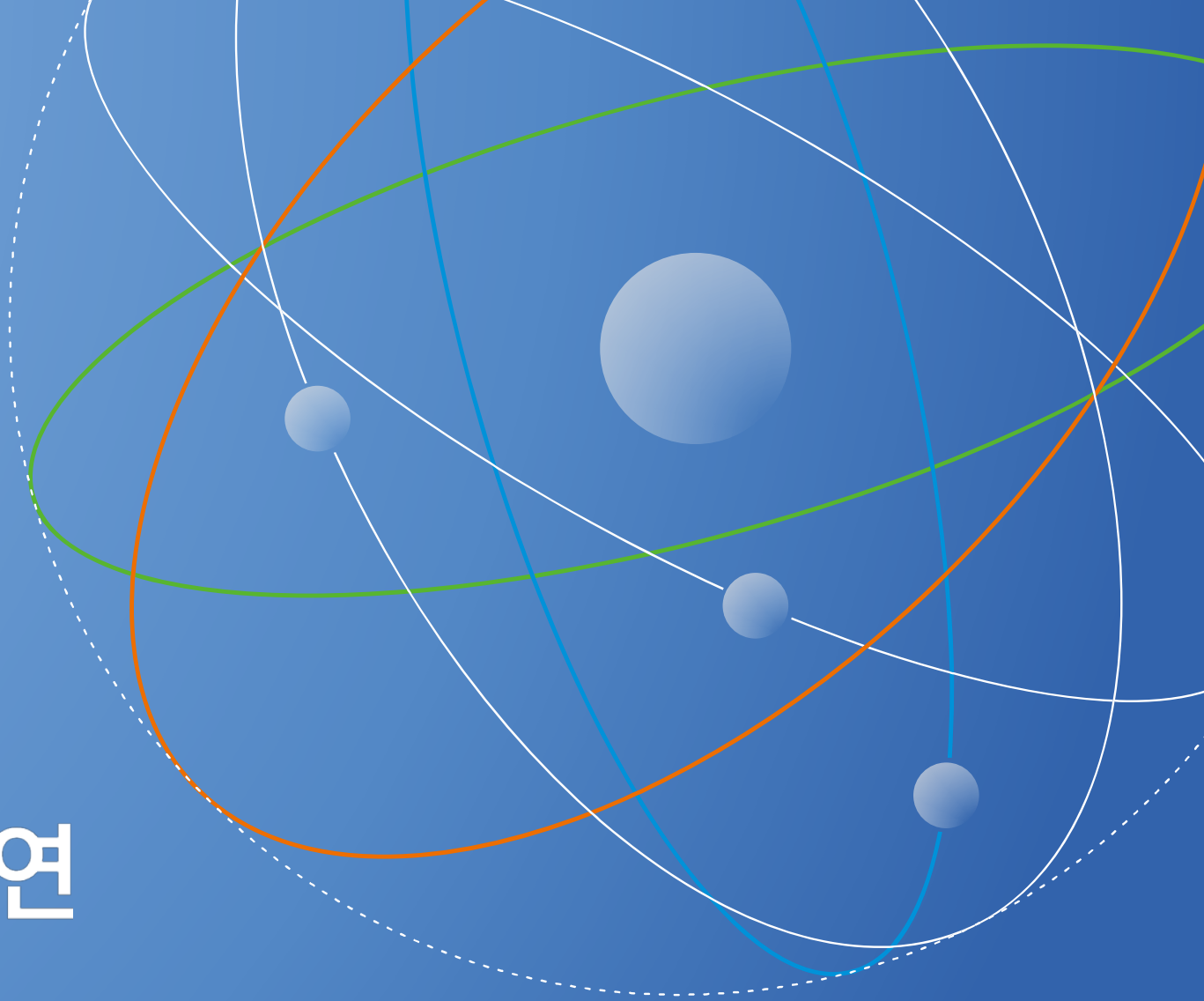
KOREA ATOMIC ENERGY RESEARCH INSTITUTE

# 피복입자핵연료와 흑연

선진핵연료기술개발부 김 응 선 (kimes@kaeri.re.kr)

2026/11/2



KAERI 한국원자력연구원 Korea Atomic Energy Research Institute



더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는

한국원자력연구원

CONTENTS

# 피복입자핵연료와 흑연


01 HPR 개발 현황: 피복입자핵연료와 흑연 도입 필요성

02 피복입자핵연료 성능 및 개발 현황

03 원자로급 흑연 노내 특성

04 결언

# HPR의 개발 역사와 적용 목적의 확대



- 우주 임무용에서 출발해 지상 특수목적 (군사기지, 극오지)과 민간 상용으로 적용 범위 확대

## 1960–1980년대

### 우주용 개념 연구



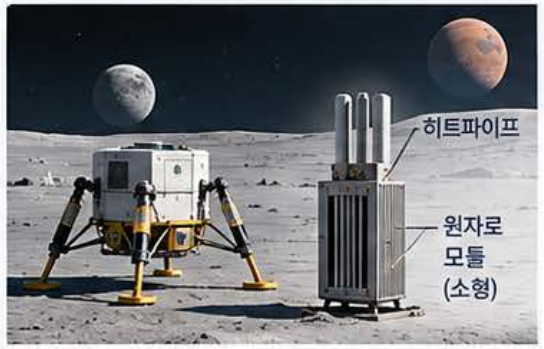

**대표 예시** SPAR 등

**주요 목적**

우주용 고온 전원 개념 검토
$UO_2$·UC계 핵연료와 액체금속 히트파이프 개념

## 1990–2010년대

### 우주 탐사 전원 실증




**대표 예시** SAFE, Kilopower/KRUSTY

**주요 목적**

달·화성 탐사 전원
소형화·경량화·신뢰성 중심,
U-Mo 금속핵연료 활용

## 2010년대 후반

### 특수목적 지상 전원



**대표 예시** MegaPower, SPR

**주요 목적**

원격지·군사기지 전력 공급
단순계통·이동성·장주기 운전 강조

## 2020년대~

### 민간 상용화 확대




**대표 예시** eVinci, Fission Surface Power 연계 검토

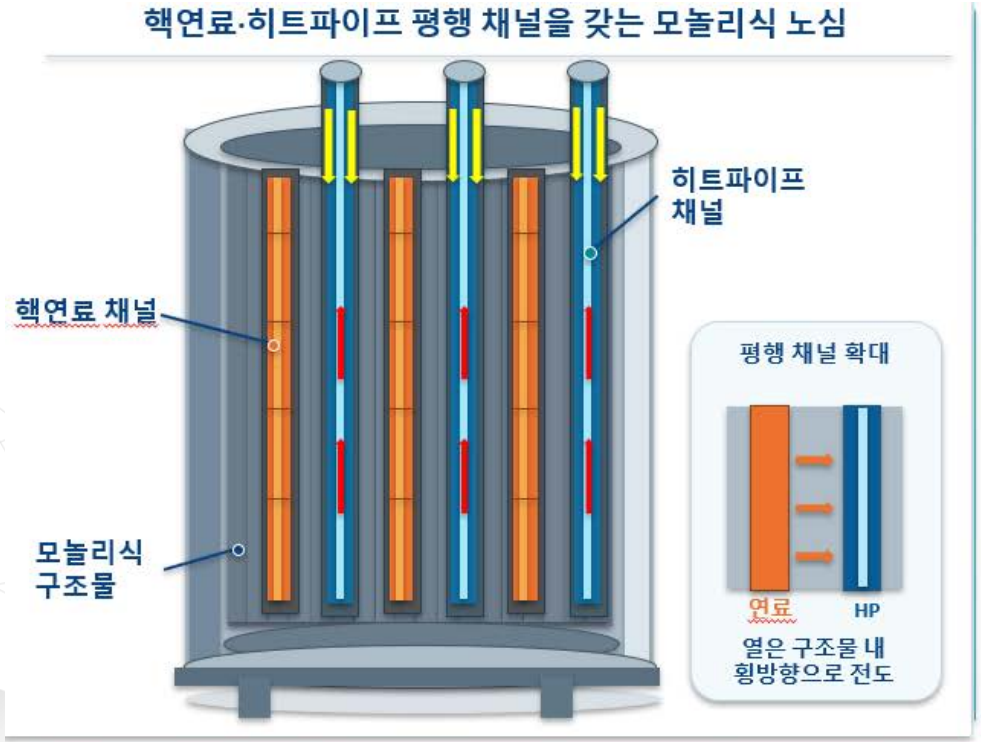
**주요 목적**

분산전원·산업열·데이터센터
안전성·경제성·인허가성 중심으로 전환

- 핵연료와 모놀리식 구조재의 선정기준이 소형화·경량화에서 안전성·신뢰성·인허가성 중심으로 진화

# HPR의 구조와 기술적 특징

- 모놀리식 고체 노심 구조: 핵연료와 히트파이프 채널로 구성
- 구성요소 계면: 기체 열전도 및 복사 / Gap 및 접촉




**고체노심**
핵연료와 열수송부가 모놀리식 구조 내에 집적

**완전 수동 열수송**
증발·응축과 모세관력으로 열 이송

**저압·무펌프**
대형 냉각재 배관·펌프 계통 최소화

**모듈형·이동성**
공장 제작·운송·현장 설치가 용이

**고온 열 활용**
전력 생산뿐 아니라 산업열 공급에 적합

**피동안전성**
정지 후에도 자연대류·복사 기반 잔열제거 가능

**기술적 의미**

- 계통 단순화로 높은 신뢰성 확보
- 소형 분산전원 및 원격지 전원에 적합
- 핵연료 · 구조물 · 히트파이프의 열적 상호작용이 설계 핵심

# 모놀리식 구조물/HP·핵연료 계면 상호작용



- 금속 소재: 낮은 융점, 강도저하, 크리프
- 핵연료: 조사 스웰링 및 크리프
- 계면 접촉: 기계적 손상, 스웰링 제한(FCMI), 확산접합, 공정반응, 갈바닉 부식/금속간화합물

| 계면·영역 | 주요 상호작용 | 성능·안전 영향 |
|---|---|---|
| 연료–모놀리스 계면   | Gap 형성·변화 / 접촉압력<br>열팽창·조사변형 차이 | 연료–구조물 열저항 증가<br>국부 연료온도 상승 |
| 모놀리스–HP 계면   | Gap/접촉 열저항 변화<br>반응·확산·부식 가능성 | 히트파이프 열유입 저하<br>국부 과열·계면 손상 |
| 모놀리스 웹·채널  | 열전도도·열응력 변화<br>수축·팽창, 균열 발생 | 열유속 재분배 및 집중<br>열전달 경로·건전성 변화 |
| 장기운전·HP 저하  | 열사이클·크리프·조사변형<br>개별 히트파이프 성능저하 | 우회 열전달·온도구배 증가<br>연료 최고온도 및 신뢰성 |

### 설계의 핵심

**안정적인 채널 간 열전달 경로 확보**

핵연료 채널 + 모놀리식 구조물 + 히트파이프 채널

### 해석·시험 포인트

1. 계면 Gap / 접촉열저항
2. 열응력·변형 / 균열
3. 계면 반응 및 HP 성능저하

# 왜 피복입자핵연료와 흑연인가?



- 고온가스로용 핵연료 및 흑연 데이터베이스, 설계방법론, 인허가 경험 및 공급망 공유 가능

| 민간 상용화 요구 | TRISO·흑연이 주는 가치 |
|---|---|
| 사고 시 핵분열생성물 방출 최소화 | TRISO 입자 자체가 기능성 방벽으로 작용 |
| 고온 운전과 피동안전성 확보 | TRISO의 고온 성능 + 흑연의 열적 완충능 |
| 제조·품질보증 기반 확보 | HTGR에서 축적된 제조·검사·QA 경험 활용 |
| 인허가 및 기술 공통성 | AGR 데이터, NRC TR 승인, SPD-6 공통화 전략 활용 |
| 장기 설계·구조평가 기반 | 흑연 물성 DB와 설계 방법론 활용 가능 |

## 기술·규제 기반의 발전 흐름

**AGR 프르그램**
TRISO 성능 데이터 축적



- 고연소도 조사 데이터 축적
- TRISO 장기 성능 검증

**NRC EPRI UCO-TRISO TR 승인 (2020)**




- TRISO 연료 안전성 공식 인정
- 차세대 설계 인허가 기반 마련

**SPD-6**
우주·지상 기술 공통화



- 우주·지상의 원자력 기술 공통화 지향
- 규제·개발 프레임워크 연계 강화

**NASA 우주 적용성 평가 (2023) 및 지상 상용화 확대**



- 우주 적용성 기술 평가 및 검증
- 민간 상용 원자로로 적용 범위 확대

**추가 검증 필요**

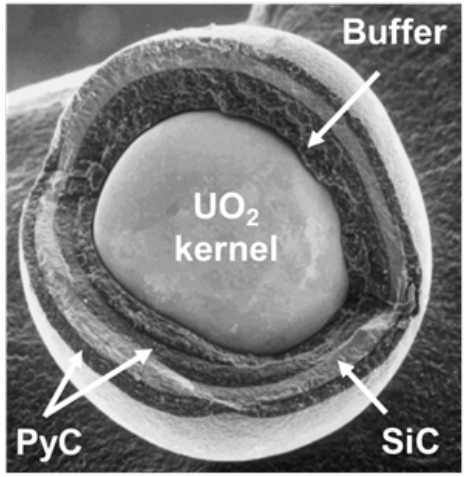
- TRISO 컴팩트와 모놀리식 구조물의 상대적 조사 변형
- 모놀리스-히트파이프 간 접촉열저항 변화
- 흑연-금속 계면의 장기 화학적 적합성
- 히트파이프 성능 저하 시 국부 핵연료 온도 영향

**핵심 메시지** | **TRISO 핵연료와 흑연의 채택은 고온가스로에서 축적된 검증기술을 활용하여 히트파이프 원자로의 상용화 위험을 낮추기 위한 전략적 선택**이다.

# 피복연료입자 구성요소의 주요 기능



- Kernel (350~500μm)
  - UO2 또는 UCO
  - 핵분열생성물 담지
- Buffer (~100μm)
  - 열분해탄소 밀도의 ~50% 수준
  - 핵분열 기체 및 CO(g) 축적 공간
  - Fission recoil 완충
  - 연료입자 팽윤 완충
- IPyC (~40μm)
  - SiC 증착 중 연료입자를 염화물로부터 보호
  - SiC 증착 기지
  - 핵분열 기체 담지



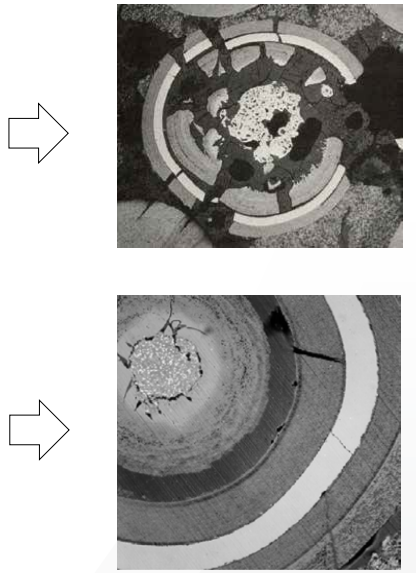

- SiC (~35μm)
  - 내부 기체압에 대응하는 주 구조층
  - 핵분열 금속을 담지하는 주 피복층
- OPyC (~40μm)
  - 핵분열 기체 담지
  - Matrix와의 결합면
  - 제조 중 SiC층 보호
- Graphite matrix
  - 강성 구조 형성
  - 열전달/온도균일성 개선
  - 핵분열생성물 이동 저감

# 피복연료입자의 손상기구



## 구조/기계적 손상기구

| Structural/Mechanical Failure Mechanisms | Service Conditions | Parameters influencing Failure Mechanism |
|---|---|---|
| Pressure vessel failure | - Temperature<br>- Burnup<br>- Fast fluence | - Strength of SiC<br>- Buffer density (void volume)<br>- Fission-gas release<br>- Kernel type (CO production)<br>- Layer thickness<br>- IPyC and OPyC performance |
| Radiation-induced PyC failure leading to SiC cracking | - Fast fluence<br>- Temperature | - Dimensional change of PyC<br>- Irradiation-induced creep of PyC<br>- Anisotropy of PyC<br>- Strength of PyC<br>- Tensile stress of in SiC at PyC crack tip<br>- SiC strength |
| IPyC partial debonding | - Fast fluence<br>- Temperature | - Nature of IPyC-SiC interface<br>- Interfacial strength<br>- Dimensional change of PyC<br>- Irradiation-induced creep of PyC |



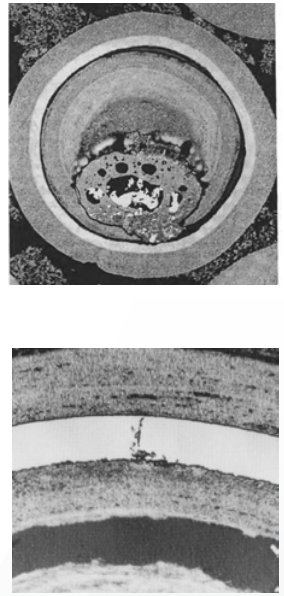
[Topical Report EPRI-AR-1(NP)-A]

# 피복연료입자 손상기구



## 열기계적 손상기구

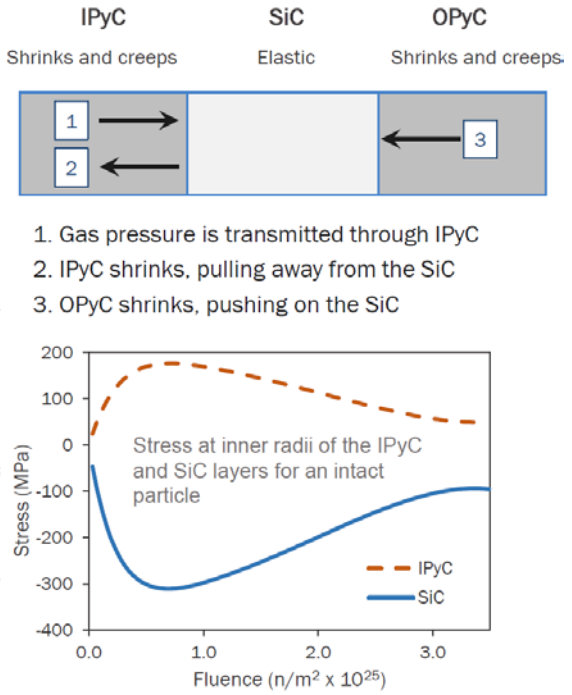
| Thermomechanical Failure Mechanisms | Service Conditions | Parameters influencing Failure Mechanism |
|---|---|---|
| Kernel migration | - Temperature<br>- Burnup<br>- Temperature gradient | - Kernel type ($UO_2$ or UCO, and so on)<br>- Buffer and IPyC thickness |
| Corrosion of SiC by CO | - Temperature<br>- Burnup<br>- Time at temperature | - Kernel type ($UO_2$ or UCO, and so on)<br>- IPyC integrity |
| Fission product attack of SiC | - Temperature<br>- Burnup<br>- Temperature gradient<br>- Time at temperature | - Chemical state/transport behavior of fission product<br>- Kernel type ($UO_2$ or UCO, and so on)<br>- Microstructure of PyC and SiC |
| SiC thermal decomposition | - Temperature<br>- Time at temperature | - SiC thickness<br>- SiC microstructure |



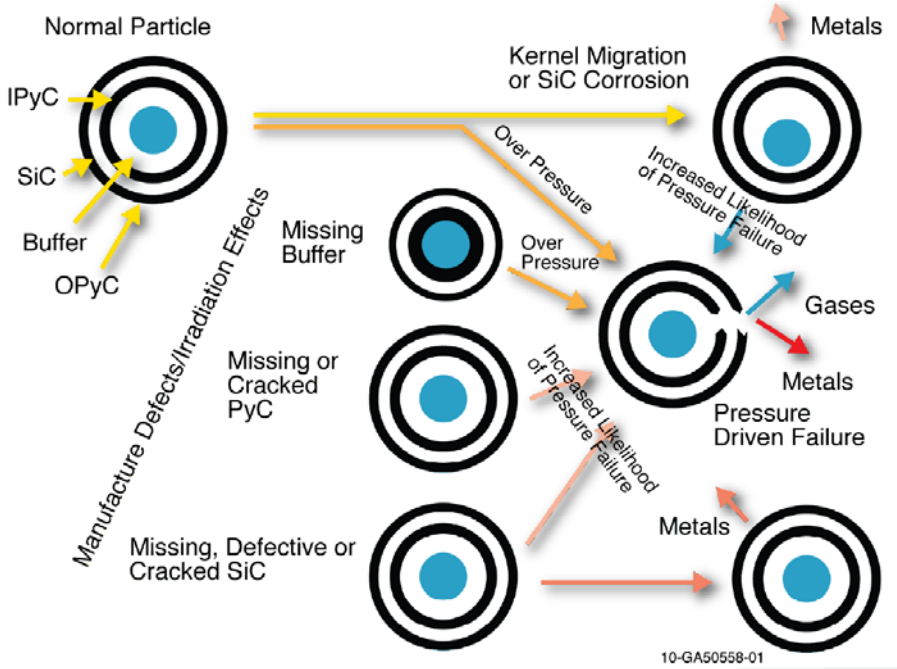
[Topical Report EPRI-AR-1(NP)-A]

# 피복연료입자 노내 손상기구

- IPyC와 OPyC가 모두 손상되지 않을 경우, SiC층은 압축 상태로 건전성 유지
- UO2에서 생성되는 CO(g)와 핵분열생성물에 의한 부식이 SiC층 손상의 주요한 원인
- 핵연료 제조 품질관리 및 성능한계 범위 제한을 통해 손상률 제어 가능



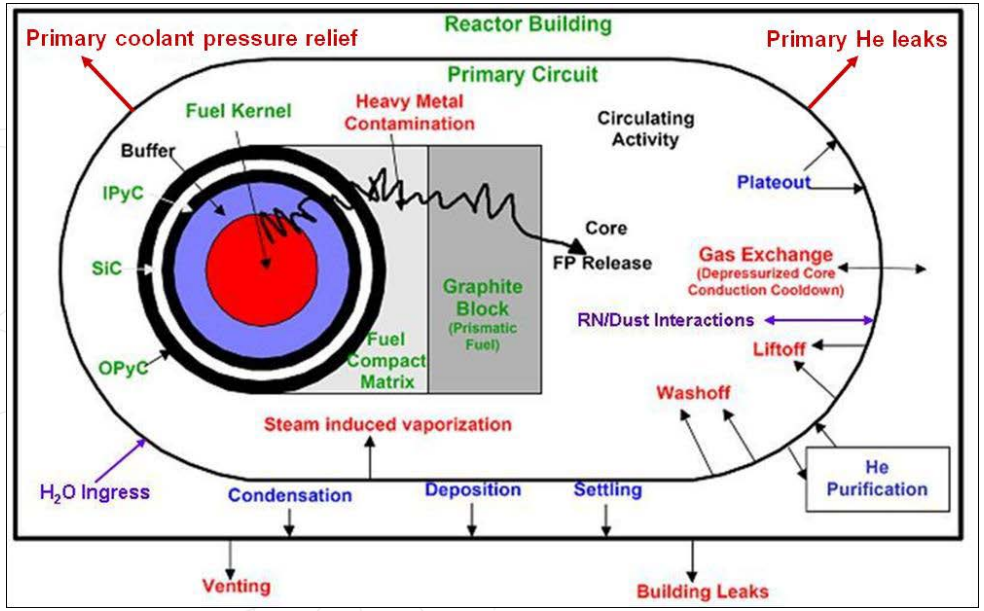

가스압 및 중성자 조사에 의한 SiC층 응력 상태
(Topical Report EPRI-AR-1(NP)-A)




품질 관리/보증된 피복연료입자의 주요 손상 (핵분열생성물 방출) 원인 및 경로
(Topical Report EPRI-AR-1(NP)-A)

# 성능 – 요건

- 방사성핵종 방출 요건 (부지경계 방사선량 등)
- 핵분열생성물 방출원 (제조 결함, 노내 손상)에 대한 사양 지정
- 품질관리(Quality Control) 측정을 통한 핵연료 품질 검증
- 중성자 조사 및 안전성 시험을 통한 손상율 사양 충족 여부



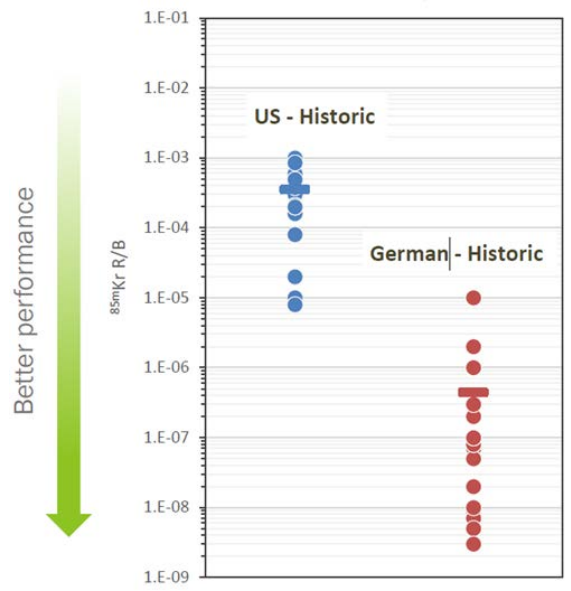

고온가스로 내 핵분열생성물 생성 및 방출 경로 (INL/EXT-10-17997 HTGR Mechanistic Source Terms White Paper)

| Parameter | NGNP – 750°C Core Outlet Temperature | |
|---|---|---|
| | "Maximum Expected" | "Design" |
| *As-Manufactured Fuel Quality* | | |
| HM contamination | ≤ 1.0 x $10^{-5}$ | ≤ 2.0 x $10^{-5}$ |
| Defective SiC | ≤ 5.0 x $10^{-5}$ | ≤ 1.0 x $10^{-4}$ |
| *In-Service TRISO Failure* | | |
| Normal operation | ≤5.0 x $10^{-5}$ | ≤2.0 x $10^{-4}$ |
| Accidents | ≤1.5 x $10^{-4}$ | ≤6.0 x $10^{-4}$ |

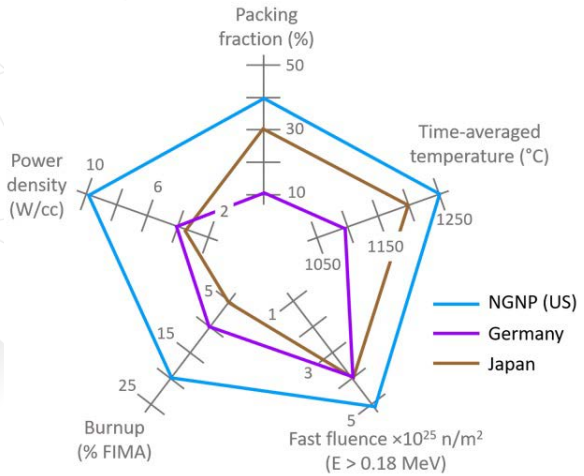
NGNP 핵연료의 제조 결함율 및 노내 손상률 설계 제한치

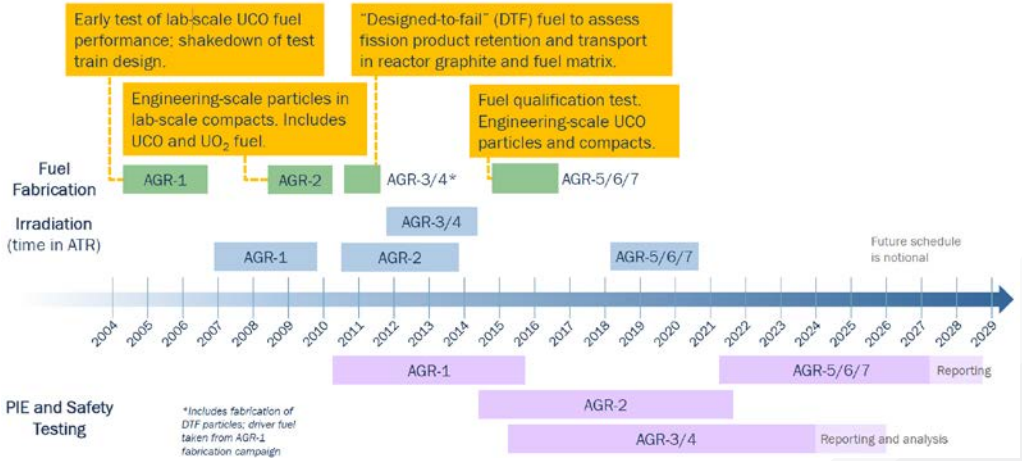
# DOE AGR 핵연료 개발 및 자격화 프로그램

- 목적
  - 고온가스로 인허가 지원을 위한 핵연료 자격화 데이터 확보
  - 미국 내 상용 피복입자핵연료 제조 역량 확보 → 상용화 리스크 저감
- 중점 목표: UCO TRISO 핵연료 제조 및 성능시험
  - 핵연료 제조 및 품질제어 측정법 개발 (실험실 → 공학규모)
  - 원자로 설계를 고려한 광범위한 중성자 조사시험
  - 정상운전 및 사고 시 핵연료 성능을 이해하기 위한 조사후 및 안전성 시험
  - 모델 개발 및 개선을 위한 핵분열생성물 이동 시험
  - 핵연료 노내 거동 예측을 위한 성능해석 모델 개발




과거 미국과 독일 피복입자핵연료 성능 비교

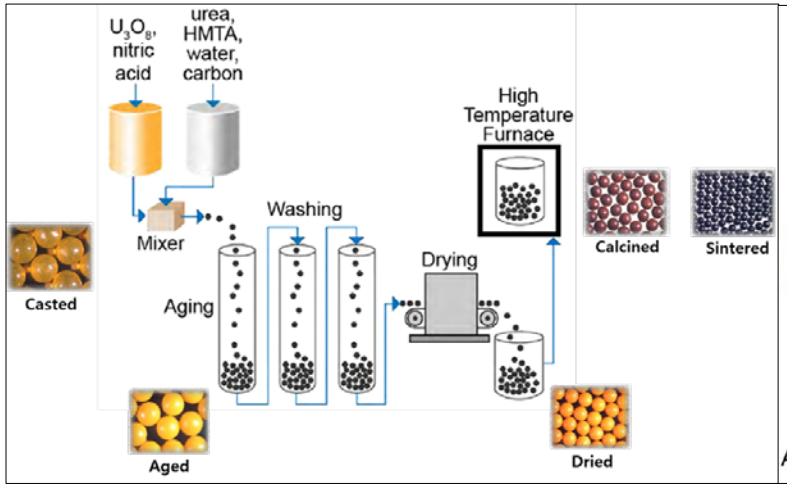


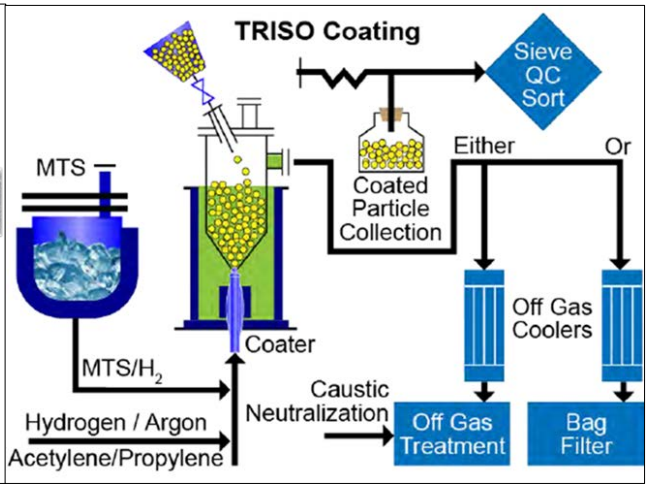



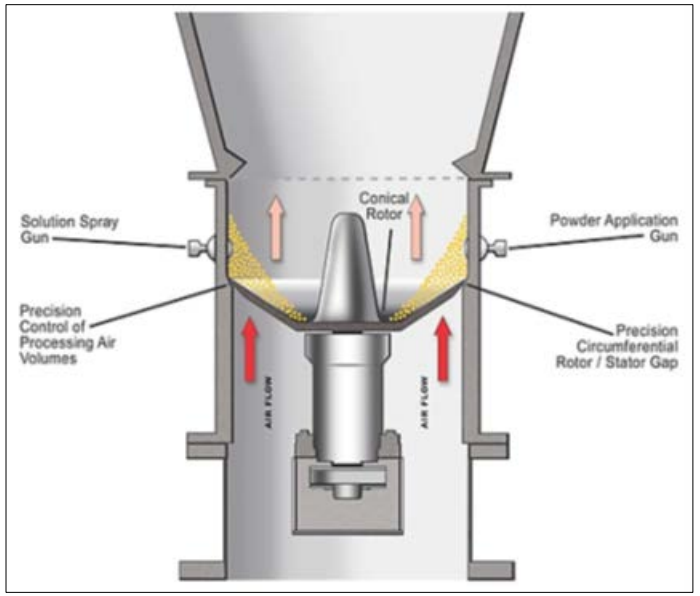

피복입자핵연료 성능 범위 및 DOE AGR 프로그램 일 (TOPICAL REPORT EPRI-AR-1(NP))

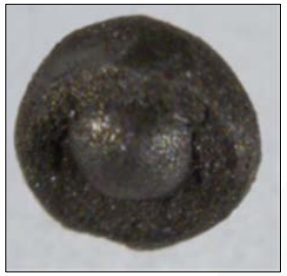
# 제조 공정

- 연료핵
  - 졸-겔 공정 (용액제조/적하/시효/세척/건조)
  - 하소/탄소열화원/소결 열처리
- 피복
  - FB-CVD 공정 (가스 노즐: CFD-DEM 해석)
- 흑연 matrix 분말 제조
- 피복연료입자 오버코팅
- 연료체
  - 성형
  - 탄화 및 결정화 열처리
- QC (Quality Control)





# 제조 – 품질관리



- 공정 조건 및 연료 물성 사양에 기준 지정
- 균일성 보장을 위해 연료입자와 피복연료입자 각 batch와 lot 그리고 연료체에 대한 수용성 검사 수행
- 물성 (variable properties) 사양에 대한 QC 측정은 통계학적 샘플링을 통해 수행
  - 95% 최소신뢰수준 충족
  - 평균값, 분산도 임계제한치 등 지정

- Kernel diameter
- Kernel stoichiometry
- Layer thickness
- Layer density
- Pyrocarbon anisotropy

- Kernel and particle aspect ratio
- Compact dimensions
- Compact U loading
- Dispersed U fraction
- Compact impurity content

- 속성 물성 (attribute properties)에 대한 최대 결함율 지정
  - 연료체/페블 내 피복연료입자 손상 사양

- SiC defects
- IPyC/OPyC defects

- Exposed kernel defects

| | MHTGR | HTR-PM | Xe-100 |
|---|---|---|---|
| Power (MWth) | 350 | 250 | 200 |
| Fuel elements | $2.0\times10^{6}$ | $4.2\times10^{5}$ | $2.2\times10^{5}$ |
| Particles total | $1.2\times10^{10}$ | $5.0\times10^{9}$ | $4.0\times10^{9}$ |
| 공학규모 (2kg/batch) FB-CVD 장치는 약 $5\times10^{6}$ particles/batch 생산 | | | |

고온가스로 노형, 출력에 따른 핵연료 장전량

# 성능 – DOE AGR 조사 및 조사후(안전성)시험



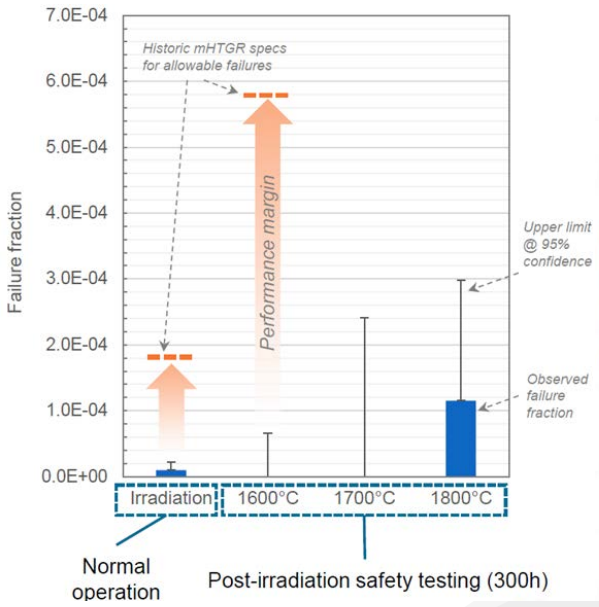
- 조사시험
  - 300 연료체 (~$10^6$ 피복입자) 조사
  - 온라인 핵분열생성 가스 (Kr, Xe) 모니터링 : Release-to-Birth ratio 계산 (연료 손상율 간접지표)

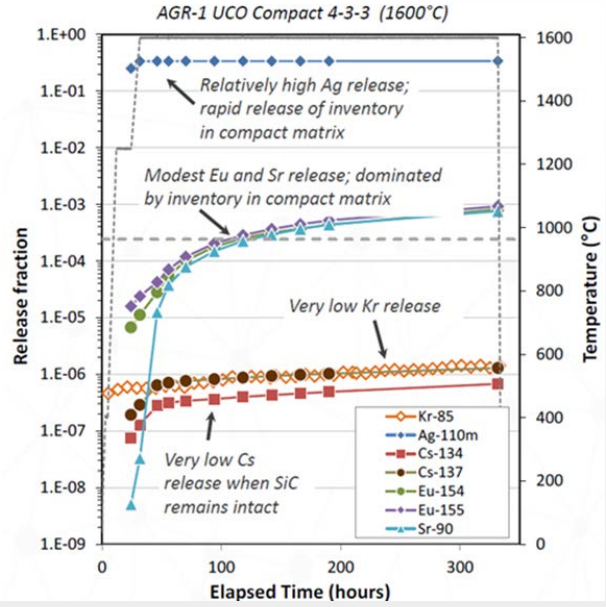
- 조사후시험
  - 피복연료입자 손상율 분석
  - 핵분열생성물 (Ag, Cs, Eu, Sr 등) 담지 성능 평가 (방출 및 이동)
  - 연료핵과 피복층의 미세구조 변화 및 성능과의 상관관계 분석

- 조사 후 가열시험
  - 설계기준 사고 시, 핵연료 안전성 검증 필요
  - 300시간@1600~1800°C 가열 시험후 손상률/방사성핵종 방출률 분석

| Irradiation test | Location | Fuel type | Spheres or compacts (particles) | Completed | Burnup (%FIMA) | Temperature (°C)[a] | EOL $^{85m}$Kr R/B |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| US DOE-AGR | | | | | | | |
| AGR-1 | ATR | UCO | 72 (298,000) | Nov 2009 | 11.3 – 19.6 | 1069 – 1197 | 0.1 – 1×10$^{-7}$ |
| AGR-2 | ATR | UCO<br>$UO_2$ | 36 (114,000)<br>12 (18,500) | Oct 2013 | 7.3 – 13.2<br>9.0 – 10.7 | 1080 – 1360<br>1072 – 1105 | ~10$^{-6}$ [b]<br>10$^{-7}$ [b] |
| AGR-5/6 | ATR | UCO | 170 (515,000) | Jul 2020 | 5.7 – 15.3 | ~600 – 1350 | 0.1 – 1×10$^{-6}$ [c] |

| Country | Particle sample | # particles | # TRISO failures | Failure fraction | Upper limit @ 95% confidence |
|---|---|---|---|---|---|
| US | AGR-1 | 298,000 | 0 | 0 | ≤1.1×10$^{-5}$ |
| | AGR-1 + AGR-2 | 412,000 | ≤4[b] | 9.7×10$^{-6}$ | ≤2.3×10$^{-5}$ |

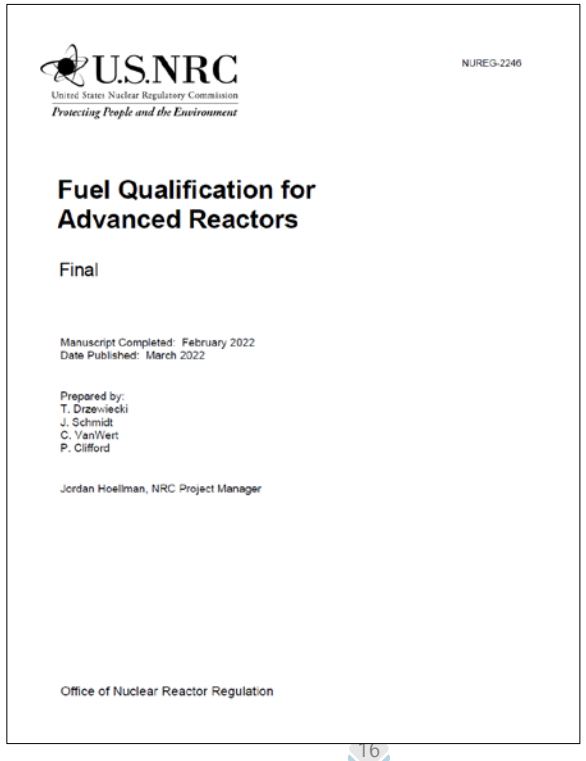


# NRC 피복입자핵연료 자격화

- NRC는 2019년 DOE AGR 핵연료 자격화 승인하고 2022년 선진원자로 핵연료 자격화 규제지침 마련
  - UCO 피복입자핵연료 제조성, 품질 및 노내 성능 (정상운전 1,250°C, 사고 시 300시간/1,600°C 검증)
  - DOE AGR 핵연료 조사시험 데이터는 핵연료 성능해석 코드 검증에 활용
  - X-Energy, Kairos Power 등은 DOE AGR 핵연료 TR (Topical Report) 참조하여 핵연료 자격화 추진/승인






# 피복입자핵연료 개발 현황 (국외)



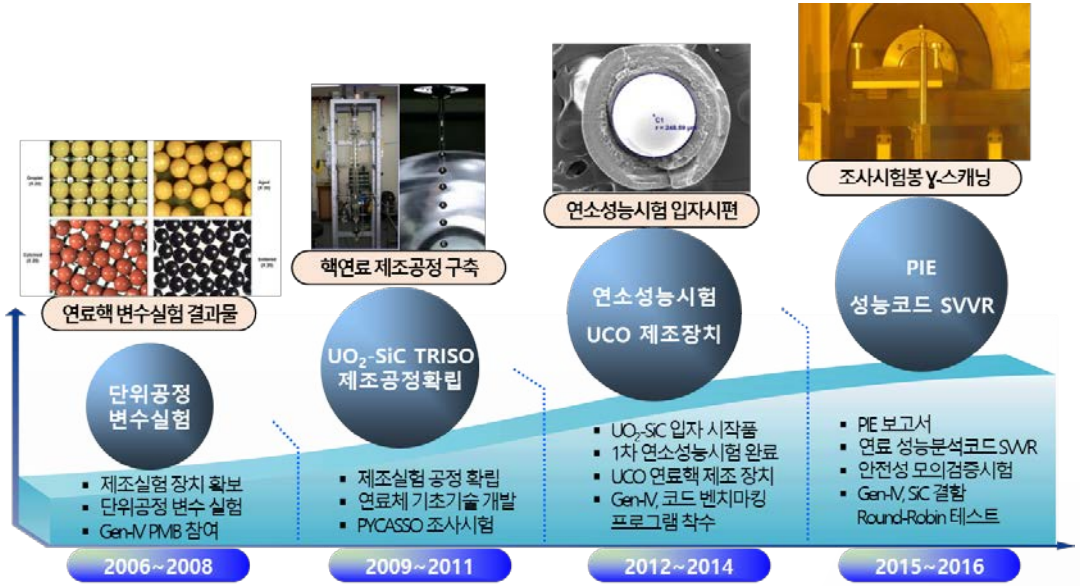
- 미국 : DOE AGR 프로그램을 통한 고온가스로 인허가 지원 및 민간의 상용급 시설 구축 추진
- 중국 : HTR-10 및 HTR-PM 개발과 병행하여 상용급 핵연료 기술 및 제조시설 확보
- 일본 : HTTR 개발과 병행하여 NFI에서 공학규모 기술 및 제조시설

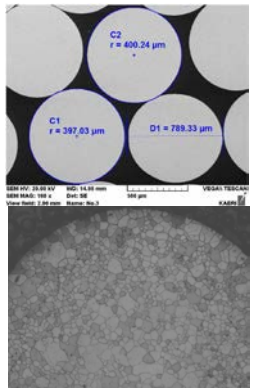
| | 미국 | | | | 중국 | 일본 |
|---|---|---|---|---|---|---|
| 개발단계 | 선도적 기술<br>상업화 진행 중 | | | | 상업화 시작<br>고온가스로 가동 성공 | 연구 중심<br>상업화 초기 단계 |
| 주요 성과 | HALEU 기반 UCO TRISO 성능 검증 (TR)<br>DOE ARDP 지원 (상용급 제조 역량 강화) | | | | HTR-PM 상업 가동 성공 | HTTR 실험 성공 |
| 상업화 | 공장 건설 중<br>상업화 초기 단계 | | | | 상업 가동 시작<br>대량 생산 준비 | 상업화 준비 단계 |
| 주요 기관/기업 | BWXT | X-Energy | USNC | Kairos Power | CNNC | NFI |
| kernel 조성 | UCO | UCO | UCO | UCO | UO2 | UO2 |
| Matrix 소재 | 흑연 | 흑연 | 탄화규소 | 흑연 | 흑연 | 흑연 |
| 핵연료 형태 | compact | pebble | compact | pebble | pebble | compact |
| 제조시설 용량 (MTU/year) | < 1 | 8 | ~0.5 | - | 2.1 | 0.4 |
| 자격화 여부 | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ | ○ |
| TRL | 8 | 7 | 6 | 5 | 8 | 8 |

# 피복입자핵연료 개발 현황 (국내)

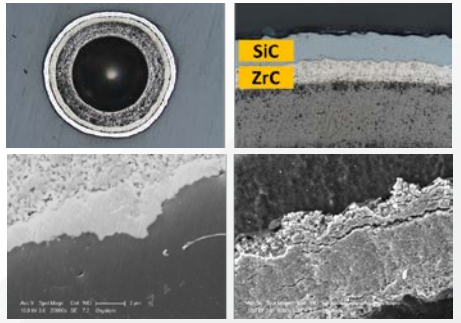


- 피복입자핵연료 기술개발 (2006.03~2017.02)
  - 20g/batch 수준 $UO_2$(~500μm) 피복입자핵연료 제조 기술 확보
  - 하나로에서 1차 4FIMA 연소성능시험
  - 피복입자핵연료 성능분석코드(COPA) SVVR
- 초고온가스로 요소기술 성능 향상 (2017.03~2019.12)
  - ZrC/SiC 다중코팅 최적화 및 연료체 이방성 개선 공정
- 삼중피복연료 연소성능 향상 원천기술 개발 (2018.09~2020.12)
  - 대형 UO2 (~800μm) 피복입자핵연료 제조 기술
- 초고온 재료 성능검증 기술 (2021.04~2022.12)
  - ZrC/SiC 다중코팅 노외 성능 검증
- 초소형 원자로용 핵연료 핵심기술 개발 (2025.01~2030.12)
  - 실험실 규모 UCO 피복입자핵연료 기술 개발
  - 시작품에 대한 하나로 노내 성능 시험
- 공학규모 UCO 피복입자핵연료 기술 개발 (2028.~)
  - 공학규모 UCO 피복입자핵연료 제조 장치/공정 개발
  - 성능해석코드 COPA 자격화
  - 시작품에 대한 노내 성능 시험 [하나로, INL ATR, LTS (Lead Test Specimen)




직경 0.8mm $UO_2$ 연료핵




ZrC/SiC 다중코팅 제조 및 계면 건전성 평가

# 원자로급 흑연 사양 요건

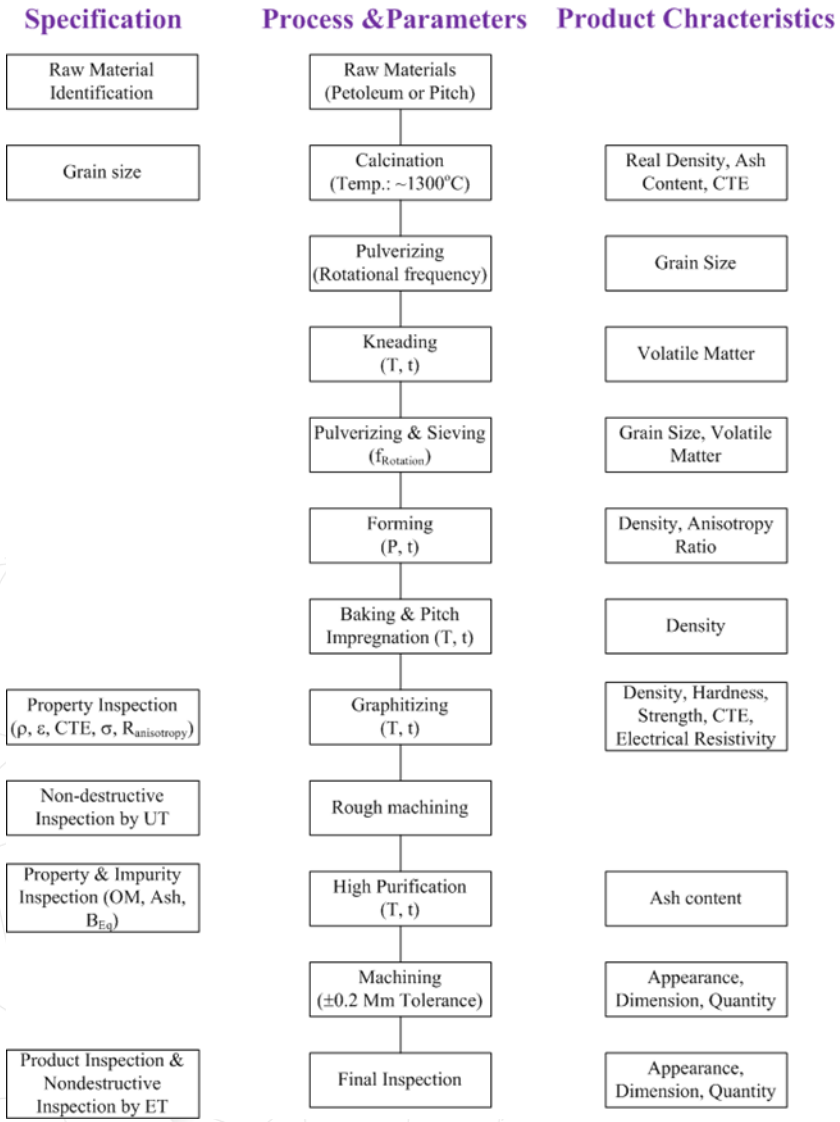


- ASTM Standard Specifications
  - D7219-08 Standard Specification for Isotropic and Near-Isotropic Nuclear Graphites
  - D7301-08 Standard Specification for Nuclear Graphite Suitable for Components Subjected to Low Neutron Irradiation Dose

| Property | Nominal Range | Performance Attributes |
|---|---|---|
| Density | 1.7 - 1.9 g/cm$^3$ | Neutron efficiency, Structural integrity, Thermal efficiency |
| Thermal Conductivity (at Room Temperature) | > 90 W/m/K | Heat transport |
| Purity (Total Ash Content) | < 300 ppm | Reduced component activity levels during replacement and/or disposal<br>Reduced graphite oxidation under normal and accident conditions. |
| Tensile Strength | > 15 MPa | Structural integrity |
| Compressive Strength | > 45 MPa | Structural integrity |
| Flexural Strength | > 20 MPa | Structural integrity |
| CTE (20°C to 500°C) | 3.5 to 5.5 x 10$^{-6}$ K$^{-1}$ | High value is indication of isotropy = dimensional stability under irradiation<br>Lower value potentially beneficial in terms of thermal stress |
| CTE Isotropy Ratio | < 1.10 | Irradiation dimensional stability<br>Structural integrity |
| Dynamic Elastic Modulus | 8 – 15 GPa | Structural integrity<br>Irradiation creep |
| Dimensional Changes with Irradiation | Minimal shrinkage<br>Minimal differences in with-grain and against-grain directions | Structural integrity (lower internal stresses) |

- 특별 고려사항
  - 핵연료 블록 : Fine-grained (10 or more grains between the channels)
  - 반사체 블록 : Low cost, high irradiation stability
  - 하부 지지 구조물 : High strength, less oxidative

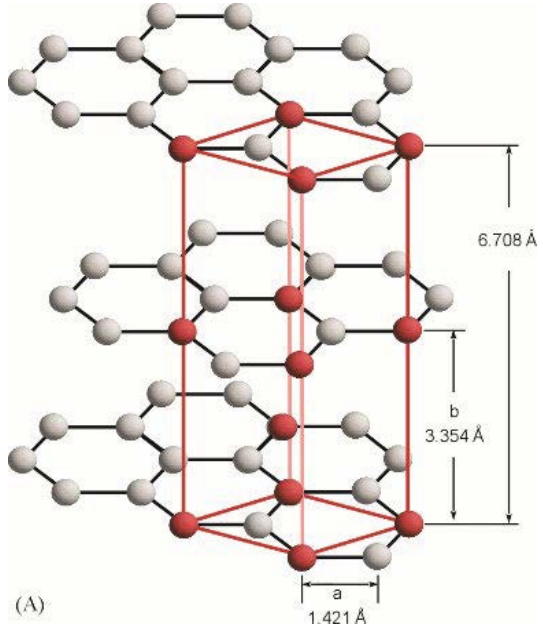
# 원자로급 흑연의 제조 공정

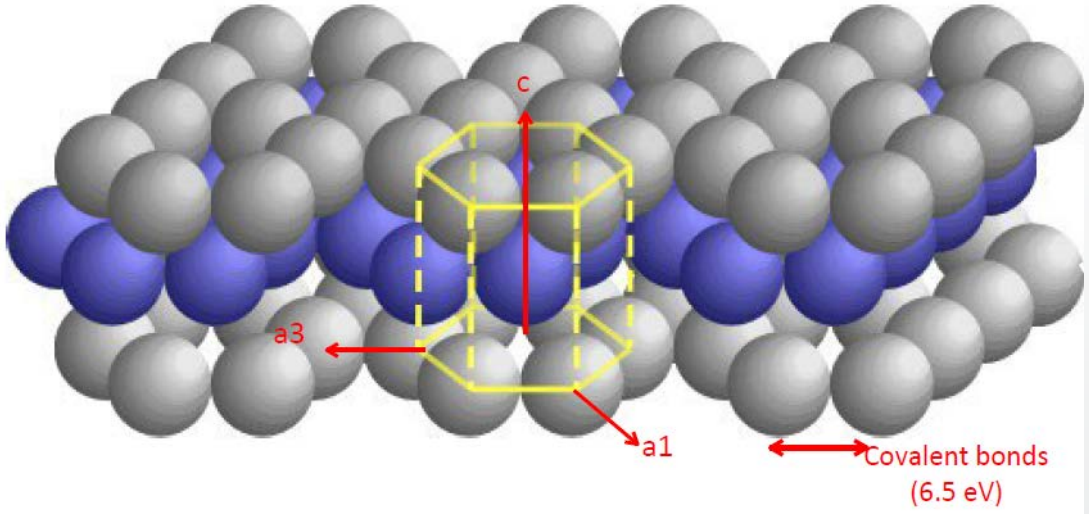



- 흑연 거동을 이해하려면 고유한 제조공정 이해 필요
- 흑연 구성 요소
  - 필러 (Filler) 입자 : 석유 코크스 / 석탄 피치 코크스
  - 바인더 (Binder) : 피치 기반 액상 결합제
- 불순물 제거를 위해 코크스와 바인더 하소
- 코크스 입도 제어
- 성형 : extruded, vibrationally molded, isostatically molded
- 고밀화를 위한 함침
- 흑연화 열처리
- 고순화 (할고겐화법)
- 체적 데이터 필요
  - Intra-billet variations
  - Billet-to-billet variations
  - Batch-to-batch variations

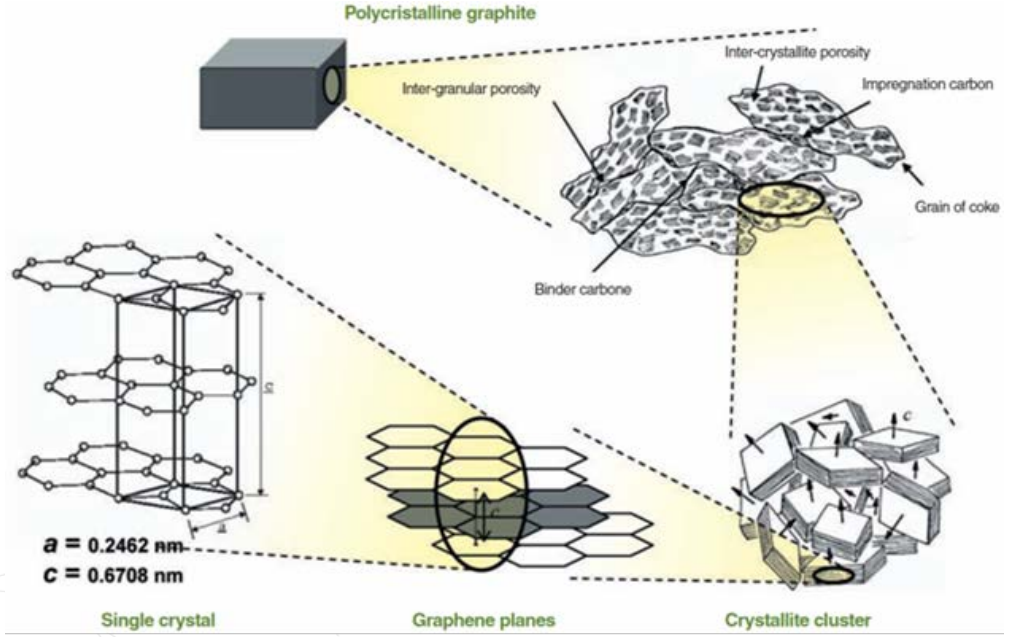
# 흑연 결정구조

- 육방정계 밀집 구조 (Hexagonal close pack)
  - A-B-A-B 형태의 기저면 적층
  - 기저면 내 공유결합
  - 기저면 사이는 반데르발스 결합
- 이방성 구조
  - 열팽창계수 : c-축 ~26x10$^{-6}$/°K, a-축 ~1x10$^{-6}$/°K
  - 열전도도 : c-축 ~6.8W/mK, a-축 ~2000W/mK



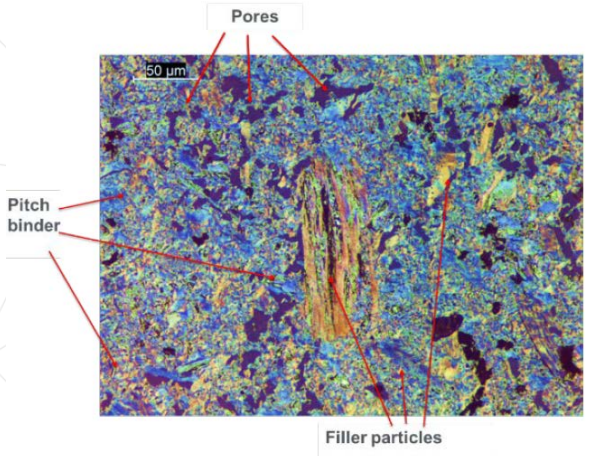



# 흑연의 미세구조










- 3가지 상 (phase)으로 구성
  - Filler phase
  - Binder phase
  - Pore phase (~20%)
- 흑연의 거동은 기공구조에 의해 결정
  - 기공 크기 : nm ~ mm
  - 제조 과정 중 큰 결함 (균열/기공) 형성
    - 필러는 탄소 바인더로 결합
    - 바인터 사이 틈에 기공 및 균열 형성
  - 나노급 기공구조는 조사 안정성 부여
    - 결정립 내 Mrozowski 균열 (완충 기공)
    - 흑연화 과정에서 기저면 분리에 의해 형성
- 흑연의 기공구조는 필연적

# 흑연 결정 내 조사손상



- 흑연 결정 내 조사손상
  - 1, 2차 원자 충돌 (primary and secondary knock-ons)
  - 침입형(interstitial) 원자와 공공(vacancy) 루프 형성
  - 루프의 크기는 조사온도에 의존
  - 새로운 기저면 형성 (c-축 팽창)과 기저면 붕괴 (a-축 수축)

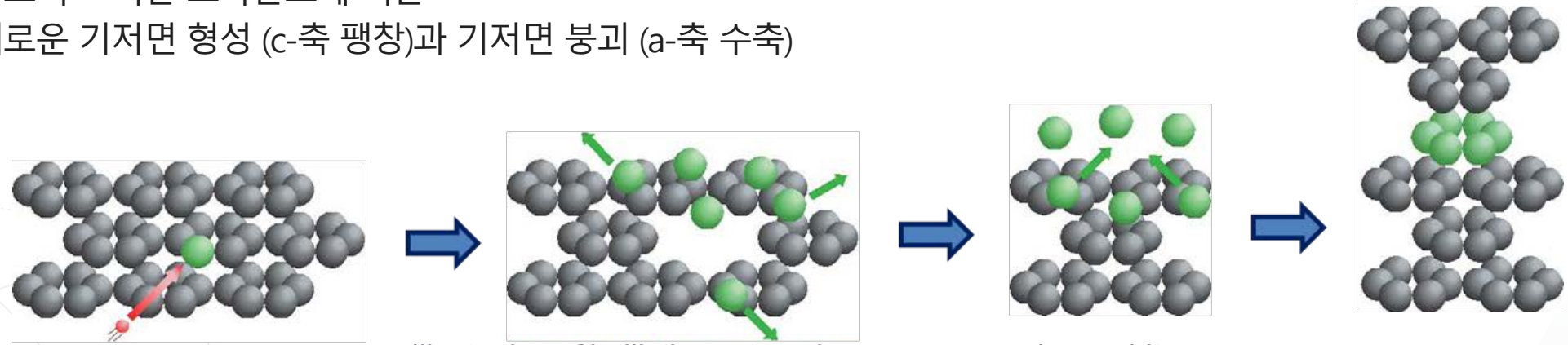
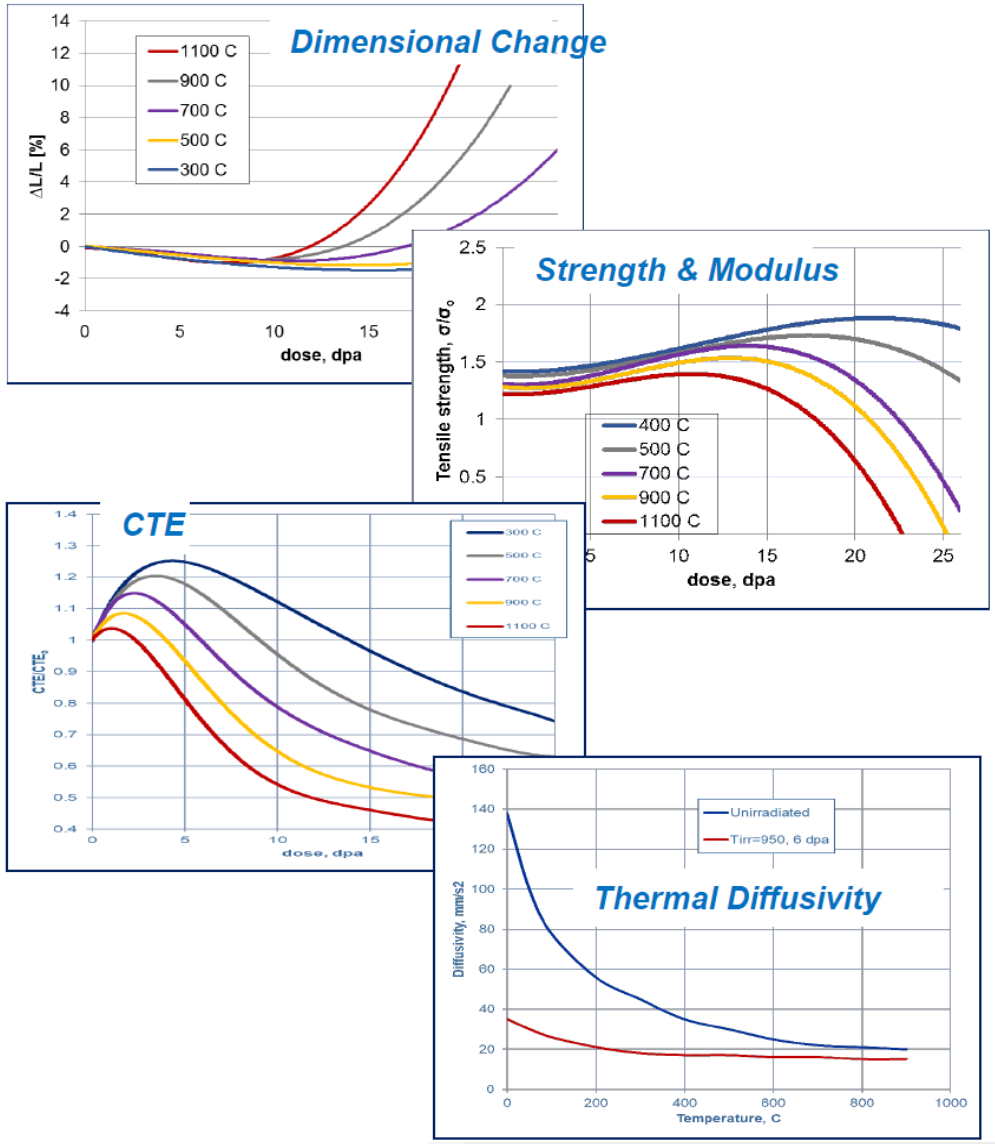


Illustration of ballistic neutron damage process in graphite

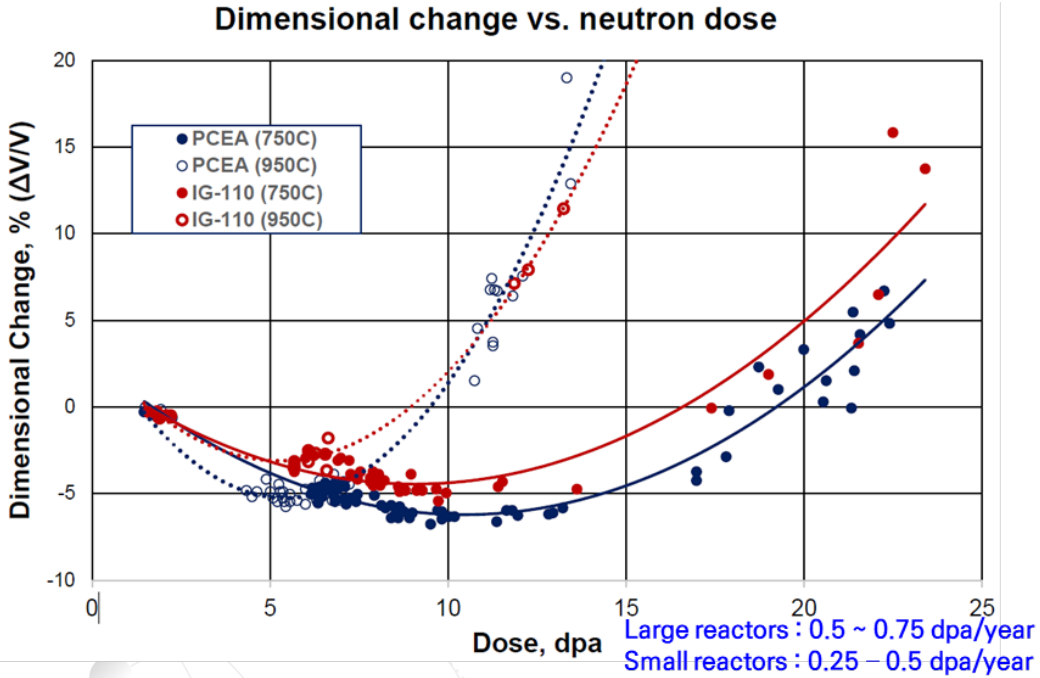
- 다결정 흑연의 조사손상에 미치는 미세조직학적 변수
  - 결정도
  - 결정립 방향성 변화
  - 제조 과정 중 형성된 미세조직 내 미세결함

# 흑연의 중성자 조사 거동

- 주요 물성 변화:
  - 체적변화
  - 밀도
  - 강도 및 탄성계수
  - 열팽창계수
  - 열전도도
    - 조사 즉시 비조사 대비 ~30% 수준으로 감소
    - 고온에서는 비조사 상태와 유사
- 변화가 거의 없는 물성
  - 중성자 감속능
  - 비열 (열용량)
  - 방사율



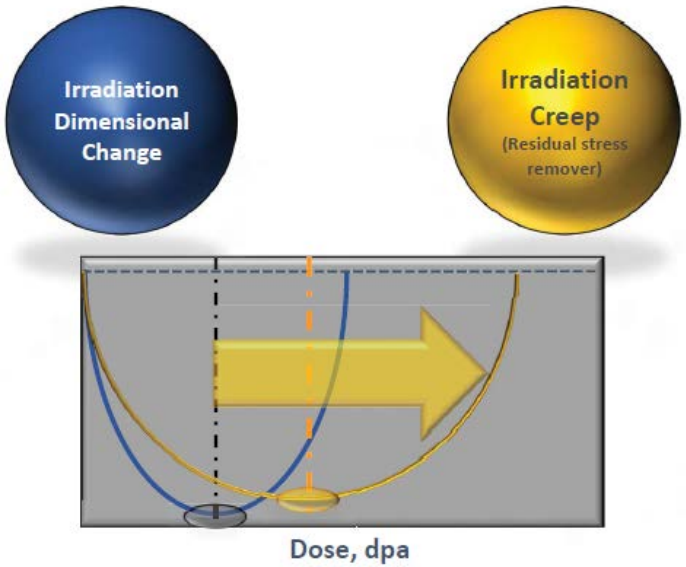
# 중성자 조사에 의한 체적변형

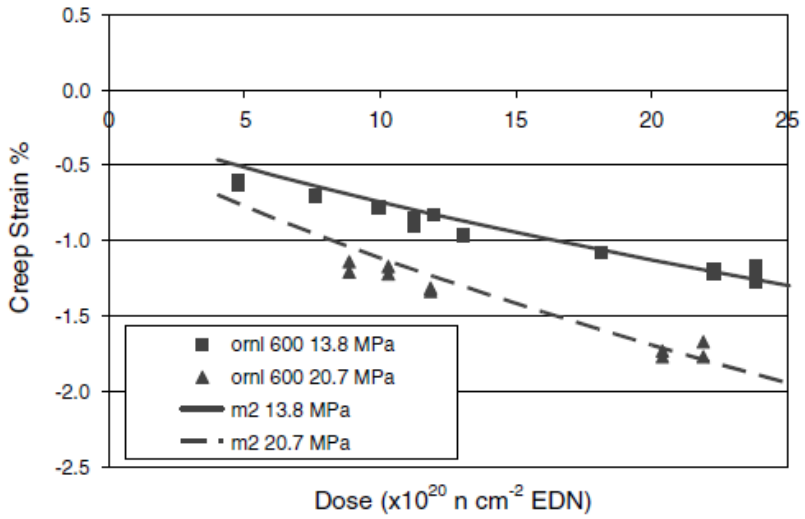





- 조사량 및 온도 의존성
  - 초기에는 Mrozowski 균열 및 결정립 불일치로 c축 팽창 수용
  - 이후 균열이 닫히며 반전점 (turnaround) 발생
  - 조사온도 증가 시, 결정립 열팽창에 의해 균열이 닫힘에 따라 반전점 가속화
- 조사율은 흑연 구조물 수명 평가에 필수
  - 반점점 이후 예측 불확실성 증가 (산포 증가)
  - 압축 및 인장 응력장은 균열전파를 각각 억제 및 촉진
- 흑연 구조물은 압력 유지 불필요
  - 균열은 돌발 손상(catastrophic failure)을 초래하지 않음
  - 연료 및 제어봉 구조건전성 유지

# 조사유기 크리프

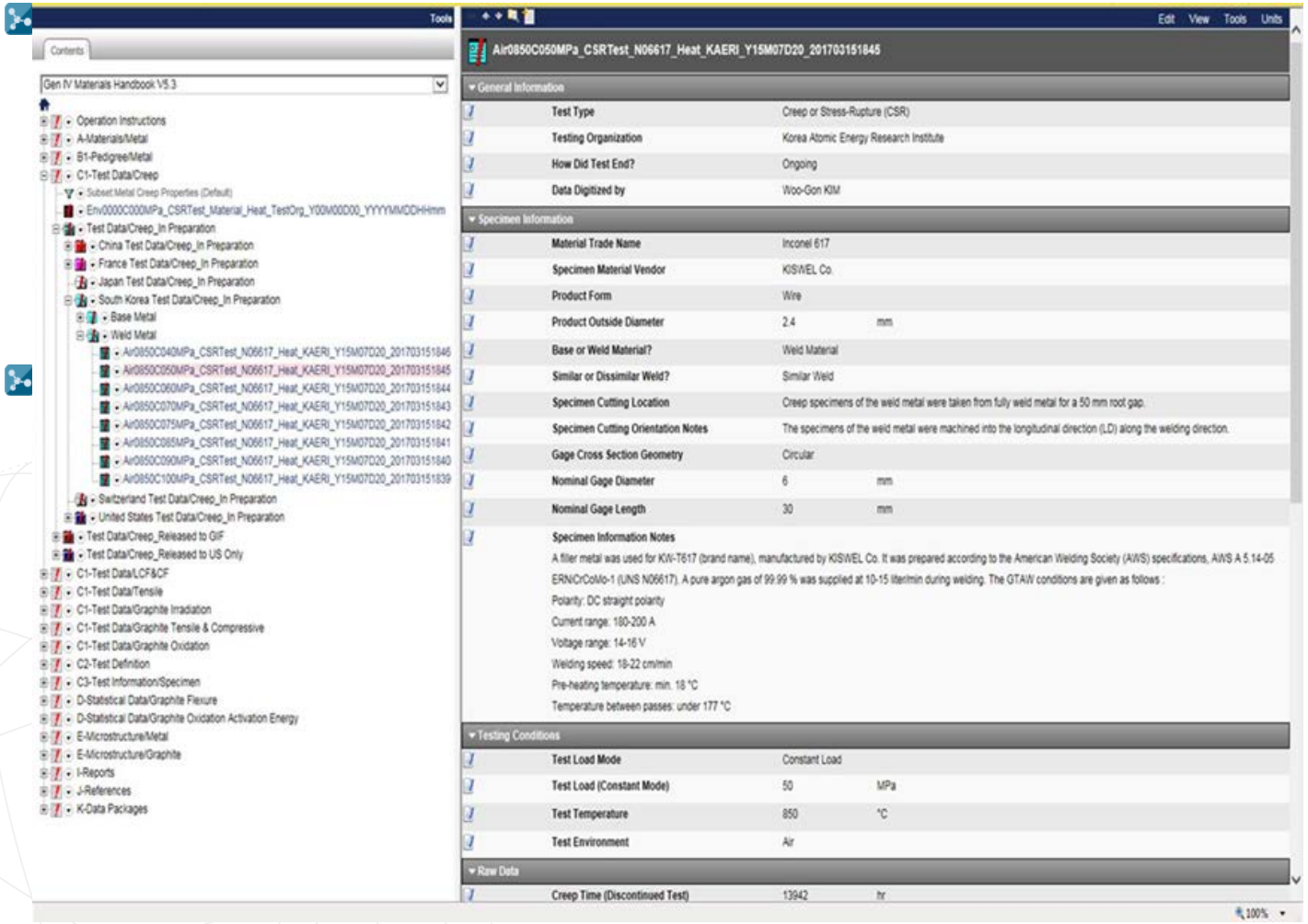


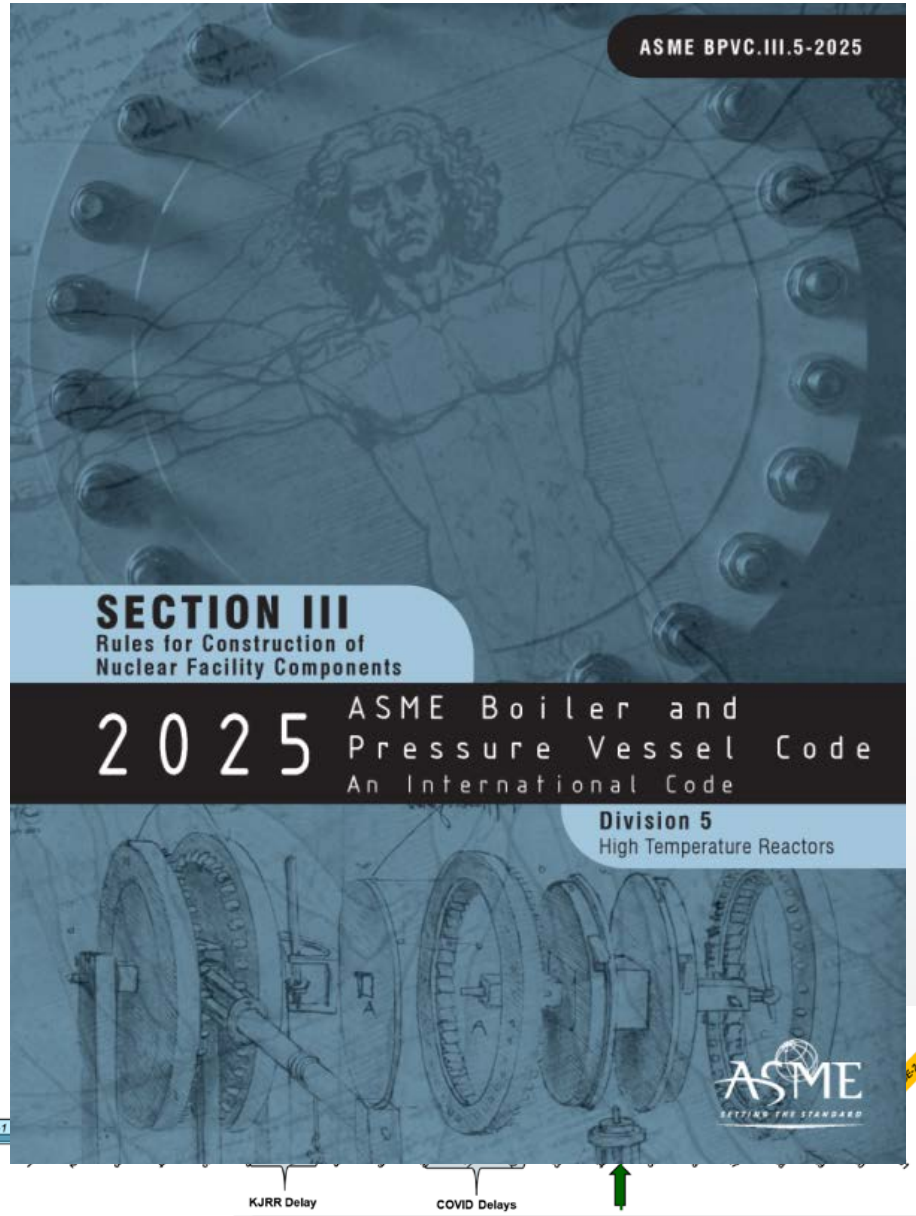




- 체적변화에 의한 내부응력 완화
- 크리프 변형률은 온도에 따라 증가
- 조사 중 열팽창 및 체적변화 관련 응력 완화에 효과적
- 조사량이 증가할수록 이 효과는 허용 설계수명을 달성을 위해 중요
- 현재 다양한 흑연 등급에 대해 크리프율 측정 중
  - 크리프를 어떻게 설계에 활용할 것인가?
  - 측정된/예측된 크리프 변형률로 내부 응력 감소
  - 크리프 변형은 반전점까지 선형으로 간주됨 (선형 크리프 법칙, M2 모델)

# 흑연 물성 DB 및 설계방법론

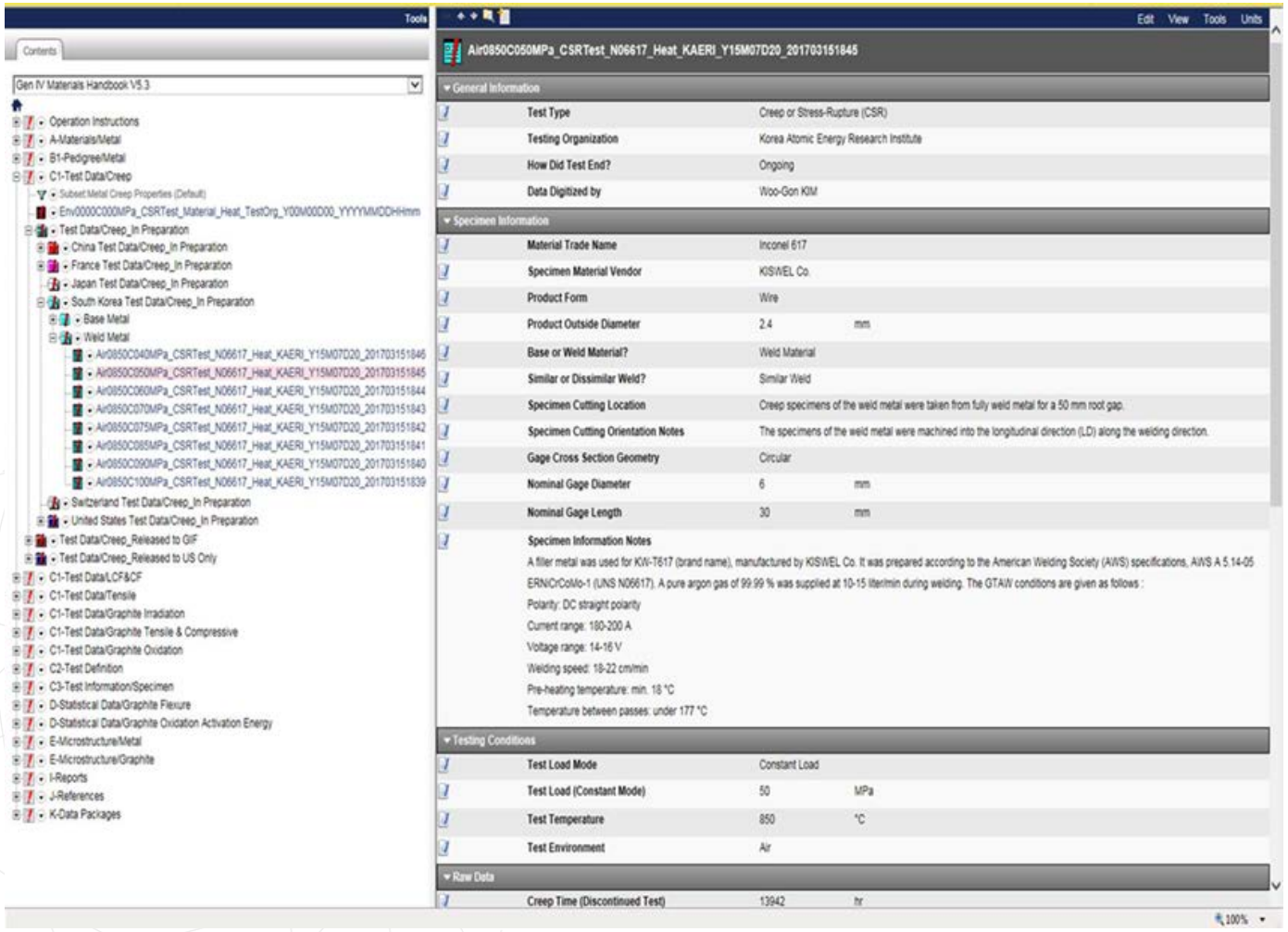


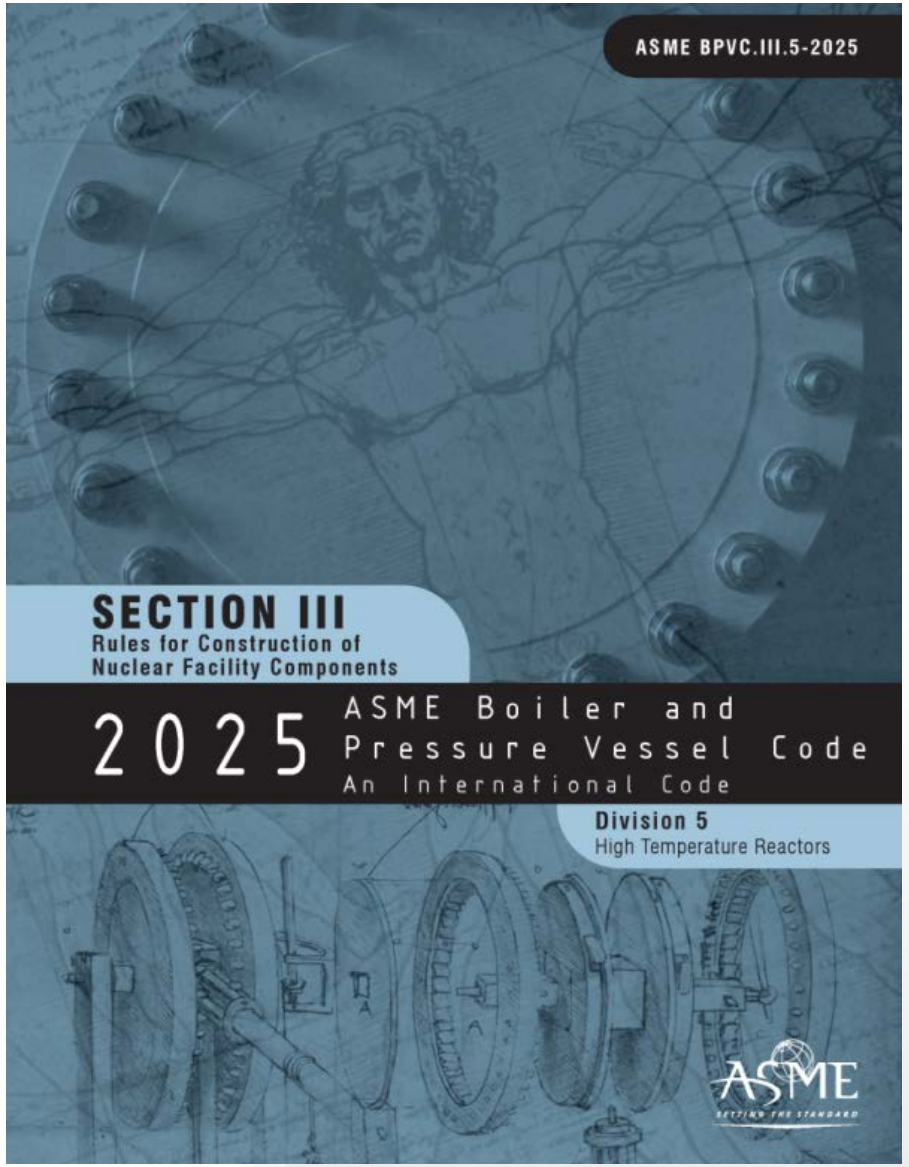


# 흑연 물성 DB 및 설계방법론





# 결언



1. 고온 안전성 및 피동안전성 확보
   - TRISO 다중 피복층의 고온 건전성과 핵분열생성물 보유 능력
   - 흑연의 우수한 내열성, 열적 안정성 및 열용량을 활용한 피동안전성 강화
2. 핵연료 성능검증 및 인허가 기반
   - AGR 조사·안전시험을 통해 TRISO 핵연료 성능검증 자료 확보
   - NRC의 EPRI TR 안전성 평가 및 NUREG-2246 등 규제체계 활용
3. 흑연 재료 DB 및 설계기준 확보
   - GIF VHTR Materials Handbook의 흑연 물성·조사거동 DB 활용
   - ASME BPVC Section III Division 5 기반 구조 건전성 평가 및 설계기준 적용
4. 제조·공급망 및 품질보증체계 확립
   - TRISO 핵연료와 원자로급 흑연의 안정적인 제조·공급망 확보
   - 제조규격, 공급자 적격성 및 NQA-1 기반 품질보증체계 구축
5. HPR 고유 설계·검증 기술 확보
   - 핵연료–모놀리식 구조물–히트파이프 간 열적·기계적 상호작용 평가
   - 조사·열변형, 계면 갭 및 접촉열저항, 화학적 적합성 검증

더 나은 세상을 위한 원자력기술
국민과 세계가 지지하는 한국원자력연구원

# 감사합니다.

KAERI 한국원자력연구원
Korea Atomic Energy Research Institute