

# KEPIC 가이드

## 핵 연 료(NF)

우 종 윤

대한전기협회 전력기준처 기준개발실장

### 1. 제정배경

지금까지 국내 원자력발전소 건설 및 운영에 외국의 기술적 요건을 도입 적용하여 왔으나, 세계무역시장의 개방화에 대비한 국내 전력산업의 보호와 외국 기술의 적용에 있어 국내 상황에 맞도록 제도적 요건을 정립해야 할 필요성이 대두되었으며, 또한 가압경수로형 원자력발전소 핵연료집합체의 설계, 제작, 품질관리 및 품질보증에 대한 적절한 제도적 요건 확립을 위해서 표준화된 핵연료 기술기준을 제정하게 되었다.

따라서 본 기술기준은 국내의 가압경수로형 원자력발전소에서 사용되는 핵연료집합체 및 노심구성품 설계, 제작 규격요건이며, 국내외 전력산업계에서 적용하는 일관되고 통일된 기술기준이다.

### 2. 제정 방향

한국 표준형 원자력발전소인 울진 3,4호기의 핵연료집합체 및 노심구성품(제어봉 집합체, 중성자원 집합체, 관막개집합체 및 가연성독물질봉집합체 등)의 설계, 제작

및 품질분야의 규격요건을 근간으로 국내의 가동 및 건설 중인 원자력발전소의 핵연료집합체 및 노심구성품에도 포괄적으로 적용할 수 있는 수준의 기술기준 작성을 기본 방향으로 설정하였다.

또한 국내 원자력발전소에서 사용되는 핵연료집합체 및 노심구성품을 국내외 전력산업계에서 통일된 기술기준으로 설계, 제작할 수 있도록 기술기준의 표준화에 역점을 두고 제정하였다.

그러나 핵연료 물질은 우리나라로 제한하였으며, 핵연료 재처리 시설을 전제로 하는 혼합핵연료(mixed oxide fuel)와 플루토늄 핵연료의 가공 등은 제외하였다.

### 3. 참조 기술기준

본 기술기준 작성에는 핵연료 설계 및 제조 관련 기술기준으로 널리 알려진 프랑스 기술기준 RCC-C (Design and Construction Rules for Fuel Assemblies of PWR Nuclear Power Plants, 1989 Addendum)를 주 참조기준으로 하였고, RCC-C 1993

Addendum, ASTM, ANSI 등의 각종 규격/코드 등을 참고로 하여 작성하였다.

다만, 국내 실정에 맞지 않는 기술기준의 내용은 국내 실정 및 관련 국내 산업계의 시방서 등 참고기준을 반영하여 작성, 수정하였으며 요건의 세부 항목별 참조기준 항목은 6의 표와 같다.

### 4. 적용방법

#### 가. 적용범위

본 기술기준은 국내에 건설되는 가압경수로형 원자력 발전소의 핵연료집합체 및 노심구성품을 설계·제작하기 위한 제반요건을 규정한 것이며, 가압경수로형 원자력발전소 핵연료집합체는 본 기술기준의 범위에 포함되지 않는다.

#### 나. 용어

본 기준에서 사용되는 용어는 가능한 한 법규 등의 규제요건상 용어를 우선 사용하였으나, 불가피한 경우 아래의 기준에 따라 선택하였으며, 번역이 곤란한 용어의 경우에는 원음을 한글 맞춤법에 따라 표기하고 원어를 필요에 따라 괄호 안에 병기하였다.

#### □ 용어 선택기준

- (1) 법규 용어 (법, 시행령, 시행규칙, 고시 등)
- (2) 정부 추천용어 (한국공업규격)
- (3) 관련 학회, 협회 용어
- (4) 전력산업기술기준 용어

#### 다. 단위

사용단위는 SI 단위계를 적용하였다. 단, 산업계의 사용 인지도가 높은 경우에는 이해를 돕기 위하여 보조단위를 병용하였다.

### 라. 관련법규 및 기준

본 기술기준의 작성근거, 참고규정, 인용기준 및 규격은 본 기준의 요건에 상치되지 않는 한 적용시점에서 최신판을 적용하였다.

## 5. 기술기준 주요내용

### 가. NFA 1000 일반사항

#### ▶NFA 1100 개요

(1) 본 기준은 가압경수로용 핵연료집합체(fuel assembly) 및 노심구성품(core component)의 설계 및 제조에 관한 사항을 규정하며, 핵연료집합체 부품과 노심구성품 부품의 설계, 제조, 구매 및 검사에 대한 기본적인 요건들을 포함하고 있다.

(2) 본 기준은 공급자(supplier)와 제조자(manufacturer)가 준수해야 할 최소한의 요건을 기술하고 있으며, 각 품목들에 대한 세부 요건들은 해당 항목에 기술되어 있다.

#### ▶NFA 1200 적용범위

본 기준은 가압경수로형 원자력발전소에 사용되는 핵연료집합체와 노심구성품에 적용하며, 핵연료집합체 설계에 관한 일반사항은 NFA 6110, 노심구성품 설계에 관한 일반사항은 NFA 6120에 기술되어 있다.

#### ▶NFA 1400 문서작성

본 기준에서 인용된 문서의 종류는 아래와 같다.

- (1) 기술종합문서(기술문서, 기술시방서)
- (2) 구매시방서
- (3) 공정시방서 또는 지침서
- (4) 제조 및 검사공정
- (6) 자격인정절차서
- (7) 공정 또는 인원자격인정 기준 또는 요건

## (8) 품질보증요건

### ▶NFA 1500 품질보증

공급자는 국내 원자력법령과 전력산업기술기준의 품질보증 기술기준 요건(KEPIC QAP-1 “원자력 품질보증 계획 일반기준”)에 일치하도록 품질보증계획을 수립 및 이행하여야 한다.

## 나. NFA 2000 부품 및 원자재 특성

본 NFA 2000은 제조자 및 하도급자에 의해 생산되는 주요 반제품 및 완제품, 부품 및 원자재의 특성을 규정하고, 이들의 제조원칙을 기술하며(노심구성품 및 구성 부품의 경우, 특수요건이 추가로 기술종합문서에 포함될 수 있음) 다음과 같은 세 개의 부분으로 구성되어 있다.

- (1) NFA 2100 : 일반요건
- (2) NFA 2200 : 원자재(반제품)에 대한 요건
- (3) NFA 2300 및 NFA 2400 : 부품(완제품)에 대한 요건

## 다. NFA 3000 성형가공

### ▶NFA 3100 일반요건

본 기준은 성형가공의 특수공정 및 관련 다음의 작업에 대한 요건을 규정한다.

- NFA 3200 이산화아라늄 분말제조
- NFA 3300 소결체 제조
- NFA 3400 용접
- NFA 3500 경납땜
- NFA 3600 세척
- NFA 3700 취급 및 저장 및 수송

## 라. NFA 4000 검사

본 검사 기준은 핵연료집합체 및 노심구성품의 원자재,

부품, 반조립품 및 조립품의 검사에 적용하며 다음 각 품목들에 대한 품질특성, 검사방법 및 검사범위를 기술한다.

- NFA 4210 연료봉
- NFA 4220 지지격자
- NFA 4230 하단, 상단 고정체
- NFA 4240 골격체
- NFA 4250 핵연료집합체
- NFA 4260 관마개집합체
- NFA 4270 제어봉집합체
- NFA 4280 가연성독물질봉집합체
- NFA 4290 중성자선원집합체

## 마. NFA 5000 비파괴 검사

### ▶NFA 5100 고정체의 방사선투과검사

핵연료집합체의 구성품 중 상단고정체와 하단고정체에 대해 시방서에서 언급되거나 또는 구매자가 방사선투과 검사를 요구할 경우 적용된다.

### ▶NFA 5200 핵연료피복관의 초음파탐상검사

핵연료집합체의 구성품 중 지르코늄합금 피복관의 결함을 검사하기 위한 초음파탐상검사 장비 및 검사기술에 대해 규정한다.

### ▶NFA 5300 지르코늄합금봉(Zirconium Alloy Bar)의 초음파탐상검사

핵연료집합체 구성품의 원자재인 지르코늄합금봉의 결함을 검사하기 위한 수침법에 의한 초음파탐상검사 장비 및 검사 기술에 대해 규정한다.

### ▶NFA 5400 침투탐상검사

핵연료집합체의 구성품 또는 원자재 시방서에서 언급되거나 또는 구매자가 침투탐상검사를 요구할 경우에 적용된다.

▶FA 5500 연료봉탐상검사(Rod Scan Test of Fuel Rod)

핵연료집합체의 구성품인 연료봉에 대해 시방서에서 언급되거나 또는 구매자가 검사를 요구할 경우 적용된다.

▶NFA 5600 UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> 연료봉탐상검사(Rod Scan Test of UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub> Fuel Rod)

핵연료집합체의 구성품인 UO<sub>2</sub>-Gd<sub>2</sub>O<sub>3</sub>연료봉에 대해 시방서에서 언급되거나 또는 구매자가 검사를 요구할 경우 적용된다.

▶NFA 5700 누설검사

핵연료집합체의 구성품인 연료봉 또는 원자재 시방서에서 언급되거나 구매자가 누설검사를 요구할 경우 적용된다.

▶NFA 5800 소결체 검사

각 연료봉내의 소결체 간격은 연료봉탐상기(rod scan tester)에 의해 측정된다. 소결체 간격검사는 NFA 5500 과 NFA 5600에서 언급한 조사기(irradiation unit)를 사용하고, 이 조사기에 장착된 세슘(Cs137)선원을 이용한 투과법에 의해 측정된다.

▶NFA 5900 통계적 검사

연속으로 생산되는 부품을 검사할 때는 광범위하게 통용되는 통계적 방법을 사용할 수 있다.

제조자가 샘플링 검사를 적용하고자 할 때는

(1) 적용범위, (2) 샘플링 방법에 대한 설명,

(3) 샘플링 계획이 기술된 절차서를 작성하여 절차서에 따라 수행되어야 한다.

바. NFA 6000 핵연료집합체 및

노심구성품 설계

▶NFA 6100 일반사항

본 장은 현재 국내 가압경수로에 장전되어 사용되고 있는 핵연료집합체 및 노심구성품에 대해 그 구성을 간략히 기술한다.

▶NFA 6200 핵연료계통의 원자로 운전환경

핵연료계통의 일반적 운전환경특성, 원자로 운전상태, 원자로냉각재 수질 및 원자로내장품과의 양립성에 대하여 기술한다.

▶NFA 6300 원자로 연료계통의 일반설계 및 안전 기준

원자로 노심 및 노심과 관련된 냉각, 제어, 보호 및 안전계통들은 다음을 보장하기 위하여 설계된다.

(1) 운전상태 1과 2에서 핵연료집합체의 건전성이 유지되어야 한다.

(2) 운전상태 3 사건 이후에 원자로는 단지 적은 양의 연료봉 손상을 허용하면서, 비록 이러한 손상이 정상적인 원자로 운전으로의 즉각적인 복귀를 방지할지라도, 안전한 상태로 유지될 수 있어야 한다.

(3) 운전상태 4 사고 이후에 원자로는 노심의 냉각 가능형상을 보장하여 안전한 상태로 유지될 수 있어야 하고 노심은 미임계의 안전한 상태로 유지되어야 한다.

▶NFA 6400 핵연료집합체 설계 기준

핵연료집합체에 대한 설계/안전 기준, 기능요건, 설계하중 및 설계요건을 기술한다.

▶NFA 6500 연료봉 설계 기준

NFA 6300 설계 관점에 따라 연료봉 설계시 반영되어야 할 설계 및 안전 기준이 기술되어있다.

▶NFA 6600 노심구성품 설계 기준

노심구성품(core component)에 대한 설계 및 안전 기준은 NFA 6300에서 설명한 일반기준을 따른다.

NFA 6300의 설계 및 안전기준은 응력 결정과 연료 집합체와 노심내장품(reactor internal)과의 양립성 평가 및 재료들 간의 양립성 평가에 주로 적용된다. 노심구성품은 적절한 수명을 갖도록 설계한다.

▶NFA 6700 설계 적정성 확인 방법

본 절에서는 설계 기준과 요구 조건들이 만족되는 것을 입증하기 위한 방법을 기술한다. 이 방법은 해석적인 예측과 운전 경험이나 원형 실험에 근거하는 실험적인 검증을 포함한다.

**부록 I. 원자로 운전상태의 분류 및 목록**

원자력 발전소에서 발생할 수 있는 모든 사고는 각기 다른 영향과 발생빈도를 가진다. 위험도가 큰 사고의 발생 확률이 아주 적다면 허용 가능하지만, 확률이 높아진다면 수용될 수 없다. 본 부록에서는 발생확률이 대중에 미치는 방사성 영향 등을 고려하여 과도상태 및 사고에 적용된 운전상태의 분류체계를 정의한다.

**부록 II. 운전상태 3, 4 사고 허용기준**

▶ II 1000 단일 제어봉 이탈

단일 제어봉 이탈사고의 특징은 급격한 과도 출력상승

(power excursion)이다.

▶ II 2000 냉각재 상실사고

냉각재 상실사고는 발생 가능성은 낮으나 발생시 심각한 결과를 초래하므로 특정 설계기준 및 방법으로 해석한다. 이 사고기준의 목적은 전체 노심의 손상을 방지하고 대중에 미치는 방사선의 영향을 제한하는 것이다.

**부록 III. 핵연료 설계 제한조건**

본 부록에서는 집합체 구조설계, 연료봉 설계 및 노심구성품 설계의 설계제한조건을 기술한다.

**부록 IV. 비가동시 핵연료계통 부하**

NFA 6400에 설정되어 있는 설계기준 조건하에서, 핵연료계통의 설계는 수송, 저장, 취급시의 하중에 대해 핵연료집합체의 건전성과 치수 안정성이 유지됨을 입증해야 한다. 본 부록에서는 핵연료집합체의 건전성 측면에서 허용할 수 있는 하중과 주변조건을 명기하고, 핵연료집합체의 수송, 저장 및 취급계통의 설계 제한치의 설정방법을 기술한다.

**6. 세부 항목별참조 기술기준**

〈NFA 각 항목별 참조기술기준 대비표〉

항목 번호	기술기준 제목	참조 기술기준
NFA 1000	일반사항	Chapter 1. General Provisions
NFA 1100	개요	A-C 1100 General
NFA 1200	적용범위	A-C 1200 Applicable Standards
NFA 1300	용어의 정의	A-C 2100 Definitions A-C 4100 Fuel Assemblies A-C 4200 Core Components (Rod Cluster Control Assemblies, Burnable Poison Rod Assemblies, Source Assemblies, and Thimble Plug Assemblies)
NFA 1400	문서작성	A-C 4300 Items for Fuel Assemblies and Core Components A-C 3000 Documentation
NFA 1500	품질보증	A-C 5000 Quality Assurance

기술기준

(NFA 각 항목별 참조기술기준 대비표) (계속)

항목 번호	기술기준 제목	참조 기술기준
NFA 2000 NFA 2100 NFA 2200 NFA 2300 NFA 2400	부품 및 원자재 특성 일반요건 원자재 부품-금속류 부품-비금속류	Chapter 2. Product and Part Characteristics M-C 1000 General Requirements M-C 2000 Products M-C 3000 Parts
NFA 3000 NFA 3100 NFA 3200  NFA 3300 NFA 3400 NFA 3500 NFA 3600 NFA 3700	성형가공 일반요건 이산화우라늄 분말 제조  소결체 제조 용접 경납땜 세척 취급, 저장 및 수송	Chapter 3. Fabrication & Related Testing and Inspection F-C 1000 General Requirements Technical reports series No.221(IAEA) B.4 Process and Product Control of Oxide Powder and Pellet for Reactor Fuel Application F-C 2000 Pelletizing F-C 3000 Welding F-C 4000 Brazing F-C 5000 Cleanliness F-C 6000 Shipment-Handling-Storage
NFA 4000 NFA 4100 NFA 4200	검사 적용범위 검사 기준	Chapter 4. Examination Table C-C 1000 Scope C-C 2000 Tables
NFA 5000 NFA 5100 NFA 5200 NFA 5300 NFA 5400 NFA 5500 NFA 5600 NFA 5700 NFA 5800 NFA 5900	비파괴 검사 고정체의 방사선투과검사 핵연료피복관의 초음파탐상검사 지르코늄합금봉의 초음파탐상검사 침투탐상검사 연료봉탐상검사 UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> 연료봉탐상검사 누설검사 소결체 검사 통계적 검사	Chapter 5. Examination Methods MC-C 1000 Radiographic Examination MC-C 2000 Ultrasonic Examination ASTM E214 KEPIC-MEN 4201 MC-C 5100 Uranium Dioxide Fuel Rod Enrichment Determination MC-C 5300 Inspection of UO <sub>2</sub> -Gd <sub>2</sub> O <sub>3</sub> Fuel Rod Loading Homogeneity MC-C 4000 Leak Testing MC-C 6000 Fuel Pellet Stack Inspection MC-C 8000 Statistical Inspection
NFA 6000 NFA 6100 NFA 6200 NFA 6300  NFA 6400 NFA 6500 NFA 6600 NFA 6700	핵연료집합체 및 노심구성품 설계 일반사항 핵연료계통의 원자로 운전환경 원자로 연료계통의 일반 설계 및 안전기준  핵연료집합체 설계 기준 연료봉 설계 기준 노심구성품 설계 기준 설계 적정성 확인 방법	Chapter 6. Fuel System Design D-C 1000 Description of Fuel System D-C 2000 In-reactor Operating Environment of the Fuel System D-C 3000 Summary of the General Design and Safety Bases of the Reactor Fuel D-C 4000 Fuel Assembly Specific Design Bases D-C 5000 Fuel Rod Specific Design Bases D-C 6000 Core Component Specific Design Bases D-C 7000 Methods for Confirming Design Adequacy
부록 I 부록 II  부록 III 부록 IV 부록 A 부록 B	원자로 운전상태의 분류 및 목록 운전상태 3, 4 사고 허용 기준  핵연료 설계 제한조건 비가동시 핵연료계통 무하 핵연료피복관의 초음파탐상검사 탐촉자 선정 핵연료피복관의 초음파탐상검사 탐촉자 위치조정	ANSI N18.2 2. General Design Consideration Appendix D-C2 Acceptance Criteria for Condition 3 and 4 Events  Appendix D-C3 Fuel Design Limits Appendix D-C4 Non-operational Fuel System Loads ASTM B811 X1 ASTM B811 X2

