

# 한국의 신형 연구용 원자로 -하나로(HANARO)

김 동 훈

한국원자력연구소  
연구위원

한

국원자력연구소(KAERI)는 열출력 30MW의 Pool Type 연구용 원자로인 하나로의 건설을 성공적으로 완료하고, 95년 2월에 초임계를 달성하였다.

영(零)출력 및 저출력 원자로 시험을 성공적으로 수행한 후, 여러 출력 단계에서 계통 성능 시험을 수행하였다. 다목적 연구용 원자로인 하나로는 원자력 기술, 방사성 동위원소(RI) 생산 및 기반 연구 개발 분야 등과 같은 여러 분야의 요구에 부응할 수 있는 고품질의 중성자속을 발생하게 될 것이다.

이 글은 KAERI에 의해서 수행된 하나로 건설 사업과 하나로에 설치된

실험 설비에 대한 소개를 목적으로 하고 있다.

## 하나로 건설 사업의 배경

KAERI는 지금까지 2기의 TRIGA형 원자로를 운영해 왔는데, 62년부터 운영해 온 열출력 250kW인 TRIGA Mark-2와 72년부터 운영해 온 열출력 2MW인 TRIGA Mark-3가 그것이다.

이 2기의 TRIGA형 연구용 원자로는 지금까지 한국의 원자력 기술에 관련된 기초 연구 개발, RI 생산 및 활용, 원자력 종사자 교육 훈련 등에 활용되어 많은 성과를 거두어 왔다.

그러나 이 2기의 연구용 원자로는 높은 중성자속 준위를 발생할 수 없다는 점에서 실제적 활용에 많은 제약이 있었던 것이 사실이다.

현대의 과학 기술 분야에서 중성자를 활용함에 있어 소기의 성과를 얻기

위해서는 열중성자속이 높아야 한다는 것이 그 전제이다.

71년도에 시작된 한국의 원자력 개발 사업은 세계적인 석유 위기 등에 자극받아 활발하게 추진되어 왔다.

80년대 중반에는 이미 7기의 원전이 한국의 전체 전력 소비량 중의 상당 부분을 감당해내며 운영되고 있었고, 2기의 원전이 건설중에 있었다.

한국은 원자력 발전의 기술 자립을 추진해 왔으며, KAERI는 핵연료 및 1차 계통 설계 기술 개발 분야에 참여해 왔다.

한국 정부는 원자력 기술의 연구 개발 활동 강화와 원자력 발전 사업 지원을 위한 연구용 원자로의 건설을 결정하였다.

이에 따라 하나로 건설 사업이 85년도에 시작되었다. HANARO는 Hi-flux Advanced Neutron Application Reactor의 약자로서, 모든 한국인의 소망인 조국의 통일, 즉 '하나

를 지향한다'는 의미를 갖고 있다.

**하나로 건설 사업 추진 개요**

하나로 건설 사업을 시작하면서, KAERI는 사업 시행에 관해 몇 가지의 원칙을 수립하였다.

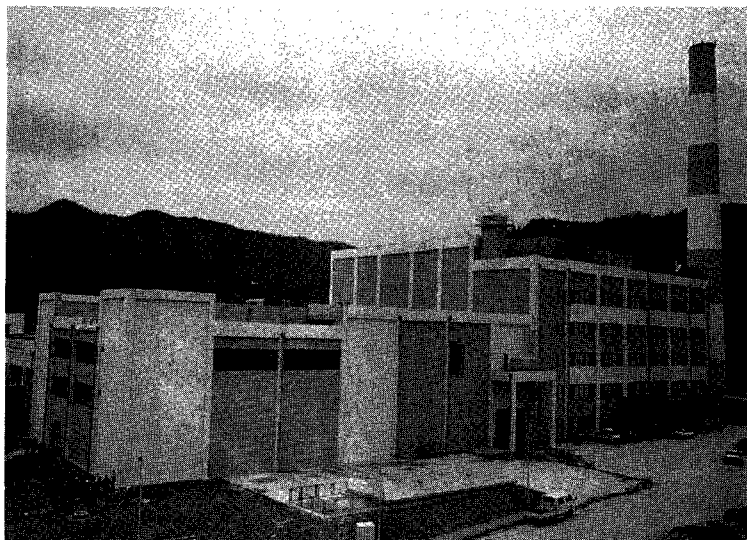
- 원자로형과 설계 개념은 상당한 장래까지 한국내의 잠재적 수요를 충족시킬 수 있도록 개발되고 선정되어야 한다.

- 설계와 건설은 KAERI의 책임하에 수행하며 국내 산업체 및 원자로 기술 용역 분야의 외국 전문 기관의 기술 지원과 자문을 활용한다.

- 사업 추진 과정에서 발생할 수 있는 시행 착오를 최소화하고 중요 계통 및 기기의 성능을 확인하기 위해서 주요 분야에 대한 확인 시험과 연구 개발을 수행한다. 그리고 하나로 사업을 통해서 연구용 원자로 설계 경험을 축적한다.

KAERI는 하나로를 설계·건설함에 있어서 다른 나라에서 운영되고 있는 연구용 원자로를 복사(copy plant)해오는 방식을 취하지 않았으며, 경제적으로 그리고 기술적으로 가장 전망이 좋은 원자로를 선정한다는 정부의 원자력 정책 방향에 부합할 수 있도록 원자로를 설계한다는 원칙하에 추진하였다.

그렇게 함으로써 KAERI는 하나로 사업을 자신의 능력 범위내에서 수행하면서 원자로 기술 개발 경험을 축적



하나로가 있는 건물 전경

할 수 있었다.

사업 초기에 KAERI는 한국의 국익에 잠재적으로 도움이 되는 기술적 타당성 측면에서 정당화될 수 있다고 평가되는 원자로 활용 계획을 수립하기 위한 연구를 수행하였다.

이에 따라 하나로의 활용 목적은 다음과 같이 정해졌다.

- 한국의 원자력 발전 사업을 지원하기 위해서 핵연료, PWR 및 CANDU의 구성품 개발을 위한 재료 시험을 수행한다.

- 여러 분야의 원자력 연구 개발 및 활용에 대한 강력한 중성자원을 제공하기 위하여, 기초 과학 및 산업 분야의 요구를 충족할 수 있는 중성자 빔 실험이 수행되어야 한다.

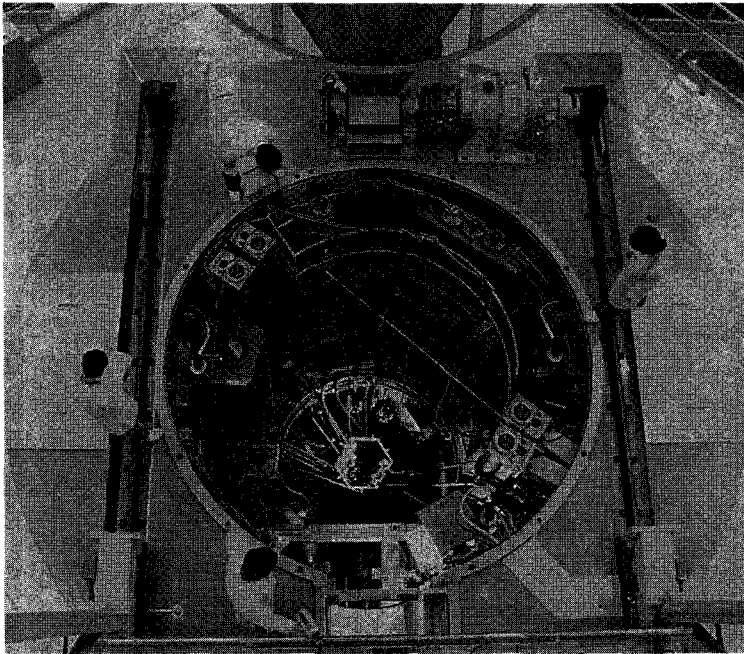
- 산업 및 의료 분야에서 요구하는 주요 동위원소를 생산한다.

(표 1) 하나로 설계 개념

|        |   |
|--------|---|
| 원자로형   | Open-tank-in-pool                                     |
| 열출력    | 30MW  |
| 연료     | LEU(20w/o U235)<br>U <sub>3</sub> Si-Al meat, Al Clad |
| 냉각재    | 경수  |
| 반사체    | 중수  |
| 노심냉각   | 상방향 강제대류 유량+우회유량                                      |
| 2차측 냉각 | 냉각탑   |
| 제어봉 재질 | 하프늄 관   |
| 원자로 건물 | 격납용기  |

하나로는 위와 같은 목적을 달성하기 위한 특정한 원자로 성능과 경제적인 측면을 만족할 수 있도록 추진되었다.

건설 당시 세계 각국에서 운영중인 연구용 원자로와 향후의 원자로에 대한 검토를 수행한 결과에 근거하여 하나로의 설계 개념이 (표 1)과 같이 확



하나로 핵연료 최초 장전 장면

(표 2) 하나로사업의 주요 공정

| 공정                       | 시 기       |
|--------------------------|-----------|
| 사업 착수                    | 85.1      |
| 안전성분석보고서 승인 및 건설 허가      | 87.12     |
| 건설 착수(설계 용역 공정 75%)      | 89.3      |
| 시운전 시험 착수(Non-nuclear)   | 93.7      |
| 원자로 설치 완료                | 94.2      |
| 최종안전성분석보고서 승인 및 연료 장전    | 95.1      |
| 초임계 달성                   | 95.2.8    |
| 15MW까지의 원자로성능 시험 완료(1주기) | 96.2      |
| 24MW까지의 원자로성능 시험 완료(2주기) | 96.4~96.5 |
| 30MW까지의 원자로성능 시험(3주기)    | 96.6~96.7 |

정되었다.

하나로는 open-tank-in-pool형 원자로로서 pool의 상부에 쉽게 접근할 수 있고 충분한 열제거원을 보유하는 장점을 가지고 있다.

원자로 열출력은 30MW로 결정되었고, 핵연료로는 연구용 원자로에 가

장 적합한 것으로 알려진 20w/o 농축 우라늄을 사용한 Uranium Silicide ( $U_3Si_2-Al$ )로 결정되었다.

속중성자 및 열외중성자의 누설을 방지하고 충분한 조사장소를 제공하기 위하여 많은 양의 중수가 노심반사체로 활용되었다.

pool type 연구용 원자로의 성능에 관한 가장 중요한 문제는 어떤 방법으로 노심을 안전

하게 냉각시킴으로써 방사능 위험을 제거하느냐 하는 것이다.

이러한 목적으로, 상부로의 강제 대류 유량과 chimney를 통한 우회 유량을 통합하여 노심을 냉각시키는 방안이 결정되었는데, 이 방식은  $^{16}N$  방출을 제어하기 위한 가장 단순한 방식이

다.

RI 생산용 원자로로 캐나다 AECL사에서 개발한 Maple-X 개념이 하나로에도 적용되었다.

하나로에 대한 광범위한 핵적·열수력학적 설계 분석이 설계 단계에서 수행되었으며, 노심 배치에 대한 여러 가지 방안이 검토되었다.

원자로 설계에 있어서, 안전성 증진을 기본적으로 고려하면서도 가능한 여러 분야의 수요자를 만족할 수 있도록 노력하였다.

이러한 것들은 결코 쉬운 일이 아니었다. 왜냐하면 수요자들은 항상 충분한 활용 공간, 보다 높은 중성자속, 그리고 정상 출력으로의 장기적 운전 등을 요구해 왔기 때문이다.

하나로는 89년 3월에 건설이 착수되어 94년 2월에 준공되었다.

95년 1월에 건설 인수 시험과 계통 성능 시험을 포함한 시운전 시험(non-nuclear)이 수행되었다. 그리고 95년 2월에 초임계를 달성하였다.

그 이후로 영출력과 저출력에서의 원자로 특성 시험과 15MW까지의 출력 상승 시험이 수행되었다. 그리고 제2주기 노심이 형성되어 96년 5월까지 24MW까지의 출력 상승 시험이 수행되었다(표 2).

이러한 시험 수행 과정에서 열수력적 변수와 온도 반응도 계수, 기포 반응도 계수 등과 같은 핵적 변수가 수집되며, 중성자 소음 분석, 열 및 고속 중성자속 분포, 여러 가지의 조사 대

상물의 반응도 효과가 평가된다.

이러한 실험들은 설계시 사용된 컴퓨터 코드의 신뢰도를 확인하고, 실험 자료를 효율적인 원자로 이용과 안전 관리에 필요한 계통 설명서 작성에 활용하기 위해 수행되는 것이다.

85년부터 시작된 하나로 사업이 이제 10년이 지났다.

하나로 사업은 원래 90년 완성을 목표로 했었다. 그러나 필요한 예산의 확보, 기술적·행정적 장애 등으로 인하여 약 4년간 지연되었다.

하나로 사업은 해결하고 개선해야 할 많은 문제와 많은 귀중한 경험을 KAERI에게 안겨주었다. 이러한 것들은 만약 KAERI가 이 사업에 대한 전적인 책임을 지지 않았더라면 얻을 수 없었을 것이다.

하나로 사업과 관련된 국제 협력으로는, 사업 초기부터 지속된 캐나다 AECL사와의 긴밀한 협력 관계를 들 수 있다.

특히 하나로의 기본 설계 및 개념 정립 단계에서, KAERI와 AECL사와의 공동 연구와 기술 정보의 교환을 통해서 유용한 기술적 자문과 지원을 제공받을 수 있었다.

국내 산업계의 원자로 기기와 구성품의 개발 능력이 불충분하여 보다 개선되어야 할 것으로 평가되었기 때문에 원자로 구조물, 정지봉 및 제어봉 구동기구, 연료집합체 및 중수 등과 같은 중요한 기기들은 AECL사에 의해서 하나로의 설계에 맞도록 제작되

어 공급되었다.

하나로의 설계에 대한 평가는 한국과 미국 정부에 의해서 87년에 체결된 협력 프로그램 협정에 따라 4명의 브룩헤븐 원자력연구소(BNL) 전문가들에 의해서 수행되었다.

또한 KAERI와 JAERI(일본원자력연구소)간에 90년에 체결된 인력교환계획 협정에 따라, 하나로 시운전팀의 일부 멤버들이 JAERI를 방문하여 JRR-3M 연구용 원자로의 성능 시험 수행 기간 동안 훈련을 받았다.

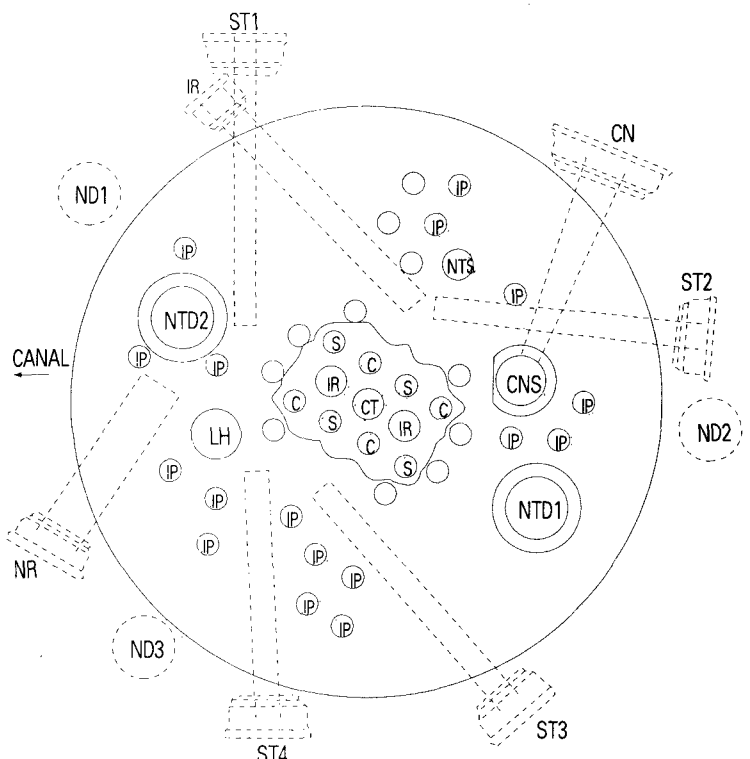
이러한 협력을 통해서 93년 이후의

하나로 성능 시험의 준비 및 시행에 필요한 귀중한 경험을 습득할 수 있었다.

**하나로 활용 계획**

하나로의 노심과 여러 가지 노내 실험 장치들의 평면도는 <그림 1>에 도시되어 있다.

노심은 경수에 의해서 감속되고 냉각되는 내부 노심과 경수에 의해서 냉각되고 중수에 의해서 감속되는 외부 노심으로 구성된다.



(그림 1) 하나로 노심 평면도

내부 노심은 사각형과 유사한 형태 의 6각형 구멍이 있다. 로서 내부에 연료집합체, 제어봉 및 외부 노심은 내부 노심 주위에 연료 재료 조사를 위한 flux trap용의 31개 집합체와 조사 시편을 위한 원통형의 8개의 구멍으로 구성되

(표 3) 하나로의 실험 설비 개요

| 위 치  | 명칭  | 형 태 | 수량 | 규 격       | 목 적            |
|------|-----|-----|----|-----------|----------------|
| 내부노심 | CT  | 6각형 | 1  | 7.44      | 캡슐 조사          |
|      | IR  | 6각형 | 2  | 7.44      | 캡슐 조사          |
| 외부노심 | OR  | 원통형 | 4  | 6.0       | RI 생산          |
| 반사체  | CNS | 원통형 | 1  | 16.0      | 냉중성자원          |
|      | NTD | 원통형 | 2  | 22.0/18.0 | Silicon doping |
|      | LH  | 원통형 | 1  | 15.0      | 연료시험 루프        |
|      | HTS | 원통형 | 1  | 16.0      | RI 생산          |
|      | NAA | 원통형 | 3  | 17.0      | 방사화 분석         |
|      | IP  | 원통형 | 17 | 6.0       | RI 생산          |
| 빔 튜브 | ST  | 사각형 | 4  | 7×14      | Spectrometer   |
|      | CN  | 사각형 | 1  | 7×15      | 냉중성자빔 실험       |
|      | NR  | 원통형 | 1  | 10        | 중성자 라디오그래피     |
|      | IR  | 원통형 | 1  | 10        | 조사시험           |

(표 4) 하나로의 실험 설비 설치 계획

| 실험설비                            | 93 | 94 | 95 | 96 | 97 | 98 | 99 | 00 | 비 고 |
|---------------------------------|----|----|----|----|----|----|----|----|-----|
| • 연료 및 재료시험                     |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 무계장 캡슐                          | ←→ |    |    |    |    |    |    |    | 진행중 |
| 계장캡슐                            | ←→ |    |    |    |    |    |    |    | 진행중 |
| 정상상태 루프                         | ←→ |    |    |    |    |    |    |    | 진행중 |
| 과도상태 루프                         |    |    |    | ←→ |    |    |    |    |     |
| • RI 생산                         |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| Fission Molly                   |    |    |    | ←→ |    |    |    |    | 진행중 |
| • 중성자빔 활용                       |    |    |    |    |    |    |    |    |     |
| 중성자 라디오그래피                      | ←→ |    |    |    |    |    |    |    | 진행중 |
| HRPD                            |    | ←→ |    |    |    |    |    |    | 진행중 |
| PNS                             | ←→ |    |    |    |    |    |    |    | 진행중 |
| SANS                            |    |    |    | ←→ |    |    |    |    | 진행중 |
| TAS                             |    |    |    | ←→ |    |    |    |    | 진행중 |
| 냉중성자원                           |    |    |    | ←→ |    |    |    |    | 진행중 |
| • 실리콘 생산                        | ←→ |    |    |    |    |    |    |    | 진행중 |
| • Boron Neutron Capture Therapy |    |    |    |    | ←→ |    |    |    | 진행중 |

력연구개발 장기계획에 반영되어 있다. 이 장기계획에 관련된 몇 가지 실험 설비 설치 계획은 <표 4>와 같다.

1. 핵연료 및 재료 시험

핵연료 및 재료 in-pile test는 원자력발전 기술개발계획의 일부분으로서 가장 중요한 분야 중의 하나이다.

이러한 목적으로 in-pile test loop 설비는 CANDU원자로용 CANFLEX 연료, DUPIC연료(PWR의 사용후 연료를 CANDU연료로 사용) 및 개량형 MOX연료를 개발하고 건전성을 확인하는 데 이용될 수 있도록 설계되었다.

이외에도 원자로 재료의 조사 시험을 위한 계장 및 무계장 캡슐이 97년까지 하나로에 장착될 계획이다.

2. RI 생산

RI 생산 설비는 하나로의 건설과 병행하여 추진되었다. RI 생산 설비는 방사성 의약품의 생산에 요구되는 의약품 품질 요건을 만족하기 위한 3개의 청정실을 갖추고 있으며, 4개의 콘크리트 hot cell과 17개의 납 cell이 96년에 가동될 예정이다.

국내에서 RI에 대한 의학적 및 산업계의 수요는 증가일로에 있다. 94년말 현재 RI 취급 기관 및 방사선 발생장치 보유 기관은 1,300개를 넘어

서고 있다.

특히 국민 복지의 증진과 의료 혜택의 확대에 따라 RI의 의료적 활용이

어 있다. 노심 주위는 반사체인 중수가 채워진 넓은 공간이 있으며, 이곳에는 <표 3>에 표시되어 있는 것과 같이 여러 가지 크기의 25개의 수직 구멍과 7개의 수평

다. 원자로 건설과 함께 RI 생산 설비와 조사 재료 시험 설비 등과 같은 몇 가지의 실험 설비의 설치도 병행되었다.

그러나 전반적으로 볼 때 실험 설비의 설치 등이 포함된 계획은 예산 지원의 제한 등에 의해서 원자로의 운전과 함께 시기 적절하게 준비되지 못하였다.

하나로 활용 계획은 93년에 수립된 국가원자

크게 증가하고 있으며, 요구되는 핵종 수도 지속적으로 증가되고 있다.

국내에서 사용되는 방사성 의약품 중에서 국내 RI 핵종 수요의 90%를 차지하는 핵심적인 방사성 핵종 Tc-99m에 대한 수요가 가장 많다.

fission molly의 생산과 RI 생산 공정 기술에 관한 연구 프로그램과 방사성 의약품을 위한 새로운 방사성 핵종의 활용도 수년내에 가능해질 것이다.

현재 하나로 운영자에게 주어진 가장 중요한 임무는 하나로가 국민 복지의 향상에 도움이 될 수 있도록 조화 된 노력을 기울이는 것이다.

### 3. 중성자빔 연구

중성자빔을 이용한 연구 활동은 7 개의 중성자빔 튜브에서 여러 가지의 Neutron Spectrometer와 radiography facilities를 통해서 수행될 수 있다. 그 중에서 High Resolution Power Diffractometer(HRPD)와 Polarized Neutron Spectrometer (PNS)는 96년부터 고온 초전도체 및 기능성 화인세라믹 등의 재료 연구에 이용할 수 있다.

핵연료에 대한 비파괴 시험 및 미세 영상 처리 기술의 개발에 이용될 수 있는 neutron radiography facility의 기본 계통이 설치중에 있다.

그 후에, 증가하고 있는 연구 수요에 부응할 수 있도록 중성자빔 연구를 위한 보충적인 고준위 시설이 단계적으로 준비될 것이다.



하나로 중앙제어실

2000년 이후에는 냉중성자빔 연구에 대한 수요가 크게 증가할 것이다.

이러한 전망에 따라 냉중성자원 및 냉중성자 안내관의 설치 후에 많은 중성자 분광계가 추가될 것이다.

### 결론

하나로 사업은 설계 및 건설 측면에서 국내 기술로 수행된 최초의 연구용 원자로이다.

하나로의 성공적인 준공은 한국의 원자력 기술 수준을 대외적으로 과시 하면서 한국의 원자력 개발 역사에 새로운 이정표를 세운 것이다.

하나로 사업은 원자로 기술 개발 경험이 부족한 연구진들에게 매우 소중한 경험을 축적할 수 있는 기회를 제공하였으며, 한국의 원자력 기술의 진보에 큰 기여를 하였다.

우수한 원자력 기술을 성공적으로 확보하기 위해서는 원자력 선진국과의 기술 교류에 바탕을 둔 협력 관계를 증진하는 것이 반드시 필요하다.

하나로가 silicide LEU를 연료로 사용한 최초의 연구용 원자로이기 때문에 하나로의 운전 경험과 탁월한 성능의 발휘는 연구용 원자로를 건설할 계획으로 있는 국가들에 매우 유용한 정보로서 활용될 수 있을 것이다.

계획된 시험 설비가 일정에 따라 준공된다면 하나로가 다음 세기까지도 한국의 국가 원자력 개발의 중심적 역할을 수행할 수 있을 것이다.

하나로가 국내적 활용은 물론이고 국제적인 원자력 연구를 위한 중요한 설비가 될 것이라는 기대하에, KAERI는 전세계 원자력계와의 토론과 정보 교환을 통해서 하나로의 운영에 만전을 기할 것이다. ☺