



KR9900064

KAERI/AR-535/99

# DUPIC Fuel Cycle Economics Assessment (I)

1999. 4.

Korea Atomic Energy Research Institute  
P.O.Box 105, Yusong  
Taejon, 305-600, Korea

*R*

30 - 40

# DUPIC Fuel Cycle Economics Assessment (I)

1999. 4.

Korea Atomic Energy Research Institute  
P.O.Box 105, Yusong  
Taejon, 305-600, Korea

## 제 출 문

한국원자력연구소장 귀하

본 보고서를 1999년도 “DUPIC 핵연료 양립성평가” 과제의 기술현황분석 보고서로 제출합니다.

제목 : DUPIC FUEL CYCLE ECONOMICS ASSESSMENT (I)

1999. 4. .

과제명 : DUPIC 핵연료 양립성평가

주저자 : 최항복

공저자 : 노규홍, 김도현

## **PREFACE**

This is a state-of-the-art report that describes the current status of the DUPIC fuel cycle economics analysis conducted by the DUPIC fuel compatibility assessment group of the DUPIC fuel development project. For the DUPIC fuel cycle economics analysis, the DUPIC fuel compatibility assessment group has organized the 1st technical meeting composed of 8 domestic specialists from government, academy, industry, etc. and a foreign specialist of hotcell design from TRI on July 16, 1998. This report contains the presentation material of the 1st technical meeting, published data used for the economics analysis and opinions of participants, which could be utilized for further DUPIC fuel cycle and backend fuel cycle economics analyses.

## 서 문

본 보고서는 DUPIC 핵연료 기술개발 과제 중 DUPIC 핵연료 양립성평가 과제에서 수행 중인 DUPIC 핵연료주기 경제성 분석의 연구 현황을 기술하는 기술 현황분석 보고서이다. DUPIC 핵연료 양립성평가 과제에서는 DUPIC 핵연료 주기 경제성 분석을 위하여 1998년 7월 15일 1차 국내전문가 기술회의를 정부 부처, 학계, 산업체 등에서 활동 중인 국내 전문가 8인 및 미국 TRI 회사의 차폐시설 설계 전문가 1인을 초청하여 개최하여 각계의 전문가들의 의견을 반영하여 경제성 분석을 추진하고자 하였다. 본 보고서는 DUPIC 핵연료 주기 경제성 분석 회의에서 발표된 내용, 현재 경제성 분석에 활용되고 있는 기존의 연구 결과물 및 전문가들의 의견을 수록하고 있어, 향후 DUPIC 핵연료 주기 경제성 분석 및 후행핵연료 주기 경제성 분석에 기초 자료를 제공하고자 한다.

## TABLE OF CONTENTS

SECTION	PAGE
PREFACE .....	2
1. DUPIC 핵연료 개발 과제 .....	5
2. DUPIC 핵연료 양립성 평가 과제 .....	6
3. DUPIC 경제성연구 배경 및 현황보고 .....	7
4. RFRL/FRAD Revisited .....	8
5. 확률론적 경제성 평가 방법 .....	9
6. DUPIC의 경제성 평가 .....	10
7. 향후 업무 .....	12
8. 전문가 의견 교환 및 토론 .....	13
9. 종합의견 .....	16
 참석자 명단 .....	 17
 참고문헌 .....	 18
 첨부자료(발표자료)	
첨부 1. DUPIC 핵연료 개발 과제 .....	19
첨부 2. DUPIC 핵연료 양립성 평가 과제 .....	20
첨부 3. DUPIC 경제성연구 배경 및 현황보고 .....	23
첨부 4. RFRL/FRAD Revisited .....	26
첨부 5. 확률론적 경제성 평가 방법 .....	38
첨부 6. DUPIC의 경제성 평가 .....	42
첨부 7. 향후 업무 .....	50

# 1. DUPIC 핵연료 개발 과제

## 발표요약

DUPIC과제 생성 배경, 추진 내역, 연구목표 및 내용 변천과정, 97년도 신중장기 계획의 연구 목표 및 단계별 연구 내용 소개. (첨부자료 1)

## 질의응답

- DUPIC제조시설에서 사용후핵연료 물질을 취급하기 전에 충분한 cold test가 이루어져야 할 것임.
- DUPIC제조시설에서 비상용 디젤 발전기가 있는가  
→ 있음.

## 2. DUPIC 핵연료 양립성 평가 과제

### 발표요약

DUPIC핵연료기술 개발과제 내에서의 경제성분석 업무 비중 설명.

DUPIC핵연료 양립성평가 기술개발 과제의 연구 목표 및 단계별 연구 내용 소개.

경제성 분석 업무 추진계획 및 전문가그룹 구성 계획 설명. (첨부자료 2)

### 질의응답

- 기술적 타당성 분석을 우선적으로 수행함이 바람직. 실험실 규모의 시설을 확장하여 바로 상용화 시설에 적용할시 경제성 평가상의 많은 문제점 예상.
- 기술적 타당성 분석 및 양립성평가가 경제성 분석에 선행되어야 함이 바람직  
→ 상호 보완적 사항이므로 기술분석과 경제성 분석이 병행되는 것이 바람직 함.
- MOX 또는 기타 핵연료주기에 대한 상대적인 양립성 평가가 필요할 것임. 기타 핵연료 주기에 대해서 모델 적용이 공통적으로 가능한가. MOX 또는 직접 처분 핵연료주기의 경제성평가 전문가의 의견을 반영하는 것이 바람직.
- DUPIC핵연료제조와 관련하여 경수로가 장주기로 갈때에 경·중수로 연계상의 문제점을 고려할 필요가 있음. DUPIC핵연료 반응도 보상을 위하여 SEU 사용 가능성, 기체상 핵분열생성물 이외의 핵분열생성물 제거 가능성 등을 고려할 필요가 있음. 사용후핵연료 처리 측면에서 기술 확인후 미국 사용자 그룹과 접촉하는 방안도 고려할 가치가 있음.  
→ 기체상 핵분열생성물을 의도적으로 제거하는 것은 기술적 민감성을 자극할 수 있음.
- 경제성분석 연구 참여인력 구성은 시설투자 부분은 시설분야, 운영분야는 제조 인력 참여가 필요함.



### 3. DUPIC 경제성연구 배경 및 현황보고

#### 발표요약

DUPIC핵연료 제조비용의 손익분기점 산출, 400톤/년 DUPIC핵연료 제조시설 개념 설계(Sciencetech) 결과 및 DUPIC핵연료 제조비용 재검토(ORNL) 결과 발표. DUPIC과 유사한 핵연료주기의 경제성 평가 사례 소개. (첨부자료 3)

#### 질의응답

- 향후 계획은 경제성 분석용 단위 공정 비용 산출에 주력할 것인가. → 핵연료 취급 및 사용후핵연료 처분 비용 등을 포함하여 전체 단위공정 비용을 데이터베이스화 할 계획.
- 핵연료주기 경제성 분석이 한전에 의해 수행된바 있는데 그 자료는 참조했는가  
→ 일부 결과는 구두로 들은바 있으나 결과 보고서를 입수하는데 상당한 어려움이 있음.
- 한전의 경제성분석은 COGEMA에 위탁하여 수행하였으나, COGEMA는 경제성을 평가하는데 필요한 자료(자문)을 제공하였으며 각 핵연료주기의 경제성에 대한 최종 판단은 한전이 했음.
- DUPIC핵연료 제조시 발생하는 피복관 등의 고체폐기물 처분비용은 핵연료 제조비 산출에 반영되어 있는가  
→ 포함되어 있음.

## 4. RFRL/FRAD Revisited

### 발표요약

Fuel Refabrication and Development Program(RFRL)은 핵비확산성 핵연료주기를 위한 핵연료 제조기술 개발을 목표로 시작되었음. 핵연료의 원격 제조, 핵연료물질 및 제조장비의 원격 이송 및 유지/보수 기술 등을 개발함. (첨부자료 4)

### 질의응답

- 원격 핵연료 제조시설의 인허가 비용 및 인허가 시간 지연 등이 고려되어야 함. → Scientech 자료에 인허가 비용 포함되어 있음.
- RFRL에서 추구하는 핵비확산성 핵연료주기의 정의는 무엇인가  
→ CIVEX의 경우 MOX 핵연료에 인위적으로 핵분열생성물을 첨가하여 핵물질의 전용을 방지하고자 했음. 근본적으로 사용후핵연료는 핵물질 전용에 대해 자기 방어 능력이 있다고 간주하여 '사용후핵연료 기준'으로 사용되고 있으며, 일반적으로 방사능을 내는 핵연료 물질을 핵비확산성으로 간주함. 이에 대한 보다 일관성 있는 판단을 위해 제염상수(decontamination factor) 개념을 도입하기도 함.  
→ 핵연료가 수송이나 취급 도중 항상 방사능을 보유하고 있어야 함.  
→ 건식처리도 그 기술에 따라 핵확산성으로 보고자 하는 견해도 있음. 국가에 대한 핵확산성 민감도는 순수 플루토늄(MOX 포함) 보유 여부, 플루토늄 취급 기술 보유 여부 및 플루토늄 취급시설 보유 여부로 판단함.
- 원격 핵연료 제조시 품질관리는 문제가 없는가  
→ SAF의 사례를 볼 때 자동화된 설비 내에서 핵연료 조성 및 분말 특성을 유지 관리하는 것이 가능함.
- Hanford 핵연료 제조시설 SAF에서 얼마나 많은 고속증식로 핵연료 다발이 제조되었는가  
→ 정확하지 않지만 적은 숫자의 다발이 제조된 것으로 추정함.

## 5. 확률론적 경제성 평가 방법

### 발표요약

핵연료주기 비용 산정의 불확실도를 평가하기 위해 도입한 확률론적 경제성 평가 방법 발표. 핵연료주기 비용 단가의 분포를 나타내는 함수 모델, 난수를 사용한 단가 선택 과정, 핵연료 주기비의 평균치 및 편차 계산 방법 소개 및 시범계산 결과 발표. (첨부자료 5)

### 질의응답

- 채규남이 수행한 LHS 및 민감도 계산 결과 참조 바람직. 결과로 제시한 확률 분포중 돌출 부분에 대한 설명 필요함. OECD'85 자료를 사용한 탄뎀핵연료 주기에 대한 해석 결과를 참고자료로 활용할 것을 권유함.

## 6. DUPIC의 경제성분석

### 발표요약

국내 전력수요 및 노형전략을 설정하고 NUFCAPI를 사용하여 DUPIC핵연료주기비를 산출하고 직접처분의 경우와 비교. 핵연료 제조비의 핵연료주기비에 미치는 영향을 보기위해 DUPIC 핵연료 제조비를 상승시켜 가며 핵연료주기비 변화를 분석. 그밖에 DUPIC 핵연료주기 도입시 연간 우라늄 필요량, 핵연료 성형가공 필요량 및 사용후핵연료 누적발생량 비교 평가. (참고자료 6)

### 질의응답

- DUPIC핵연료주기에서 중수로 사용후핵연료 발생량이 감소하는 이유는?
- 직접처분주기 비용이 대략 6mills/kWh 이고 MOX 핵연료주기 비용이 대략 7mills/kWh 인데, 앞에 발표된 고원일 결과와의 차이점은 어디에서 오는가?
- 핵연료 제조설비 이용률을 70%로 가정했는데, 이용률이 저하될 때 핵연료주기비에 미치는 영향등 불확실도 문제를 점검할 필요가 있음.  
→ AIROX 공정에서도 70% 이용률을 사용하였으며, 기타 핵연료주기 시설의 가동률도 일반적으로 그 정도를 가정함.
- 핵연료 누적 발생량은 20% 감소하는데, 저장비용이 증가함. 그 원인 규명이 필요하며, 전반적으로 불확실도에 대한 재검토, 민감도 분석, 및 중요 변수 분석이 필요함.
- DUPIC핵연료주기에서는 경수로주기의 후행 부분과 중수로주기의 선행 부분이 연결되므로, DUPIC핵연료주기를 정확히 정의하는 것이 바람직함.
- 결과표에 제시된 DUPIC processing 비용의 위치가 애매함. DUPIC핵연료 제조부분을 분리하는 것이 바람직함.

- 한전에서 발표한 자료에 의하면 국내 전기 생산의 33%를 원자력이 감당할 경우 핵연료 주기비가 약 2억 3500만\$ 이며, 전년도 국내 핵연료 주기비가 약 2억 400만\$. 송기동이 제시한 2040년 핵연료 주기비 3억\$은 의문이 있음.

## 7. 향후 업무

### 발표요약

DUPIC핵연료 제조시설 비용 재평가 및 투자비/운영비 단가 자료 보완 계획, 핵연료 취급, 핵연료 수송, 핵연료 저장 및 사용후핵연료 처분 비용 평가. 국내·외 전문가 활용, 데이터베이스 구축 계획 및 투명성 확보를 위한 국제기구에 위탁 연구 가능성 제시. (첨부자료 7)

### 질의응답

- 투명성 제고 위한 IAEA 위탁 계획은 투명성에 대한 정의가 의문시 됨. DUPIC을 경제성 관점에서만 보기 보다는 경제성 외적으로도 중요한 인자들을 고려함이 바람직함. 경제성에 대한 연구는 누가 하더라도 신임을 얻기 어려울 것은 마찬가지라고 봄. 그럼에도 불구하고 경제성 연구는 계속할 필요가 있음.

## 8. 전문가 의견교환 및 토론

- ANS 학술대회에서 임창생은 중수로 사용후핵연료 저장 비용이 43\$ 이고 DUPIC은 4.6배 라고 발표한 내용에 대해 확인 요망. DUPIC핵연료 제조 용량400tHM/yr에서 단위의 통일이 필요함. cold test 후에는 상당한 비용 상승이 예상됨, 연간 운전정지 시간을 고려하여 예비 diesel 발전기 비용 필요. 외부에서 바라볼 때는 한소장 시절부터 핵무기에 대한 미련이 있다는 생각함, 홍보실과 협의하여 사용후핵연료 감소, 자원활용 및 환경보호 측면에서 DUPIC이 필요하며, 플루토늄 분리와는 다르다는 것을 언론에 설득할 필요가 있음. 송기동 발표자료 6쪽에 재처리(reprocessing)은 대외적으로는 언급하지 않는게 중요함. 대정부 홍보도 병행하는 것이 바람직 함, 예를 들면 과기부를 통해 DUPIC을 정부 입장으로 반영하는 것이 바람직함.
- DUPIC에 대해 국내에서 실용성등에 문제가 제기된바 있고 이를 반영하여 연구범위의 축소조정(pilot 규모연구배제)이 있었음. 내부적으로 계속 추진되려면 경제성 자료가 계속 생산되어야 함. 계속적으로 기술자료 및 경제성 자료를 개선하고, 지속적으로 연구성과 결과를 보이고 핵연료성능, 특성 평가를 수행하는 것이 바람직함.
- 원자력 기금을 사용하는 연구과제에 대한 비판이 높음. 원자력 기금을 국내 연구/기술개발에 사용하지 않고 주로 연구비를 외국으로 지출하고 있는 것으로 인식함. 특히 원자력연구소는 그 기능이 최종 성과물을 만드는 것이 아닌데, 원자력연구소는 DUPIC이나 신형원자로 연구에서 최종성과물 생산에 예산을 투자하고 있음. 예를 들어 연구 제안서에서 최종 목표를 pilot 시설 건조로 한 경우가 있는데, 세부기술은 연구소가 담당하고 나머지 기술은 회사가 담당해야 함. 그렇지 않은 경우 연구개발 과제로 보기 힘들기 때문에, 핵심 기술 개발에 치중해야함. 1991년 DUPIC을 시작한 후 그 동안 생산된 결과가 무엇이며 외국에 내세울수 있는 기술이 있는가?
- DUPIC 2단계 연구가 2002년 3월 까지 계획되어 있으며, 2단계 말까지 수개의 DUPIC 연료봉 및 소결체 제조와 하나로에 소결체를 조사 시험을 통한 성능분석을 하기로 되어 있음. 경제성이 중요하게 인식되나, 비핵확산성 기술로

서 직접처분과 비교하여 경제성이 유사하게 나온 것은 현재로는 경제성이 없다고 보아야 할 것임. 현재 수치보다 앞으로 경제성이 더 나빠질 수 있음. 따라서 경제성을 향상시킬 수 있는 독창적 기술의 첨부가 필요하며, 특정 기술에 대한 상세분석이 필요할 수도 있음. 경제성 이전에 기술성에 대한 의문이 해소되고 있지 않으므로 기술성에 대한 부분도 중요함.

→ 실험실 규모로서 소결체 제조는 기술적으로 가능함. 핵연료 제조 가능성, 양립성 문제, 경제성 비교 평가 등을 2단계까지 입증하고 나서 후속 단계 연구를 수행 예정임.

- 핵연료 소결체 제조, 탈피복 등은 연구소의 업무 영역이 아님, 다른 곳에서 할 수 있는 업무는 연구소 연구 범위에서 제외되어야 함. 완성품 제작은 핵연료 주식회사 업무로 보아야 함. 원자력연구소는 기술만 개발하는데 국한해야 함 (한전과 초기에 과제 분류시 정부과제는 주요기술 개발만 하기로 되어 있었음). 핵연료 소결체 제조 및 탈피복을 핵연료 생산을 위함은 아님. 연구소에서 보유하고 있는 소규모 hot cell에서 사용후 핵연료 물질을 이용하여 DUPIC 핵연료 분말, 소결체 특성 연구와 소결기술, 산화/환원기술 등 핵심기술을 실험실 규모로 연구 하기 위함임.

→ 사용후핵연료를 위한 소결로 및 핵연료 제조 시설은 현재 국내 회사에는 없음.

- 회의 목적이 경제성 분석 회의를 통해서 의견을 수렴하는 것이므로 토의 내용을 경제성 분석에 관한 내용으로 집중하는 것이 바람직함. DUPIC 핵연료 개발은 전례없는 연구이기 때문에 수행에 어려움이 따르나, 최소한의 연구 개발 업무는 계속 추진해야 할 것임. 사회 간접적으로는 방사선의 신체 위해도가 중요시됨. DUPIC을 도입 하더라도 전체적인 환경 영향은 그대로 남게되며, 보장조치의 경우도 방사성 물질의 계측이 더 어려운 점도 있음. 경제성 분석에서도 단위 비용 자료의 불확실성을 고려하면, 제조 비용이 MOX와 비교하여 상승할 것으로 예상.

- MOX 핵연료에서 플루토늄 함량이 너무 증가하면 문제가 됨. 플루토늄 포함시 재료 특성의 변화 및 원자로 속에서 성분 균질성을 유지하기 위한 방안 등에 대한 연구가 필요함. 분리하지 않으면 핵비확산성이란 개념은 다름, 분리를



안한것과 못한것은 다름. 현재 방법대로 추진하되 보다 구체적인 기술확보 사항을 추가 해야 할 것임.

- DUPIC 때문에 경·중수로를 3:1로 유지하는 논리는 앞뒤가 바뀐 것으로 봄. 그러나 현재 노형전략하에서는 좋은 대안으로 잔존할수 있다고 봄. 산업계와의 마찰은 한전이 기금을 내기 때문으로 봄.

## 9. 종합의견

- DUPIC핵연료주기 비용 산출시 사용된 입력자료를 명확히 할 것 (DUPIC핵연료주기 모델, 노형비율 등)
- 핵연료제조비 구체적으로 제시 (운영비, 예비비 등)
- 핵연료 수송, 취급, 저장 및 처분 비용 재 평가
- 핵연료주기 비용 단가 데이터베이스 구축이 바람직 함
- 민감도 분석을 통해 주요 단가를 파악하고 불확실도 분석
- DUPIC의 기술적 평가는 계속 추진되어 경제성 평가를 통하여 뒷받침 해야 함
- 경제성 평가 결과의 외부 재검토는 그 필요성이 회의적 임

## 참석자 명단

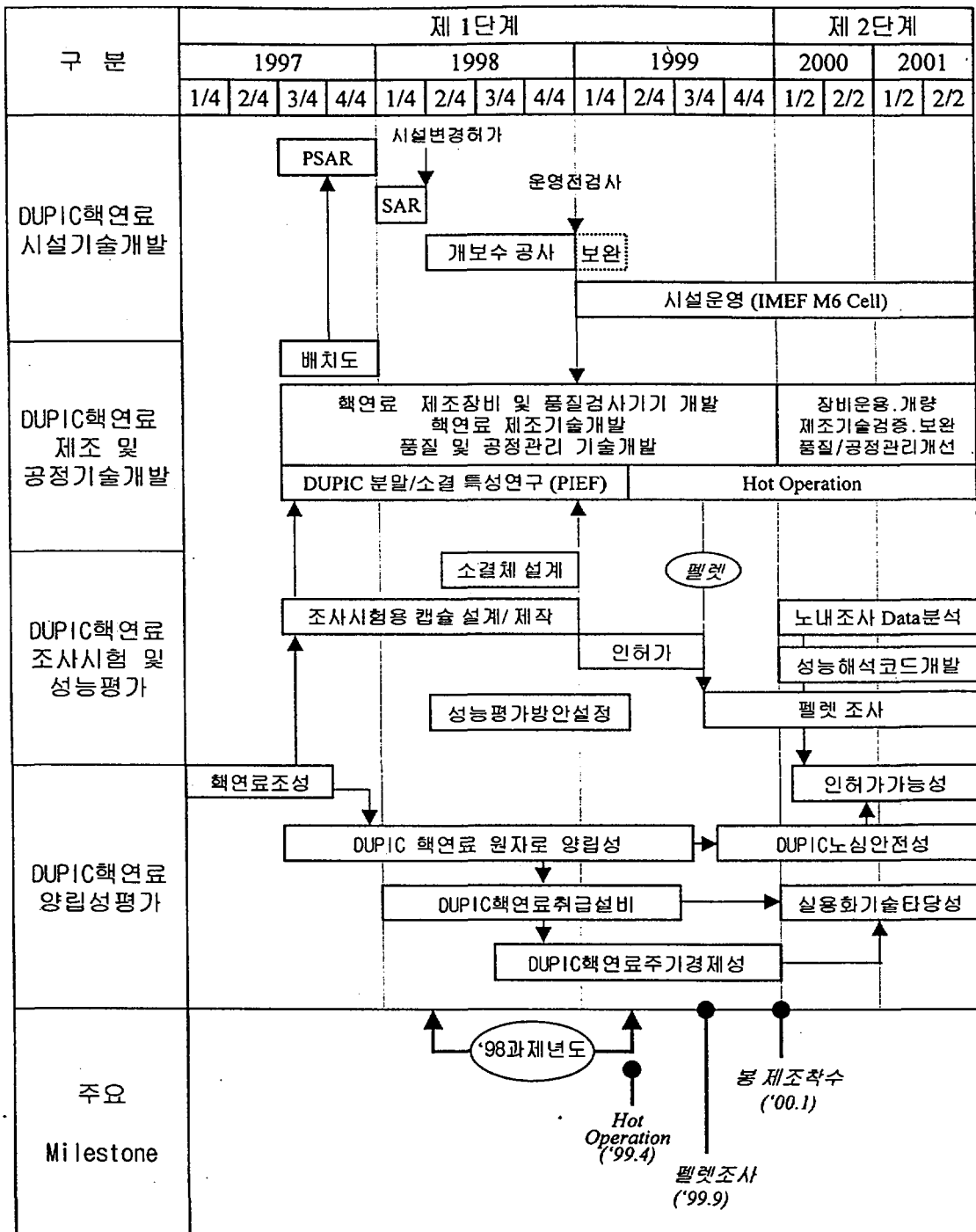
채규남	산업자원부 원자력발전과/과천시 정부청사
정범진	과학기술부 원자력개발과/과천시 정부청사
박찬오	원전연료(주) 노심설계처/대전시 유성구 덕진동 150
나복균	전력기술(주) 기계설계처/대전시 유성구 덕진동 150
조남진	한국과학기술원 원자력공학과/대전시 유성구 구성동 373-1
이은철	서울대학교 원자력공학과/서울특별시 관악구 신림동 56-1
이창건	원자력위원
김화섭	한국원자력연구소 경제분석실
송기동	한국원자력연구소 경제분석실
이한명	한국원자력연구소 경제분석실
양명승	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제
이재설	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제
배기광	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제
최항복	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제
박장진	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제
최종원	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제
고원일	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제
임성팔	한국원자력연구소 DUPIC 핵연료개발과제

## 참고문헌

1. "Estimates of Canadian Fuel Fabrication Costs for Alternate Fuel Cycles and Systems", Ontario Hydro Report No.79114, Canada (1979)
2. "AECL/KAERI Joint Research Program Tandem Fuel Cycles", Phase 1 Program Final Report, AECL/KAERI (1983)
3. "Economic Prospects of the IFR Fuel Cycle", ANL (1991)
4. "경수로 사용후핵연료를 중수로에 직접 사용하는 방안 검토", 한국전력공사 연료처 (1991)
5. "경·중수로 연계 핵연료주기비 검토", 한국원자력연구소 경제분석팀 (1992)
6. "The Economics of DUPIC Fuel Cycle", KAERI DUPIC Project Internal Memorandum (1994)
7. "DUPIC 핵연료주기 경제성 평가", KAERI/RR-1725/96 제 3 장 (1997)
8. "Analysis on DUPIC Fuel Cycle in Aspect of Overall Radioactive Waste Management", University of Tokyo (1997)
9. "Nuclear Fuel Cycle Cost Analysis using a Probabilistic Simulation Technique", Annals of Nuclear Energy (1998)
10. "Disposal Costs for Advanced CANDU Fuel Cycles", AECL (1998)
11. "Environmental and Economic Performance of DUPIC", MIT (1998)

# 첨부 1. DUPIC 핵연료 개발 과제

- DUPIC 핵연료개발 추진체계



## 첨부 2. DUPIC 핵연료 양립성 평가 과제

### DUPIC 핵연료주기 경제성분석 기술회의

DUPIC 핵연료 양립성 평가 기술 개발 과제

최 항 복

1998. 7. 16.

한국원자력연구소

2

### DUPIC 핵연료주기 기술개발

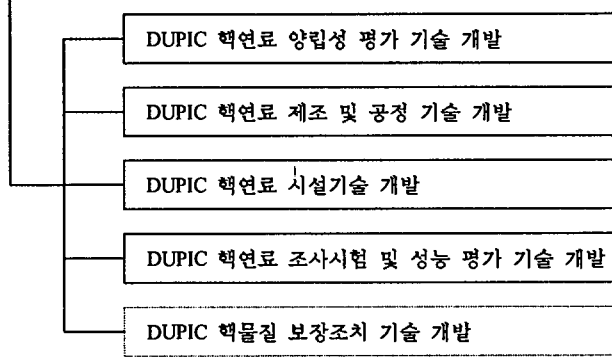
● 최종목표 :

- ▶ DUPIC 핵연료 양립성, 경제성, 기술타당성 평가
- ▶ DUPIC 핵연료 기술 개발
  - DUPIC 핵연료 제조 및 공정기술 개발
  - DUPIC 핵연료 시제품 제조 (소결체 및 연료봉)
  - DUPIC 소결체 하나로 조사시험 및 성능평가

● 단계별목표 :

1 단계 ('97 - '99)	2 단계('00 - '01)
DUPIC 핵연료 원자로계통 양립성 및 경제성평가	DUPIC 핵연료 원자로 안전성 및 기술타당성평가
소결체 및 연료봉 제조/공정기술 개발	DUPIC 연료봉 제조
DUPIC 소결체 제조	DUPIC 소결체 계장 capsule 조사시험
DUPIC 소결체 무계장 capsule 조사시험	DUPIC 핵연료 성능평가

### DUPIC 기기 조직



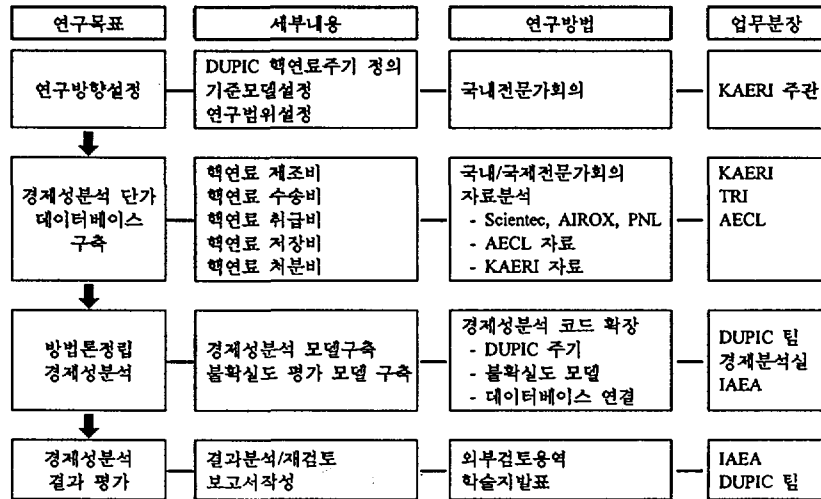
### DUPIC 핵연료 양립성 평가 기술 개발

- 최종목표 : DUPIC 핵연료의 원자로 양립성 평가
  - DUPIC 핵연료의 경계성 분석
  - DUPIC 핵연료 실용화를 위한 기술 타당성 분석

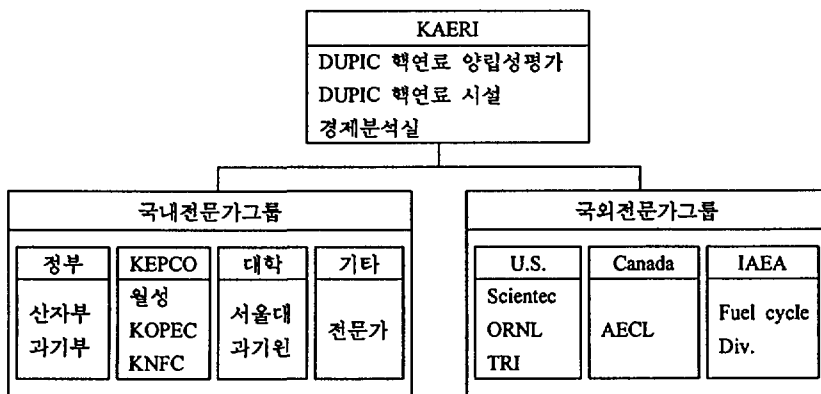
● 단계별목표 :

1 단계 (1997 - 1999)	2 단계(2000 - 2001)
<ul style="list-style-type: none"> <li>• 원자로 운전타당성 분석</li> <li>• 원자로 각 계통과의 양립성 평가</li> <li>• 노심설계 기존 방법의 적용타당성 평가</li> <li>• 핵연료물질 조성 민감도 분석</li> <li>• <u>DUPIC 핵연료 경계성 분석</u></li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 원자로 안전성 및 인허가 가능성 분석</li> <li>• DUPIC 핵연료의 노심설계 기술</li> <li>• 최적조성 DUPIC 핵연료물질 공급기술 개발</li> <li>• DUPIC 핵연료 실용화를 위한 기술타당성 분석</li> </ul>

**경제성분석 추진 계획**



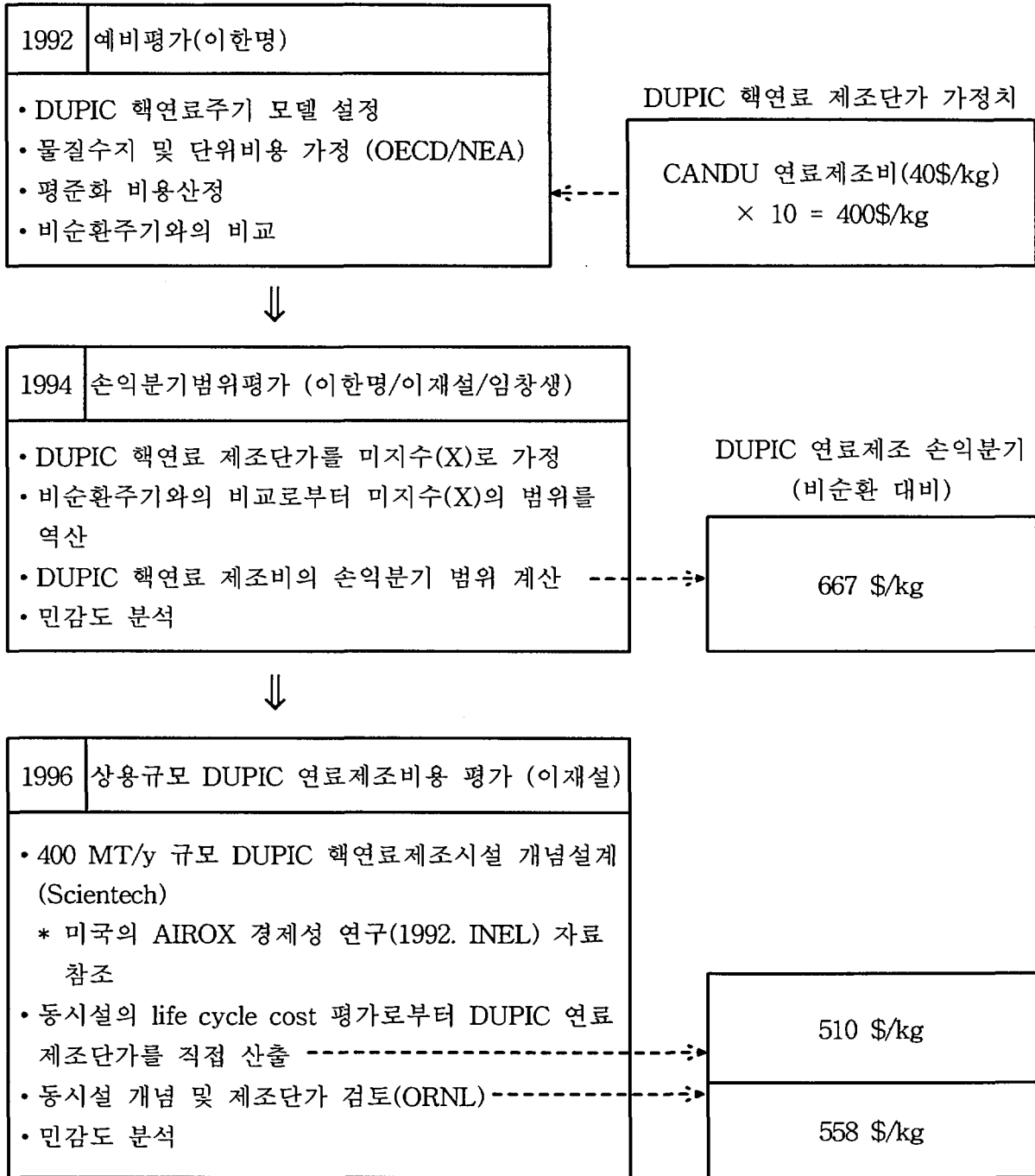
**경제성분석 전문가 그룹**



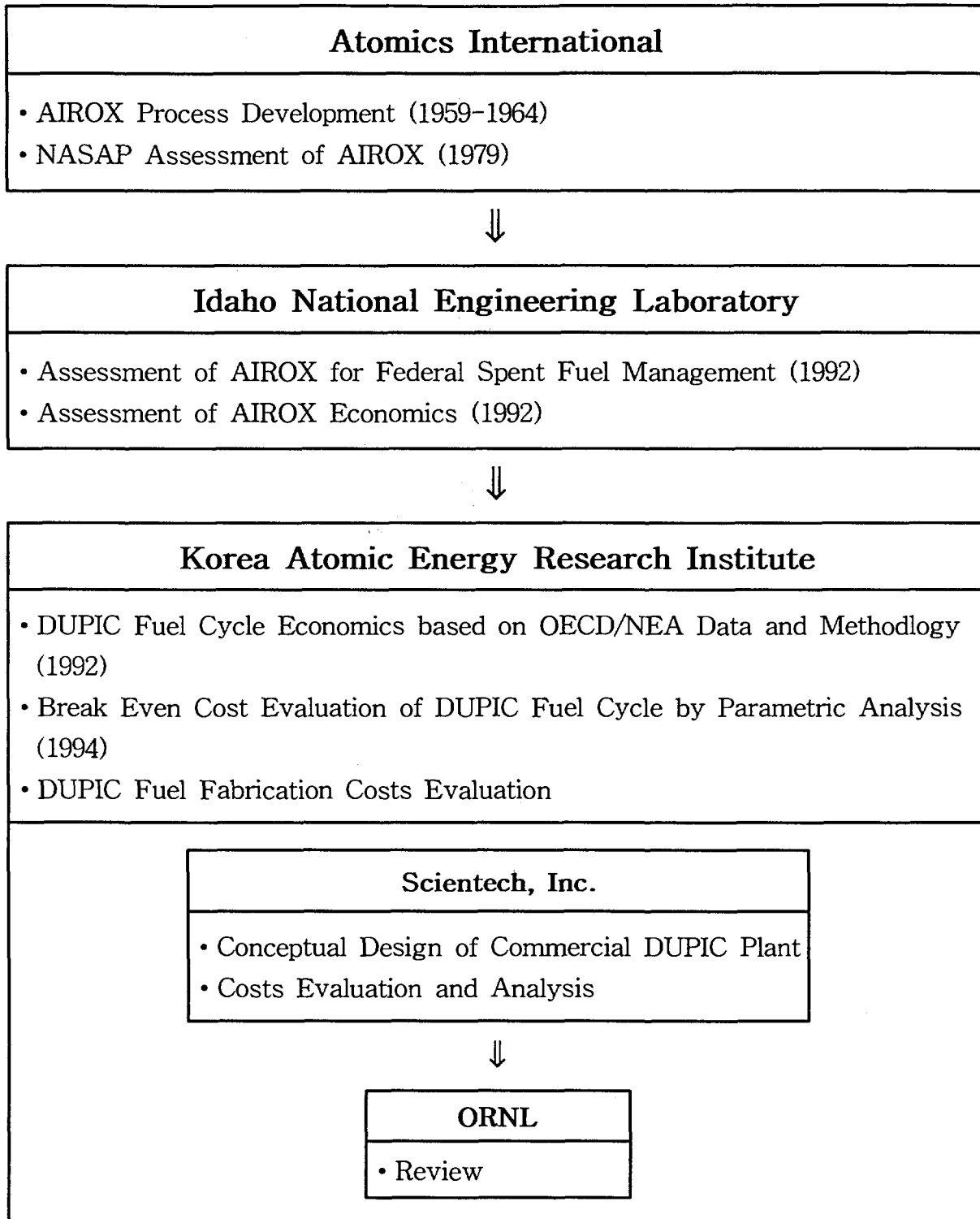


### 첨부 3. DUPIC 경제성연구 배경 및 현황보고

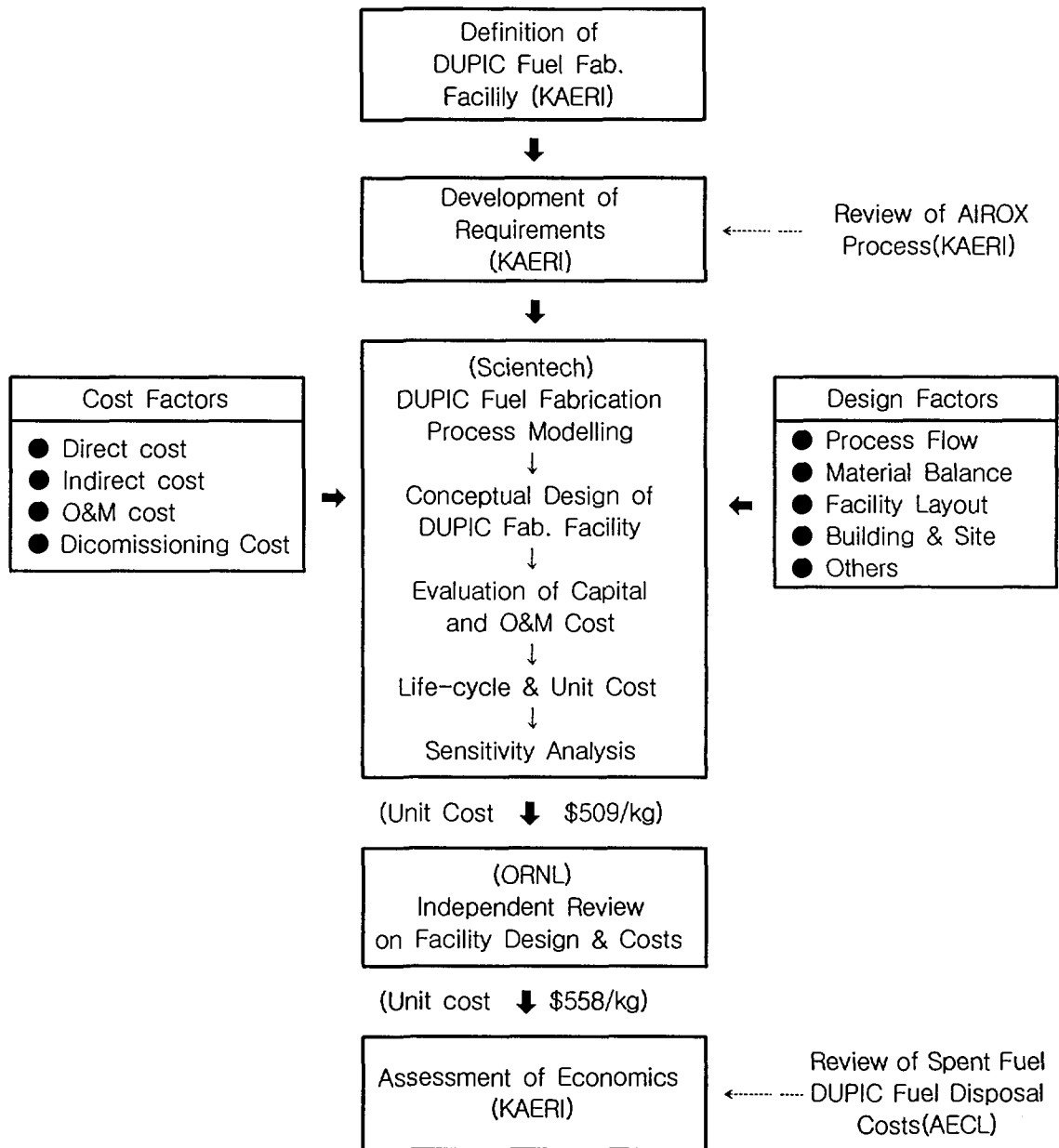
#### DUPIC 경제성 연구 배경/현황 (요약)



## Background



# Assessment of DUPIC Economics



## RFRL/FRAD Revisited

Presentation to KAERI

By

Jerry Scott

Technical Resources International

## FRAD/RFRL Background

- Fuel Refabrication and Development Program
  - Initiated in the late 1970s as a part of INFSE
  - Goal of FRAD is to develop a refabrication technology base for proliferation resistant nuclear fuel cycles
  - FRAD Program was managed for the Department of Energy by the Pacific Northwest Laboratories (PNL)

## FRAD and the RFRL

- As Part of the FRAD program a Remote Fuel Refabrication Laboratory Project was initiated.
  - The RFRL was a cold pilot plant that was to be used to test and integrate remote equipment and processes that would meet the FRAD mission
  - RFRL F/R included flexibility to mock up either pellet or packed fuel forms for U233/recycled Pu, spiked CoMOX, or denatured U233 fuel feed materials

## RFRL Participants

- Facility Pre Conceptual Design
  - Olympic Engineering Corp.
- Facility Conceptual Design
  - A/E: Fluor Engineers and Constructors
  - Technical Review: General Atomic
  - Cost Estimate Review: Los Alamos Technical Associates
- Process Equipment
  - Equipment and Process: Olympic Engineering Corp.
  - Equipment Estimate: Vitro Engineering
  - Cost Estimate Review: LATA

## RFRL History

- RFRL was to provide the facility and process support equipment (\$28M, 1979)
- FRAD program was provide process equipment out of separate funding (\$50 M, 1979)
- The project continued for 2 years and was canceled after the conceptual design and some technical review studies were completed in 1979 and 1980

## KERI SMATER and RFRL

- During a recent visit by Dr. Jae Sol Lee to Technical Resources International it was discovered that he was interested in the FRAD/RFRL
- Dr. Lee recognized the similarities between the SMATER and FRAD Missions

## Presentation Objective

- Because of the similarities between the RFRL/FRAD mission and the current KAERI/SMATER initiative, it is desirable to compare the approaches between the two projects

## Facility Approach USA versus European

- Typical USA approach historically uses a canyon process
- Typical European approach utilizes a facility design customized for a specific process

## USA Approach Advantages

- Optimizes facility flexibility for other process applications
- Reduces multiple facility requirements where a specific process has not been refined or a second process application is a potential
- Lower equipment costs due to minimized customization
- Lower design costs due to lower complexity

## USA approach Disadvantages

- Facility (brick and mortar) costs are generally higher (high facility volume to process equipment volume ratio)
- Maintenance in place is sometimes more difficult
- Higher maintenance costs due to more complex modular removal and central maintenance design approaches required
- Higher shielding volumes to meet generic limiting requirements



## Why RFRL?

- Basis for need
  - Equipment and facility both require special considerations for remote operations and maintenance
  - Remote operations and maintenance demands must be resolved and established prior to design of production plant
  - Development, testing and demonstration of remote process equipment and controls and their remote maintenance must be performed in a cold accessible and versatile facility

## RFRL Features

- RFRL to be a Cold Pilot Plant will provide capability to:
  - Develop, test, and demonstrate remote process equipment and controls in a cold environment
  - Develop and demonstrate remote maintenance equipment and techniques
  - Develop and demonstrate material and equipment transport in the remote mode
- Verify refabrication technology for remote fabrication of highly radioactive fuels

## RFRL Features (cont...)

- Versatile, flexible and cold facility capable of housing equipment and controls of integrated process line similar to a production plant
- RFRL provides integrated mockup process lines for:
  - Nuclear material receipt and storage
  - Remote fuel refabrication processes
  - Cold component assembly and equipment engineering
  - Contaminated equipment maintenance
  - Waste management

## RFRL Features (cont...)

- Provide integrated 10,200 m<sup>2</sup> building which provides mockup process lines for:
  - Nuclear material receipt and storage
  - Remote fuel refabrication processes
  - Cold component assembly and equipment engineering
  - Contaminated equipment maintenance
  - Waste management
  - Process support laboratories
  - Cold component and large equipment receipt and storage
  - Cold maintenance shops
  - HVAC and mechanical equipment
  - Office and other building support service areas

## RFRL Features (cont...)

- Several processes to be demonstrated
  - Two fabrication techniques
  - Several fuel cycles
  - Two fuel bundle types
  - Conventional and hybrid pellet fuel including packed particle
- Equipment supplied from the FRAD Program

## RFRL Features (cont...)

- Single story building designed with:
  - Capability for handling thorium and uranium oxides
  - Facility production capacity of 100kg/day/equipment item consistent with multiple line sizing
  - Simulated shield walls
  - Overhead bridge crane, MSMs, and bridge mounted manipulators
  - Three zone ventilation system
  - Focus on automated, remotely operated and remotely maintained equipment

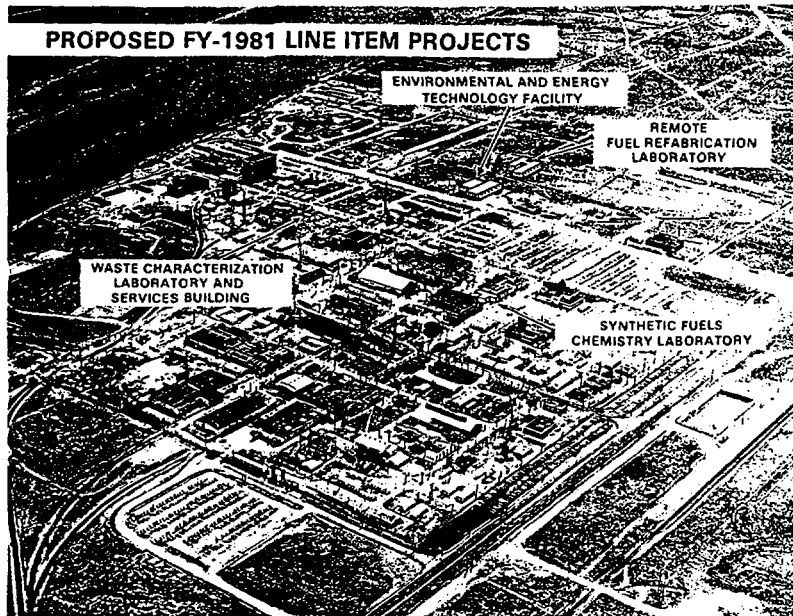
## RFRL Design Guidelines

- Layouts limited to one floor
- Security provisions (personnel control and guard facilities) not considered
- Tunnels or dedicated corridor/transport systems between cells to be considered
- Process cells to be 9m wide canyon cells flanked by 5m wide operational corridors

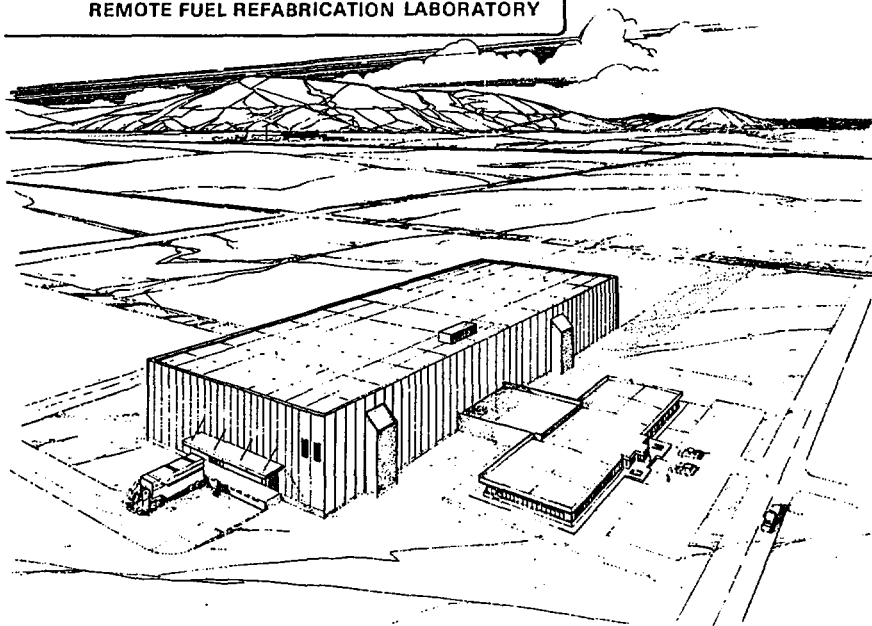
## RFRL COST (1979)

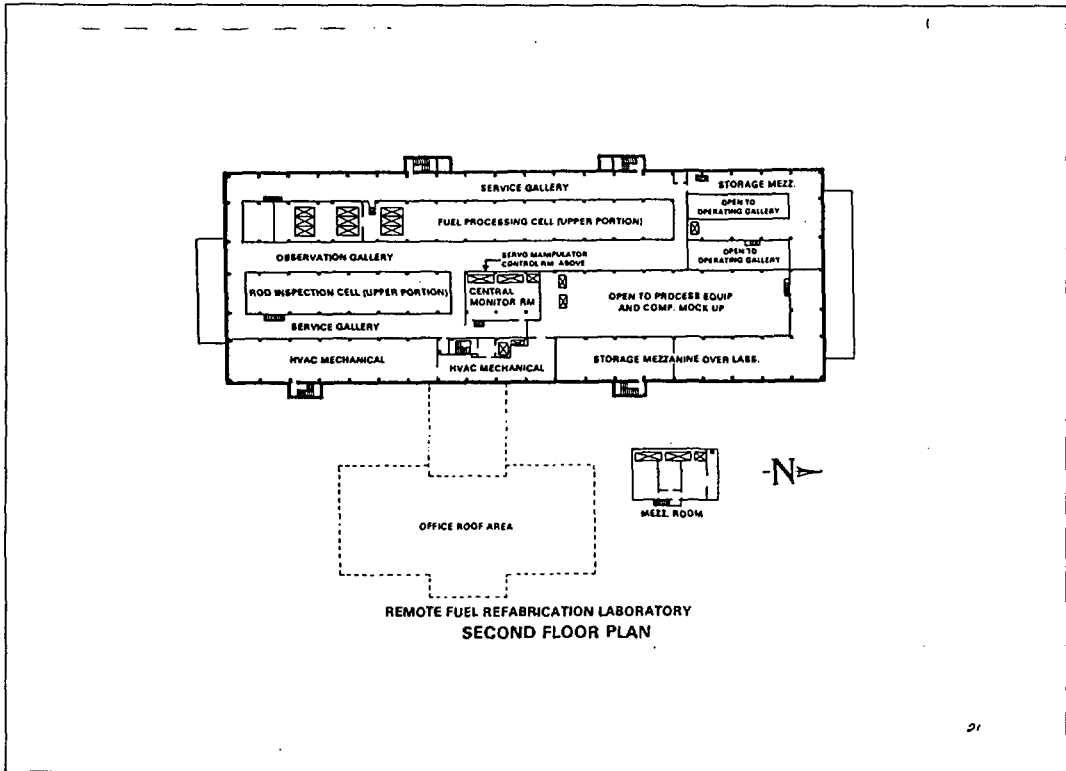
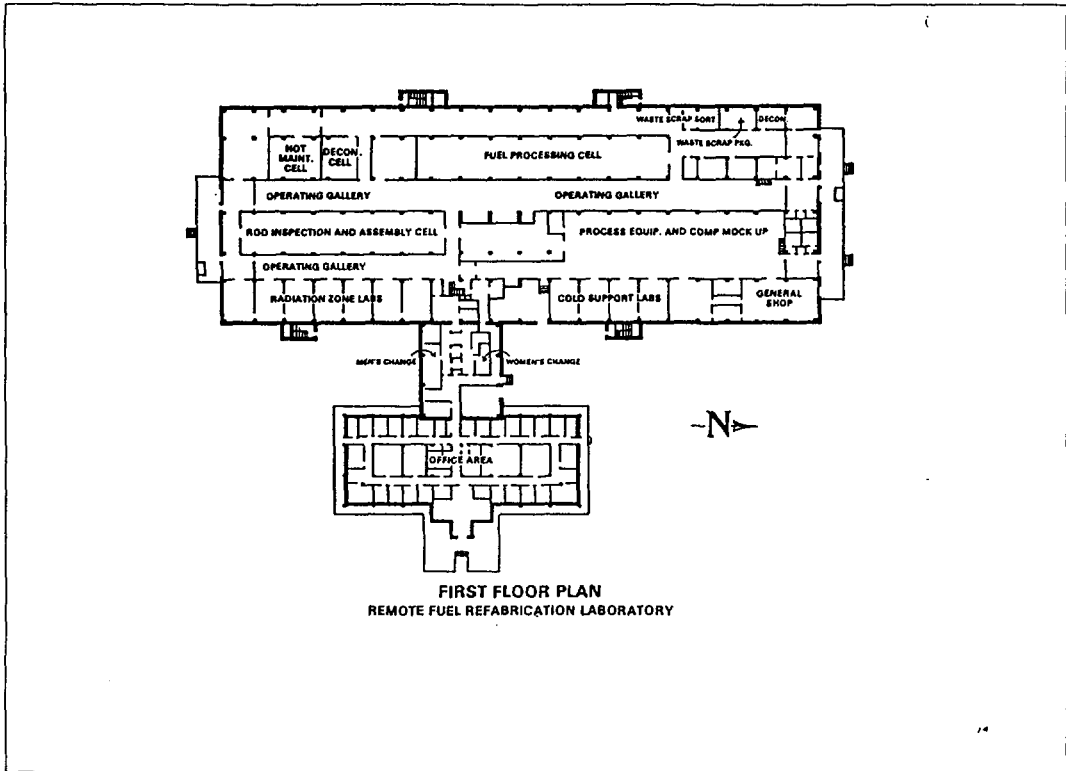
• Two Phase Line Item (Facility)	
– FY 1981 Title I and Title II Design	\$ 4M
– FY 1982 Construction and Title III	<u>\$24M</u>
 Total Project Cost	 \$28M

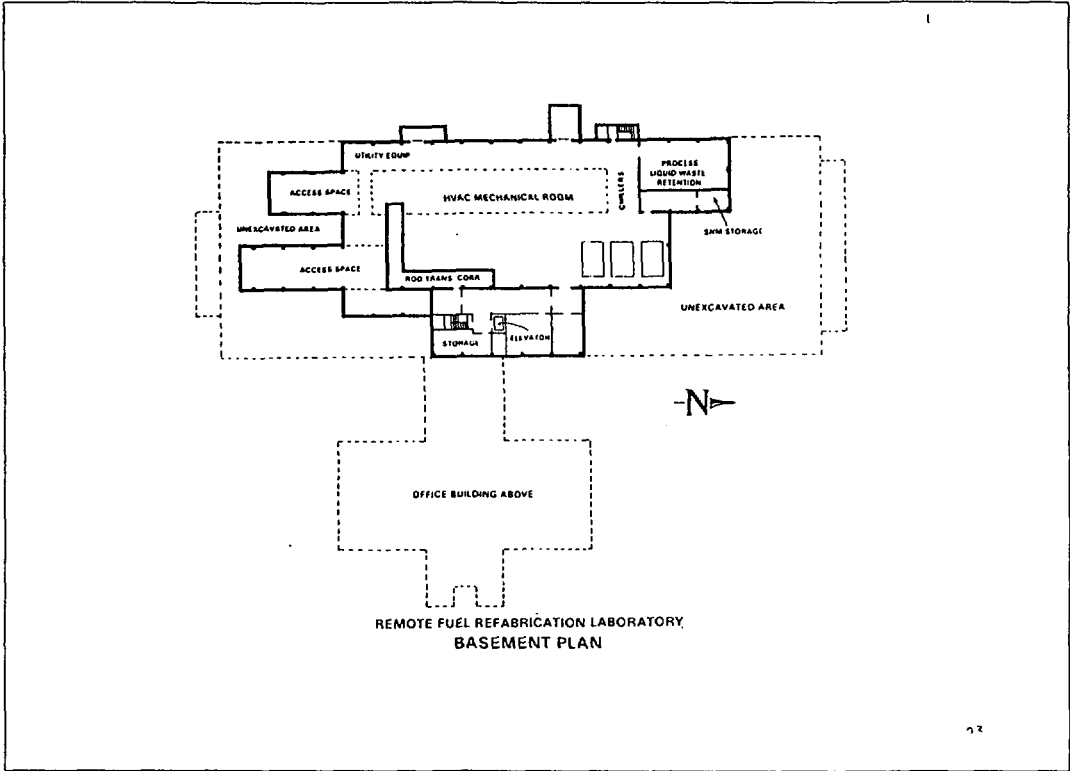
**PROPOSED FY-1981 LINE ITEM PROJECTS**



**REMOTE FUEL REFABRICATION LABORATORY**







## 첨부 5. 확률론적 경제성 평가 방법

### 확률론적 경제성 평가 방법의 응용

1998. 7.

고원일

#### *Introduction - Objectives*

- **Methodology Suggestion of Fuel Cycle Cost Analysis**

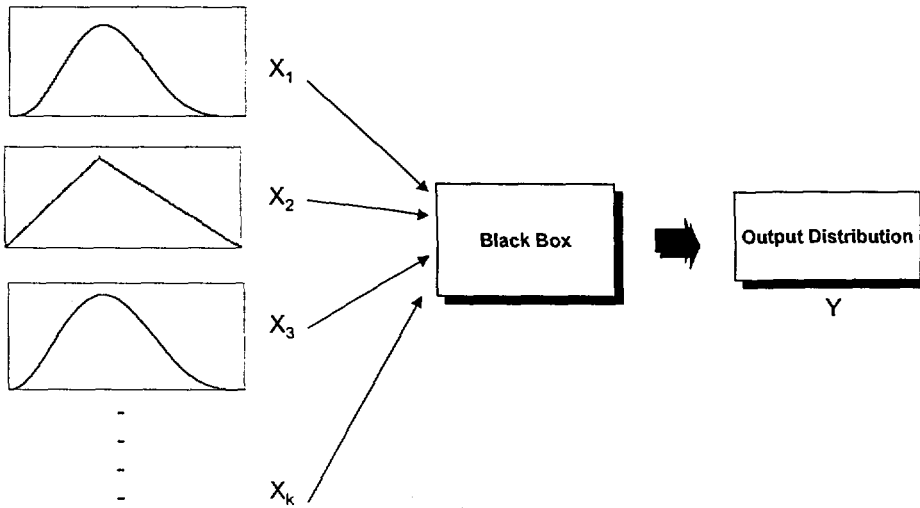
- Using Monte Carlo Simulation

- **Case Study**

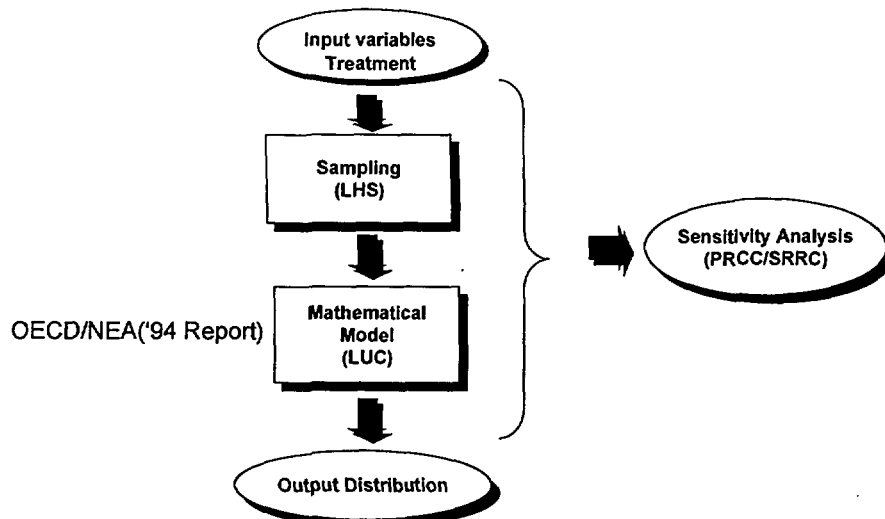
- ✦ Once-through and recycle option(PWR)



## Introduction - Simulation Technique?



## Introduction - Scope and Procedure

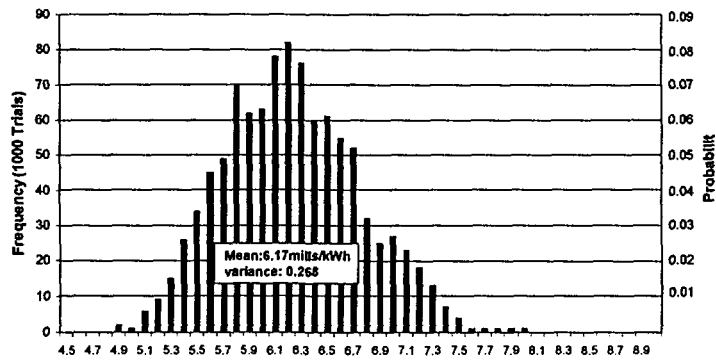


## Results - Input Treatment

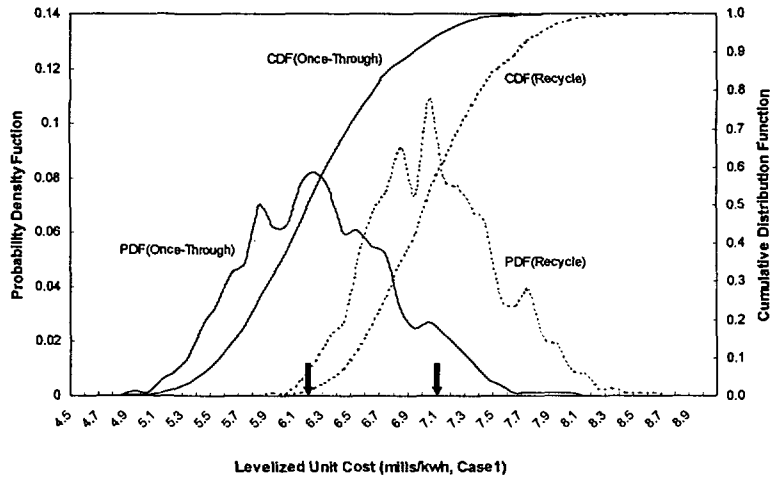
Component	Case 1		Case 2		Case 3	
	Assumed PDF	Parameters*	Assumed PDF	Parameters*	Assumed PDF	Parameters*
U3O8	Triangular	40, 50, 90	Beta	40, 90, 2.67, 4.65	Lognorm.	51.295, 0.0256
Conversion	Triangular	6, 7, 11	Beta	6, 11, 3.37, 4.35	Lognorm.	8.086, 0.103
Enrichment (\$/SWU)	Triangular	80, 110, 130	Beta	80, 130, 4.40, 3.60	Beta	80, 130, 4.40, 3.60
PWR Fuel Fabrication	Triangular	200, 275, 350	Beta	200, 350, 4.00, 4.00	Normal	275, 25
MOX Fuel Fabrication	Triangular	825, 1100, 1375	Beta	825, 1375, 4.40, 4.00	Normal	1100, 33
Transportation	Triangular	20, 50, 80	Beta	20, 80, 4.00, 4.00	Normal	50, 10
Storage (PWR Fuel)	Triangular	60, 230, 290	Beta	60, 290, 9.38, 3.32	Beta	60, 290, 9.38, 3.32
Reprocessing	Triangular	540, 720, 720	Triangular	540, 720, 720	Triangular	540, 720, 720
PWR Fuel Disposal	Triangular	140, 610, 670	Beta	140, 670, 7.20, 4.20	Beta	140, 670, 7.20, 4.20
HLW Disposal	Triangular	90, 90, 580	Triangular	90, 90, 580	Triangular	90, 90, 580
Discount Rate	Triangular	0, 5, 15%	Beta	0, 15, 9, 4	Lognorm.	5.801, 0.3854

\*Triangular PDF: min., mode, max., Beta PDF: a, b, alpha, beta, Normal PDF: mean, standard deviation, Lognormal PDF: mean, variance

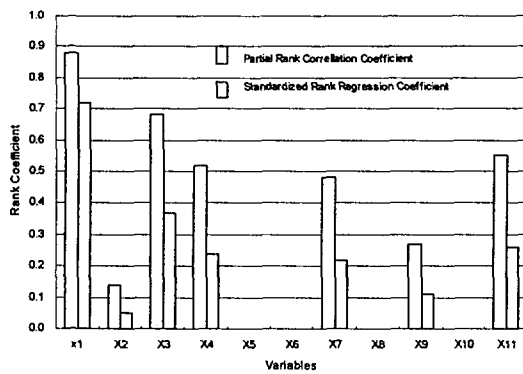
## Results - Histogram for Case 1



## Results - PDF and CDF for Case 1



## Results - Sensitivity for Case 1



The Results of Sensitivity Analysis of Once-through Option(Case 1)

## 첨부 6. DUPIC의 경제성 평가


.....

DUPIC의 경제성평가

제1차 국내전문가회의

1998. 7. 16

KAERI 경제분석실



.....

.....

DUPIC의 경제성 평가

- DUPIC의 제조원가 및 핵연료주기비
- NUFCAP을 활용한 분석
  - 전력수요 예측
  - 노형전략 설정
  - 분석 결과
- 향후 연구계획

.....

• KAERI 경제분석실

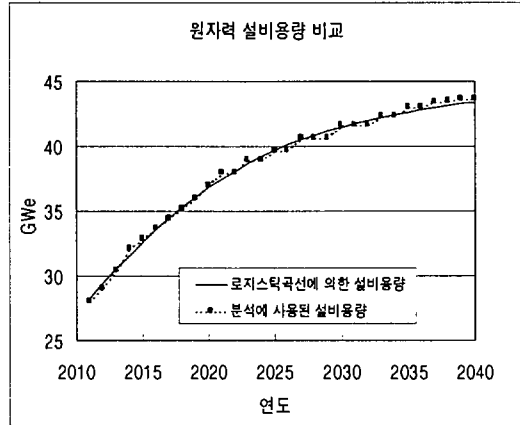
2



• 전력 수요 예측

- 일인당 발전량과 원자력발전 점유율의 logistic growth를 가정
- 최종수령 일인당 발전량: 12,000 kWh/인·년
- 최종수령 원자력발전 점유율: 50%
- 2010년 까지는 '95 장기전력 수급계획 인용

• 원자력 설비용량



• 노형전략

- 경수로와 중수로의 연계
- DUPIC핵연료주기 채택

	2010	2020	2030	2040
경수로	23 기	28 기	31 기	33 기
중수로	4 기	11 기	12 기	14 기

- 2010년까지는 '95 장기 전력수급계획 인용
- 이후에는 매년 1기씩 경수로를 투입하고 모자라는 설비용량은 중수로로 공급

• DUPIC 설비

- DUPIC제조설비는 2010년에 50t/yr 규모의 pilot plant 투입
- 2040년에 400t/yr 규모의 commercial plant 투입
- DUPIC제조설비의 이용률은 70%를 가정

## 대안별 평준화 핵연료주기비용

단위: \$/MWh

Component	Once Through		DUPIC		DUPIC*1.5	
	Cost	Share	Cost	Share	Cost	Share
Uranium	3.287	43.5%	2.940	39.1%	2.940	38.4%
Conversion	0.212	2.8%	0.190	2.5%	0.190	2.5%
Enrichment	1.972	26.1%	1.920	25.5%	1.920	25.0%
Fuel Fabrication	1.339	17.7%	1.304	17.3%	1.304	17.0%
Subtotal for Front-End	6.810	90.2%	6.354	84.5%	6.354	82.9%
Transport	0.106	1.4%	0.142	1.9%	0.142	1.9%
Reprocessing	-	0.0%	-	0.0%	-	0.0%
MOX Fabrication	-	0.0%	-	0.0%	-	0.0%
DUPIC Processing	-	0.0%	0.288	3.8%	0.431	5.6%
Storage	0.368	4.9%	0.500	6.6%	0.500	6.5%
Final Disposal	0.264	3.5%	0.236	3.1%	0.236	3.1%
Subtotal for Back-End	0.738	9.8%	1.165	15.5%	1.309	17.1%
Total	7.549		7.520		7.664	

• • • • • • • • • • KAERI 경제분석실

7

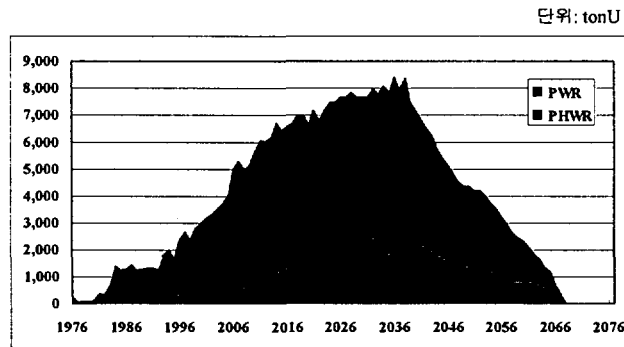
• 분석 결과

- 연간 우라늄 필요량(그림 참조)
- 연간 핵연료 성형가공 필요량 (그림 참조)
- 사용후핵연료 누적 발생량(그림 참조)
- 연간 DUPIC핵연료 제조량 (그림 참조)

• • • • • • • • • • KAERI 경제분석실

8

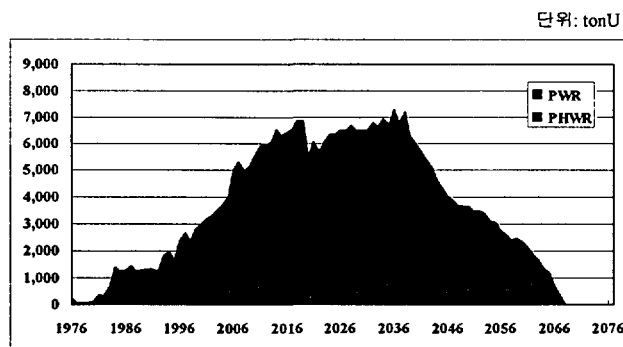
## 연간 우라늄 필요량(직접처분)



• KAERI 경제분석실

9

## 연간 우라늄 필요량(DUPIC)



- PWR에 사용되는 우라늄 양은 변화가 없음
- PHWR에 사용되는 우라늄 양은 DUPIC연료로 대체됨에 따라 감소
- 2040년에 연간 우라늄 필요량 : 16% 감소

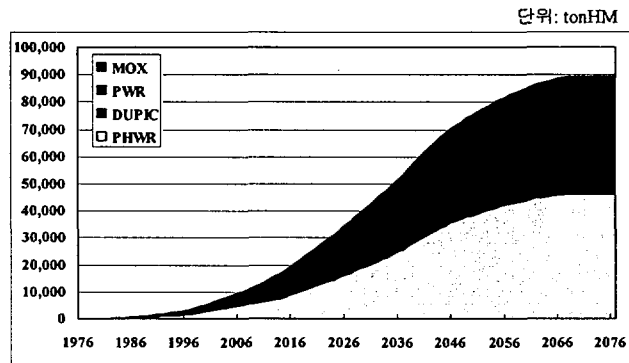
• KAERI 경제분석실

10





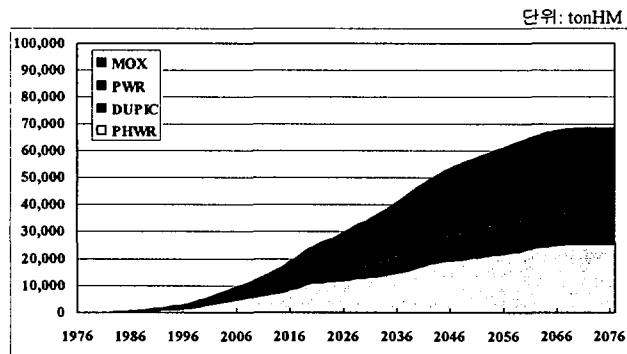
## 사용후핵연료 누적발생량(직접처분)



• KAERI 경제분석실

13

## 사용후핵연료 누적 발생량(DUPIC)



- 2040년의 누적 사용후핵연료 발생량 : 22% 감소
  - PWR 사용후핵연료 : 23% 감소
  - PHWR 사용후핵연료 : 20% 감소

• KAERI 경제분석실

14



## 첨부 7. 향후 업무

### 향후연구 추진계획

1. 연구범위
2. 추진방법
3. 추진일정/예산

#### 1. 연구범위

- (1) DUPIC 핵연료제조시설 비용
  - 과거연구결과 재평가
  - 시설기술체계 세분화정리
  - 투자비 및 운영비 Cost data 보완
- (2) CANDU 원전의 Incremental Costs
  - 연료취급계통을 포함한 비용 상승 가능요소 분석
  - 추가비용 산출
- (2) 기타 DUPIC 핵연료주기요소 평가
  - DUPIC 핵연료수송 및 저장
  - 사용 후 DUPIC 핵연료 처분

#### 2. 추진방법

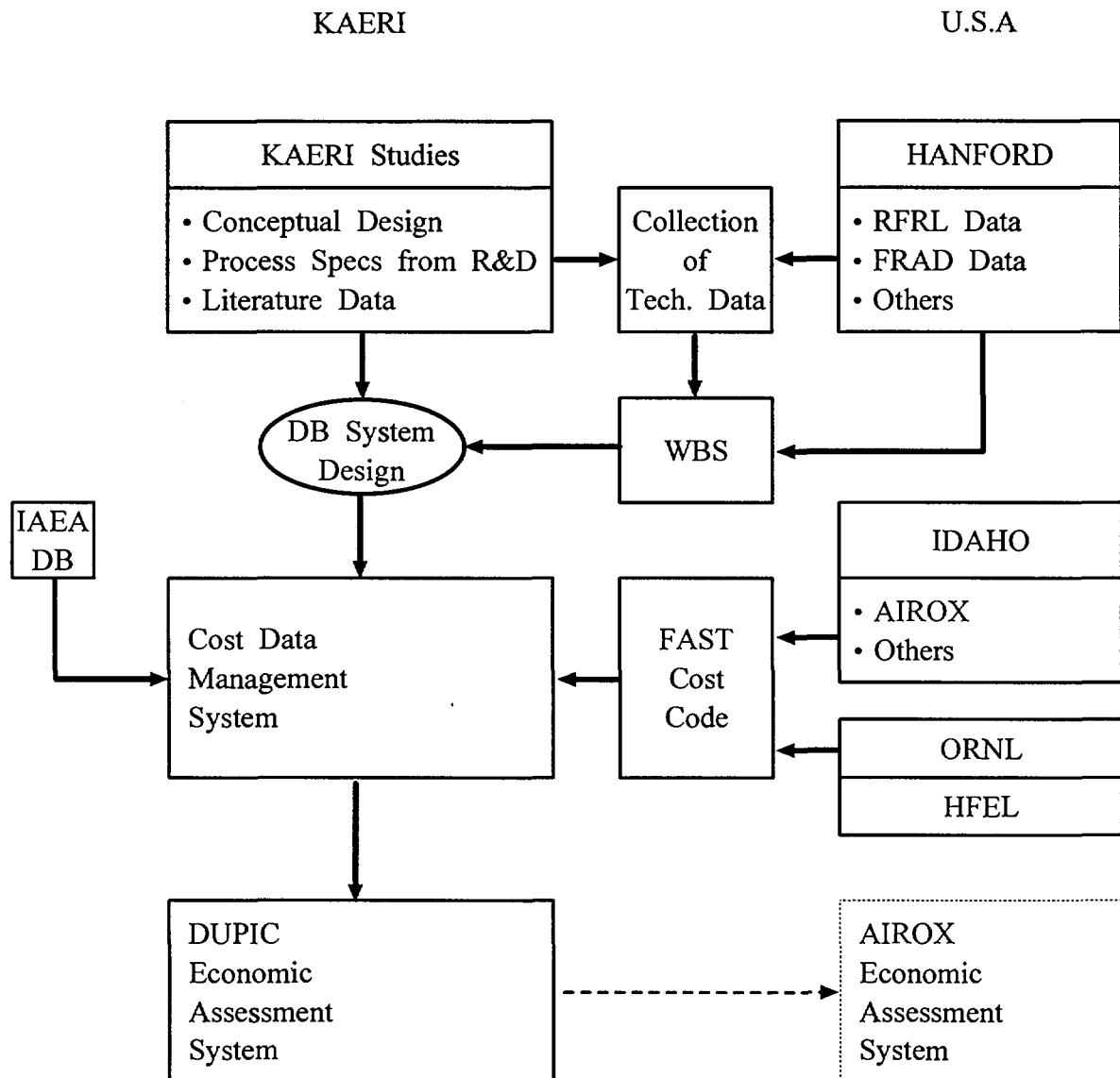
- (1) 국내 전문가 Group 구성
  - 국내 유관기관의 전문가 그룹구성
  - 계획에 대한 의견 수렴
  - 전문분야별 정보제공
- (2) 국외 전문가 Group 구성
  - 원칙적으로 DUPIC 공동연구 협력국(캐나다, 미국, IAEA)의 전문가로 구성된 연구 그룹 구성
  - 필요에 따라 전문가를 초청하여 특정 주제에 대한 자문 및 정보제공
  - 적절한 시점에 전문가 그룹 회의 개최

- (3) DUPIC System Database 개발
  - Technical System 에 대한 DB화
  - Cost Data 를 Tech, System 과 link
  - 투명성 증진을 위해 국제기구 (IAEA 등)에 위탁연구 가능성 고려

### 3. Schedule and Budget

YEAR	1997				1998												1999												
MONTH	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
FYSCAL YEAR	FY '97				FY '98												FY '99												
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparatory Work</li> <li>- Negotiation</li> <li>- Agreement</li> <li>- Kick-Off Meeting</li>   <li>• Technical Assessment (Detail Schedule to be developed)</li>   <li>• Cost Estimation/ Economic Assessment (Detail Schedule to be developed)</li>   <li>• Conclusion and Report</li> </ul>	_____				_____												_____												
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparatory Work</li> <li>- Negotiation</li> <li>- Agreement</li> <li>- Kick-Off Meeting</li>   <li>• Technical Assessment (Detail Schedule to be developed)</li>   <li>• Cost Estimation/ Economic Assessment (Detail Schedule to be developed)</li>   <li>• Conclusion and Report</li> </ul>	_____				_____												_____												
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Preparatory Work</li> <li>- Negotiation</li> <li>- Agreement</li> <li>- Kick-Off Meeting</li>   <li>• Technical Assessment (Detail Schedule to be developed)</li>   <li>• Cost Estimation/ Economic Assessment (Detail Schedule to be developed)</li>   <li>• Conclusion and Report</li> </ul>	_____				_____												_____												
Budget (Million Won)	16				100,000												100,000												

## Approach to Development of DUPIC Facility Database



**NUCLEAR FUEL CYCLE SIMULATION SYSTEM  
(VISTA) A PC Computer Code being Developed  
by the Agency**

**INPUT:**

- Nuclear Capacity, Burnup, Enrichment and the Trends

**OUTPUT:**

- Spent Fuel Discharge
- Fissile and Total Pu Generation
- Actinides Generation
- U Resource Requirement
- SWU Requirement
- Others

**on country, reactor type and yearly basis**

June 24, 1998

Cooperation between KAERI and INEEL for DUPIC/AIROX

**1. Background**

- (1) KAERI has been conducting lab.-scale DUPIC program while INEEL intends to be involved in a similar U.S. initiative (AIROX)
- (2) KAERI has a well defined agenda for the DUPIC program at near-term which can be a useful reference to the development for AIROX program in the U.S. if the AIROX proposal to DOE gets through.
- (3) A most feasible topic for immediate collaboration between the DUPIC and AIROX looks to be a development of database which could be useful for both DUPIC and AIROX programs.

**2. Proposal for Immediate Actions**

- (1) Both sides shall collaborate to create a database system that would be useful for both DUPIC and AIROX.
- (2) KAERI shall dedicate at KAERI cost an experienced staff to the DB work for several months of attachment to INEEL.
- (3) INEEL shall help the KAERI staff to work at INEEL site with the FAST code which is supposed to be useful reference for the DB development.

**3. Further Development of Cooperative Work**

- (1) Further cooperation could be developed on the basis of the joint exercise for the database development.
- (2) KAERI shall seek further cooperative possibilities in later this year, while INEEL shall look at the outcome of the AIROX R&D proposal to DOE in October

Thomas Ryon  
INEEL

Jas Sol LEE  
KAERI



# 미국의 AIROX/DUPIC 연구 개발 사업

- International R&D Program for Dry Recycle  
of Commercial Spent Nuclear Fuel -

## 1. 서론

미 의회에 계류 중인 DOE의 FY'99 Nuclear Research Initiative에 미국내 Dry Recycle Group을 결성하여 500만불 규모의 연구 개발 계획으로 신청하고자 함

## 2. 목적 및 필요성

- 에너지 분야 시장 개방 조치에 대비한 경쟁력 있는 원전 사업을 위해서는 사용후핵연료의 효율적인 관리 대책이 있어야 한다.
- 미국은 사용후핵연료의 직접 처분 사업을 추진하고 있으나 이보다는 AIROX나 DUPIC과 같은 건식 재순환을 통해 핵확산 저항성을 증진하면서 사용후핵연료를 재활용하는 것이 더 바람직하다.
- 따라서 미국내 관련 기관을 consortial로 AIROX 연구 개발 사업을 추진할 필요가 있다.

## 3. 추진전략

### (1) 제 1단계 (약 5년)

- 60년대 Atomics International에서 수행된 실험실 규모 AIROX 연구 결과를 확인하고 국제협력(캐나다, 한국등)을 통해 연구 개발 기반 구축(미국, 캐나다, 한국 등의 가용 시험시설을 파악하여 제 2단계 전략 수립

### (2) 제 2단계

1단계 연구 결과를 바탕으로 실험실 규모를 pilot 규모(2~4 또는 4~8 LWR 집합체)로 확대하여 Lead Test Assemblies (LTA)를 상용로에 시험 장전

### (3) 제 3단계

- 제 2단계의 pilot 규모를 더욱 확대하여 (50MT.yr 규모) 상용화를 추진하고 아울러 인허가 및 사업을 위한 민자 유치
- 사업의 국제화를 위한 자본 분담 및 시설 부지 등의 문제 협의

### (4) 제 4단계

AIROX의 경쟁력에 따른 사업의 민영화

서 지 정 보 양 식

수행기관보고서번호	위탁기관보고서번호	표준보고서번호	INIS 주제코드		
KAERI/AR-535/99					
제목/부제	DUPIC Fuel Cycle Economics Assessment (I)				
연구책임자 및 부서명 (TR, AR인 경우 주저자)	최항복 (핵연료 설계기술 개발팀)				
연구자 및 부서명	노규홍 (핵연료 설계기술 개발팀) 김도현 (한양대학교)				
출판지	대전	발행기관	한국원자력연구소	발행년	1999. 4.
페이지	55 p.	도표	있음( 0 ), 없음( )	크기	26 Cm.
참고사항					
비밀여부	공개( 0 ), 대외비( ), _ 급비밀, 소내만 공개( )		보고서종류	기술현황분석보고서	
연구위탁기관			계약번호		
초록 (15-20줄내외)	<p>본 보고서는 DUPIC 핵연료 기술개발 과제 중 DUPIC 핵연료 양립성평가 과제에서 수행 중인 DUPIC 핵연료주기 경제성 분석의 연구 현황을 기술하는 기술 현황분석 보고서 이다.</p> <p>DUPIC 핵연료 양립성평가 과제에서는 DUPIC 핵연료 주기 경제성 분석을 위하여 1998년 7월 15일 1차 국내전문가 기술회의를 정부 부처, 학계, 산업체 등에서 활동 중인 국내 전문가 8인 및 미국 TRI 회사의 차폐시설 설계 전문가 1인을 초청하여 개최하여 각계의 전문가들의 의견을 반영하여 경제성 분석을 추진하고자 하였다. 본 보고서는 DUPIC 핵연료 주기 경제성 분석 회의에서 발표된 내용, 현재 경제성 분석에 활용되고 있는 기존의 연구 결과물 및 전문가들의 의견을 수록하고 있어, 향후 DUPIC 핵연료 주기 경제성 분석 및 후행핵연료 주기 경제성 분석에 기초 자료를 제공하고자 한다.</p>				
주제명키워드 (10단어내외)	DUPIC 핵연료, 경제성, 제조비, 핵연료주기비				

**BIBLIOGRAPHIC INFORMATION SHEET**

<b>Performing Org. Report No.</b>		<b>Sponsoring Org. Report No.</b>		<b>Standard Report No.</b>		<b>INIS Subject Code</b>	
KAERI/AR-535/99							
<b>Title/Subtitle</b>		DUPIC Fuel Cycle Economics Assessment (I)					
<b>Project Manager and Department (or Main Author)</b>		Choi, Hangbok (DUPIC Fuel Compatibility Assessment)					
<b>Researcher and Department</b>		Roh, Gyuhong (DUPIC Fuel Compatibility Assessment) Kim, Do Heon (Hanyang University)					
<b>Publication Place</b>	Taejon	<b>Publisher</b>	KAERI		<b>Publication Date</b>	1999. 4.	
<b>Page</b>	55 p.	<b>Ill. &amp; Tab.</b>	Yes( V ), No ( )		<b>Size</b>	26 Cm.	
<b>Note</b>							
<b>Classified</b>	Open( V ), Restricted( ), ___ Class Document		<b>Report Type</b>		<b>Status-of-the-Art Report</b>		
<b>Sponsoring Org.</b>				<b>Contract No.</b>			
<b>Abstract (15-20 Lines)</b>		<p>This is a state-of-the-art report that describes the current status of the DUPIC fuel cycle economics analysis conducted by the DUPIC fuel compatibility assessment group of the DUPIC fuel development project. For the DUPIC fuel cycle economics analysis, the DUPIC fuel compatibility assessment group has organized the 1st technical meeting composed of 8 domestic specialists from government, academy, industry, etc. and a foreign specialist of hotcell design from TRI on July 16, 1998. This report contains the presentation material of the 1st technical meeting, published date used for the economics analysis and opinions of participants, which could be utilized for further DUPIC fuel cycle and backend fuel cycle economics analyses.</p>					
<b>Subject Keywords (About 10 words)</b>		DUPIC, economics, manufacturing cost, fuel cycle cost					