



건식저장을 위한 **사용후핵연료** 기술개발 현황

2018. 5. 16

이성기

한전원자력연료



Contents



I. 서론

II. SF 기술확보 범위

III. SNF 고유 평가 모델

IV. 비정상 SF 조치 솔루션

V. 결론

1. 서론

핵연료(사용후핵연료) 환경/특성

구분	설계/제조	원자로연소	습식저장	취급/건조/운반/취급	건식저장/회수	운반/취급/저장/처분
환경	<ul style="list-style-type: none"> 설계: ~10개월 제조: ~1년 대기압 상온 공기 Fresh 소재 - 부식/조사(x) - 연성 ● As-is(design) 형상 (힘/비틀림(x)) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 3~5년 ● ~15 MPa ● ~ 320°C ● 경수/중수 ● 조사된 소재 - 산화/수소화/취화 - 고연소도 → 부식량증대 ● 형상변형 (힘/비틀림(O)) (손상/비정상연료(O)) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 5년 이상 ● 3~5 MPa ● ~ 40°C ● 경수 ● 물리/재료적 추가 열화/변화(X) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 취급(SNF Pool) - 건조/용기 장전 - 비정상연료 조치 ● 건조공정 - 3Torr, 30분 - 400°C (max) - Δ65°C/10회(max) ● 운반/취급(건식) - 대기압/상온 - 외력(충격, 진동) 	<ul style="list-style-type: none"> ● 40년 이상 ● 대기압/He ● 400°C (max) (피복관) - ~100°C/100년 ● 열화 - 수소화물 재배치 → 기계적 특성 저하 	<ul style="list-style-type: none"> ● 운반/취급 - 저장용기 교체 - 회수/재 운반 - 저장열화 특성 반영 ● 저장/처분
						
비고	<ul style="list-style-type: none"> 원자로 조사 및 운반/취급 건전성 유지 조건 설계/제조 	<ul style="list-style-type: none"> 핵연료 특성이 가장 많이 변화 과정 가장 가혹한 환경 (최고 온도, 압력, 응력, 중성자 조사) 	<ul style="list-style-type: none"> 조사 후 상태 유지 PSE 측정/상태 확인 	<ul style="list-style-type: none"> 건조 공정: 최대 열화 환경 운반/취급: 손상 가능성 최대 환경 건식저장 특성 반영 	<ul style="list-style-type: none"> 열화 특성 정의/회수성 평가 	<ul style="list-style-type: none"> 장기저장 열화 특성 반영 → 운반/취급 건전성 평가 보수적 평가를 위해 이 시점 특성 고려 평가

1. 서론

■ 원자로 시스템

- ✓ 원자로 운전 수명: 30~60년, 안전성/건전성 평가, 영구운전정지 후 ⇨ 해체 대상
- ✓ 핵연료 발전 기간: 3~5년, 안전성/건전성 평가, 사용후핵연료 편입 후 관리 됨

■ 사용후핵연료(SF) 관리 시스템(운반/저장 캐스크 등)

- ✓ 설계대상 : SF가 안전하게 관리되도록 맞춤형(양립) 설계
- ✓ 설계수명 : 40~50년, 안전성/건전성 평가, 설계수명 후 : 교체 대상

■ SF 관리(건전성/안전성 평가)

- ✓ SF 자체 특성을 파악/정의 ⇨ 주어진 환경(운반/저장)하에 안전/건전한지 평가하여 안전하게 관리하는 과업
 - ⇨ 평가 대상
 - ⇨ 건전성에 관해 결코 타협(compromising) 할 수 없는 대상(IAEA1558)
- ✓ 관리 시스템(운반/저장 용기, 운용 방법 등)은 이를 위해 안전하게 설계/절차화 되어야 함

1. 서론

기술개발 근거 (국내외 관계 법령)

● 미국: 10CFR71, 72

- ☞ 정상조건: 사용후핵연료 기계적 건전성 유지(운반성,저장성,회수성)
- ☞ 사고조건: 사용후핵연료 건전성 평가에 의한 신뢰할만 형상 기반 안전성 평가 (임계 등)

● 국내: 사용후핵연료 인도규정(원안위고시 제2014-59호)

- ☞ 사용후핵연료 취급, 운반시 기계적 건전성 유지
- ☞ 사용후핵연료는 취급, 운반시 책임계 사고의 방지 등 책임계 안전이 유지될 수 있도록 포장
- ☞ 결함핵연료는 원칙적으로 폐기시설운영자가 인도받을 수 있어야 한다. ~
- ☞ ~ 운반 및 저장에 지장을 초래하지 않도록 하여야 한다.



기술 확보 목표 수준

- 관계법령, 미국 산업계 수행내용(EPR) 벤치마킹 ⇨ 미국 동등 수준 이상 고유 평가기술 확보
- 건식저장 특성(열화+SNF 특성) 반영 + 운반 기계적 건전성(최악손상모드) 평가 기술개발

해외사례(1)

운반용기 안전성 평가보고서-사용후핵연료 건전성평가 부분

Intentionally Blanked

해외사례(2)

The Criticality Effects of Fuel Reconfiguration

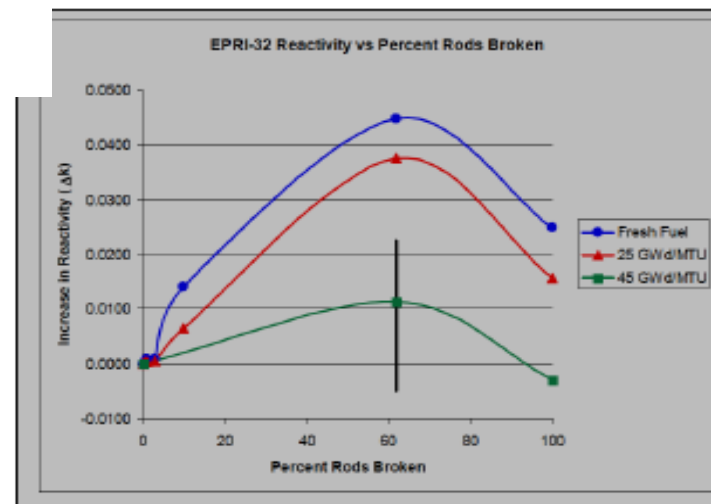
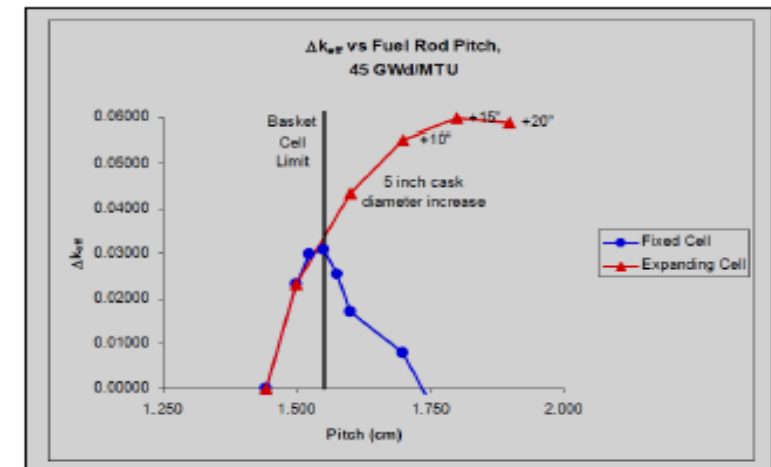


EPRI Report 1015050:

- Impact to criticality due to change of fuel rod pitch
- Impact to criticality due to percentage of broken rods

Impacts are:

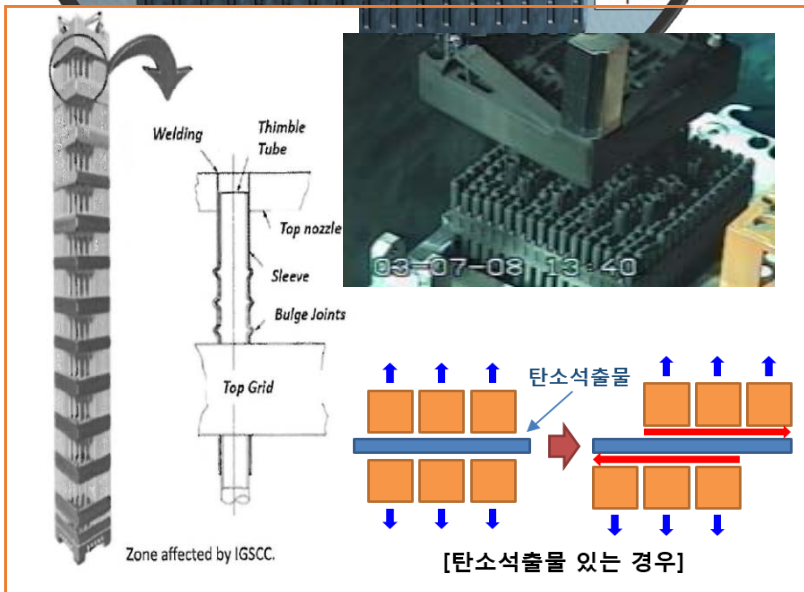
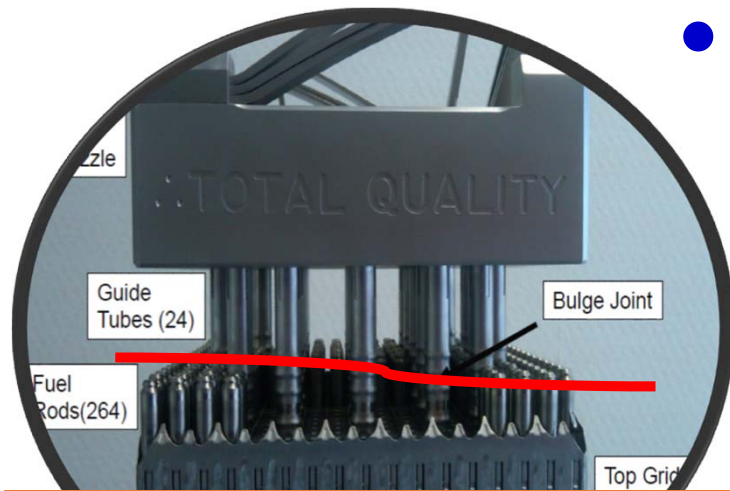
- *Burnup Dependent*
- *Cask Design Dependent*



Intentionally
Blanked

해외사례(3)

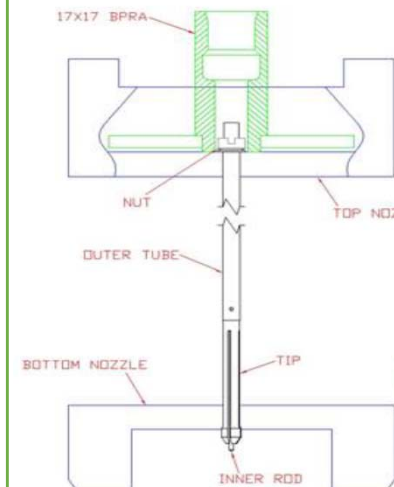
SF TN-GT 분리 조치사례



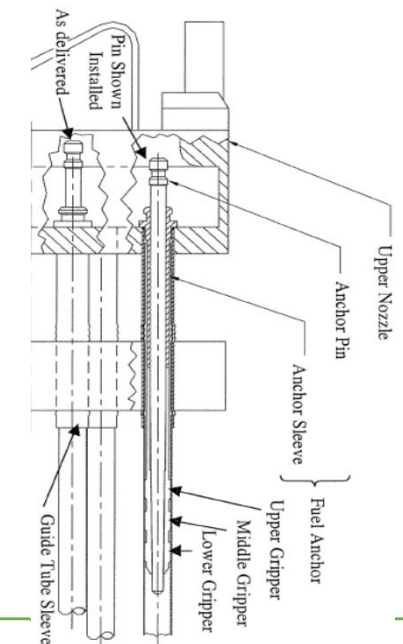
● NRC letter to Duke Energy, August 2008:

- ✓ Systems containing modified, **SCC** susceptible fuel assemblies loaded for storage **are not transportable** until an analysis demonstrating the assemblies meet Part 71 requirements is reviewed and approved by the NRC.

❖ ITTR 타입



❖ Anchor 타입



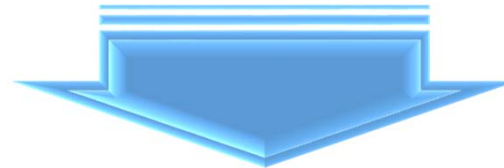
1. 서론

SF DB/모델/코드 확보/구축

SF 특성정의/건전성 평가

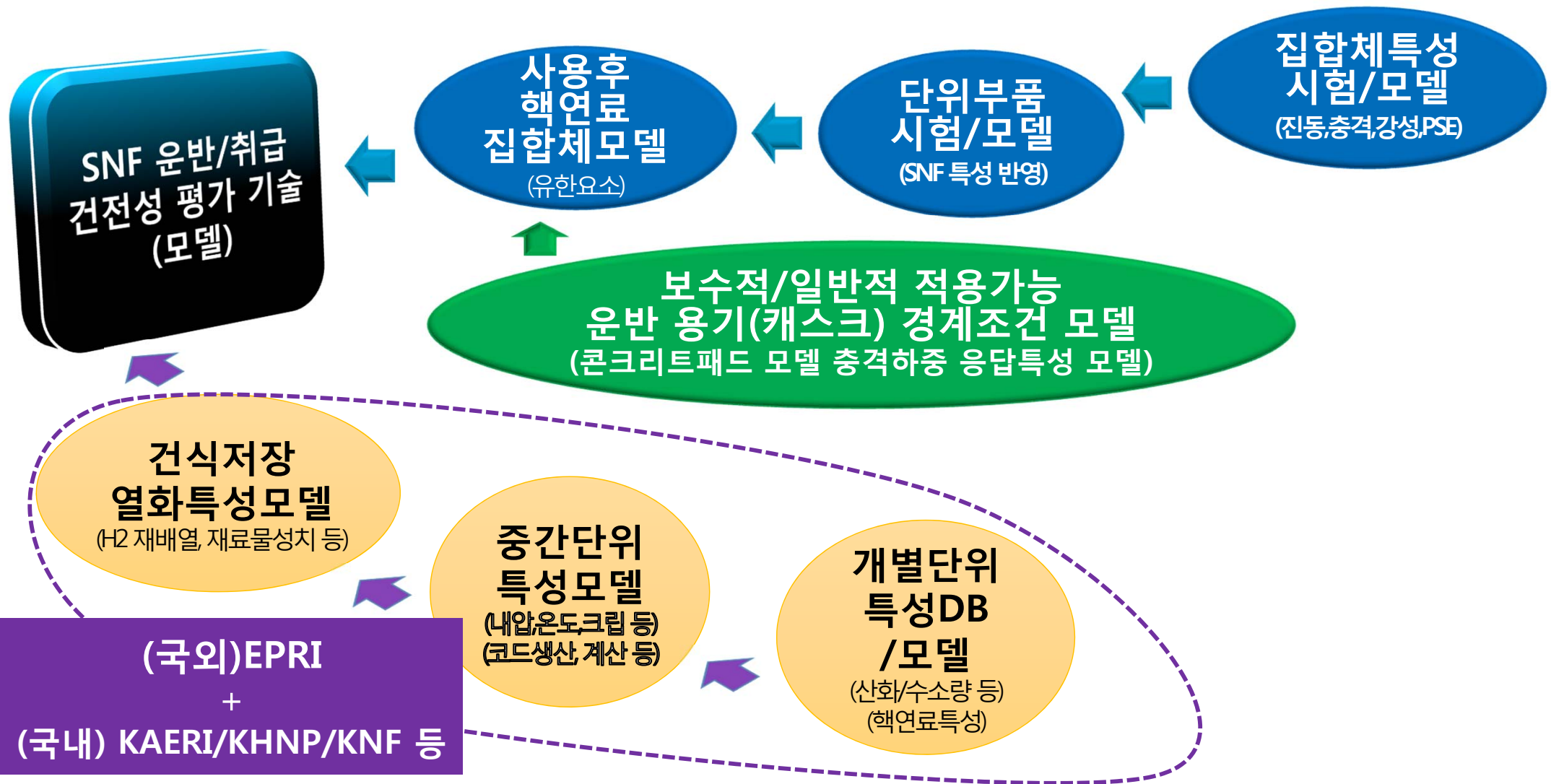
미국 수행체계 벤치 마킹

- 법령/규제 요건(10CFR71,72 등)
- 운반/저장 평가 방법론 (EPRI 등)



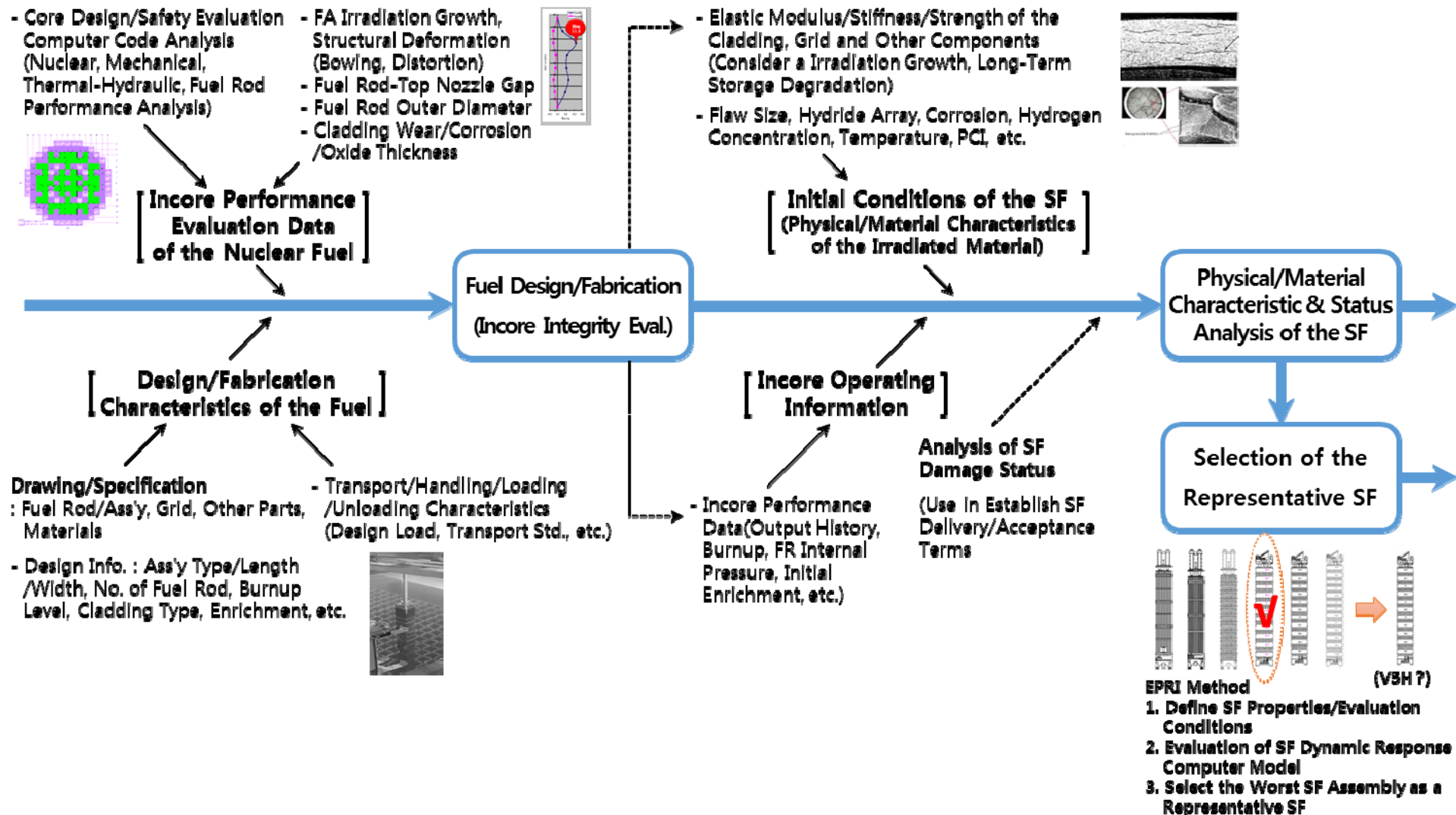
세계수준 고 신뢰도 SF 평가/관리
솔루션 제공 체계 구축

II. SF 기술확보 범위



II. SF 기술 확보 범위

SF Integrity Evaluation Scheme (1)

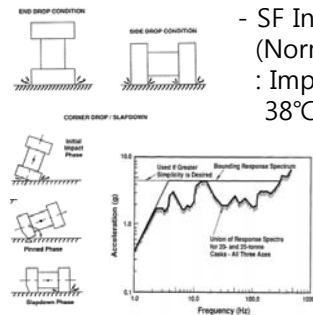


II. SF 기술확보 범위

SF Integrity Evaluation Scheme (2)

- Select the Model(Conservative Preliminary Evaluation/Final Evaluation)
- Define Geometry & Physical/Material Characteristic
- Define Transport Environment(Road, Rail, etc.)

**[Define a Cask
(SF-Cask Model)]**



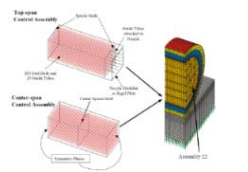
- SF Integrity Evaluation (Normal Condition)
: Impact & Vibration, 0.3m Drop, 38°C Ambient Temperature

- SF Integrity Evaluation (Hypothetical Accident Condition)
: 9m Drop, 1m Drop onto a Steel Bar, 800°C Engulfing Fire

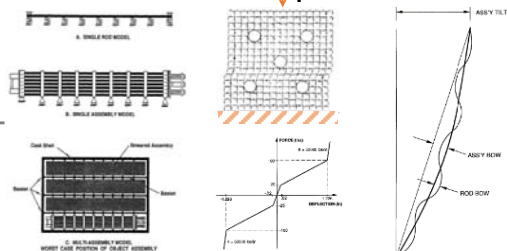
**[The Application of 10CFR71 Requirements
(Consider External Load Transfer, Cask→SF)]**

**SF-Cask System
Global Analysis**

[SF-Cask Modeling]



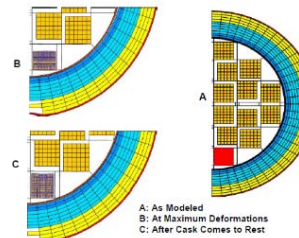
- Single Fuel Rod/Fuel Assembly Model
- Cask & Multi-Fuel Assembly Model



Grid Deformation FR/FA Bowing

[SF-Cask Model Analysis]

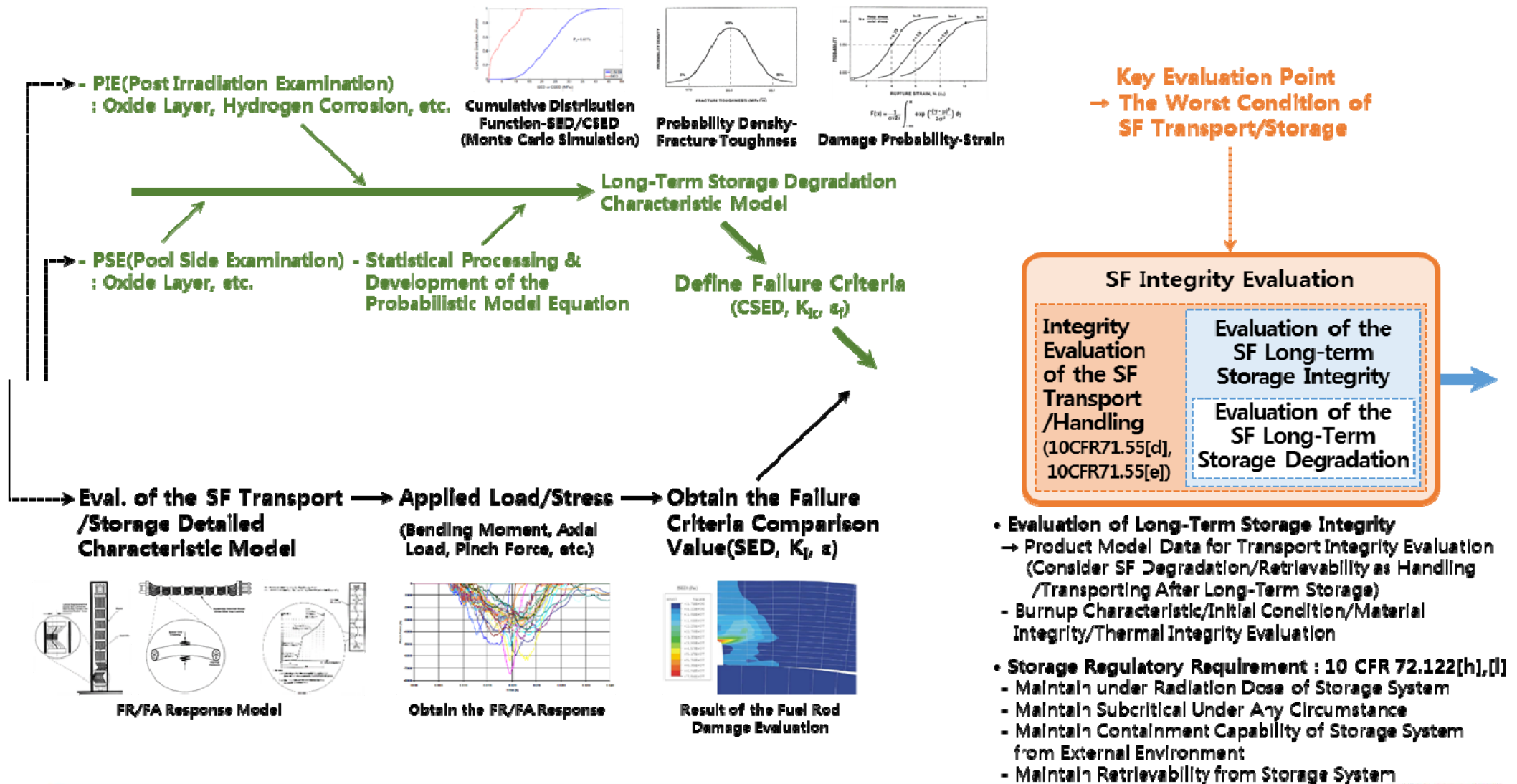
- Finite Element Analysis (Drop/Vibration/Impact/Thermal, etc.)



**Evaluation of the SF
Transport/Storage
Detailed Characteristic Model**

II. SF 기술확보 범위

SF Integrity Evaluation Scheme (3)

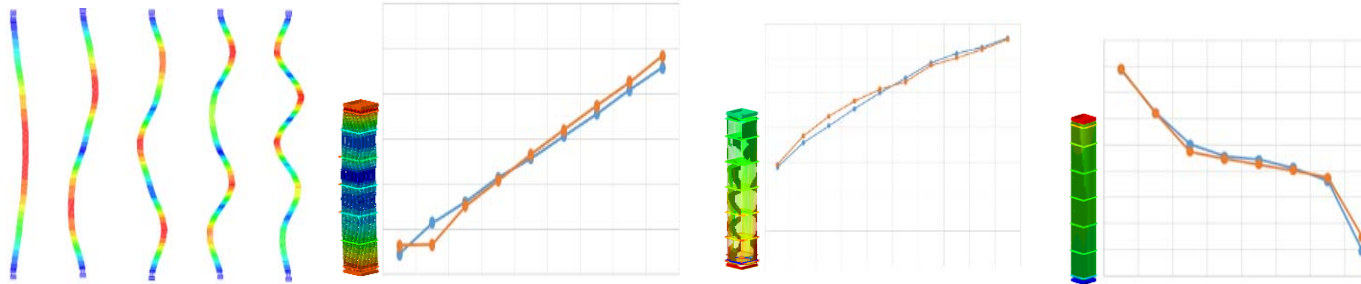
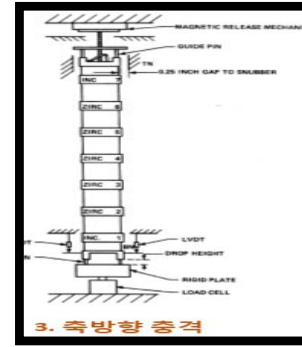
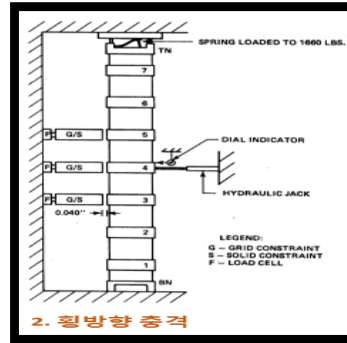
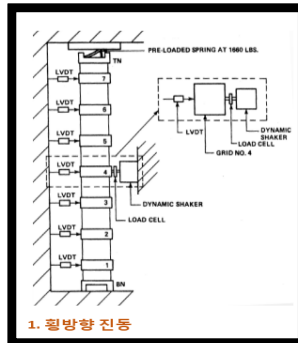




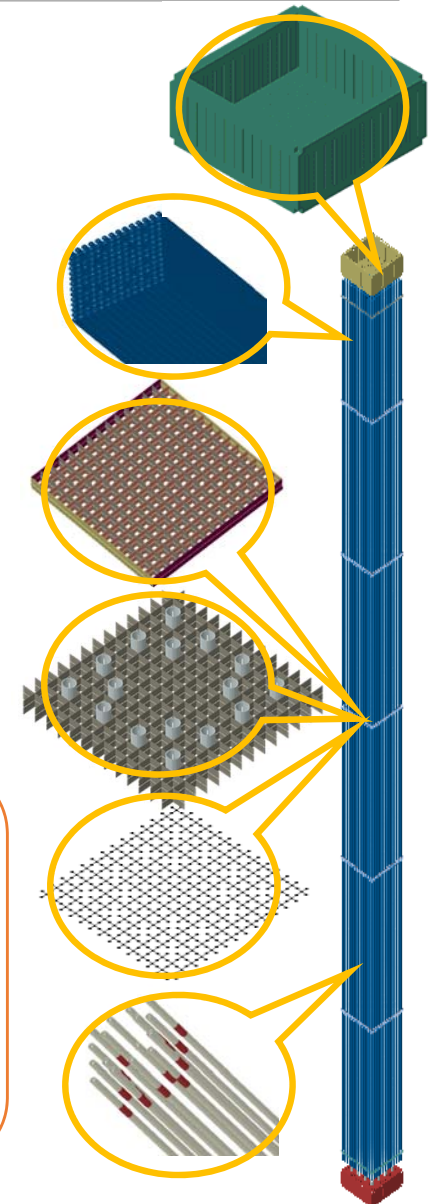
신연료특성



SNF 특성



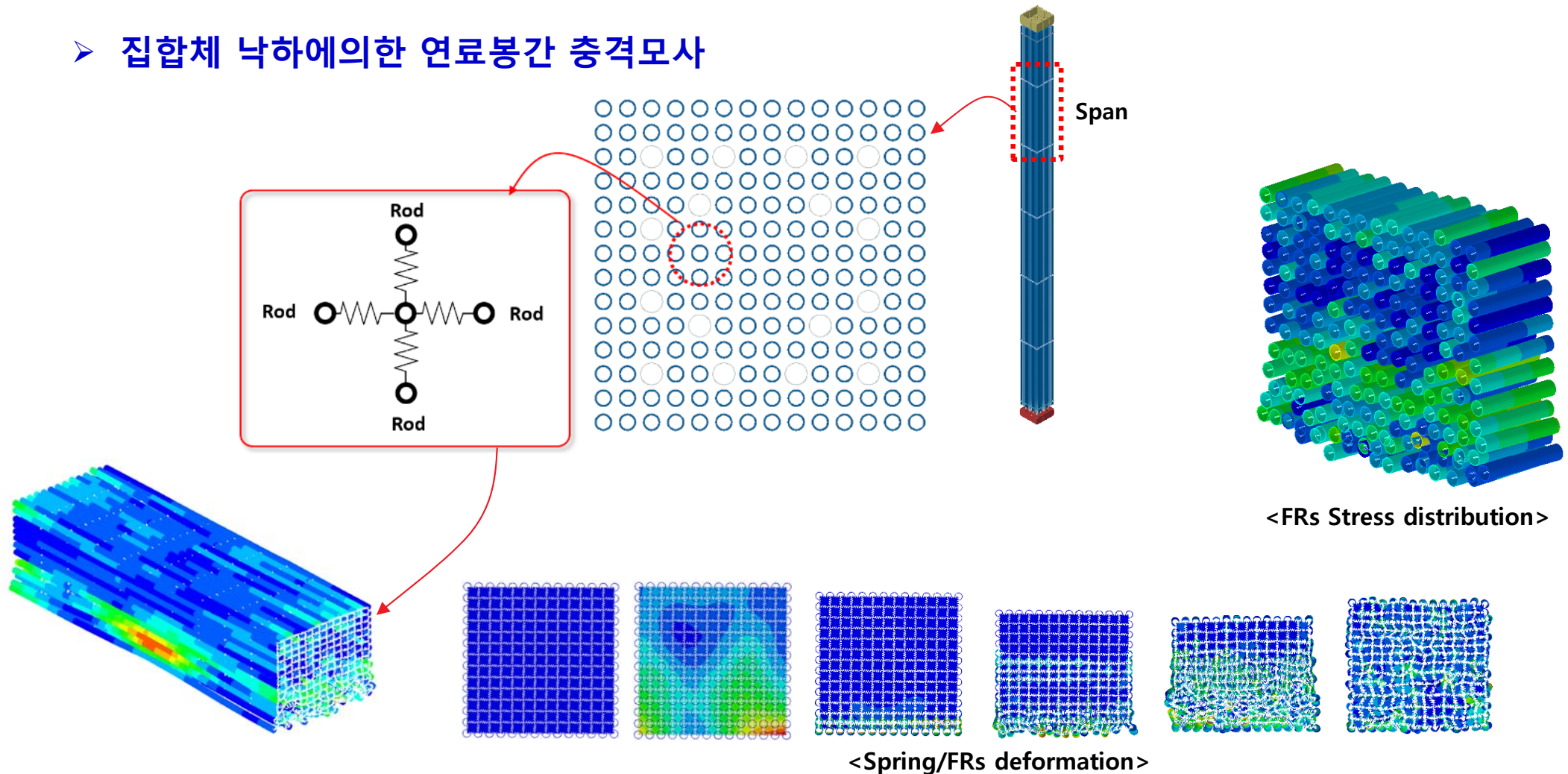
사용후핵연료 특성 반영 고유 모델 최종화 과정
(지지격자 조사특성, SF 집합체 PSE 측정자료, 건식저장
열화 특성 등)



III. SNF 고유 평가 모델-운반

● 사용후핵연료 상세 전산모사 모델 개발 및 평가 (집합체 모델 최적화)

➤ 집합체 낙하에 의한 연료봉간 충격모사



III. SNF 고유 평가 모델-운반

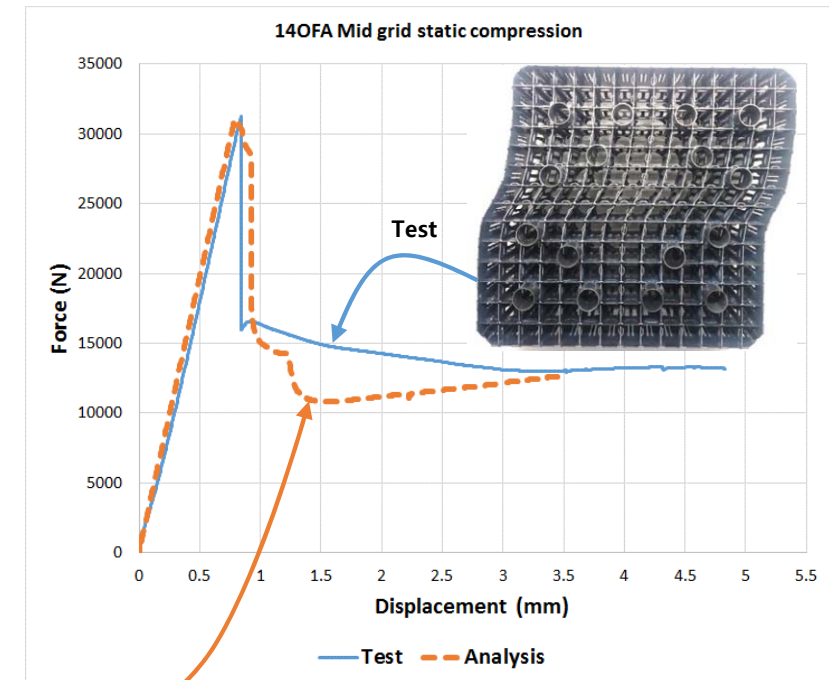
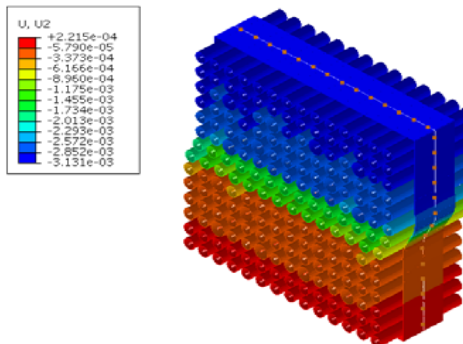
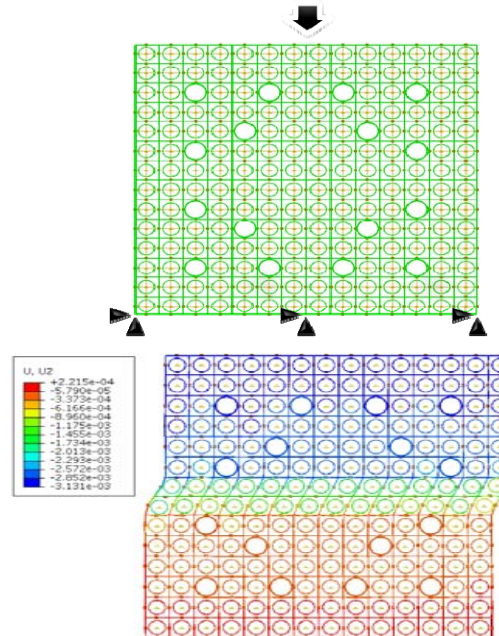
○ 사용후핵연료 상세 전산모사 모델 개발 및 평가

● 지지격자 모델 최적화 – 지지격자 기계적 특성시험 결과 기반 모델 유효성 검증

- 지지격자 좌굴강도 및 강성
- 좌굴 전,후 하중-변위 결과
- 지지격자 좌굴형상



<정적 좌굴시험>



III. SNF 고유 평가 모델-운반

○ 낙하조건에서의 기계적 건전성 평가용 부품단위 특성 시험

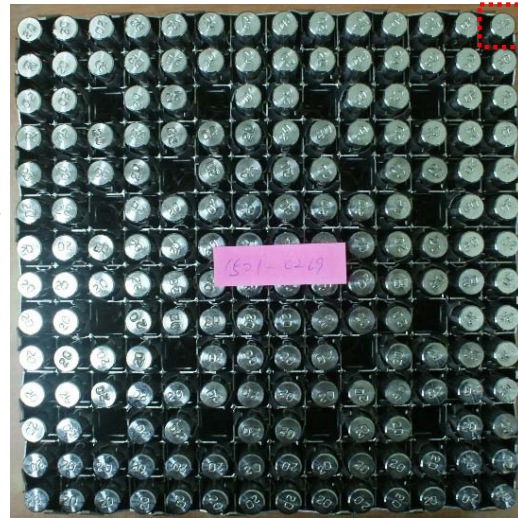
◆ 목적: 전산모사모델의 입력값 생성, 유효성 검증, 사용후핵연료 특성 반영

● 셀크기 조정 시험

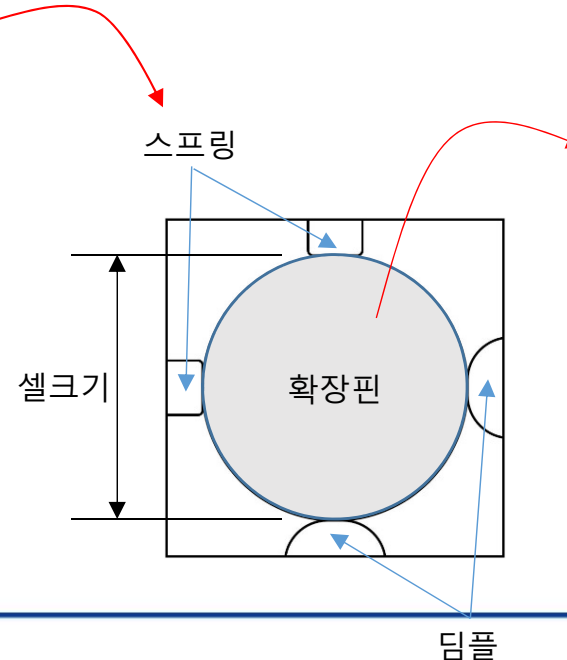
- NRC IN 2012-09, "Irradiation effects on FA spacer grid crush strength" (조사후 좌굴강성 감소)
- LRT-NRC-12-68-NP, "End of Life Effects on Seismic/LOCA Performance for the AP1000 Pressurized Water Reactor Fuel Assembly" (Gap, 부식, 수소취화, 조사경화 등에 대한 민감도 시험 수행결과 gap에 의한 영향이 가장 주요함)



<시험장비>



<시험시편>

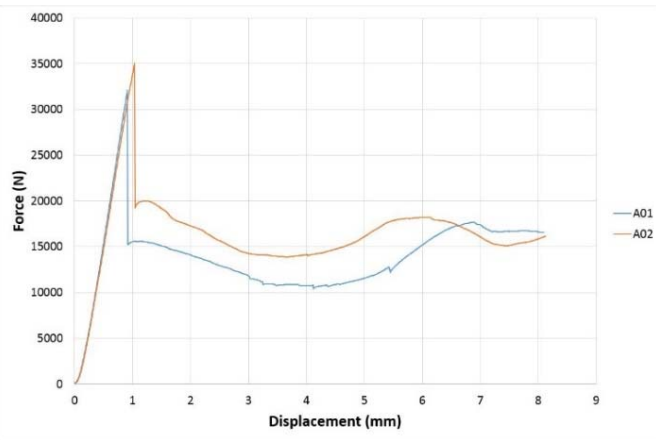


- 확장판 직경: 9.9 mm
10.1 mm
10.2 mm

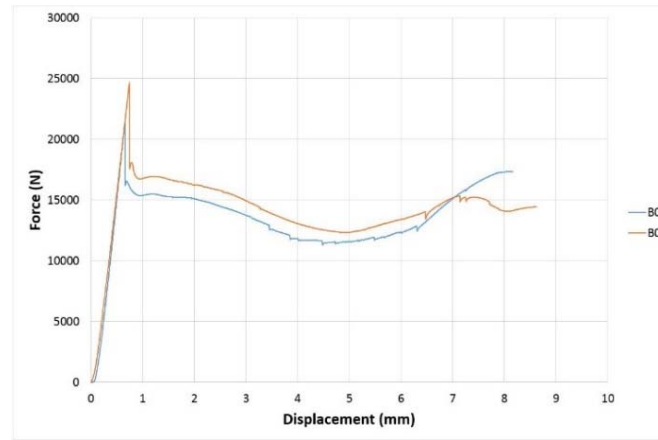
III. SNF 고유 평가 모델-운반

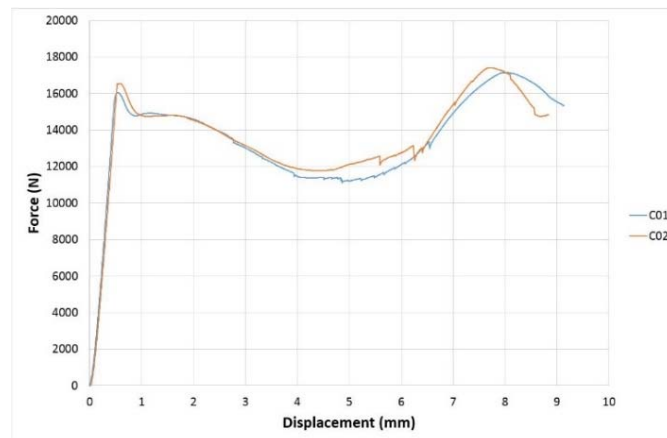
□ 셀크기 조정 후 지지격자 정적좌굴시험

- Gap 크기에 따른 하중-변위 결과

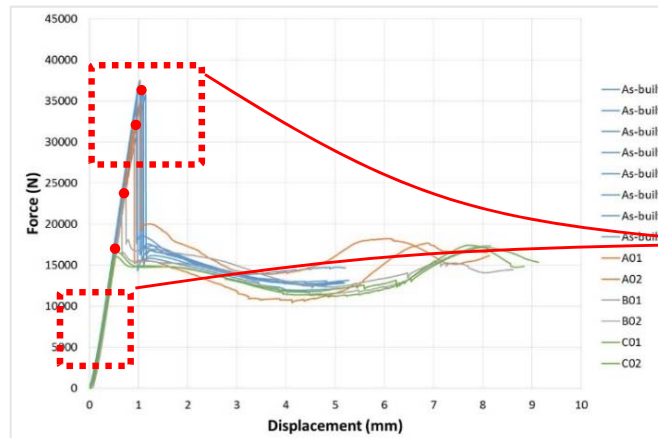


<A>

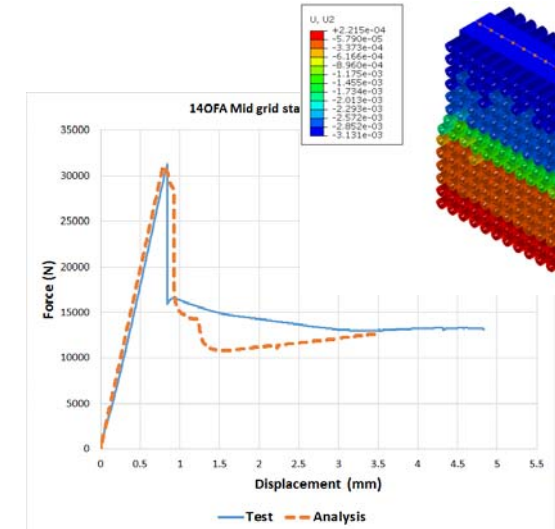
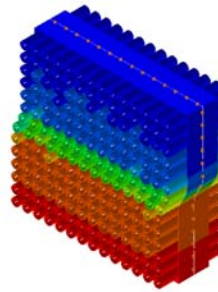




<C>



<As-built, A, B, C>



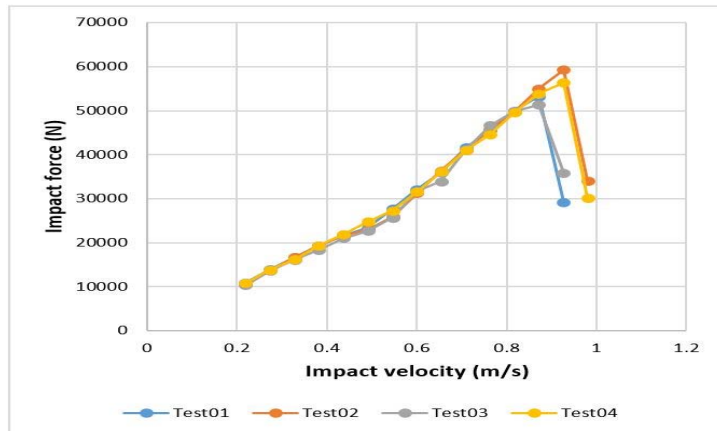
- 좌굴강도
- 강성
- 좌굴전/후 하중 - 변위

모델의 유효성 검증에 활용

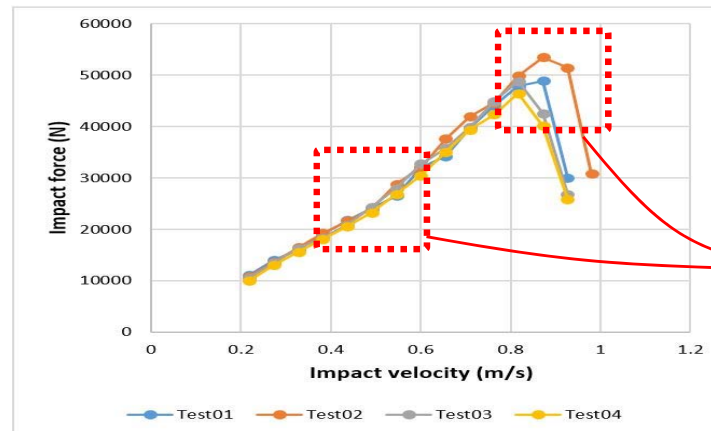
III. SNF 고유 평가 모델-운반

□ 셀크기 조정 후 지지격자 충격시험(동적 좌굴강도)

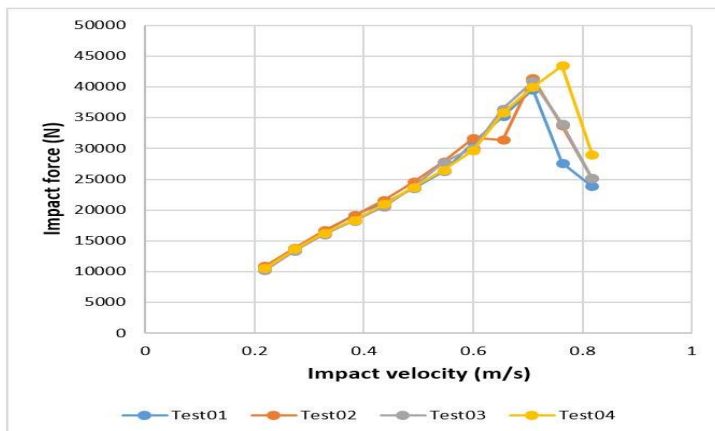
● 충격속도 - 충격하중 결과

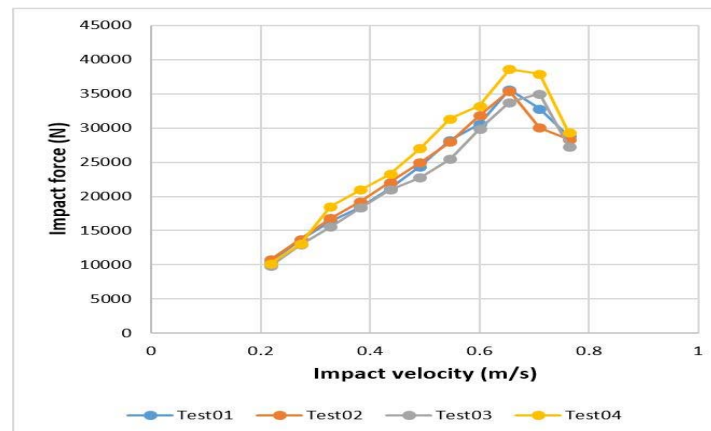


<As-built>



<A>

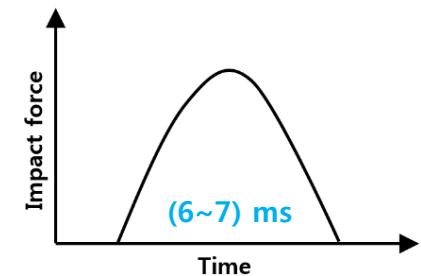




<C>



- 좌굴강도
- 속도에 따른 충격하중
- 충격하중 - 시간

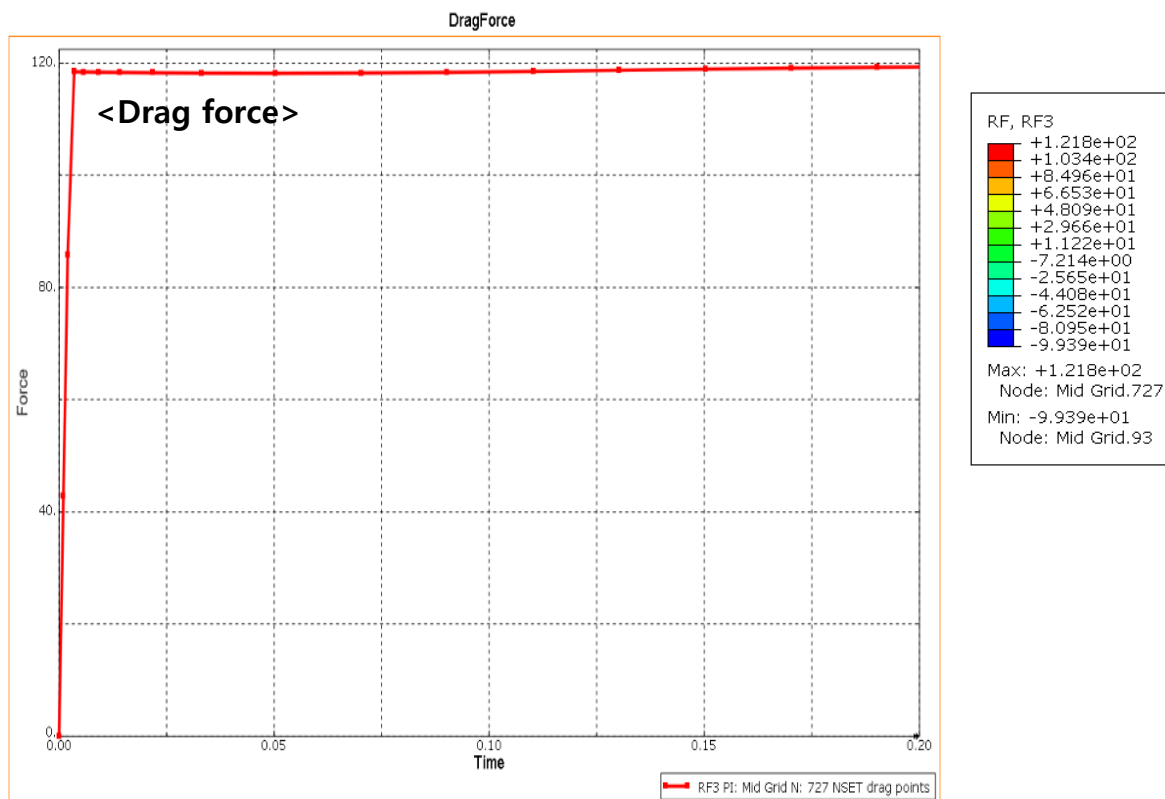


모델의 유효성 검증에 활용

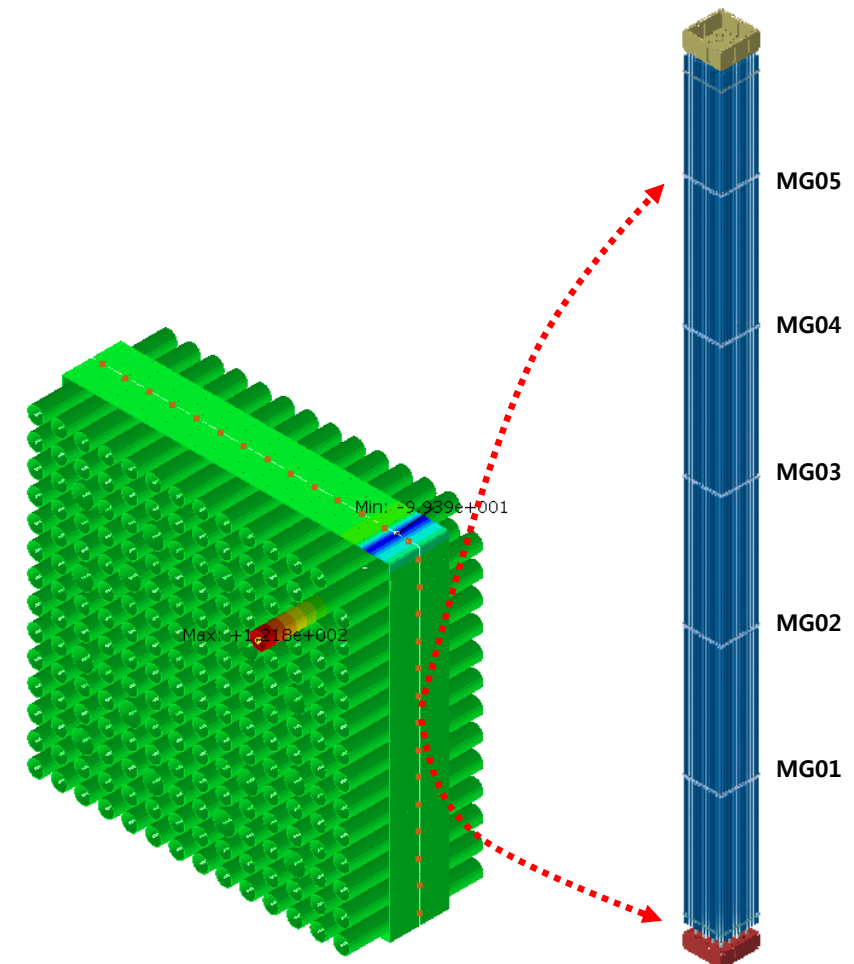
III. SNF 고유 평가 모델-운반

□ 지지격자 모델 최적화 – 지지격자 기계적 특성시험 결과 기반 모델 유효성 검증

● 연료봉 인출력(Drag force) 결과 (시험 수행 예정)



<하중 - 시간 그래프>



검증된 지지격자 모델을 집합체 모델에 적용

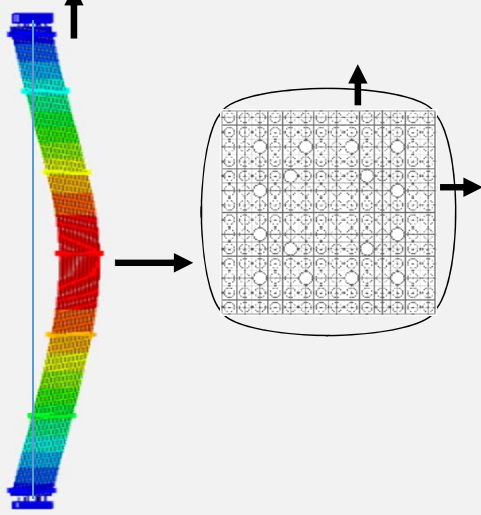
III. SNF 고유 평가 모델-운반

□ SF 특성 영향인자 매개변수화를 통한 평가 모델 최적화 및 수용성/유연성 제고

● (많은 성능 영향인자의 효율적 민감도 분석 가능)

➢ SNF 기하학적 특성(PSE) 반영

- 집합체 휨
- 연료봉 길이 성장
- 지지격자 폭 성장
- 연료봉의 직경 변화
- 지지격자 셀 크기 변화



<Python 프로그래밍>

```
# Create the model
MGModel=mdb.Model(name='MidGridStatic')
MGPart=MGModel.Part(name='Mid_Grid', dimensionality=THREE_D, type=DEFORMABLE_BODY)

# datum point 1 ~ 870/ Grid=====
for i in range(1,array_size*2+2):
    for j in range(1,array_size*2+2):
        if i % 2 == 1:
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[j-1],position[i-1],0.0))

for i in range(1,array_size*2+2):
    for j in range(1,array_size*2+2):
        if i % 2 == 1:
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i-1],position[j-1],0.0))

# datum point 871 ~ 1410/ Fuel rod=====
for i in range(1,array_size+1):
    for j in range(1,array_size+1):
        if FAPartern[i-1][j-1] == 1:
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],-FR_length/2))
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],0.0))
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],FR_length/2))

# datum point 1411 ~ 1490/ Guide tube=====
for i in range(1,array_size+1):
    for j in range(1,array_size+1):
        if FAPartern[i-1][j-1] == 0:
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],-FR_length/2))
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],-sleeve_length/2))
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],0.0))
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],sleeve_length/2))
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],FR_length/2))

# datum point 1491 ~ 1570/ welding=====
for i in range(1,array_size+1):
    for j in range(1,array_size+1):
        if FAPartern[i-1][j-1] == 0:
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],0.0)) # top
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],0.0)) # bottom
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],0.0)) # right
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],0.0)) # left
            MGPart.DatumPointByCoordinate(coords=(position[i*2-1],position[j*2-1],0.0)) # center

# Wire generation=====
MG_datums_keys=MGPart.datums.keys()
MG_datums_keys.sort()
```

➢ 부품 ↔ 집합체 간 모델 맵핑 (부품단위 해석 후 집합체 투영)

- 상부/하부/혼합/보호 지지격자
- 상단/하단 고정체
- 연료봉/안내관/Dashpot

➢ 다양한 핵연료 타입으로 모델 확장

- WEC
- CE/KSNP



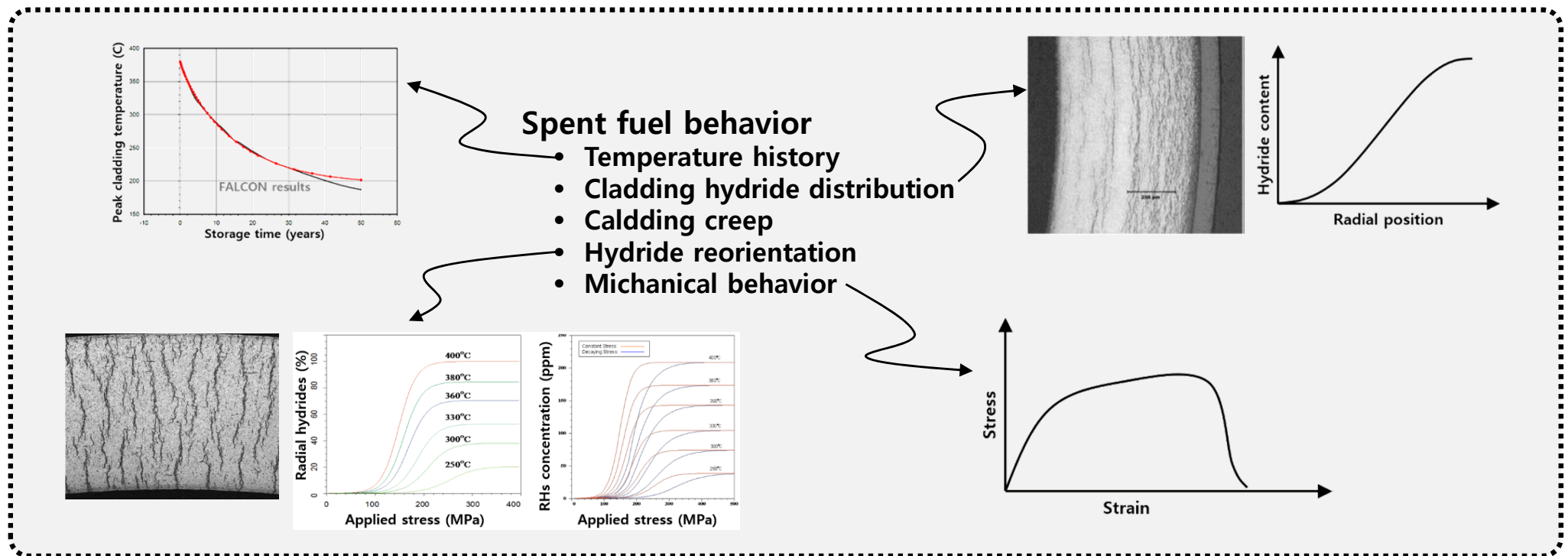
➢ 재료물성, 요소특성, 경계조건 등 민감도해석

모델 다변화의 효율적 대응

III. SNF 고유 평가 모델-SF/저장 특성 반영

● 사용후핵연료 및 장기건식 열화 특성 모델 반영

➤ 先, EPRI 손상 모델 분석/적용: 後, 국내자료(KNF, KAERI 등) 적용

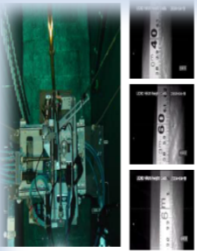
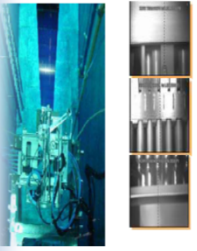
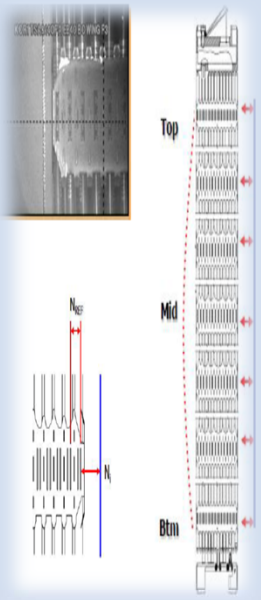
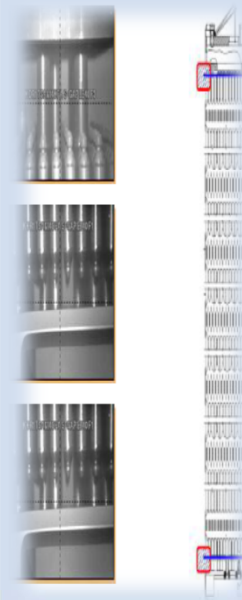
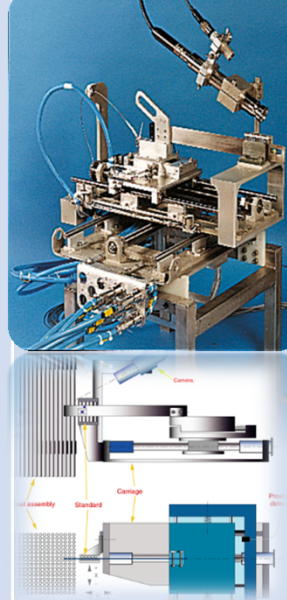



➤ Define material properties using **Abaqus User Subroutine**

III. SNF 고유 평가 모델-SF/저장 특성 반영

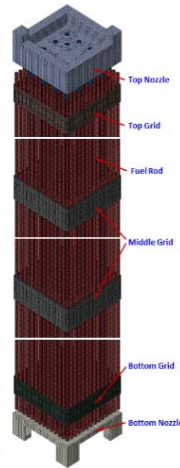
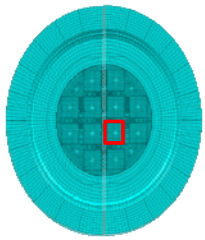
□ SF 비파괴 검사(PSE: Pool-Side Examination) 기반 건전성 평가 가능성 구축

● PSE, PIE 비파괴 측정 및 Data/DB 확보 용이

항목	조사성장	FA 휠	FA 뒤틀림	TN-FR 간격	산화막	PSE 측정현장
내용	  (a) 고정된 물체를 이용한 encoder의 검교정 (b) Encoder를 이용한 집합체의 위치 측정					
● SF 운반평가 모델 반영(건식저장 특성 모델 포함) 및 건전성 평가 타당성 확인)						

III. SNF 고유 평가 모델-운반/저장

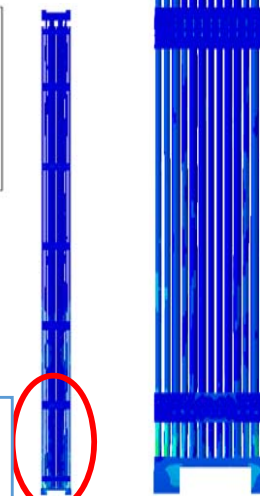
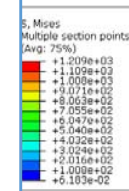
3D 상세-유한요소 모델링/평가



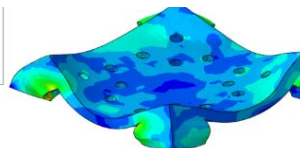
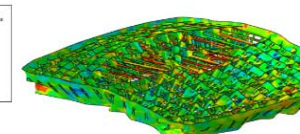
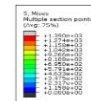
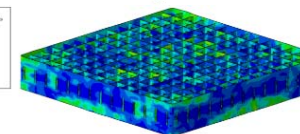
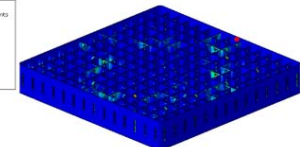
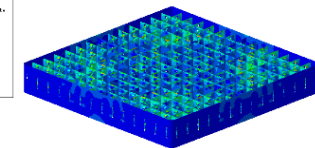
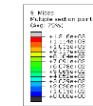
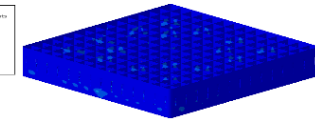
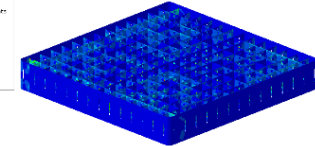
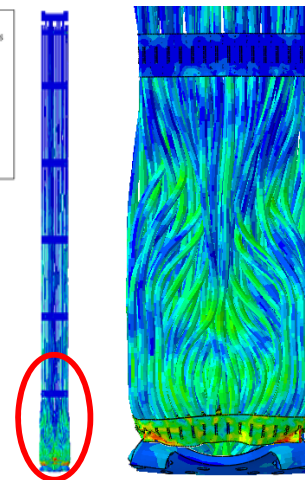
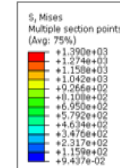
● 해석결과고찰

- ✓ 해석신뢰성
- ✓ 경제성
- ✓ 모델 유연성

정상조건
수직낙하
(0.3 m)



사고조건
수직낙하
(9 m)



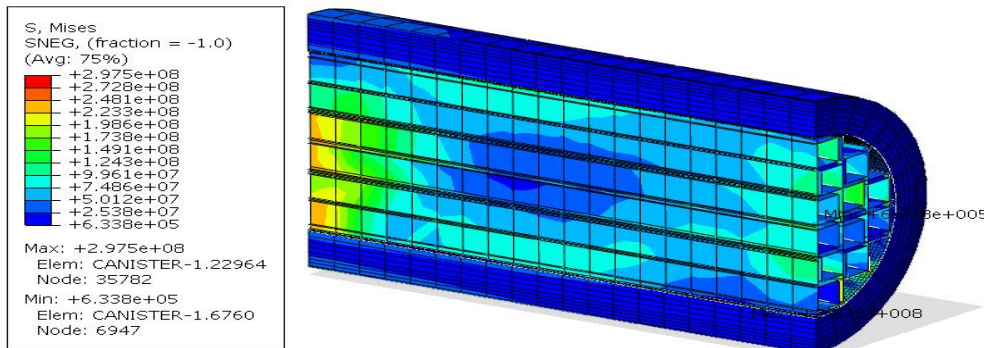
구성 요소	재질	항복응 력 (MPa)	인장응 력 (MPa)	최대응력 (MPa)			
				정상운반		운반사고	
				Case 1	Case 2	Case 1	Case 2
피복관	Ziy-4	531	710	546 (433)	539 (484)	795	795
BG	Inc. 718	1,034	1,241	1,216	1,162.0	1,390	1,390
MG	Ziy-4	296.0	379.0	304.7	281	470	466
TG	Inc. 718	1,034	1,241	1,117	1,012	1,375	1,377

III. SNF 고유 평가 모델-운반/저장

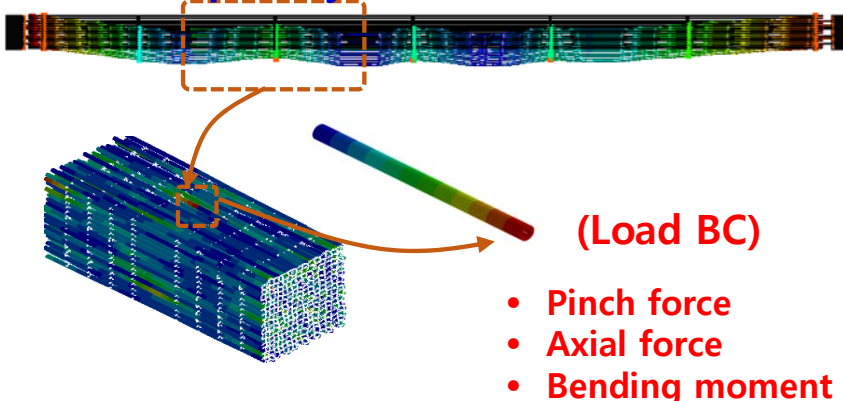
Fuel Rod Model(FE) for integrity evaluation

Stage1: Global Analysis

<General/Conservative Model of Transportation Cask>



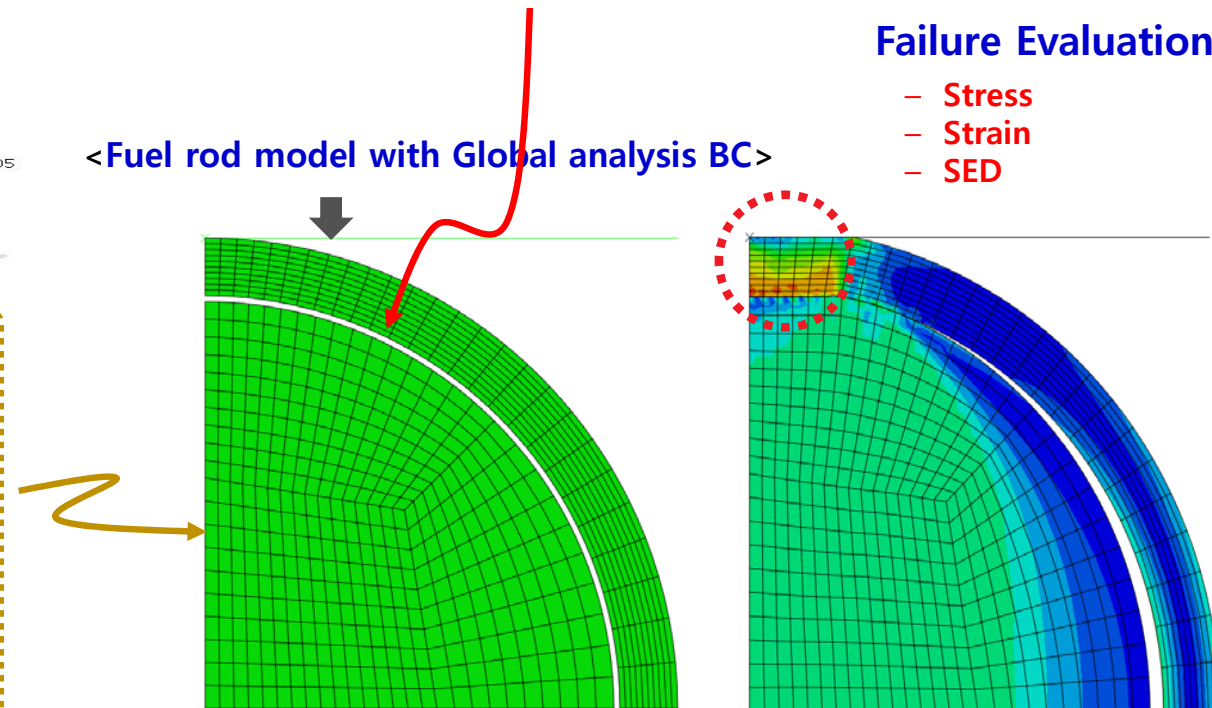
<SNF drop analysis>



Stage2: Detailed FR/other fuel component integrity evaluation

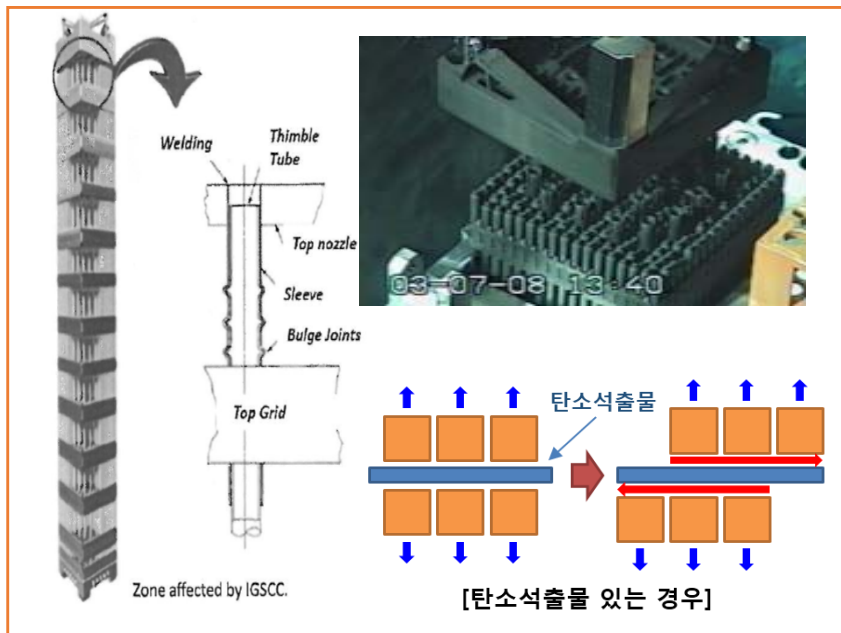
Material properties using Abaqus User Subroutine
Geometric condition(gap, cladding thickness...)

<Fuel rod model with Global analysis BC>

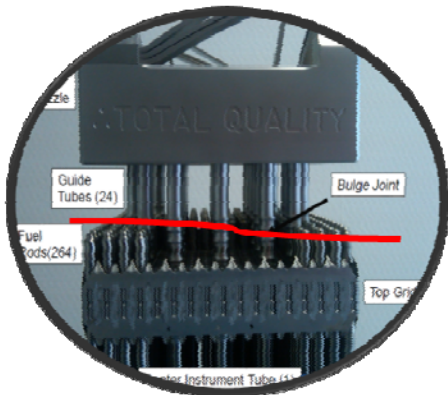


IV. 비정상 SF 조치 솔루션

Development of Solution for TN-GT separation due to IGSCC

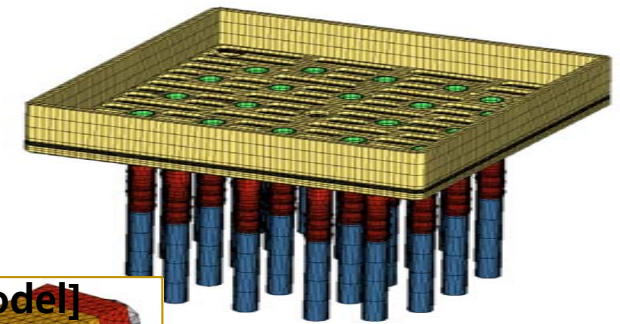
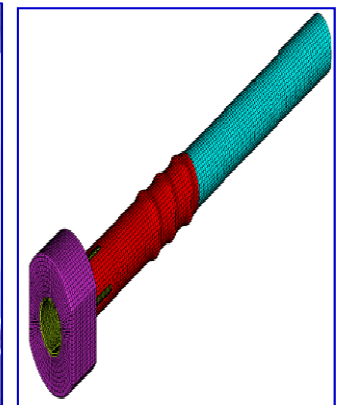
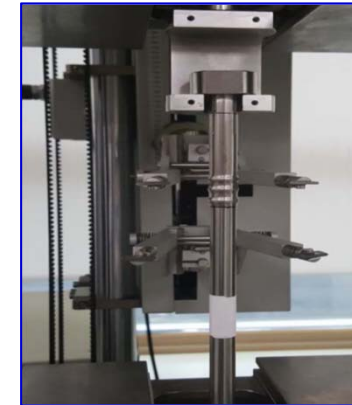


IASCC

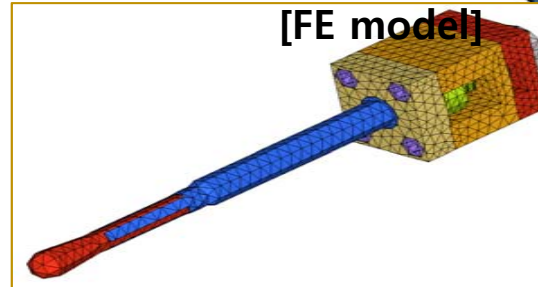


Work process

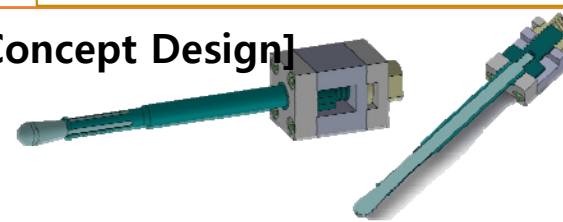
- Analyzing a potential separation-risk SNF
- TN-GT tie mechanism
- TN-GT FE model/test
- Design of TN-GT tie tool for safe handling
- Design optimization



[FE model]



[Concept Design]



[2 mock-ups]



V. 맺음말

- 검증된 선진국 기술 기반 위 진보성을 갖춘 세계 최고 수준 평가 기술 개발/적용
- SF 관리기술(건식저장), 원자로 발전기술 대비 상대적으로 불확실성, 난이도가 낮으며 안전성이 대체로 검증된 기술임
- 원자력 유관 전문기관간 유기적 기술협력을 통한 국민 안심/수용성 제고 필요

감사합니다

