

## 《기술 보고》

### 경수로핵연료 수리기술의 현황과 개발방향

김형규 · 서정민

한국원자력연구소

(1992. 12. 14집수)

## 요 약

국내 기술로 설계, 제조된 경수로핵연료가 고리 2호기를 시작으로 국내 8기의 경수로형원자력발전소에서 사용되어 경수로핵연료의 국내 기술수준을 향상시킬 수 있게 되었으나 운전중 결함이 발생한 핵연료를 재사용가능케 함으로써 핵연료비를 절감할 수 있는 핵연료수리기술분야의 연구개발은 상대적으로 매우 뒤져있는 실정이다. 따라서 본 기고문에서는 외국의 핵연료수리기술들과 국내 원자력발전소에서 운전중 발생한 결함핵연료의 수리현황을 정리하여 향후 국내에서 수행할 핵연료수리기술의 연구에 도움이 되고자 하였다.

## 1. 서 론

핵연료는 원자로내의 고온, 고압의 냉각재에서 운전중 건전성을 유지하도록 설계되어 있으나 실제로는 연료취급부주의나 핵연료설계, 제조시의 예견하지 못한 원인으로 인하여 여러형태의 핵연료결함이 일어날 수 있다. 이러한 결함핵연료중에는 결함 정도 및 형태에 따라 다음주기에 사용이 어려운 것이 있을 수 있으며 이때 검사 및 수리에 의해 사용을 가능하게 하면 핵연료교체에 따른 연료비상승 및 핵연료의 노심내 재배치를 위한 노심재설계 등을 피할 수 있어 원자력발전소 운용상의 경제적 이득을 가져올 수 있고 또한 사용후핵연료저장조의 방사능준위를 감소시킬 수 있다. 그러나 현재 국내의 경우 핵연료의 결함여부에 대한 검사는 국내 장비 및 기술로 가능하나 결함의 형태, 크기와 수를 규명할 수 없으므로 결함원인에 대한 분석을 제대로 하지 못하여 핵연료 설계 및 제조기술의 개선에는 큰 도움을 주지 못할뿐 아니라 검사결과에 따라 수리작업을 수행하는 핵연료수리기술에 대해서는 아직 국내 기술개발이 매우 미흡한 실정이다. 한편 외국의 원자력선진국들은 오래전부터 이러한 기술들을 발전시켜 원자력발전소 운용의 경제적 손실을 방지할 뿐만 아니라 핵연료의 설계 및 제조기술향상에 기여하여 왔으며 또한 핵연

료검사 및 수리장비도 발전시켜 왔다. 그러나 국내의 경우 결함이 발생된 핵연료에 대한 결함원인의 규명과 핵연료수리에 대한 기술부족으로 핵연료의 수리작업을 외국의 기술에 의존하여 왔다. 따라서 국산 핵연료가 국내 원자력발전소에서 사용되고 있는 시점에서 결함핵연료에 대한 검사 및 수리기술의 개발로 핵연료이용률향상에 의한 원자력발전소 운용상의 경제성 제고 및 국산핵연료의 설계, 제조기술개선 등을 도모하기 위하여 외국의 수리기술현황을 파악하고 국내에서의 핵연료수리현황을 기술하기로 하였다.

## 2. 핵연료수리의 개요 및 방법

### 2.1. 개요

핵연료수리는 크게 연료봉교체, 골격체교체 및 이물질제거 등의 3가지로 분류될 수 있다. 핵연료는 설계, 제조시의 예견하지 못한 원인으로 인하여 여러 형태의 결함이 일어날 수 있으며 또한 발전소의 재장전기간중 핵연료의 인출 및 삽입시에 취급부주의 등으로부터 결함이 발생할 수 있다. 전자의 경우는 주로 연료봉에 결함이 발생하는 것으로서 결함연료봉을 교체하며 후자의 경우는 주로 핵연료의 지지격자(Grid)에 결함이 있는 것으로서 핵연료의 골격체를

교체하는 수리가 이루어진다. 그리고 운전중 원자로 내의 이물질이 냉각수의 유동으로 핵연료에 부착되는 경우에는 핵연료에 부착된 이물질을 제거하는 수리를 수행한다.

## 2.2. 수리방법

핵연료의 수리를 위해서는 상단고정체를 분리하거나 하단고정체를 분리하여야 하며 이는 핵연료의 구조에 따라 어느 하나 또는 양쪽 모두를 분리하여 수리할 수 있다. 상단고정체를 분리할 경우에는 발전소의 사용후핵연료저장조의 랙 또는 별도의 특정한 장소-사용후핵연료 수송용기선적구조(Cask Loading Pit) 등에서 상단고정체와 핵연료의 안내관을 연결하는 안내관체결나사를 풀고 상단고정체를 분리한후 결합연료봉 또는 골격체를 교체한다. 교체후 새로운 안내관체결나사로 상단고정체와 안내관을 체결하여 상단고정체를 결합함으로써 핵연료의 수리를 완료한다. 한편 하단고정체를 분리할 경우에는 180° 돌릴 수 있는 장비에 핵연료를 넣고 180° 돌린후 하단고정체와 안내관을 연결하는 안내관체결나사를 풀고 하단고정체를 분리하여 결합연료봉 또는 골격체를 교체한다. 교체후에는 새로운 안내관체결나사로 하단고정체와 안내관을 체결하여 하단고정체를 결합한후 다시 핵연료를 180° 돌려 핵연료수리를 완료한다. 그림 1은 하단고정체를 분리한후 결합연료봉을 교체하는 수리절차를 나타내고 있다. 그런데 원자로 운전중 냉각수유동에 의해 안내관체결나사가 저절로 풀리는 것을 방지하기 위해 핵연료제조시에는 나사의 날개부위를 소성변형시키거나 별도의 고정와이어(Locking Wire)를 이용하여 용접하고 있다. 따라서 상단및 하단고정체의 분리시에 소성변형시킨 것은 물리적 힘을 작용시켜 풀어내며 용접된 것은 용접부분을 그라인딩 또는 방전가공하여 제거한후 해체한다. 그러나 수리작업후 결합시에는 새로운 체결나사로 체결하여 나사의 날개부위를 소성변형시키는 방법을 사용한다. 또한 하단고정체를 분리할 경우에는 핵연료를 180° 돌리기위한 장비와 공간이 필요하게 되어 핵연료를 180° 돌리는 별도의 장비가 필요하나 상단고정체를 분리할 경우에는 그럴 필요가 없으므로 상대적으로 장비가 단순하게 된다는 특징이 있다. 그러나 기본적으로 장비와 작업자 사이의 거리가 물에 의한 방사선차폐거리로서 충분히 확보되어

야 하며 상단및 하단고정체중 어떤 것을 분리하는가 하는 것은 핵연료집합체의 구조뿐 아니라 결합의 형태, 혼합날개(Mixing Vane)의 존재 유무에 따라서도 달라지므로 각 경우를 고려하여 결정하여야 한다.

## 3. 외국의 핵연료수리기술현황

### 3.1. 미국

미국에서는 핵연료수리를 포함하여 핵연료시장에 경쟁업체가 많아 핵연료검사및 수리는 항상 입찰과 계약에 의해 이루어지므로 이를 위하여 미국의 각 핵연료 관련회사들은 핵연료검사와 수리관련기술및 장비를 꾸준히 발전시켜 왔다.

CE(Combustion Engineering)사의 경우 핵연료수리장비는 이동식으로서 결합이 발생된 핵연료에 대하여 원자력발전소의 재장전기간중에 사용후핵연료저장조에 설치되어 작업이 수행된다. CE사의 핵연료는 상단고정체만이 분리가능한 구조이므로 사용후핵연료저장조의 랙을 작업공간으로 하여 랙의 하부에 단(Spacer)을 넣어 랙에 핵연료를 넣었을때 핵연료의 상부가 랙의 바깥으로 나올 수 있도록 하며 주위 몇개의 랙을 핵연료수리를 위한 보조공간으로 사용한다. 랙에 결합핵연료를 넣은후 안내관과 나사체결되어 있는 포스트를 풀어줌으로써 상단고정체를 분리하며 이때 포스트의 소성변형된 부분에 물리적 힘을 가하여 반대방향으로 변형시킨후 풀어낸다. 상단고정체가 분리되면 연료봉인출공구를 사용하여 연료봉을 인출하고 이때 연료봉에 대한 와류탐상검사도 동시에 수행할 수 있으며 와류탐상장비로는 다중주파수(Multi-Frequency)를 이용하는 MIZ-18을 이용한다. 이렇게 하여 인출된 결합연료봉은 연료봉저장용기에 수거하고 인출된 결합연료봉의 위치에는 지르칼로이봉이나 계산된 농축도의 새로운 연료봉을 삽입한다. 결합연료봉의 교체가 끝나면 분리되어 있던 상단고정체를 새로운 포스트로써 핵연료에 체결한다. 이때 기사용된 포스트는 사용후핵연료저장조 내에 있는 폐기통에 저장하며 수리가 완료된 핵연료를 지정된 위치의 랙으로 이동함으로써 결합핵연료의 수리를 완료한다<sup>[1]</sup>.

W(Westinghouse)사의 경우는 회전이 가능하고 상하이동이 가능한 다목적수리장비(Multi-Purpose

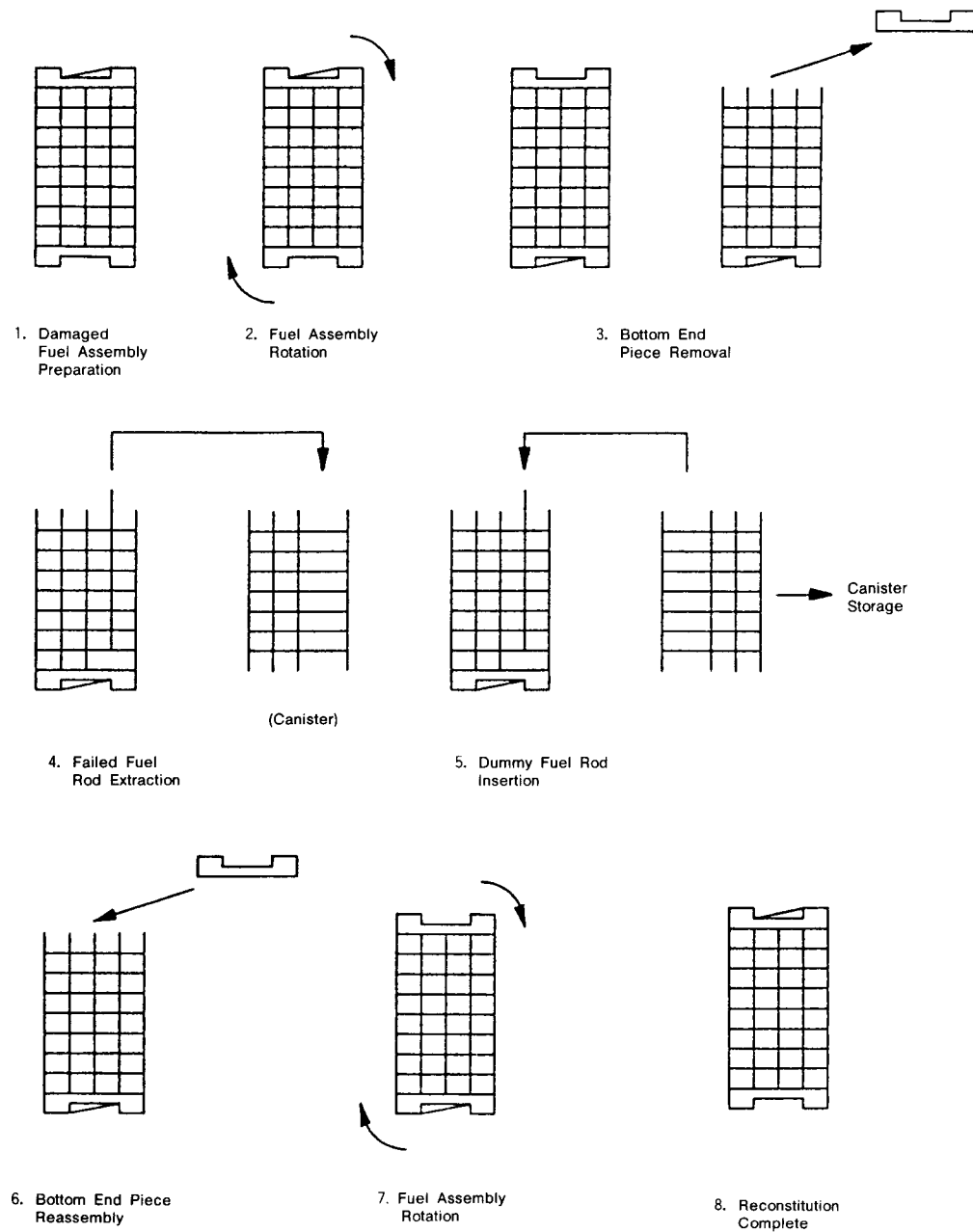


그림 1. 결함핵연료 수리절차

Fuel Repair System)를 이용하여 장비의 설치가 가능한 공간에서 상단 및 하단 고정체를 분리하여 결함 핵연료를 수리할 수 있으며, W사의 핵연료와 같이 하단 고정체가 분리 가능한 구조의 핵연료수리시에는 장비에 핵연료를 넣어 180° 돌린 후 작업을 수행한다. 즉 회전과 상하이동이 가능한 연료승강기(Fuel Elevator)에 결함 핵연료를 넣고 움직이지 않도록 고정 한 후 연료승강기를 180° 회전시켜 두껍을 열고 하단 고정체와 안내관을 연결하는 체결나사를 풀어낸 후 하단 고정체를 분리한다. 연료봉의 위치를 안내하는 안내장치(Guide Block)와 연료봉의 인출 및 삽입용 공구인 연료봉취급공구(Fuel Rod Handling Tool)를 이용하여 결함 연료봉을 인출하고 결함 연료봉이 인출된 위치에 모의 연료봉을 삽입한 후 새로운 체결 나사로서 하단 고정체와 안내관을 연결한다. 그리고 운전중 냉각수의 유동에 의해 저절로 풀리는 것을 방지하기 위하여 체결나사의 날개부위를 주름잡는(Crimping) 공구를 이용하여 소성변형시킨다. 두껍을 닫아 핵연료를 고정 한 후 다시 180° 돌려 핵연료를 원위치시키고 두껍을 열어 핵연료를 지정된 랙으로 이동하여 수리를 완료한다<sup>[2]</sup>.

### 3.2. 독일

KWU사의 경우 KWU사에 의해 건설된 원자력발전소에는 대부분의 표준수리장비가 설치되어 있으며 KWU사에 의해 건설되지 않은 원자력발전소에 대하여는 KWU사의 이동식 수리장비를 이용하여 수리작업을 수행하고 있다. 독일에서는 원자력발전소의 재장전기간 동안 결함 핵연료의 확인과 결함이 있는 핵연료에 대한 수리를 필수공정으로 하고 있으며 이를 위하여 현장검사와 수리기술을 향상시켜 이제는 주로 기존의 기술에 컴퓨터를 사용한 작업의 자동화를 통하여 정밀도 및 신뢰도 향상, 그리고 결과의 현장기록방법을 개선하고 작업자들의 방사선피폭을 줄이기 위해 자동화를 통한 현장작업시간을 줄이는 것에 노력하고 있다. 이동식 장비는 그림 2에서 보여주는 바와 같이 지지구조물과 핵연료를 180° 돌릴 수 있는 용기(Basket)로 구성된 연료체재조립기(Fuel Assembly Reconstitution Unit)와 연료봉을 인출 및 삽입하는 연료봉교환장치(Fuel Rod Exchange Device) 등으로 구성되어 있으며 핵연료수리를 위하여 핵연료의 회전이 가능한 공간에 연료체재조립기

를 설치하고 결함이 있는 핵연료를 용기에 넣어 180° 회전시킨 다음 하단 고정체를 분리한다. 연료봉교환장치를 이용하여 인출중에 결함 연료봉에 대한 와류탐상검사와 연료봉과 지지격자 사이의 마찰력 및 지지격자의 스프링력을 측정할 수 있다. 인출된 결함 연료봉의 위치에 모의 연료봉을 삽입하여 하단 고정체를 결함한 후 180° 회전시켜 지정된 위치의 랙으로 이동하여 결함 핵연료의 수리를 완료한다<sup>[3,4]</sup>.

### 3.3. 프랑스

프랑스의 Framema사는 자신들이 공급한 모든 형태의 핵연료에 대한 수리경험을 바탕으로 기존 수리장비의 성능을 향상시켜 왔으며 하나의 장비로 각 형태의 핵연료 및 각 발전소의 다른 발전소에서도 핵연료

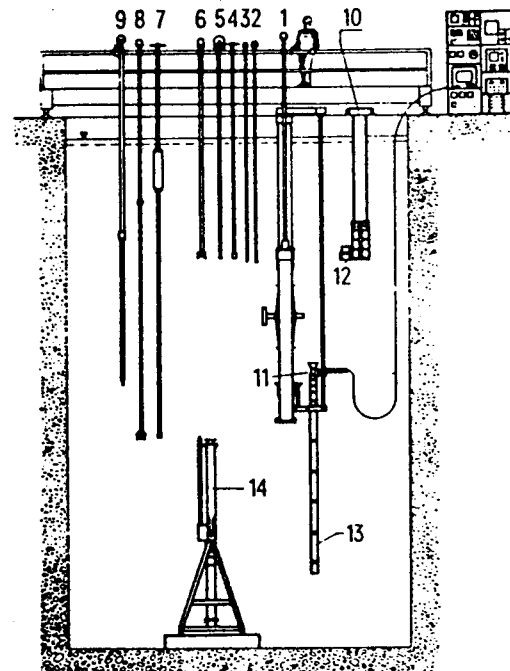


그림 2. KWU사의 핵연료수리장비(예) :

- |               |              |
|---------------|--------------|
| 1. 결함연료봉 탐상장비 | 8. 핵연료취급공구   |
| 2. 연료봉인출장치    | 9. 연료봉교환장치   |
| 3. 다목적렌치      | 10. 하단고정체보관틀 |
| 4. 렌치         | 11. 와류탐상장비   |
| 5. 나사체결공구     | 12. 폐기통      |
| 6. 하단고정체취급공구  | 13. 연료봉저장용기  |
| 7. 렌치         | 14. 연료체재조립기  |

를 수리할 수 있도록 하였다. 또한 작업의 자동화를 통하여 작업시간을 단축하고 적은 운용요원으로도 작업이 용이하도록 하였다. 핵연료수리방법은 결합 핵연료와 건전한 골격체를 옆에 나란히 두고 수리하는 일반적 방법뿐만 아니라 결합이 있는 핵연료 위에 건전한 골격체를 두고 수리하는 방법을 개발하였다. 이 방법은 결합이 있는 핵연료를 180° 돌려 하단고정체를 분리하고 그위에 상단및 하단고정체가 모두 결합되어 있지 않은 새로운 골격체를 두어서 아래에 있는 연료봉을 인출함과 동시에 새로운 골격체에 연료봉이 삽입될 수 있도록 하였으며 연료봉의 교체가 완료되면 하단고정체를 체결하고 핵연료집합체를 다시 180° 돌려 상단고정체를 결합한다. 그리고 아래에 있는 결합이 있는 골격체에 하단고정체를 결합시킨후 180° 돌려 지정된 곳에 저장하였다가 후에 폐기한다. 또한 상단고정체가 분리가능한 개량형핵연료집합체(Advanced Fuel Assembly)에 대하여는 신연료승강기(New Fuel Elevator)를 이용하여 결합연료봉을 인출및 삽입하는 수리방법도 개발하였는데 이 방법은 신연료승강기에 결합연료봉을 가진 핵연료를 넣고 방사선차폐거리를 유지하는 상부위치에서 상단고정체를 분리한후 특정한 공구를 이용하여 결합이 있는 연료봉을 잡고 있는 상태에서 신연료승강기를 내림으로써 결합연료봉의 인출이 이루어지며 인출된 결합연료봉을 연료봉저장용기(Canister)에 넣고 신연료승강기를 상승시켜 새로운 모의연료봉을 삽입한 후 상단고정체를 결합하여 지정된 랙으로 이동시킴으로써 결합연료봉에 대한 연료봉교체작업을 완료한다.<sup>[5]</sup>

### 3.4. 스페인

스페인에서는 사용자와 공급자 사이에 핵연료의 검사와 수리에 대한 필요성이 증가되어 상호 원활한 협조가 진행되고 있다. 이들은 원자력발전소의 냉각수방사능준위와 작업자의 피폭량감소, 재장전을 위한 재설계의 필요성제거, 사용후핵연료저장조에 저장된 모든 재사용가능한 핵연료의 수리, 핵연료의 신뢰도개선및 핵연료의 제조와 설계를 개선하기 위하여 W사의 다목적수리장비를 도입하여 수리작업을 수행하고 있다. 수리작업이후 발전소의 냉각수방사능준위가 크게 감소하였고 검사및 수리작업을 연속적으로 실행하여 발전소의 전체적인 방사능준위감소

의 장기목적이 얻어지고 있으며 또한 명백히 줄어들고 있음을 발표하고 있다<sup>[6]</sup>.

## 4. 국내에서의 핵연료수리현황

1978년 고리 1호기가 상업운전을 시작한 이래로 현재 국내에는 8기의 경수로형원자력발전소가 가동되어 국산경수로핵연료가 사용중에 있으며 건설및 설계중인 영광 3, 4호기와 울진 3, 4호기에서도 국내 개발한 경수로핵연료가 장전되게 될 것이다. 한편 10년이 넘게 원자력발전소가 가동되면서 몇 차례의 핵연료결합이 발견되었으며 현재까지 결합이 발생된 핵연료의 재사용을 위한 수리로서는 고리 1, 3, 4호기와 울진 2호기에서 1985년과 1991년 두차례에 걸쳐 W사의 기술과 장비로서 수행된 경험이 있다. 고리 1호기에서는 발전소 가동초기에 배플분사에 의해 다수의 핵연료에서 결합이 발생되어 1985년에 골격체교체, 연료봉교체및 이물질제거 등의 결합핵연료수리를 수행하였으며 당시의 작업은 상단고정체와 안내관슬리브의 용접부위를 절삭한후 상단고정체를 분리하는 방법을 사용하였다. 그리고 1991년에는 고리 3, 4호기와 울진 2호기에서 골격체교체와 연료봉교체작업이 수행되었으며 이때에는 하단고정체와 안내관을 연결하는 안내관체결나사를 핵연료의 형태에 따라 그라인딩하거나 소성변형된 부분에 힘을 가하여 풀어내는 하단고정체 분리방법을 사용하였다. 1985년도 고리 1호기에서 수리된 핵연료는 장전되어 사용이 완료되었으며 1991년도에 수리된 핵연료는 현재 사용중에 있다. 표 1에는 지금까지 국내에서 수

표 1. 국내에서의 핵연료수리현황

발생년도	핵연료집합체 수	수리년도
1979	3	1985
1981	2	1985
1982	10	1985
1983	1	1985
1984	1	1985
1986	3	1991
1987	3	1991
1988	3	1991
1990	2	1991
계	28	

행된 핵연료수리현황을 보여주고 있으며 현재까지 28개의 핵연료집합체를 수리하였고 주로 연료봉교체의 수리가 많았다. 핵연료의 설계와 제조기술이 더욱 발전하겠지만 결합핵연료가 발생할 가능성을 결코 배제할 수 없으며 결합 발생시 항상 외국의 기술에 의존하는 것은 원자력발전소의 경제적 운용에 있어서도 바람직하지 못하므로 핵연료수리기술의 국산화가 필요한 실정이다.

## 5. 핵연료수리기술의 개발방향

앞에서 기술한 외국의 핵연료수리기술들을 검토하고 국내에서의 핵연료수리현황을 살펴볼 때 핵연료수리기술의 국산화를 위한 우리의 기술개발방향은 다음의 사항들을 고려해야 할 것이다.

- 1) 경제성
- 2) 장비설치의 간편성
- 3) 작업시간의 단축성

경제성측면에서 고려할 때 재장전기간중 결합핵연료가 발견되어 이 핵연료가 다음주기에 장전되지 못할 경우 다음주기의 노심재설계를 긴급히 수행하여야 하며 이때 노심내의 연소도분포를 고려하여 결합이 발생된 핵연료뿐만 아니라 이와 노심내 대칭관계에 있는 다른 3개의 핵연료도 다음주기에 사용되지 못하기 때문에 이들 핵연료가 설계연소도에 도달하지 못하였음에도 불구하고 재사용되지 못하는 경제적 손실을 초래한다. 그럼에도 불구하고 국내에서 핵연료수리에 관한 연구개발이 거의 이루어지지 않았던 것은 국내에서 가동중인 경수로형원자력발전소가 현재 8기로서 사업성측면에서 볼 때 큰 동기부여가 가능치 못하였음이 그 이유이었으나 현재 건설중인 영광 3, 4호기와 설계중인 울진 3, 4호기와 후속기들, 그리고 이제는 이들 발전소에 국산핵연료가 장전되어 사용된다는 점을 고려하고 기술개발에 소요되는 시간을 감안할 때 핵연료수리기술의 국산화가 시급하다고 할 수 있다.

한편 일반적으로 한주기에 결합이 발생하는 연료봉의 수는 많지 않으므로 재장전기간동안 핵연료수리를 수행하기 위해서는 장비의 설치가 간편해야 한다. 발전소 마다 핵연료수리장비가 설치되어 있다면

핵연료수리를 위한 장비설치가 문제되지 않지만 국내 사정으로는 이동식 장비를 이용할 수 밖에 없으며 발전소운전중에 자료들을 이용하여 어느정도의 핵연료결합여부를 알 수도 있으나 재장전기간중의 핵연료 육안검사 또는 초음파탐상검사에 의해서 결합핵연료의 발생여부를 확인하게 되므로 이 경우 핵연료가 인출된 후 다시 재장전되기까지의 시간은 충분치 않아 장비는 발전소의 사용후핵연료저장조 또는 사용후핵연료 수송용기선적수조에 안전하고도 쉽게 설치될 수 있는 구조를 가져야 함이 매우 중요하다.

또한 장비의 설치가 간편함과 더불어 결합핵연료를 수리하는데 걸리는 시간이 될 수 있는한 짧아야 한다. 한번에 다수의 핵연료에 결합이 발생되지 않는다면 재장전기간동안 핵연료의 수리가 가능하며 현재 외국의 기술로는 하나의 골격체교체에 약 20시간, 그리고 한개의 연료봉교체에 소요되는 시간은 약 5시간 정도이다. 이러한 작업시간은 작업자의 방사선피폭량과도 관계되므로 가능한한 작업시간을 줄이도록 노력하고 있다. 따라서 현재 핵연료수리를 수행하고 있는 국가에서는 장비의 자동화를 통하여 정확한 작업이 이루어지고 작업시간을 줄임과 동시에 적은 인원으로도 작업이 가능하도록 장비를 개선하는데 노력하고 있다. 이러한 외국의 기술들과 비교해볼 때 핵연료의 설계, 제조를 수행하고 있는 국가로서 핵연료수리에 대한 우리의 관심이 매우 미흡한 실정임을 알 수 있다.

## 6. 결 론

핵연료검사 및 수리기술은 현재까지는 국내 여건상 그 필요성을 크게 인식하지 못하여 기술개발이 거의 이루어지지 않았으나 국산경수로핵연료가 국내 경수로형원자력발전소에서 사용되고 있는 현재 시점에서 핵연료검사기술개발을 통하여 국산핵연료의 설계, 제조기술개선 등을 도모하고 이와 함께 핵연료수리기술개발로써 핵연료이용률향상에 의한 원자력발전소 운용의 경제성 제고를 꾀하여야 함은 핵연료 설계자로서 수행하여야 할 필수적 과제이다. 본 기고문은 장기적인 안목에서 국가의 원자력기술자립을 위해 핵연료검사 및 수리장비의 기술개발에 대한 연구

의 필요성을 강조하면서 글을 맺는다.

## 참 고 문 헌

1. H. K. Kim, "Report of Fuel Service Field in CE", KAERI/EP-113/88, KAERI(1988)
2. Field Service Procedure, Nuclear Services Division, WESTINGHOUSE(1991)
3. H. K. Kim, "Report of Fuel Service Field in KWU", KAERI/IM-95/87, KAERI (1987)
4. H. Knaab, K. Knecht, and W. Jung, "New Pool-Site Inspection and Repair Techniques Based on Computer Support", IAEA Technical Committee Meeting on Poolside Inspection, Repair and Reconstitution of LWR Fuel Elements, Lyon(1991)
5. L. Guironnet, "Irradiated Fuel Assembly Restoration Equipment", IAEA Technical Committee Meeting on Poolside Inspection, Repair and Reconstitution of LWR Fuel Elements, Lyon(1991)
6. J. I. M. Galan, et al., "Spanish Experience on Fuel Assembly Inspection-repair Campaigns at ASCO I and II and VANDELLOS II", IAEA Technical Committee Meeting on Poolside Inspection, Repair and Reconstitution of LWR Fuel Elements, Lyon (1991)