



파이로프로세싱과 고속로개발의 허구성

장정욱
마쓰야마대 경제학부 교수

파이로프로세싱과 고속로개발의 허구성

일시 : 2021년 7월 19일(월)

일본 마쓰야마(松山)대학
경제학부 교수 장 정욱

분리·변환(P&T, Partitioning and Transmutation)

경수로(또는 고속로)의 사용후핵연료를

(1) 분리 → “**건식재처리**”의 “**파이로프로세싱법**”

(2) 변환 → “**소듐냉각고속로(SFR)**”의 핵연료로

ADS(가속기구동 미임계로) 등으로도

분리 · 변환의 결과(추진파의 주장)

- (1) 재활용으로 에너지 자원효율의 증가 및
경제성 제고
- (2) SF의 부피 감소로, 직접처분에 비해 환경성
 - 1) 최종처분장의 면적 축소 → "100분의 1"로
 - 2) 관리(및 독성)기간의 단축 → "1000분의 1"
(우라늄광석비)
- (3) 핵비확산성, 등을 주장

논점: 실현가능성 및 타당성?

1. Pyroprocessing법의 건식재처리의

2. 고속로 → SFR·ABR 등 ⇔ ADS

❖ Sodium cooled Fast Reactor(소듐냉각고속로)

❖ Advanced Burner Reactor(선진연소로)

❖ Accelerator Driven System(가속기구동미임계로)

(ADSR, Accelerator Driven Subcritical Reactor)

3. 핵분리·변환(P&T) → 2와 3의 결합으로

❖ Partitioning and Transmutation ≠

소멸
(언어조작)

【해외위탁 재처리】→ ❖ 혼합산화물(MOX, Mixed Oxide)연료

: Thermal Recycle(경수로에서 플루토늄이용) 5

직접처분과 재처리

1. 직접처분(Direct disposal---Once through)

❖ 사용후핵연료 → 수조냉각 → (중간저장) → 최종처분장

2. 재처리(Reprocessing) → 핵무기 원료인 Pu생산을 위해 개발

(1) 습식 → 수용액(水溶液) --- PUREX법(영, 불, 일, 러, 중), UREX+ 등

(2) 건식 → 용융염과 액체금속

❖ 파이로프로세싱법은 건식재처리의 한 가지일뿐이다.

→ Pyro-processing 법(금속), RIAR 법(러시아, 산화물), 질화물, 불화물

❖ 파이로프로세싱법에 의한 재활용 주장도 “고속로의 상용화”가 안되면 “무용지물”이다.

3. 관망정책(Wait and See)의 변화없이, 재처리 및 고속로 개발만을 강조!

재처리를 하더라도 최종처분장은 불가결하다

I. 파이로프로세싱

1. 원리

高温전기화학법으로, 금속연료를 용융염에서 양극용해·이온화하여, 음극에서 환원·석출(析出)할 때, 각 원소의 산화(酸化)환원전위(電位)의 차이로 U, Pu, FP 등을 분리하는 방법이다.

ANL의 IFR계획(1984 ~ 94년)

2. 기본공정

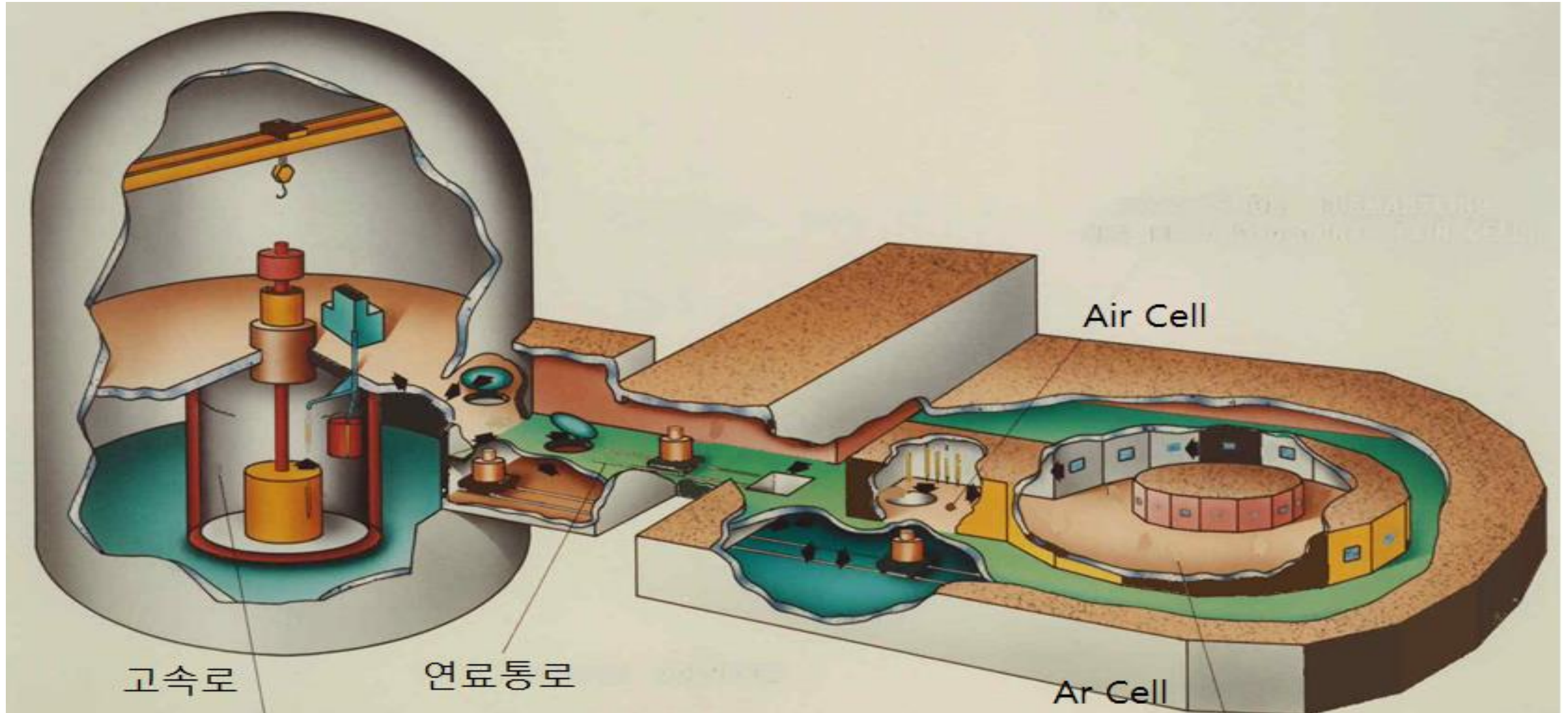
(1) 전(前)처리 → (2) 전해환원 → (3) 전해정련·제련 → (4) 증류와 폐기염처리(리사이클) → (5) 연료제조 → (6) 폐기물처리·처분

❖ 전해환원 → 산화물을 금속으로 변화시키는 추가공정

금속연료의 제조

IFR(Integral Fast Reactor)

통합형(일체형)고속로-1984년부터 IFR Program



A. 금속(합금)연료 → 1940년대 후반부터 개발

<열전도성과 증식(Breeding)성이 좋다>

- ❖ Swelling(팽배)현상으로 연료파손, 낮은 용점(고온화 곤란)
→ 산화물연료의 보급
- ❖ Smear density의 축소(75 ~ 80%)와 Zr첨가로 극복
→ 파손방지, 용융온도 상승(노심의 고온화)

B. 건식재처리의 개발 → ANL의 FCF(1964 ~ 69)

- ❖ IFR계획(1984 ~ 94년)의 금속연료 건식재처리방법을 「파이로프로세싱」로 지칭

특 징: 습식(PUREX법)에 비해

1. बै치(Batch)운전 → 고온공정

- ❖ 배관삭제로 시설의 간소화(소형화)
- ❖ 고연소도연료 및 짧은 냉각기간의 연료를 취급
- ❖ 취급량이 많다(臨界제한의 완화)

2. 문제

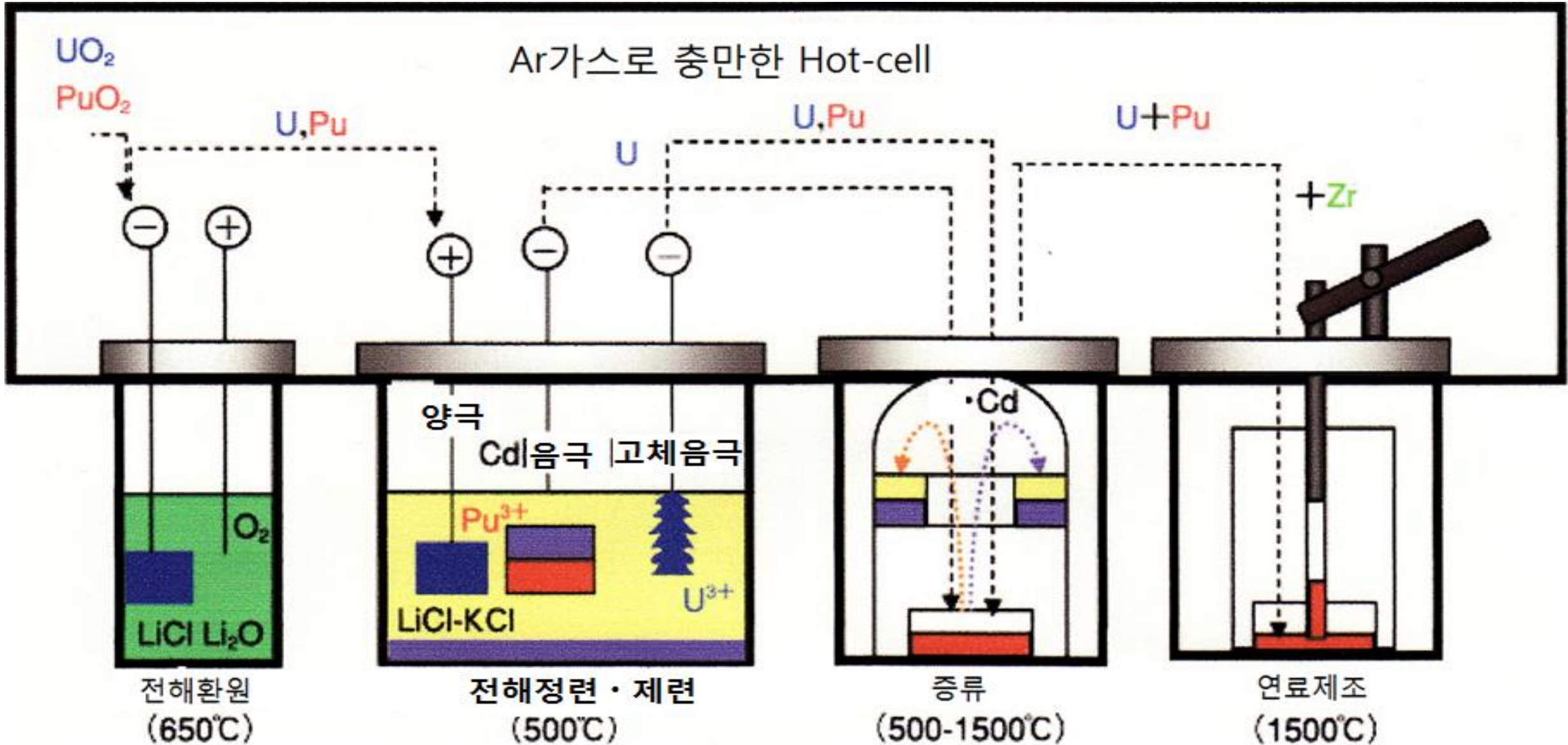
- ❖ 500 ~ 1300°C의 고온작업 → 기기·부품의 빠른 열화
→ 경제성(유지·보수비?)
- ❖ 높은 방사능(핵비확산성?) ↔ 피폭 리스크(원격작업)
- ❖ 염화물, 금속 등의 2차폐기물의 대량발생과 처분
- ❖ 계량방법 개발 등

건식과 습식의 재처리

습 식	사 항	건 식
가능!	1.Minor Actinide의 분리	가 능
길 다	2.냉각기간(SF)	짧 다
적 다	3.취급량 (주로, Pu)	많 다
많 다	4.설비(장치)의 수	적 다
많 다	5.2차 방사성폐기물의 양	적 다
낮 다	6.핵비확산성	높 다 ?
가 능?	7.최종처분장의 규모 및 관리기간의 축소	가 능 ?
?	8.테러위험(부지내에 재처리공장의 건설)	낮 다 ?

Closed fuel cycle

파이로·프로세싱법의 기본 공정도



1. 前처리(Head-end Process)

(1) 연료 집합체 해체(Disassembling)

(2) 연료봉의 절단(chopping) → 적당한 길이(3 ~ 5cm)

❖ 희가스의 방출(약 90%)

(3) 산화(脫피복관-decladding)

❖ 500 ~ 700°C, 1 ~ 2h, $3\text{UO}_2 + \text{O}_2 \rightarrow \text{U}_3\text{O}_8$

❖ 부피 증가(1.4배)로 피복관 파열 → 분말화

❖ 희가스 및 휘발성 FP가스(Cs, Tc, Mo, I, Kr, Xe 등)의 방출

❖ 고연소도 연료는 기계적 피복후, 산화 탈피복을

(4) 고온산화(Voloxidation)

❖ FP산화를 위해 온도를 1000 °C이상으로 더 올린다.

→ FP가스 제거율의 향상

→ 전해환원효율의 향상

(5) 전해환원 원료물질(펠릿) 제조(?)

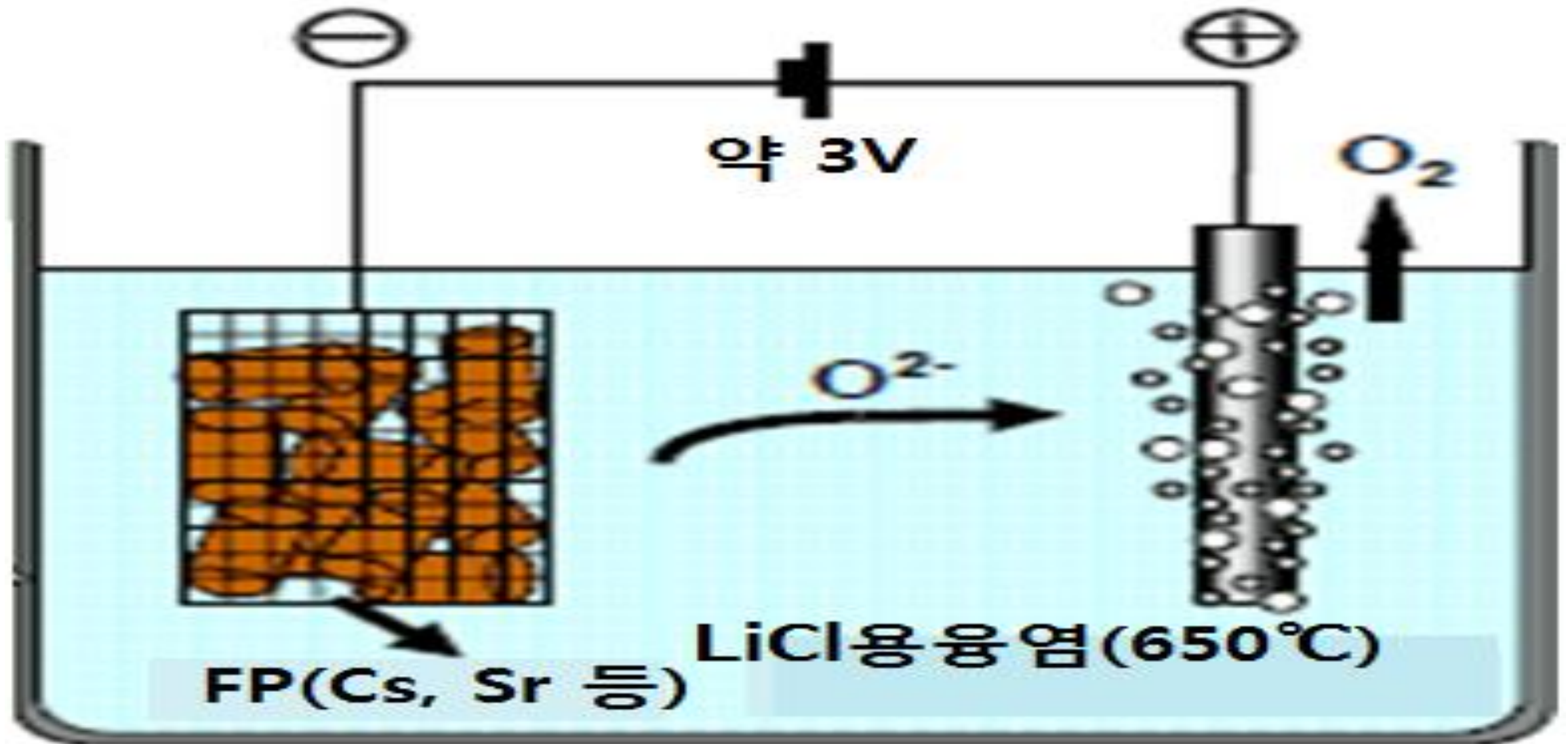
(6) Off-gas의 포집·저장

❖ 희가스(He, Kr, Xe 등)

❖ 휘발성가스(Cs, I 등)

【SFR-SF의 경우, 본드재인 Na의 제거(증류법)가 필요】

2. 전해환원 (Electrolytic reduction)



산화물의 금속화 (환원)

【산화물은 전류를 통하지 않으므로 금속으로 환원】

(1) 電解질 (LiCl-Li₂O, 650°C), 철Basket, Wire(Pt)

(2) Cs, Sr, Ba, I 등은 전해질(염화물)에 용해

→ 염화물의 생성자유에너지가 Li보다 적은 것

→ ALE에서 Li 보다 큰 것은 산화물형태로 존재

❖ 산소이온의 전자상실로 "산소가스" 발생

(3) Lanthanoid + 금속FP +(U+TRU)는 Basket에 남아, 전해精鍊공정에

環元효율

U(99.7%), Pu(97.8%), Np(98.8% 이상), Am(90.2%)

Actinide 등의 산화환원전위

	고체음극	액체Cd 음극	액체 Bi 음극
U	2.0×10^{11}	25	1300
Np	2.1×10^7	28	200
Pu	2.7×10^5	18	130
Am	710	10	67
Y	0.37	0.0053	0.0012
La	0.09	0.28	0.59
Nd	1	1	1

사용후핵연료차세대관리종합공정실증시설 -Advanced spent fuel Conditioning Process Facility-



2017년 7월부터 1kg/Batch 실험

❖ 2010년, 당초계획의 처리능력은 20kg/Batch

A. 전기공급시간기준(추정)→16h/Batch

B. 8h/d의 작업으로 10일간의 80시간

→장치예열, 핵물질의 이송·계량, 운전, 분석, 장치냉각 등
때문에 최소 3개월

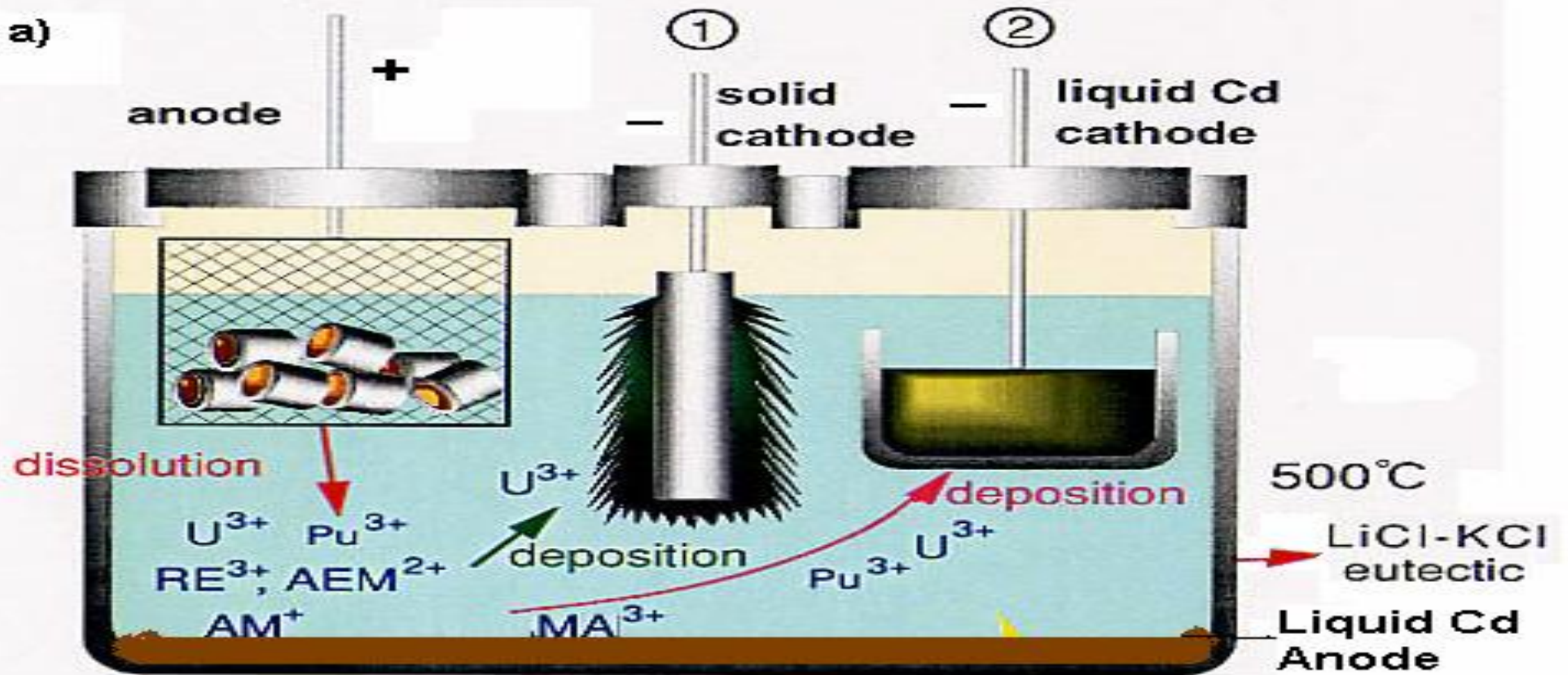
즉, 약 4개월/Batch

=다음의 시험조건준비 및 화학분석 (3개월) + 10일운전

약 30일간가동/y로,

최대 3kg/년 처리

3. 전해 정련(Electrorefining)



AM: Alkali metal FP; AEM: Alkaline earth FP;
RE: Rare Earth FP; MA: Minor actinides

파이로프로세싱법의 핵심공정

-우라늄과 플루토늄의 분리-

- 1) 용융염(LiCl-KCl), 450°C, 철음극(고체), Cd음극(액체), 철Basket
- 2) 용융염에 녹은 우라늄을 우선 철음극에 회수(Dendrite狀)
→ 반복하여 용해 및 회수
- 3) 용융염속의 우라늄이 일정 비율(회수)로 낮아지면, Cd음극을 넣어 $U+TRU+RE \rightarrow$ **群분리**

군분리 → 원소분리 → 핵종분리

4) ALE(AEM), RE(희토류) 등 → 용융염에

5) 철Basket에는 미용해물질이 남는다.

❖ 스트렌스강의 피복관 및 Hull, 귀금속FP (Zr, Mo, Ru, Te, Rh, Pd, Nb 등), 미량의 잔류

Actinoid가 남는다. → 4%의 귀금속, 11%의 U

4. 전해제련(Electro-winning)

-Liquid Cadmium Cathode and RAR-

6) TRU·U·RE의 회수(LCC)⇨Ingot(합금 덩어리)

염 및 Cd(증류법, 800~950°C) 등 전해질의 제거

7) 증류후의 Cd음극의 組成(전위가 높은 순으로 음극에)

U(49%), Np(0.2%), Pu(48%), Am(0.8%), Cm(0.2%), FPs(2.1%)

8) 용융염 속의 TRU를 정련공정으로 회수

❖ 산화물(Dross)도 회수

9) 용융염 및 액체금속의 수송기술

❖ 도가니의 예열 및 열충격 파손문제

TRU회수 및 FP제거

-Residual Actinides Recovery-

A. 용융염(오염)문제 ⇨ Batch수 제한과 환원속도 저하를 초래

1) 전해정제후 FP(Cs, Sr 등의 FP 및 RE의 염화물)의 축적에 따른 용매의
粘性증대

❖ 특히, 알칼리금속, 알칼리토류금속의 증가에 따른 금속염화물의
생성으로 → 환원속도의 저하

2) 미회수 Actinoid의 붕괴열에 따른 온도제어의 곤란

3) 석출물의 오염이 허용범위를 넘는다.

❖ Batch수의 제한과 Pu회수의 개시는, 염속의 Actinoid와
FP의 농도가 기준

B. 리사이클 ⇨ 환원제·산화제의 이용

:Actinoid가 FP보다 먼저 Zeolite에 흡착하므로,

1)염을 환원제(금속Li)을 포함한 Cd와 접촉

→Actinoid의 대부분이 Cd로(회수)

2)Actinoid가 없는 염을 Zeolite에 접촉

→FP제거(유리고화체로 처분)

3)FP를 제거한 염과 Actinoid를 포함한 Cd를 접촉시키고

산화제(CdCl_2)를 첨가하여, Actinoid를 염으로 되돌린다. 【반복】

b)폐기염은 인공광물인

“유리결합 Sodalite고화체”로 영구처분

5. 연료제조(射出鑄造법)

- (1) 전해제련에서 나온 Ingot에 U 및 Zr을 첨가하여 TRU함유량을 조정
- (2) 진공하의 1,500°C전후에서 녹힌 후, 압력차를 이용하여 **石英주물**에 사출주조한다
- (3) 주물에서 꺼내어 연료Slug의 양쪽 끝을 버리고, 일정한 크기로 자른 후, 피복관에 삽입한다.
- (4) Na Bonding(고속로 연료로서)공정

【문제】

- (1) Am의 증발문제(**손실 약 40%**)→시설의 오염도
❖ MA의 산화는 고준위 방사성폐기물의 증가로
- (2) 폐기 주물의 발생(고준위방사성폐기물) → **석영의 대량폐기.**
- (3) 잘라낸 연료봉 양쪽 끝의 연료누적(재활용여부)

2차 폐기물의 발생과 처분

기체	연료봉의 전처리공정의 배출가스, 용융염의 FP가스, Cd 증기 등
액체	전해환원·정련·제련공정의 폐기염 및 Cd금속 등
고체	Hull, End-piece, 구조재, 교환부품(절단용 칼 등), 포집필터, 교환용 기기, Impeller, 전해조, 철, 세라믹(도가니), 고화체, 석영주물 등
	시설해체·개조에 따른 콘크리트 및 폐재

경수로 사용후 핵연료의 구성

44,000MWd로 3년연소, 3.5년냉각(1,000kg)

	무 게	비 율	재이용가능성 ?	
			경수로	고속로
U235	9kg	0.9%	○	○
U236	5kg	0.5%	×	×
U238	929kg	92.9%	○	○
Pu	11kg	1.1%	○	○
MA	1kg	0.1%	×	○
FPS	45kg	4.5%	×	×



唐少傅白公墓

【추진파의 주장】에 대한 검증

- A. 재활용률 →우리농자원 이용률(약 0.6%)을 약 94 ~ 96%로
- B. 경제성 →습식재처리보다 저렴하다.
- C. 안전성
- D. 환경친화성 ⇨직접처분(Once through)에 비해
 - 최종처분장의 규모 감소(100분의 1)
 - 최종처분장의 관리기간(유해도)→(10만년에서 300년으로)
- E. 핵비확산성
 - ❖ 群분리이므로 핵무기원료로의 전용 불가능

파이로프로세싱의 검증

A. 자원의 재활용률(약 94 ~ 96%) 주장에 대해서

1. 고속로의 상용화가 절대적인 전제조건이다.

❖ 현행의 경수로에서는 파이로프로세싱법의 금속연료를 사용할 수 없다.

2. 추진파의 Simulation은 재처리공정상의 손실 (기기부착, 반감기 등) 및 투입에너지를 전혀 고려하고 있지 않다.

❖ 파이로프로세싱법의 분리효율과 고속로의 변환효율은 탁상공론의 뱅튀기이다.

자원의 재활용률 → 마이너스!

【U235의 4.1%농축도, 1000kg】의 제조시

1. 천연U: $U235(59\text{kg}) + U238(8,241\text{kg}) = 8,300\text{kg}$
2. 농축과정: $U235(41\text{kg}) + U238(959\text{kg}) = 1,000\text{kg}$

DU의 발생: $U235(18\text{kg}) + U238(7,282\text{kg}) = 7,300\text{kg}$

재처리후의 감손 U238(929kg)은 불순물이 많다. 공정 Loss도

순수한 DU량이 지저분한 감손U238의 약 7.8배

❖ 농축공정의 역무계약에는 DU의 처분비용이 포함되어 있다.

MOX연료는 감손U가 아니라, 열화U을 사용

1. Thermal recycle(MOX 연료의 경우)

$$U235(0.9\%) + Pu(1.1\%) = 2.0\% \quad \text{재활용률}$$

2. 가령, SFR가 개발되어도, 농축과정의 열화U이 우선적으로 이용,

$$U235(0.9\%) + Pu(1.1\%) + MA(0.1\%) = 2.1\%$$

3. 재처리·연료가공(기기부착, 반감기 등)의 Loss 및 투입에너지→오히려 재활용률은 **마이너스**

B. 경제성

파이로프로세싱은 **실험실 연구단계**

1. 재처리비용은 직접처분보다 높다.

❖ 일본정부의 비공개자료 → 약 4배

❖ 일본원자력위원회(2011.11) → 약 2배

2. 롯카쇼재처리공장, 800t/y

(1) 2015년 12월현재, 핵심시설인, 재처리공장의
건설비가, 7,600억円(1993년) → 약 2조2,200억円(3배)

(2) 공장유지비만 약 1,100억円/년씩 누적

(3) 결과, 2015년 12월말현재, 재처리비용이
11조円(2004년) → 15.4조円(경제산업성)

3. 핵연료사이클(32,000t) 전체비용이

18.8조円(2004년) → 최저 74조円이라는 시산도

4. 게다가, **고속로 건설비 및 최종처분장 비용은 제외**되어 있다.

후행주기의 비용은 수백조원

1. 일본의 재처리비용 약 154조원(32,000t)

❖ 약 48억원/t을 국내의 배출량(2015년말)에 적용

→ 6,735t(PWR) × 약 48억원 = 약 32.3조원

→ 7,763t(PHWR) × 약 48억원 = 약 37.3조원

2. 고속로와 최종처분장 비용은?

(1) 분리·변환을 해도 **최종처분장은 필요하다**

(2) 몬주(28만)의 건설비 5.9조원

→ 수삽기(100만kWe)의 고속로 건설비?

❖ KAERI 건설계획(15만kWe) → 1조 7250억원(최저!)

3. PHWR(중수로) SF의 최종처분비?

Mock-up규모의 시험시설 PRIDE

PyRoprocess Integrated inactive Demonstration facility

1. 재처리공장의 건설비 ⇨ 건식이 싸다?

❖ 10t/y의 처리능력, 건설비 330억원(증액 ?)

→ 2015년 현재, 약 750t/y(PWR 20t/y + PHWR, 95t/y)

→ 75기의 공장 × 330억원 = 2조4750억원

→ 부대시설(폐기물 처리시설 등의 포함여부 ?)

❖ 일본 건식재처리 공장의 건설비만(추산, 1992년)

→ 처리능력 20t/y, 258억円(약 2600억원)

2. 2025년의 종합파이로시설(KAPF) 건설계획

PRIDE(Mock-up규모의 시험시설) PyRoprocess Integrated inactive DEMonstration facility



<R.D.Phillip, Commercial-Size IFR Fuel Cycle Facility,
CRIEPI/EPRI Joint Study of IFR, June 9, 1986.>

파이로·프로세싱법 비용의 추산에서,
→ 자본비는 습식(대규모)의 5분의 1, **운영비는 2분의 1**

2. **운영비** → 습식과 건식의 **차이는 거의 없다**

(1) **자동화**의 습식에 비해, 건식은 Batch 공정

(2) 운전비, **소모품비**(조업비의 약 40%를 차지하는
기기교환비 등), 인건비, 폐기물처리·처분비, 해체비

(3) 원격조정 탕으로 **균일의 재료가공 곤란**

❖ 생성물 성상(性狀)과 소량다수에 대응하는 분석방법과 관리시스템 개발

→ 분리에서 나온 제품 및 2차폐기물은 균일성이 없는 고체상태가 대부분으로, 소량다수를 대상으로 한 개별관리가 필요

(4) 재료개발

❖ 취급하는 물질(고방사성)과의 양립성, 내부식성, 기계적 강도가 있는 재료

(5) 일괄공정(자동화)의 개발 등

❖ 용융염 등 고온액체의 수송기술

3. 안전성

- (1) 고체 등의 2차폐기물 안전 보관
 - 1)가스의 완전 포집 및 포집필터의 안전 보관?
 - 2)Cs, Sr의 유리고화체의 장기적 보관?
→폐기염의 유리결합고화체의 보관
 - 3)Ingot의 보관
 - 4)석영주물 및 교환기기 등의 보관?

- (2) 작업시의 피폭리스크의 저감?
 - ❖TRU 및 강한 γ 선 핵종의 대량 취급

- (3) 운전중의 화재대책, 낙하사고
- (4) Hot Cell의 압력유지, 자연재해, 테러 대책

재처리공장의 근본적인 리스크

1. 사고시의 대규모피해(FPs의 누출 등)

히로시마(U235) → 900g(FPS),
나가사끼(Pu239) → 1,200g(FPS)

20톤/년의 재처리공장 ⇨ 9,000,000g(FPs) 취급

2. 작업원의 피폭증가

- Am, Cm 등의 고(高)차원 핵종의 증가
- SF속의 Pu의 방사능은 순수 Pu239의 약 5.4배
- FPs의 방사능

사고시, 보수기간의 장기화
⇨ 경제성의 악화도

3. 금속Pu의 공기중 산화, 자연발화
Ar가스의 Hot-cell, 원격조정 장치 등
4. Xe, Kr, T, I 등 배기가스 배출
→ 전처리과정 (약 80%) 정련과정 (약 20%)
5. 세정 및 교환 등에 의한 2차 방사성폐기물의 대량발생
→ 화학적 폭발·화재와 방사능 누출
6. 재료 및 기기의 고온부식→저장문제
7. Batch공정에 의한 빈번한 사고(보수작업의 피폭)

Off-gas의 포집 및 저장

1. 요오드(I) → AgX(실버제오라이드). (Br-臭素의 포집도)

(1) FPs의 약 1%(중량)

(2) I131(8일). I129(1700만년, 약 75%)

2. **클립톤(Kr85, 10.7년)** → 고 비용

(1) 회수 ⇨ 액화증류법, 저온활성탄법, 고정화법

→ Ar에서 분리·냉각하여 고압의 실린더에

(2) 저장 → 적어도, **100~200년간** 가스누출 방지?

(3) Kr90 → **Sr90**, Kr89 → **Sr89**

3. T(12.3년)→ 산화하여 HTO로 포집(촉매 CuO)
4. Tc, Mo, Te, Se, Sb, C14→ 칼슘필터
5. Xe→ Ar에서 분리·냉각하여 고압의 실린더에
 - ❖ I(YI₃)의 변환시에도 Xe가스의 방출량은 거의 100%
6. Cs, Rh, Cd→ 석탄회 필터

❖ C14(5715년), I129(1570만년), **Kr85(10.76년)**는 방사능은 낮지만, 장수명핵종(LLFP)이며, 용해(가용)성으로 환경부하(지하수)가 높다.

❖ 필터의 고화기술 중요



Ⅱ. 고속로 (Fast Reactor)

1. 개발초기, 우라늄자원의 희소성
→ 고속증식로 (FBR, Fast Breeding Reactor)의 개발로, 우라늄자원의 한계를 해결
2. 군사용 플루토늄의 생산로
3. 발전목적의 핵반응로 (Reactor)
4. 잠수함동력용으로 소형화 요구

LWR	구 분	SFR
열중성자 (약 2.2km/s)	중성자	고속중성자 (약 2만km/s)
UO ₂ , MOX	핵연료	고농축 우라늄, Pu, MOX 등
물(경수), 가스	냉각재	Pb, Bi, Na, Gas
물, 중수, 흑연	감속재	필요없음
0.6할 전후	증식율	1.24~1.29(이론적)
약 33%	열효율	39%
낮 다	변환효율	높 다
작 다	사고피해범위	크 다

고속증식로(FBR)의 좌절

1. 빈번한 사고 발생(미숙한 기술)
→ 증기발생기의 전열관 파손, 소듐(냉각재)의 폭발·화재사고
2. 낮은 증식율(실험실 수준)과 긴 증식기간
3. 비싼 건설·운영비
4. 높은 핵확산성 → 핵무기의 슈퍼급 플루토늄의 생산
5. U자원의 풍부, LWR 보급의 감퇴 ⇔ 재처리 중지
→ 60 ~ 70년대 초까지, 특히 Oil Crisis(1973년),
LWR 확대와 U의 수급핍박(가격상승) 예상의 실패
6. 냉전의 종식 → Pu 수요 감소

변환중심의 개발로 전환으로 연구유지 대책

1. 미국 → AFCI-GNEP, Gen-4, 선진적연소시험로(ABTR)의 도입연구,
2. 프랑스 → 2025년까지 원형로 ASTRID(균질Cycle)의 도입계획(좌절)
3. 러시아 → BN-600 (21%와 33%의 HEU)
BN-800(2015년12월, 최초의 MOX SFR - 2할)
 - ❖ START에 따른 Pu(34t)의 연소처분 목적
4. 중국 → 2010년, 실험로 CEFr(64.4%의 HEU → MOX)
5. 인도 → Th의 리사이클(군사용)
6. 일본 → 몬쥬(폐지확정, 2016.12)

핵변환 특히 MA 연소를 명목으로 회생?

1. 1992년, KALIMER의 연구
 2. 1997년6월, 원자력연구개발 중장기계획
 - 2001년 KALIMER(15만KWe)개념설계, GE
 3. 2002-06년,
 - KALIMER(60만KWe)개념설계
 - 2028년, KALIMER(60만kWe, 실증로)건설
 - 2040년, KALIMER(120만kWe,상업로)건설
 - 2068년, Break-even reactor
 4. 2007-09년
 - Gen-IV SFR(PGSFR)로 설계변경
 5. 2028년 실증로(30만kWe)건설 계획
 - 현재 원형로(10만kWe) 개념설계로 변경
 - 개념설계→(특정설계)→기본설계→상세설계
- ❖ Break-even, Even, Breeder

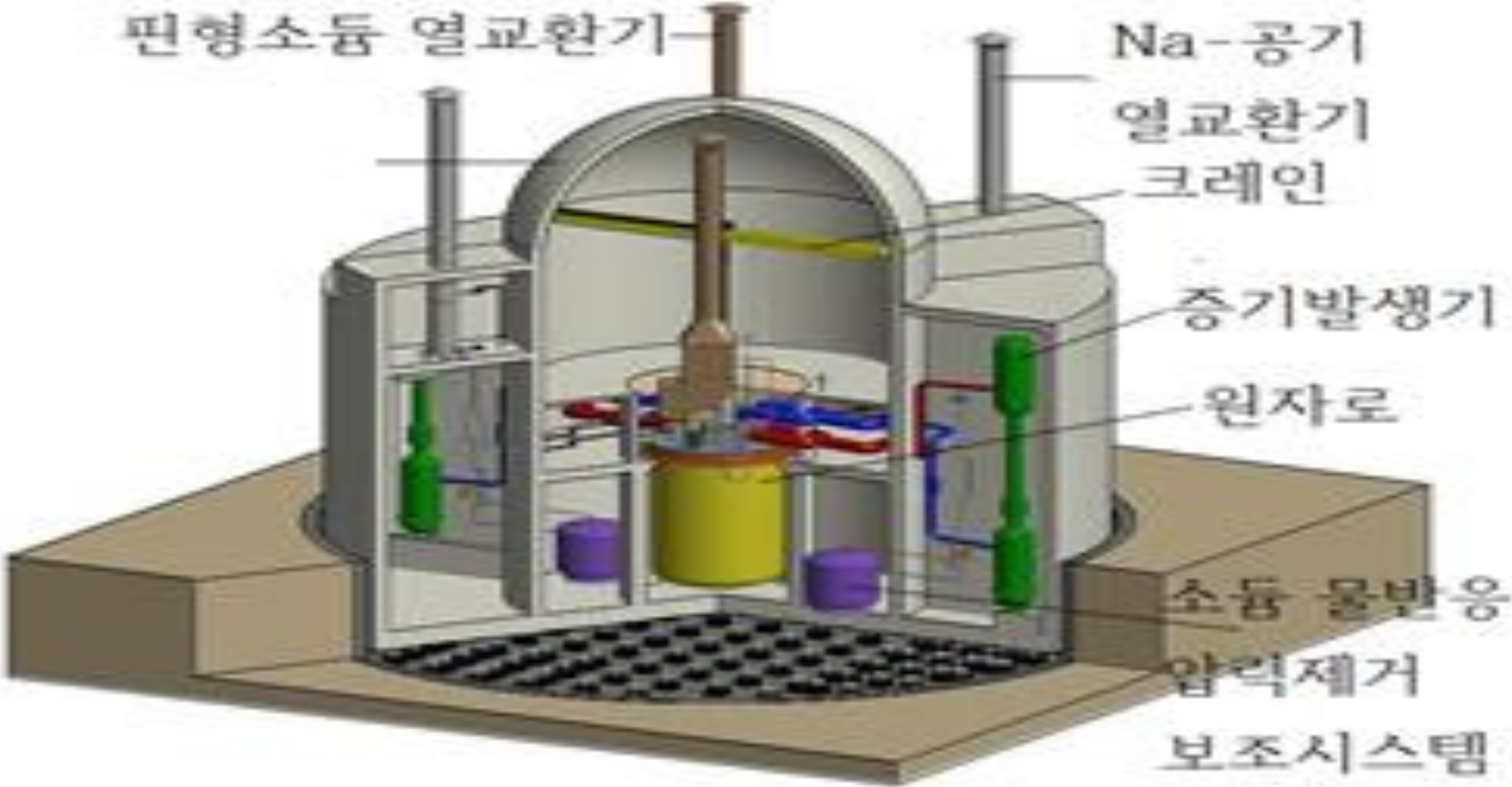
PGSFR

Prototype of Gen-IV Sodium-cooled Fast Reactor

- ❖ 실증로에서 원형로(10만kWe)로 (하한)변경
- ❖ 2028년 건설예정(60만kWe)→ with ANL(Design)
- ❖ U-Zr금속연료(초기) → 6개월
U-TRU-15%Zr금속연료→ 11개월

- ❖ 60년간동, 가동율 70%, 열효율 38.8%
- ❖ Pool-type(Tank형)
 - 1) 경제성 > Loop-type
 - 2) 설계制約 → 유지, 보수? 3) 수송제약,
 - 4) 내진성부족

PGSFR의 개념도

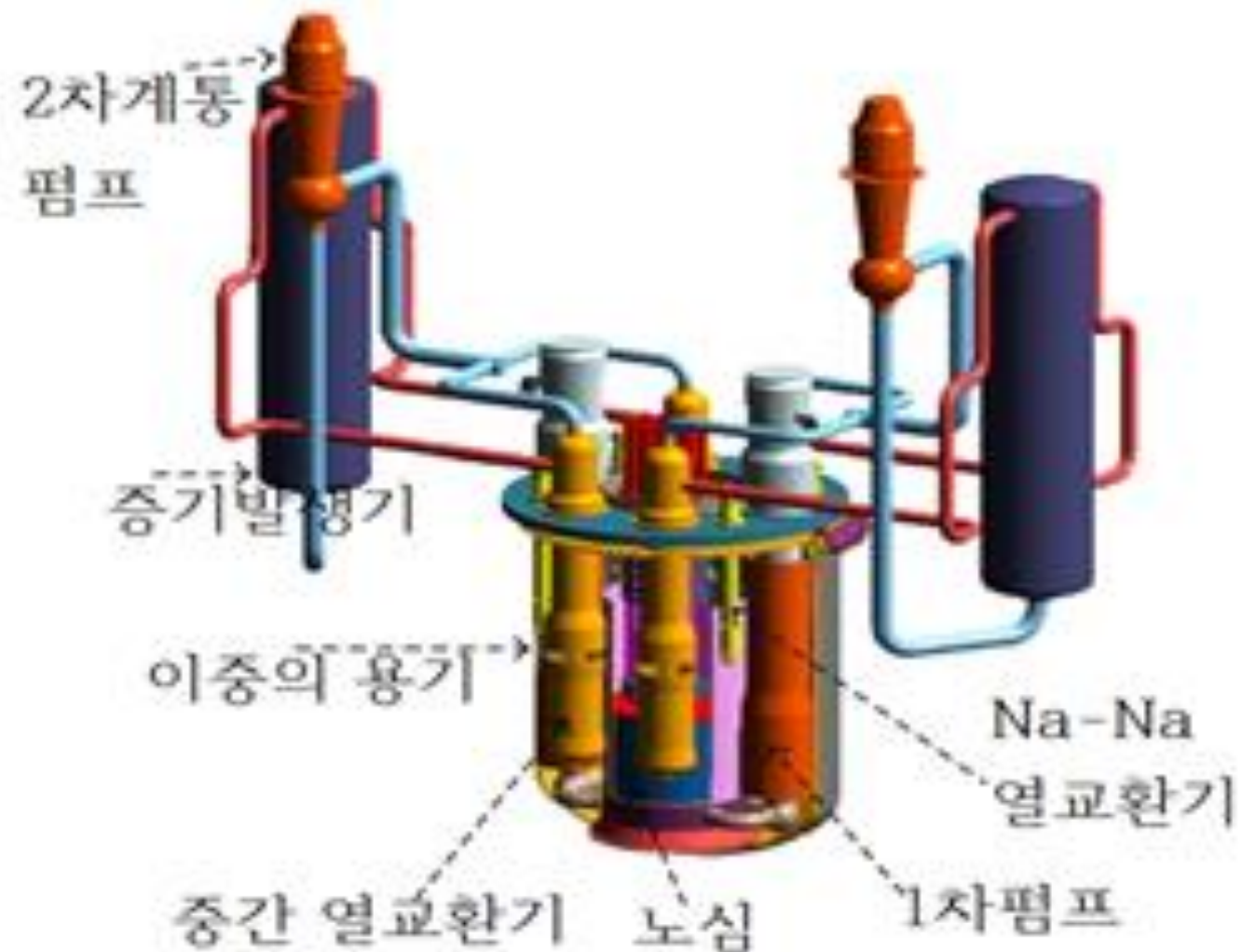


Pool(Tank) 형 \Leftrightarrow Loop형

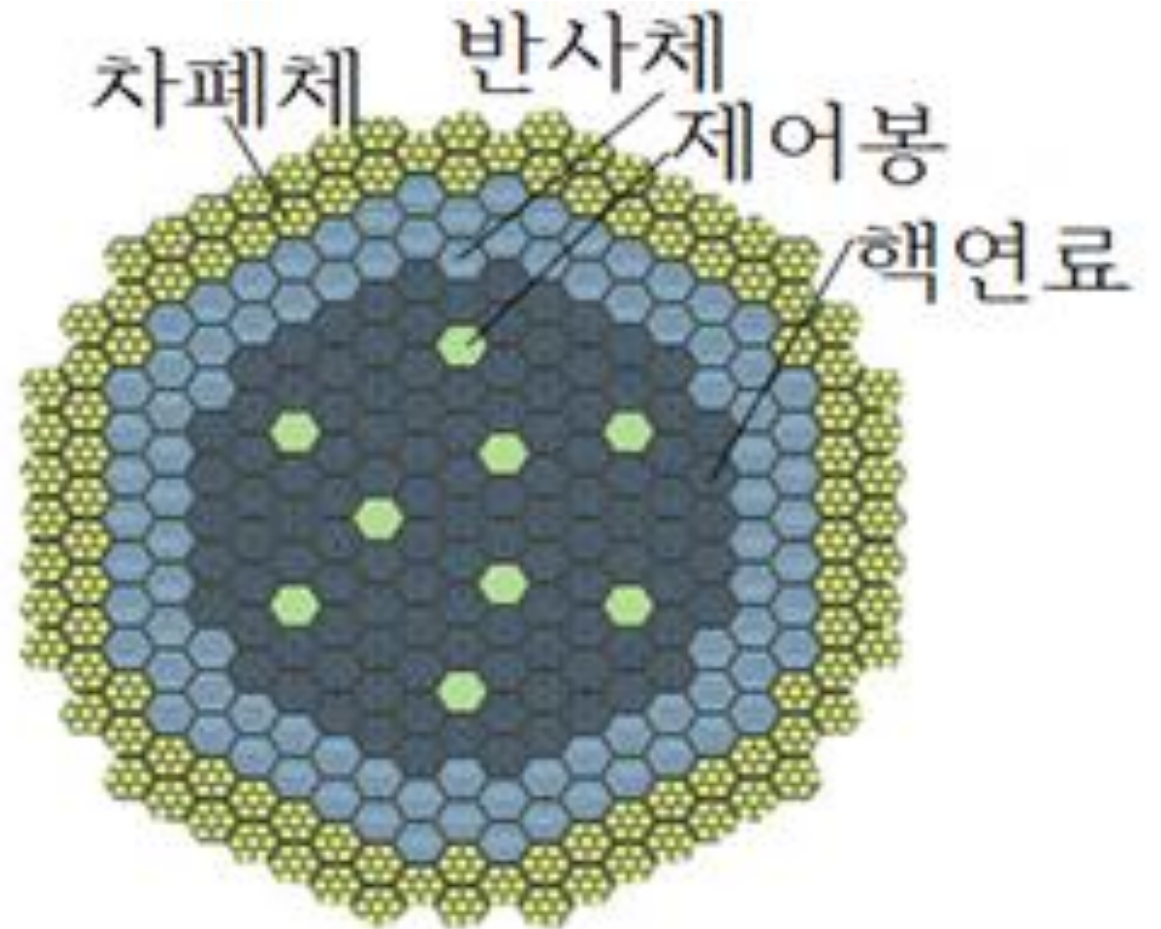
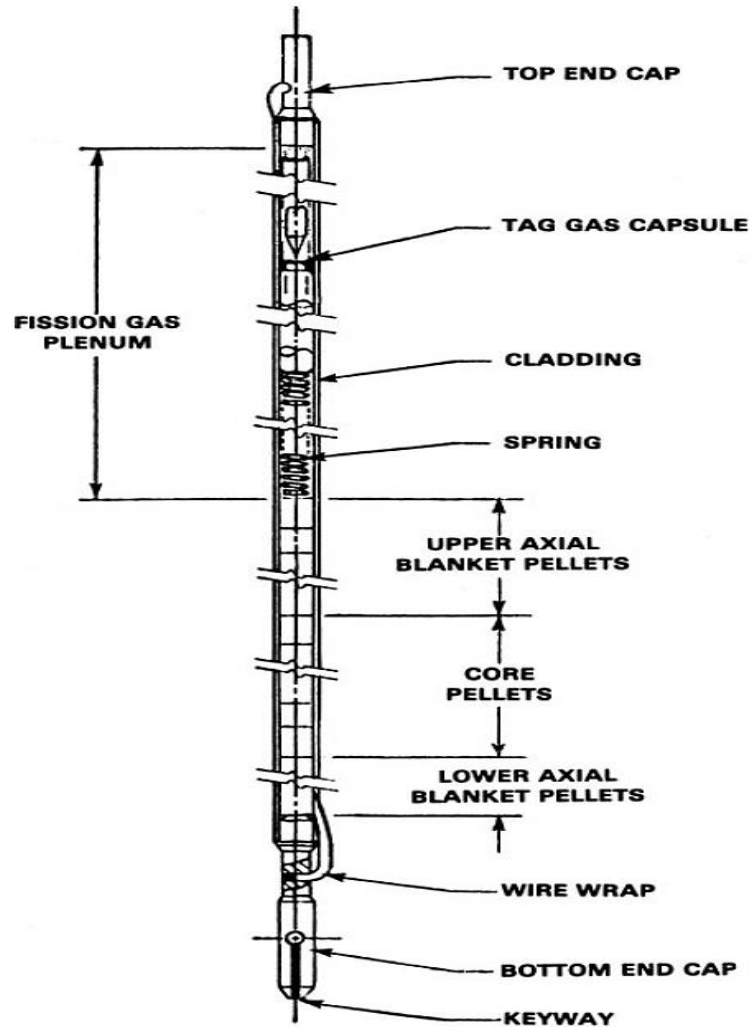
탱크(이중용기)
속에

1. 노심
2. 열교환기
3. 펌프

❖ 루프형은 분리



PGSFR의 노심과 축Blanket



SFR의 검증

A. 핵연료 증식 가능성과 경제성

1. 증식률 (60~70%는 노심, 나머지 Blanket)
 - (1) 증식율은 실증데이터가 아니라 희망사항
 - (2) 증식율과 발전량은 반비례의 **Trade-off** 관계
 - (3) 증식기간은 고속로 수명을 초월할 가능성
 - ❖ 배증시간(30 ~ 60년) > 고속로의 수명
 - 고속중성자의 영향으로 노심 열화

현재, 플루토늄 과잉 = 불량채권

2. U자원의 100배 이용설

(1) 핵연료수급의 팽박 - 가격상승

- ❖ 2000년대, 1,000기의 핵발전소 전제 ?
- ❖ 海水의 우라늄(약 46억t)의 존재

(2) 100배 이용 → **탁상공론**

- ❖ U이용률 경수로(약 0.6%), 고속로(약 60%---???)

3. **비싼 건설비**(Monju, 28만KWe)

- ❖ 설계시(360억円)→95년, 임계사고시(5,886억円)
당초계획은 2배였다.

- ❖ kW당 건설비 ⇨

LWR의 약 11배

- ❖ **국내 PGSFR(15만kWe)건설비 계획→1조7250억 원**
100만kWe(약 4조원)-----**LWR 약 3배(최저)**

4. 보수·점검의 기간이 길다(장기간)→Na의 불투명성

(1) Joyo(실험로, 열출력 14만kWt, 발전설비없음)

❖ 2007.5, 이동장치 고장(6개월후 확인)

→ 직경 0.6cm 길이 1.3cm의 핀 6개의 행방불명

❖ 수리종료 및 복구 → 2015년6월, 현재, 안전기준 심사신청

❖ 비용 ~100억円 → 세정과 부식처리, 개량 등

(2) Monju의 보수기간 → 14년 5개월(1995.12 ~ 2010. 6)

5. 높은 폐로비용(JAEA, 2018년 내부추산)

❖ 약 3,750억円 → 1조엔초로 증가 가능성

6. 경수로의 경제성 > 고속로

7. 고속로의 실현가능성(기술진보)? → 불확실성

B. 안전성 → Na의 화학반응성, 부식성

1. Na(Monju, 1,600t) 누출

(1) 수소의 발생

→ Na무사고의 고속로가 없다

a) 330 °C 이하 → $\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{NaOH} + 1/2\text{H}_2 + \text{열}$

b) 330 °C 이상 → $2\text{Na} + \text{H}_2\text{O} \rightarrow \text{Na}_2\text{O} + 1/2\text{H}_2 + \text{열}$

(2) 가성소다 및 산화나트륨에 의한 기기 및 배관 등의

<고온>

공기와의 반응으로,

→ 산소, 수소, 물



❖ Cover-gas → 원자로(Ar Gas), 1차계통실(N)

❖ 가동률의 저하 → 배관부식, 노후화, 연료열화(Am241)

❖ 고체상태(常溫)로 燈油속에 보관

(3) Na(용점 97.8°C)의 불투명성

- ❖ 사고시, 새로운 기기 및 기술개발의 필요
→ 보수기간의 장기화(경제성 저하)

(4) 부분적인 응고현상 → 회전부분의 손상

- ❖ 정지중에도 Na온도유지(비용)
→ 약 200°C(Monju 유지비, 200억円/년)

(5) Na의 순도관리 곤란

- ❖ 불순물(주로, 산소불순물)이 많으면, 연료·구조재의 부식속도 증대

(6) Smear density가 적절해도, 연소기간이 길면,

- ❖ FP가스의 축적으로 피복관내의 가스압 증가
- ❖ Swelling때문에 연료와 피복관의 상호작용

2.노심용융(Melt-down)

출력밀도(LWR의 약 9배)가 높다.

→급격한 출력상승으로 연료파손 및 Na의 비등

(1)정전시

Na의 냉각기능 상실→ 비등(880°C) → 온도상승→

금속연료의 용융온도($1,100^{\circ}\text{C} < 2,750^{\circ}\text{C} : \text{UO}_2$)→ 핵폭주→노심용융

(2)운전시

노심중심의 온도상승→금속이 늘어 남→연료봉의 밀착→ 출력·

온도상승→ 금속연료의 용융→ 핵폭주→노심용융

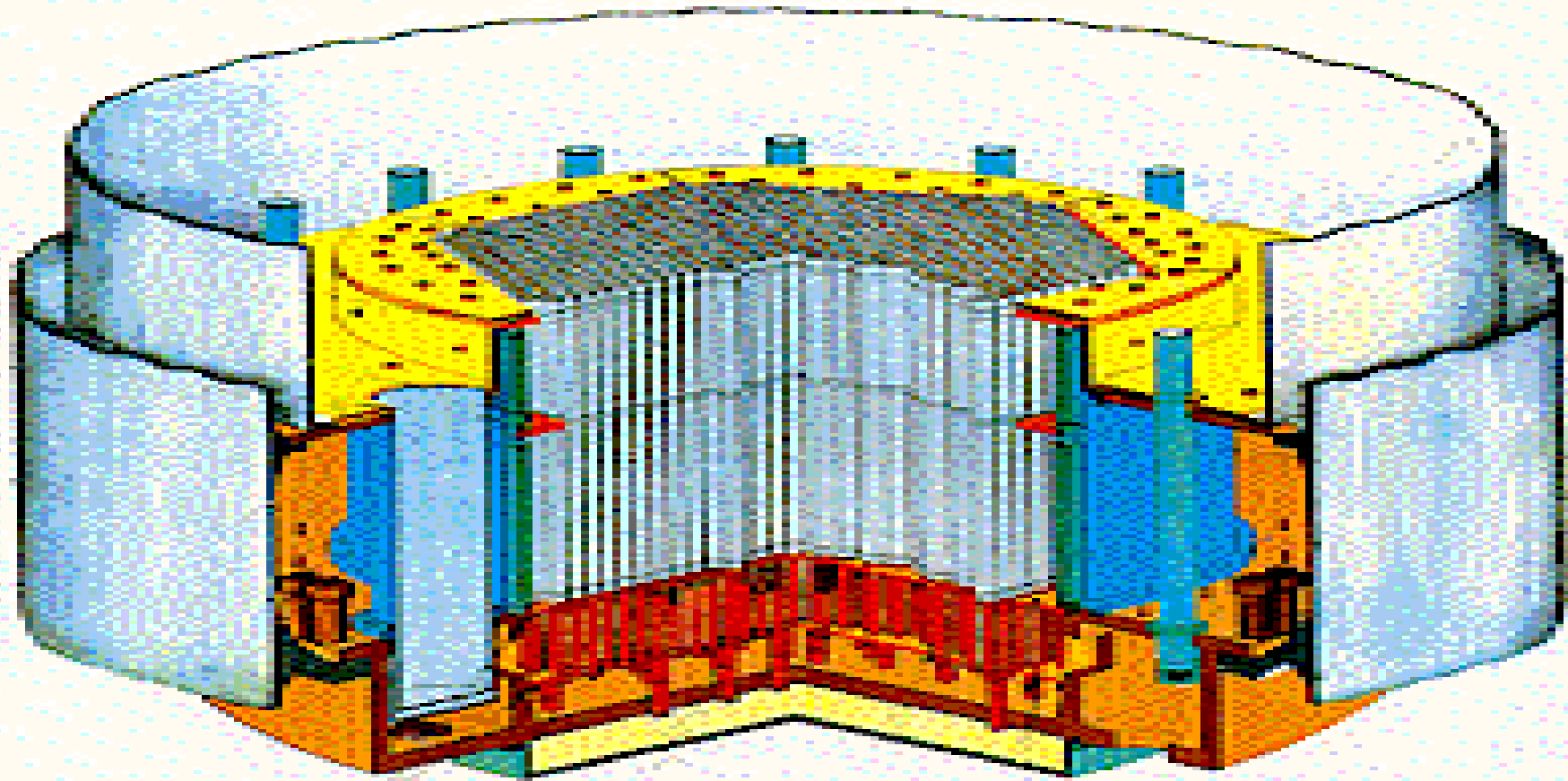
* Na비등시, **陽의 보이드반응**때문에 핵폭주 용이

❖ 연쇄반응 유지(발생중성자의 증대)를 위해
연료밀도를 PWR의 약 5배정도
→ 냉각재 Na의 낮은 감속효과

❖ 연료봉의 간격
→ PWR(약 3.4mm), FBR(Monju 1.4mm)

❖ 피복관의 두께
→ PWR(약 0.62mm), FBR(Monju 0.47mm)

3. 핵폭발의 가능성



- (1) 연료(높은 밀도)의 합체(Core compaction)
→ 추진파는 연료분산(dispersal) 가능성이 높아, 반응도 저하로 이어진다, 고 주장(반론)
- (2) 연료전체가 녹은 상태의 웅덩이
- (3) 주변은 U238이 Blanket로서 벽을 이루고 있다
- (4) 밀폐된 상태에서 나트륨의 비등(Void 증가)
→ 출력·온도상승 → 비등, 의 악순환
- (5) 연료봉 금속의 증발
- (6) 금속의 증발에 의한 증기가, 녹은 연료를 움직인다
- (7) 특히, 중심의 반응이 활발하여 증기가 녹은 연료를 밖으로 밀어 낸다
- (8) 녹은 연료가 벽을 타고 위로 움직인다→위로 간다
- (9) 냉각되어 벽을 타고 내려와 밑의 연료와 합체한다.

4. 강한 방사성의 Na

- ❖ $\text{Na}24$ (15시간, β 와 γ), $\text{Na}24$ 의 약 2000분의 1의 양의 $\text{Na}22$ (2.5년, γ)
 - 가동정지후 1주일정도는 원자로에 접근 곤란
 - $\text{Na}22$ 는 반년후에도 표면 약 $10\text{rem}(100\text{mSv})/\text{h}$
 - 방사화된 Na때문에 내부피폭, **작업성 저하**

5. 배관(1차냉각계)의 내진성 취약

(1) 열충격(열應力)방지

- ❖ LWR(150기압) 직경70cm, 두께 7cm
- SFR(약 10기압) 직경80cm, **두께 1.1cm**

❖ Na저장탱크(Guard Vessel)의 열충격

【Monju의 사고사례】

- 통상정지(13분후)의 실시,
긴급정지(1시간30분후), Na누출량(약 0.7t)
- 이후, Monju사고, 열충격회피로 1시간30분
소요, 따라서 완전정지까지 **계 3시간 40분**

❖ 기기가 받는 열충격 → Monju(약 10배) > LWR

❖ Monju의 원자로용기의 Guard Vessel는
→ 높이 12.7m, **두께 4cm**

6. 배관내의 검사의 곤란

- ❖ 배관내에 Na가 남아 있을 가능성
→ 공기와의 접촉으로 부식 ⇔ 얇은 배관두께

7. 증기발생기의 전열관(세관)의 취약성

- (1) 증발기(물, Cr·Mo鋼), 과열기(증기, 스텐레스鋼)
→ 두께(원형로 수mm, 실증로?), 약 140기압의 차
- (2) 전열관(세관)의 검사곤란(ECT의 낮은 精度)
- (3) 냉각재가 경수로보다 약 200°C 높다(열팽창)

8. 연료집합체의 검사곤란 → Microscope의 삽입부분의 한정

9. 배관의 鹽害 및 감육(減肉) → 기체의 배출로 환경오염

10. 종업원의 피폭증가 → 고차원핵종의 증가

11. 제어봉의 역할

- ❖ SFR의 핵반응은 **LWR의 약 250**배로,
LWR(제어봉, 붕산수)와는 달리 **제어봉만**
 - 1) **삽입속도** ⇨ 일본의 LWR은 2초이내(실질 1.6초)
⇨ Na의 비등전에 삽입(수동삽입) ?
 - 2) **지발중성자비율** → U235(0.67%) ⇔ Pu239 (**0.22%**)
SFR의 즉발중성자는 100만분의 1초

12. 원자로의 내구성 → 대량의 중성자 조사

- ❖ 노심 구조재의 내구성? → 취성천이온도

13. SFR의 금속연료

- (1) 용융점이 낮다($1057 \pm 125^\circ\text{C}$).
 - ❖ 산화물(2750°C), 탄화물(2300°C), 질화물(2597°C)
- (2) Swelling 문제 → 장기간 연소시
- (3) 낮은 온도에서도 피복관과 共晶반응 (Eutectic reaction)

14. T의 대량생성(수십배) > LWR

- ❖ 연소도가 LWR보다 3 ~ 4배 높아, FP량이 늘고 방사능도 증가한다.
 - 삼체핵분열, $\text{B}10(n, 2\alpha)$ 반응, 냉각재중의 붕소 및 리튬과의 중성자 $\text{Li}6(n, \alpha)$ 반응 등에서 생긴다.

LWR 와 SFR의 SF(/t)

	LWR	SFR
Pu 함유량(kg/t)	10	245
연소도(MWd/t)	33,000	80,000
붕괴열(kW/t)	19	75
FPs의 방사능(Ci/t)	30	85
I의 방사능(Ci/t)	4,200,000	18,100,000
Kr의 방사능(Ci/t)	1	11
T의 방사능(Ci/t)	690	2,300
TRU(g/t)	660	1,560

추진파의 안전 주장에 대해

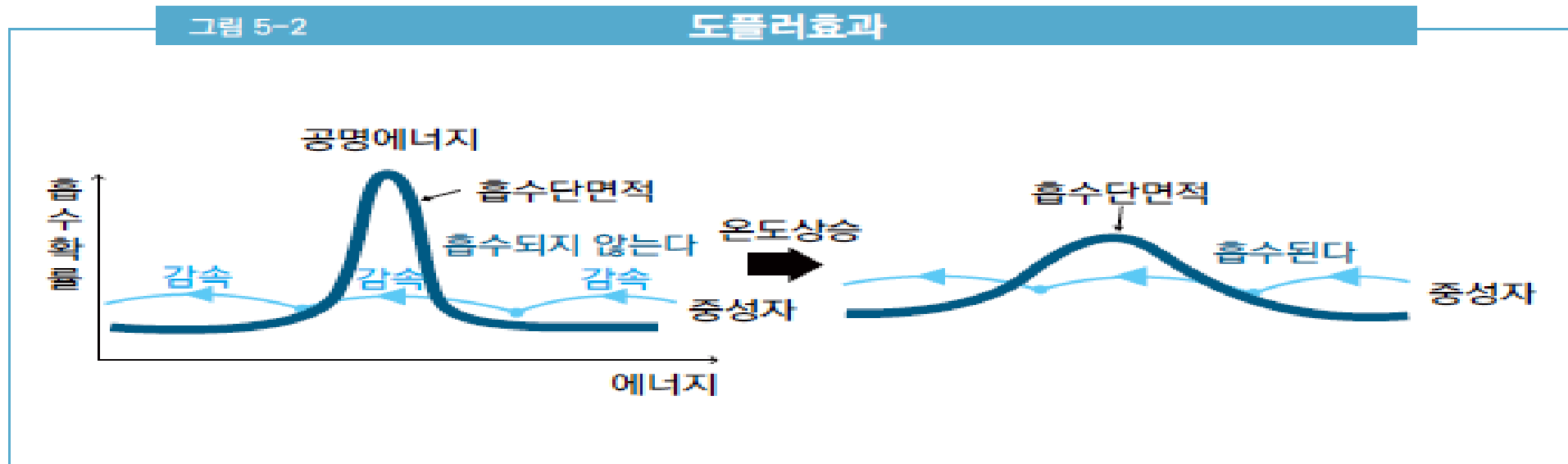
- 1.저압으로 냉각재비등(882°C)까지의 여유가 매우 크다
→ 급격한 냉각재 상실이 없다???.
❖ Na의 비등까지 "약 300°C" 의 여유(운전최고온도 500 ~ 600°C)
→ Na의 比熱이 물의 "약 4분의 1" 이라는 점을 무시
❖ ECCS는 필요없는 것이 아니라, 사용할 수 없다.
→ 안전함으로 비상노심냉각장치가 불필요라는 주장(반론)
- 2.사고시의 붕괴열제거
❖ 자연대류의 공기냉각 → 배관 파손시 무용?
3. 음의 반응도(Feed-back)의 저하
❖ 도플러효과 감소 및 Na보이드 반응도 → 陽의 반응도
4. 질소분위기, 鋼製liner → Monju사고시 파손

핵발전소의 자기제어성(Feed-back)

고속로는 연료의 고밀도화와 Na상실 → “즉발임계”

1. 도플러(Doppler)효과

- ❖ 출력상승 등으로 연료온도가 상승하면, U238, Pu240의 공명영역의 확대에 따른 중성자 흡수 증가(陰의 반응도)
→ 경수로에서는 음의 반응도가 크다.
- ❖ 고속로에서는 음의 반응도가 적다.
→ 연료 축방향팽창, 지지판 팽창 등으로 음의 반응도 보완?



2.Na Void(기포)반응도

→LWR에서는 “**陰**의 반응도”가 SFR에서는 “**陽**의 반응도”로

(1)노심바깥쪽→**음**의 반응도

❖출력상승으로 냉각재의 온도상승이 상승하여 기포가 생기면, 밀도감소로 중성자 감속(충돌)이 적어지고 중성자의 외부 누출이 증가한다(음의 반응도 ↑).

(2)노심**중앙**→**양**의 반응도

❖냉각재의 중성자 흡수 감소(**양**의 반응도 ↑), 노심의 누출 중성자 수도 증가하지만(**음**의 반응도 ↑), 높은 **중성자 에너지**에 의한 **반응도가 상승**하여 출력이 상승한다(양의 반응도 ↑).

❖출력상승→연료의 손상·용융→Core compaction →반응도증가→재임계(즉발임계)

Core compaction(압축, 밀집) ↔ 연료분산(Dispersion)설

(3) (1)음 < (2)양

→ Na 보이드 반응도 증가 즉 陽의 반응도

❖ 고속로에서도 소형원자로는 중성자의 외부 누출이 커, 陰의 반응도이지만, "중형원자로 이상"은 누출효과가 적어져 오히려 陽의 반응도를 증가시킨다.

(4) 노심의 확대에 따라, 양의 반응도 증대

→ 중·대형로 Risk

❖ 양의 반응도효과인 중성자 에너지 증가의 기여가 적어지나, 음의 반응도효과인 누출효과는 더 적어지기 때문이다.



Ⅲ. 群분리와 核변환

-Partitioning and Transmutation(P&T)-

SF속의 MA과 LLFP를 SFR 및 ADS를 이용한 핵반응을 통해, 단수명 핵종 또는 안정핵종으로 변환시킨다.

핵반응

- (1) U, Pu, MA(Np, Am, Cm)의 핵분열
- (2) 중성자 포획으로 장수명핵종→단수명핵종
- (3) 붕괴

추진파의 주장

★ 사회적 수용성의 증대

1. 최종처분장의 효율화 → 직접처분의 100분의 1로 ?
2. 장기 Risk 저감(관리기간의 단축)
→ 잠재적 유해도를 **우라늄광석** 수준(10만년)
으로 저하시키는 기간을 **300**년으로 단축
 - ❖ 천연우라늄(33만년)
 - ❖ 우라늄광석에는 딸핵종인 라돈(Rn) 등에 의해 천연우라늄보다 우라늄광석의 방사능이 높다.

P&T의 기본적 구성

1. SF속의 재활용 가능한 U, Pu, 장수명핵종인 MA, LLFP 등을 분리·추출한다.
2. 1에서 나온 U, Pu, MA를 SFR 또는 ADS의 연료로
→ 핵분열과 붕괴로 단수명핵종 및 안정핵종으로 변환
3. LLFP를 고속로 또는 ADS에서 중성자포획 및 붕괴를 통해 단수명핵종 및 안정핵종으로 변환한다.
4. 일부의 LLFP(주로, 백금족)을 재활용하고,
5. 발열源인 Cs, Sr 등은 분리후 저장·폐기한다.
6. 1~4이외의 핵종은 분리 또는 재활용후 폐기

군(群)분리·변환정책의 목표

한 국		일 본	
TRU	핵변환으로 단수명화	TRU	핵변환으로 단수명화
I, Tc		Tc, 백금족(Ru, Rh, Pd 등)	유효이용 Tc는 핵변환
Sr, Cs	냉각후 지층처분	Sr, Cs	냉각후 지층처분
FP(단수명)	Fixation(고화체?), 처분	그 밖의 원소	유리고화체 처분

국내 추진파의 주장 ¹⁾		Canister	일본 경제산업성의 발표 ²⁾	
Thermal Recycle	고속로	원자로	Thermal Recycle	고속로/ADS Recycle
N.A	20분의 1	부피의 감소	약 5분의 1 (약 0.22)	약 7분의 1 (약 0.15)
약 만년	약 300년	독성기간 감소	약 8000년	약 300년
10분의 1	1000분의 1	100,000년	약 8분의 1 (약 0.12)	약 240분의 1 (약 0.004)
N.A	100분의 1	발열량	N.A	N.A
N.A	100분의 1	최종처분장 면적(1)	약 3분의 1	약 4분의 1 ³⁾

1) 국내의 주장은 처분장의 관리기간을 300년이하

2) 일본에너지청(2013.5) ;JAEA의 자료(2014.2), (1)은 Canister,

3) MA의 변환과 Sr-Cs의 100~130년후의 분별폐기의 사례이다.

①FP의 분리와 MA의 변환, ②Sr-Cs燒成體의 300년 냉각후의 조밀저장,

③P&T 공정의 발생고화체의 60년냉각으로 100분의 1(축소가능성)

P&T의 검증

1. 완전분리(**Partitioning**)은 불가능

(1) 현재, 群(**그룹**)분리(3~4분류)

(2) **원소**분리

(3) **핵종**분리 → 레이저 기술개발 ?

2. 변환(**Transmutation**)장치의 실현가능성 ?

(1) SFR 또는 ADS의 기술적 실현가능성

(2) 실용화(경제성 및 안전성 등)의 성립가능성

균질(均質)사이클

1. 균질사이클

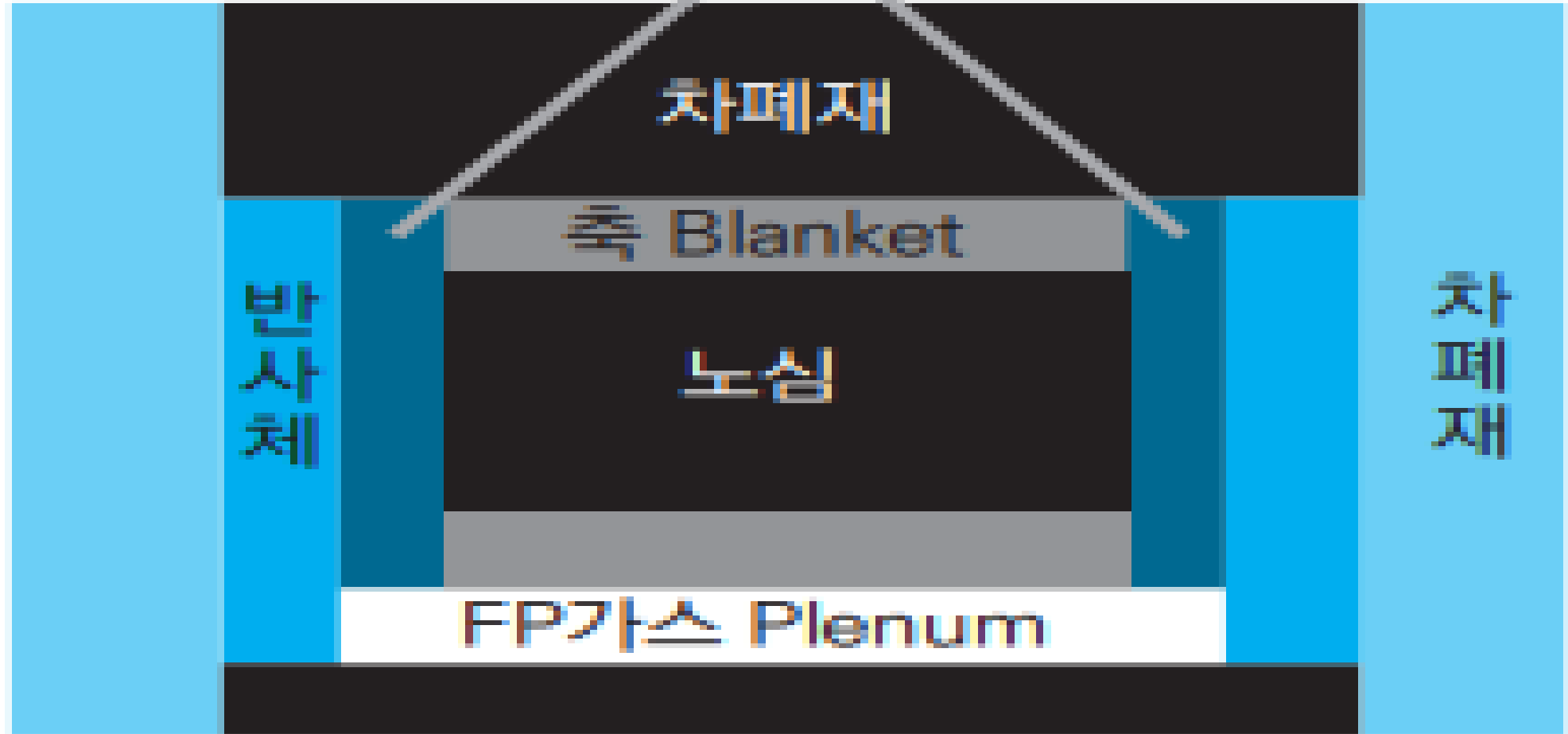
- (1) 노심연료속에 MA(+ RE)를 균질하게 포함시킨다.
- (2) 건식재처리의 금속연료는 **균질사이클로만**
- (3) MA비율은 **5%이하로**

2. 비균질사이클

- (1) MA를 타킷연료로 만들어(드라이브 연료는 별도), 노심속 또는 주변의 블랭킷(Blanket)에 장착한다.
- (2) 고속로의 타킷연료의 MA비율은 **20%정도**
- ❖ **ADS이용(파쇄)**의 경우, **50 ~ 80%정도까지**

균질로

경 Blanket



1. 환경친화성

A. TRU의 핵변환

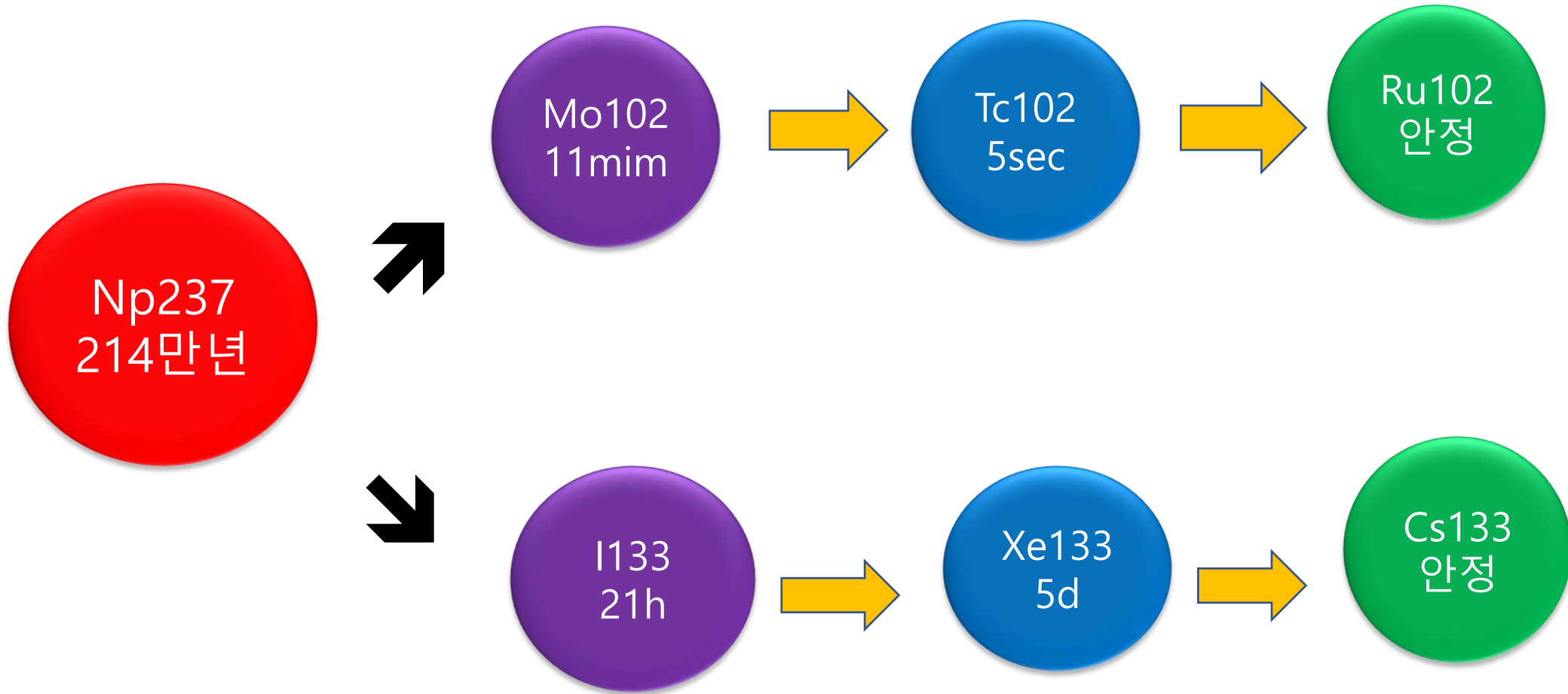
【핵적특성】

- ❖ 遲發중성자의 비율이 낮다.
- ❖ 장수명핵종으로, 高발열, 高 γ 선강도, 高중성자선강도(자발핵분열 + ($\alpha.n$))

【MA, Minor Actinides】

Np237(2.144×10^6 년), Am241(432.2년), Am243(7370년),
Cm242(162.8일), Cm243(29.1년), Cm244(18.1년), Cm245(8500년)

핵변환(MA) → 핵분열



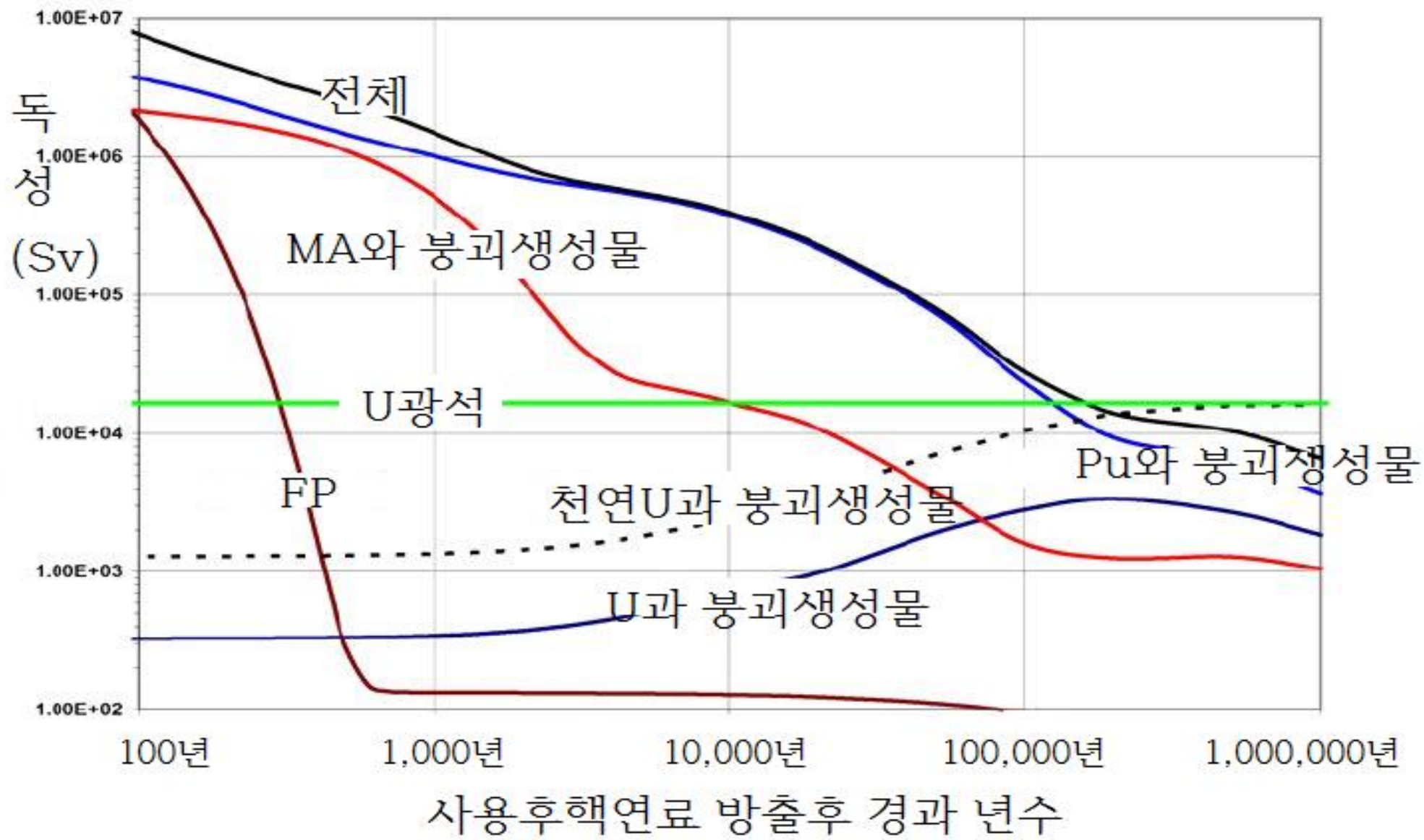
TRU의 특성

	발열 (W/g)	γ 선강도 (γ / g · s)	중성자선강도 (n/g · s)
Pu238	0.56	3.0×10^6	36000
Pu239	0.002	1.1×10^8	96
Pu240	0.007	3.9×10^6	1300
Pu241	0.004	1.2×10^7	1.23
Np237	0.0002	7.3×10^6	0.9
Am241	0.11	4.9×10^{10}	7000
Am243	0.007	5.5×10^9	540
Cm244	2.8	6.9×10^8	1.2×10^7

TRU(함유량/t)

45,000MWd로 3년연소,4년냉각 4년냉각(1,000kg)-

핵종	반감기	$\mu\text{Sv}/\text{k Bq}$	함유량
Pu238	87.7년	230	0.3kg
Pu239	2.4만년	250	6kg
Pu240	6,564년	250	3kg
Pu241	14.3년	4.8	1kg
Np237	214만년	110	0.6kg
Am241	432년	200	0.4kg
Am243	7,370년	200	0.2kg
Cm244	18.1년	120	60g



분리효율과 변환효율의 한계

1. (일본) TRU 회수(분리)율---상정
→ Am, Cm > 99.998%, Np > 98.2% ---
2. Cycle마다의 Loss

3. 낮은 변환효율

(일본) MA의 변환효율 45~50%(실험실내의 기대치)

- ❖ MA의 변환효율 약 14%(금속), 12%(산화물)/년
- ❖ Am241의 변환율은 14~21%로, 상한치를 반영해도, 반감기 때문에 누적량은 증가
- ❖ MA의 장착은 변환전용ABR의 금속연료에서도 상한 5%(균질사이클) 정도

TRU의 변환확률(%)

PLENTIFUL ENERGY, The Story of the IFR, Yoon Il Chang,

	Thermal spectrum	Fast spectrum
Np137	3	27
Pu238	7	70
Pu239	63	85
Pu240	1	55
Pu241	75	87
Pu242	1	53
Am241	1	21 ?
Am242m	75	94
Am243	1	23
Cm242	1	10
Cm243	78	94
Cm244	4	33

- ❖ Am243과 Cm244는 고속로에서도 핵분열을 거의 하지 않는다.
 - 프랑스의 ASTRID은 변환대상은 Am만
(Cm은 비열량이 크고, 중성자방출량도 많기때문)
- ❖ 복수의 SFR 또는 ADS가 불가결
 - 경제성, 안전성, 친환경성 ???
- ❖ 복수회에 걸친 장기 연소가 불가결

Nuclear Wastes: Technologies for Separation and Transmutation, Washington, D.C., National Academies Press (1996)

- ❖ 재고량과 새로운 생성량을 고려하면, 완전연소는
몇백년이상 → 막대한 비용과 피폭 리스크 증가

Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Experience and Lessons from Around the World

-Report of the International Panel on Fissile Material(p.15)-

According to a comprehensive study by the U.S. National Research Council published in 1996, however, even with repeated recycle and fissioning of the transuranics in fast-neutron reactors, it “would take about two centuries ... to **reduce** the inventory of the [transuranics] to about **1%** of the inventory of the reference LWR once-through fuel cycle.” The study also concluded that this would be extraordinarily costly.

B. LLFP의 핵변환(포획)

(1) 선택기준 → 생성량, 발열량, 환경부하, 기술적 가능성

(2) LLFP는 핵분열을 하지 않는다 → 열중성자가 효율적

❖ (n, γ) 는 열중성자가 적합하다.

❖ $(n, 2n)$ 는 보통 고속중성자가 적합하다.

(3) SFR이용으로 핵변환(포획)

❖ 고속중성자의 경우, 변환대상(Target Pin) 주위에 감속Pin을 두어야 한다. → 비용증가, 기술개발

★ 감속Pin의 예, **Zr-H**

<FPs생성비율⇒확률> FP의 약 1할이 LLFP

(1) 주요원소 ⇒ 28~66까지의 **약 40원소**

(2) 66~166의 질량수로 **약 100 종류**

→ 약 85%의 확률로 질량수 90~100, 135~145

(3) 대부분의 60여종류는 0.1%의 비율이나,
⇒ Sr90(5.8%), Xe133(6.6%). Cs137(6.2%),
I131(3.1%), Xe135(6.3%)

(4) 대부분은 반감기 90년이하

❖ **Cs137, Sr90의 변환은 곤란하다**

→ 포획단면적이 작아 변환하면, 반감기보다 더 길어진다(Sr90의 경우 100년)

주요 LLFP(함유량/t)

피폭저감(I129, Cs135, Se79, Zr93), 잠재적유해성(Tc99, Sn126)

	반감기	$\mu\text{Sv}/\text{k Bq}$	함유량
Se79	29.5만년	2.9	6g
Sr90	28.8년	28	0.6kg
Zr93	153만년	1.1	1kg
Tc99	21.1만년	0.64	1kg
Pd107	650만년	0.037	0.3kg
Sn126	10만년	4.7	30g
I129	1,570만년	110	0.2kg
Cs135	230만년	2.0	0.5kg
Cs137	30.1년	13	1.5kg

초기의 방사능과 발열량

- ⇒ Sr90, Cs137---HLW 발열량의 약 4할
- ⇒ 물에 녹기 쉽다(용해성-가용성)

장기의 방사능과 발열량

- ⇒ 백만년까지는 LLFP, 그 이후는 TRU가 지배적
 - ❖ ~1500년은 Am241가 지배적
 - ❖ 피폭에서는 I129가 지배적
- ⇒ FP의 약 1할이 LLFP(반감기 30년이상)이다.
 - ❖ 지하수의 경우, Se79(29.5만년), Cs135(230만년)과 딸 핵종

변환대상의 LLFP

★ 피폭방지 \Rightarrow I129, Cs135, Se79, Zr93

★ 잠재적 유해도 \Rightarrow Tc99, Sn126

A. **Tc99** (최대변환효율, 16% ?)

(n. γ)Tc100(15.8s) \rightarrow β \rightarrow **Ru100**

❖ Ru100(n. γ) \rightarrow Ru101 or Ru102 (안정핵종)

❖ Ru103(방사성, 39.26d) \rightarrow Rh103 (안정핵종)

❖ **비교적 발생량이 많다.**

B. **I129**

(n. γ)I130m(9.0min) or I130(12.36h) \rightarrow β \rightarrow **Xe130**

❖ Xe130(n. γ) \rightarrow Xe131, Xe132 (안정핵종)

or Xe131m, Xe133, Xe133m(11.84d)

❖ **고온에서 안정된 화학형태(화합물- ex. YI_3)의 선정?**

C. **Cs135** ⇒ 핵변환 곤란

(n.γ)Cs136(13.16d) → β → **Ba136**

❖ Ba136 → Ba137 or Ba138,

Ba137m, Ba139(단수명핵종)

❖ **Cs135**(약 15%, 나머지 Cs133과 Cs137가 반씩)

→ Cs133의 2회의 (n, γ)로 오히려 증가

→ 핵종(동위원소)분리가 불가결

D. **Zr93**(n.γ) → **Zr94**

E. **Sn126**(n.2n)

Sn125(9.6d) → β → Sb125 (2.8y) → β → **Te125**

SFR와 LLFP(일본의 시뮬레이션)

A. SFR 1기(MOX연료)

- ❖ 100만kWe급(LWR) 3.6기분의 I129, 1.5기분의 Tc99
- ❖ 100만kWe급(LWR) 5~6기분의 MA 변환가능
(최근, 2015) SFR은 자기발생량의 I129, Tc99의 변환가능

B. ADS 1기(窒化物연료, 25만kWe)

- ❖ 100만kWe급(LWR) 10기분의 MA 변환가능
→MA의 핵변환→ 최종처분장 **면적 25%**로 축소
- ❖ 100만kWe급(LWR) 1~2기분의 I129 및 Tc99
(최근, 2015)100만kWe급(LWR) 10기분의 I129의 변환은 가능하나,
Tc99는 발생량이 많아, 핵변환곤란도

직접처분과 분리·변환

❖ 독성비교 → 우라늄광석(10만년), 천연우라늄(33만년)

❖ 직접처분시의 1년째의 독성이 기준

1. 방사성 독성 = 잠재적 유해도

(1) 경구섭취 → 소화기계통 섭취 (2) 흡입섭취 → 호흡기계통 섭취

2. 최종처분장 면적

(1) 기준은 무게가 아니라 **부피**이다.

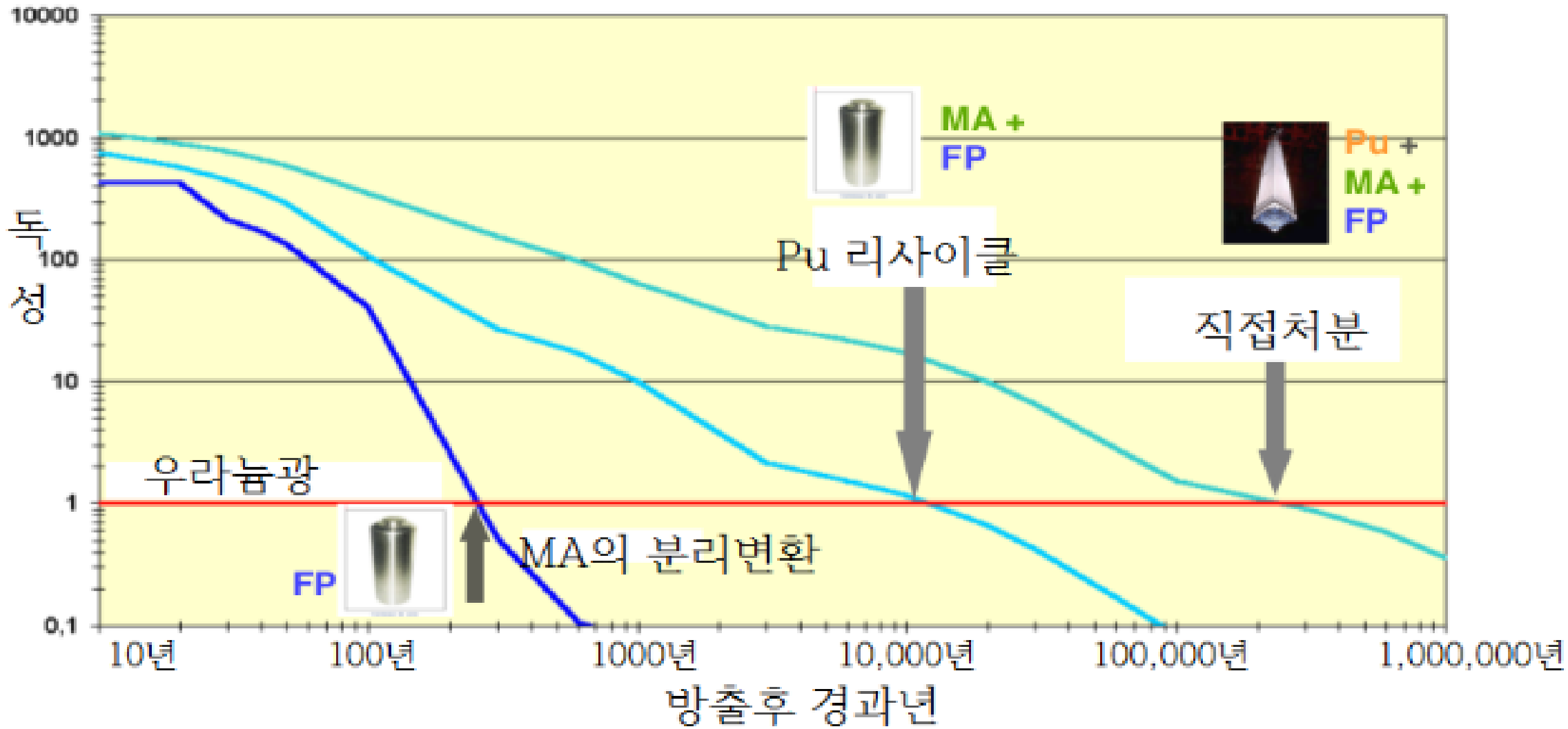
(2) **발열** 및 **재임계방지**를 위해 **간격**

1) 지하갱도의 축방향 저장은 간격무시

→ 보관장소(구멍)의 기계적 강도가 문제

2) 지하갱도의 횡방향 저장은 간격고려

잠재적 유해도(독성)의 저하



처분장의 Risk(유해도)

1.직접(인간침입-Human intrusion) 시나리오

→채굴 등에 의한 MA의 흡입섭취 Risk

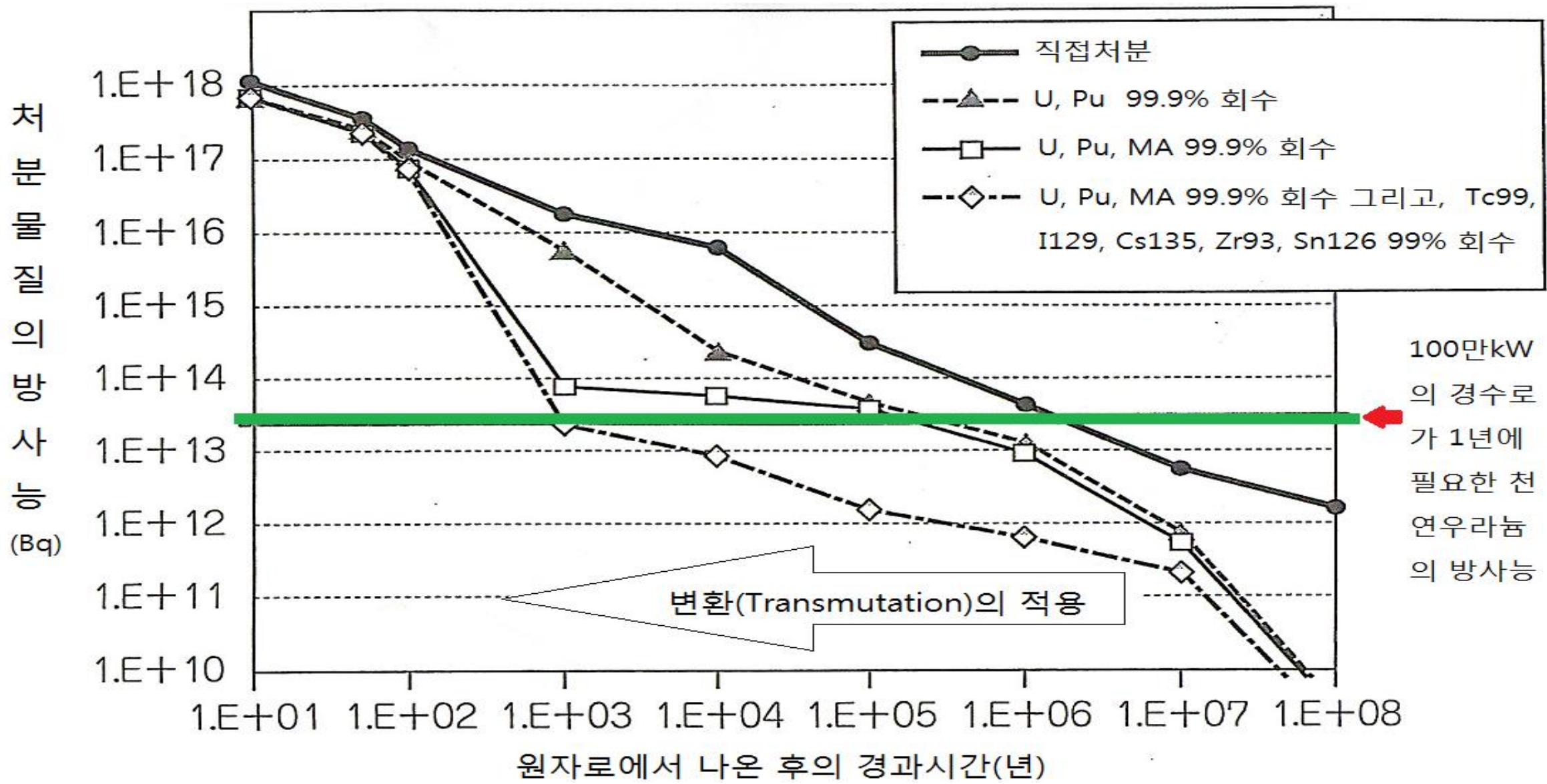
2.지하수 시나리오

→지하수에 녹아 지상으로 유출된 경우의, 경구섭취 Risk

→FP의 가용성 및 비흡착성 ⇔ MA의 難溶性

❖선량의 지배핵종은 Cs 등의 FP로서, Actinoid핵종의 회수는 최대선량의 저감에 그다지 기여하지 않는다.

방사능의 쇠퇴기간



천연우라늄과 비교

2015년-ORIGEN 2Code(방사능) -취발성 FP 무시-

1. TRU 회수율 99.9999% + 냉각기간 300년 < **Natural Uranium**
❖ Se, Tc, Zr, Sn, Cs의 90% 회수 필요(2004년자료)
2. TRU 회수율 99.999% < **Natural Uranium**
❖ 냉각기간(약 1,500년후에 낮게 된다)
3. TRU 회수율 99%, 99.9%, 99.99%의 경우,
❖ 3,000년냉각후에도 > **Natural Uranium**

RECYCLING OPTION SEARCH FOR A 600-MWE
SODIUM-COOLED TRANSMUTATION FAST REACTOR,
YONG KYO LEE and MYUNG HYUN KIM(2015년, p.56)

❖ Simulation에 불과하다(LLFP의 회수율?)

→ 게다가 습식재처리에 비해, 건식재처리는 FP제거율이 떨어진다.

★ WNA(2015)

(1) BNFL-Cogema 연구(2001) → Actinides 제거율(99%)

(2) 미국의 연구

→ Actinides 제거율(99.9%)

→ Tc99. I129의 제거율(95%)

Alan E. Walter, Donald R. Todd and Pavel V. Tsvetkov, Fast Spectrum Reactor, Springer, 2015

TRU회수율 99.8%이상이 아니면 300년 축소는 불가능

처분장 면적 축소

MA의 P&T 후(일본 추산)

- A. LWR(UO₂)의 경우 → 약 80%로 축소 가능
- B. LWR(MOX)의 경우 → UO₂의 2배이상의 면적이 필요하나, 약 30%로 축소 가능
- C. SFR(MOX)의 경우 → UO₂의 30%이상의 면적이 필요하나, 약 40% 축소 가능

- ❖ P&T 를 하지 않으면, Thermal recycle 과 SFR recycle, 둘다 처분장 면적 축소는 안된다.
- ❖ LLFP의 분리도 필요하다.

발열량저하와 FP의 P&T

-지하갱도의 橫방향 처분-

1. 부피 및 처분간격은 **발열량**이 기준이다.
2. 발열량 저감에는 MA의 분리·변환(낮은 효과) 보다 **Sr·Cs의 분리**가 유효하다(발열량 약 40%저감)
 - ❖ Sr/Y-90 및 Cs/Ba-137의 발열량이 **각각 MA의 약 4배**에 달한다.
U/Pu는 무시할 수 있는 정도
→Sr의 회수로 발열저감효과는 있으나, 안전평가상의 효과는 낮다(없다).
 - ❖ 그러나, 분리한 Cs·Sr에도 미회수의 MA, Pu, LLFP가 포함되어 있으며, 게다가 Cs에는 동위원소 **Cs135(약 290만년)**가 있다.
따라서, **Cs135의 (핵종)분리·변환을 충분히 기대하지 못하면,**
분리·변환을 한 Cs도 지층처분해야 한다.

LLFP의 변환은 과연 가능할 까?

1. 동위체(핵종) 분리의 완성 은 ?
 - ❖ Cs133의 변환으로 Cs135(약 230만년)의 생성증가
→ 2회의 (n,γ)로 Cs135가 더 많아 진다.
 - ❖ 낮은 분리효율로 발생량은 그다지 변하지 않고,
낮은 변환효율때문에 오히려 양이 증가한다.
2. 2차 방사성폐기물이 증가한다.
 - ❖ Sr, Cs의 분리로 오히려 발생량(고화체)가 증가
→ 단기적으로는 방사능증가(작업원 피폭, 주변환경)
3. 수습기의 SFR가 필요하다→SFR의 짧은 수명
4. 낮은 변환효율로 변환을 반복해야 한다.

1. 중성자 에너지 수 KeVt~ 100KeV
2. 중성자 Flux(1×10^{16} [n/cm²/S])
3. 산화물 연료 → 금속 연료는 산화물보다 변환효율이 1~2할 높다.

	Sr90	Cs135	Cs137		I129	Tc90
핵분열수열(%)	2.0	7.5	6.5		1.5	6.0
중성자포획 단면적(Barn)	0.01~0.03	0.1~1.0	0.01~0.1		0.2~2.0	0.5~3.0
장착량 10%의 변환시간 (년)	106~317	3.2~32	32~317		1.6~16	1.1~6.3
핵변환율 (%/照射기간)				감속재 무	21.5	20.7
				감속재 유	21.3	24.3
조사기간(년)				감속재 무	28	←
				감속재 유	12	←
최대고속중성자조사량($\times 10^{23}$ n/cm ²)				감속재 무	6.3	5.8
				감속재 유	2.1	1.9 ₁₀₇

I129, Tc99의 변환효율

(중성자조사량, $\times 10^{23}n/cm^2$)

	감속핀 무		감속핀 유	
	I129	Tc99	I129	Tc99
화학형태	NaI	Tc	NaI	Tc
감속재비율			50	70
照射기간(y)	28	20.7	좌동	좌동
변환율(%/照射기간)	21.5	20.7	21.3	24.3
변환량/생성량	1.12	1.17	1.09	1.12
최대고속중성자조사량	6.3	5.8	2.1	1.9

귀금속FP및 Tc

1. 발열량은 MA와 비슷하다.
2. 발열량의 대부분은 단수명의 Ru106으로,
10년정도의 냉각후에 고밀도 처분이 가능하다.

그러나, Tc99과 Pd107을 포함하므로 심지층 처분이 필요하다. 대폭적인 처분의 합리화는 기대할 수 없다.

SF의 70년냉각 ≡ 처분장의 40% 축소

SF의 200년냉각 ≡ 처분장의 75% 축소

Managing Spent Fuel from Nuclear Power Reactors: Experience
and Lessons from Around the World
-Report of the International Panel on Fissile Material(p.68)

주의

추진파들은 변환을 **소멸** 이라며, 마치 방사성물질이 완전히 없어지는 것처럼 사실을 호도하고 있다.

→ 핵변환이 가능해도, 다른(단수명) 핵종으로 남아 있다.

→ 번역한 일본조차 2000년이후는 [소멸]을 사용하지 않고, [변환]으로

❖ Transmutation 또는 Burn

표면선량율의 저감효과

지층처분시에

핵분열생성물(FP)의 γ 선, α 붕괴 및 자발핵분열에 의한 중성자선이 중요하다.

특히 중성자선의 영향이 커므로, Actinoid의 회수로 고준위방사성폐기물의 취급은 용이하게 된다

(작업원의 피폭저감).

2. 안전성 검증-陽의 보이드 효과 악화

1. MA첨가로-----陽의 보이드 효과가 증가

(1) 도플러 계수 → 2분의 1 ~ 3분의 1 저하

1) MA 5% 장착으로 도플러계수 3할 저하,

2) MA 2% 장착으로 도플러계수 2할 저감

(2) Na 보이드계수 → 10 ~ 50% 증가한다

1) MA 5% 장착으로 Na보이드계수 3~4할 증가(Am241)

2) MA 2% 장착으로 Na보이드계수 2할 증가

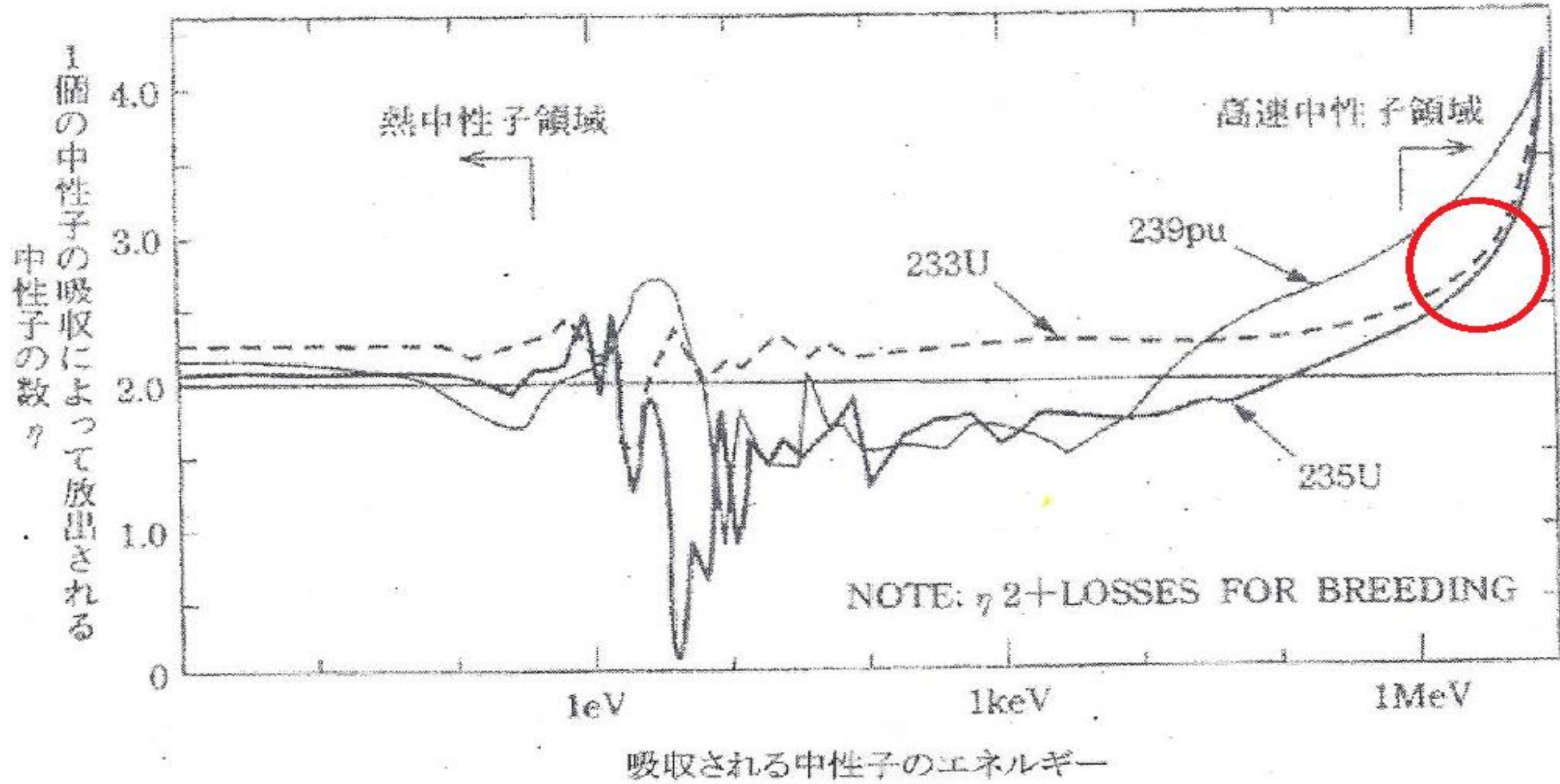
❖ MA의 핵분열은 역치(閾値)반응 → 1MeV이상의 중성자

❖ 펌프고장, 반응도 삽입 등으로 냉각재(Na)온도 상승으로 밀도 감소 및

보이드화가 일어나면, 1MeV이상에서

중성자의 증가(핵분열 급증) → 출력상승 → 냉각재온도 상승

η 의 증가



❖ U238의 장착제한 → 새로운 MA생성 방지

a) 지발중성자의 저감으로 노심 제어곤란

b) 지발중성자비율이 일반 고속로의 0.4%보다 낮아져 변환중심의 고속로 즉 변환로에서는 0.2%로 반감된다. 노심의 제어 곤란 ↑

c) U238도 1MeV이상에서 핵분열한다.

2. 따라서, MA량을 제한할 필요가 있다.

현재의 5%도 均質Cycle의 경우로, Void 반응도가 겨우 10 \$ (목표제한치)이내로 → 추산치

→ 일본 문쥬는 Am을 최대 2%정도 ❖ Am241,

❖ Am243, Np237, Cm244 → 양의 반응도 효과

❖ Am242m, Cm245 → 음의 반응도 효과

3. 변환과정에서 **단수명핵종의 방사능 증가**
4. 높은 연소도에 따른 **Swelling(팽배)문제**
5. **He 대량 생성** → 연료 Cm242 및 Pu238 α 붕괴

❖ Na **보이드반응의 억제**

(1)노심의 반경을 크게하고, 노심높이를 낮춘다(팬케이크).

→중성자 누출의 촉진

(2)블랭킷의 일부 및 전부 삭제, (3)친물질의 저감

❖ 실증로(30만kWe)→원형로(10만kWe)로 축소

❖ MA연료의 발열은 연료제조, 수송 등의 취급시에 영향

→발열원은 Pu238, Am241, Cm2441

ADS 개발

1. U과 Pu를 거의 포함하지 않으므로, MA의 생성이 거의 없다
 - (1) 핵파쇄중성자 → 핵변환 및 핵분열
 - (2) 핵파쇄중성자 → 약 30개로
2. 높은 변환율 ⇨ 100만kWe급(LWR) 10기분의 MA 변환
3. 높은 안전성(가속기의 정지→미임계로, ADSR)
 - (1) Pb-Bi는 화학적으로 불활성
 - (2) 지발중성자, 냉각재의 Void효과(負) 등의 문제가 상대적으로 적다
 - (3) 중간열교환계 불필요,
 - (4) 새로운 MA의 생성이 거의 없다.

3. 핵확산의 저항성

TRU 및 FPs 등이 혼합된 Pu로 핵비확산성 우월?
-강력한 γ 선!-

추진파는,
재처리후의 Pu은 , TRU, FP(특히 RE)와의
群분리이므로, Pu의 **단독추출** 이 어렵다.
즉, 핵무기의 원료로는 부적합하다,고 주장

Pu의 단독추출, 가능하다

- (1) 짧은 조사기간의 연료 및 깨끗한 용융염의 이용
❖ 경수로에서는 3~6개월이내의 照射(핵병기급)
- (2) 습식보다, 분리에 비용과 시간이 상대적으로 더 걸릴 뿐이지, 절대적인 핵비확성은 아니다.
- (3) 핵분열의 방해물질인 Am, Cm 등의 분리가 불가능한 가?
- (4) 금속연료는 산화물연료보다 핵무기의 원료에 적합하다.
- (5) 재처리전보다 방사능이 낮아져, 범죄집단의 접근이 용이하다 ⇒ Cs137 및 Sr90의 제거(보관)
- (6) Eu154(약 8.6년), Ce144(약 285일)의 짧은 반감기
❖ Eu는 전해질에서 제거, Ce는 거의 없는 상태

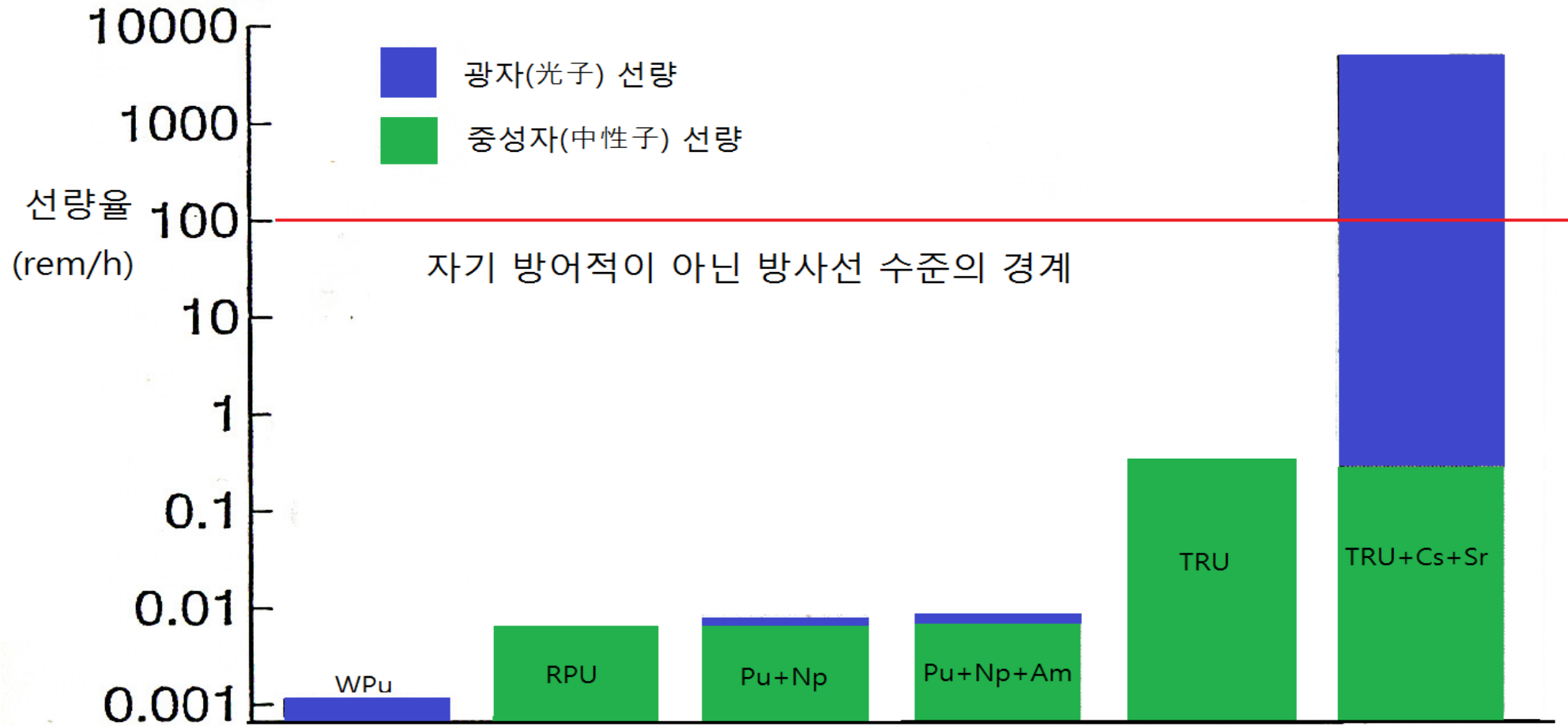
절대적인 핵비확성은 없다

1. 발열량의 문제 → Am과 Cm은 화학적 성격이 매우 비슷하다
Am₂₄₁, Cm₂₄₄ > 핵무기급Pu
❖ 문제해결의 폭탄구조의 존재
2. 자발핵분열의 중성자에 의한 조기(早期)폭발
❖ Pu₂₃₈, 240,242, Cm₂₄₂, 244, 246
→ Pu량의 감소(폭축속도향상, 균일폭축기술)로 가능
3. 방사선량의 저감 → Cs, Sr의 제거
4. 대체핵물질 → Np₂₃₇(포신형은 가능) 및 Am에 대해,
1998년에 IAEA가 확인(FSV)
→ Np₂₃₇는 Pu₂₃₉과 유의량도 유사
5. MUF(불명물질량)의 발생과 계측방법?

사용후 핵연료와 TRU혼합물의 방사능 -

핵물질에의 접근 가능성 $1\text{Sv at } 1\text{m}$ -

Dose rate from 4.4kg transuranics through a canister



WPu(핵무기급 Pu), RPu(원자로급 Pu), Np(넵투늄), Am(아메리슘), TRU(초우라늄 원소)

FBR SF의 組成(%)

Pu 동위체	FBR		LWR	핵무기
	노심+축Blanket	경Blanket		
Pu238	2	0	2	0.07
Pu239	62	98	58	93
Pu240	24	2	24	7
Pu241	8	0	11	0.7
Pu242	4	0	5	

일본의 재처리(후행주기) 철퇴론

1. 2002년, 경제산업성과 전력회사의 철퇴협의

- ❖ 경제성 결여때문에 논의 시작
- ❖ 당시 전력회사들의 사고은폐 사실의 폭로로 전력회사 간부들이 사직하여 논의 좌절

2. 2011년 후쿠시마사고후, 일본정부의 철퇴론

- ❖ 기득권자들의 저항(특히, 전력업계출신 의원)
→ 투자손실의 보전, SF의 정부인수책임 등
- ❖ 아오모리縣(재처리, 임시처분장)의 저항
- ❖ 일본의 國策?(군사목적-재처리기술·인력과 시설의 유지) 등의 이유

정지중의 롯데쇼재처리공장 유지비/년

	주요항목	억원
1	재처리공장의 점검비	200
	SF의 관리비	
2	폐액의 분석에 관한 위탁비	200
	방사선 관리에 관한 위탁비	
	직원(약 1500명)의 인건비	
3	재처리기술의 연구비	172
	재산세	
4	용자금 이자	409
	합계	1100



국회의 예산승인은 합리적였던가

1. 고속로 예산(연구비)

(1) 승인 → 1,204억 원(2012~15년), 430억 원(2016년), 457억 원(2017년)

(2) 계획 → 18년(590억 원), 19년(562억 원), 20년(539억 원)

2. 한정된 예산 ⇔ 정책우선도?

(1) 실현가능성의 고려는?

1) 한·미연료주기공동연구(JFCS, 2011 ~ 20)의 결과후?

2) DUPIC 계획

→ 1997 ~ 2011년까지 480억 원 손실

3) 파이로프로세싱법

❖ 1997 ~ 2011년까지 3510억 원, 2017년(약 482억)

❖ 계획 → 18년(315억), 19년(330억), 20년(345억)

DFDF (DUPIC Fuel Development Facility)

- ❖ 최대 2kg/Batch (Batch당 10일)
→ 고온산화후의 분말(U_3O_8)을 ACPF로

DUPIC계획의 실패

Direct Use of spent PWR fuel in CANDU

- 1) 경수로의 사용후핵연료를 중수로의 핵연료로
(TANDEM → DUPIC)
- 2) 1992~99년(DUPIC)까지 488.46억원의 혈세낭비

(2) 기술계승 및 인재양성 주장

❖ 자짚기 기술

- 1) 핵연료조사(러), 2) 원자로 공동설계(ANL, 미)
- 3) 핵연료취급계통(프),
- 4) 기술제휴 및 자문(일본)
- 5) 기술도입(예정)→소듐취급(러시아), 폐로(일본)

(3) 실증로(30만kWe)→15만kWe→원형로(10만kWe)

❖ 예상비용→1조 7250억원(15만kWe)

❖ 2028년 운전?

3. 종합파이로 시설(상업규모-100톤/년, KAPF, Korea Advanced Pyroprocessing Facility)의 건설을 JFCS의 결과전에 시도할 가능성조차 부인할 수 없다.

❖ 예상비용→1조 1106억원

고속로의 핵연료 확보 가능성?

1. 산화물연료

(1) 20% 이상의 **고농축연료**(중,러) → **농축**

1) 고농축에 대한 미국의 **사전적 개별동의** 가능성?

2) 산화물연료 SFR의 변환율은 낮다.

(2) **MOX연료**(일,프) → **재처리**

1) 해외위탁재처리(현재 가능 → 프랑스와 **영국**)

2) MOX이용은 비합리적이고 명백한 **매국행위**

→ 경제성, 안정성, 친환경성 등 장점은 전혀 없다.

2. 탄화물연료(인도) 및 질화물연료 → **재처리**

3. **금속연료**(미) → **재처리**

❖ SF대상의 쉐공정에 대한

미국의 동의 가능성은 없다

예산확보와 혈세낭비

1. 가상적인 국제경쟁 및 결과의 과대포장

2. 예산 소화 → 국제학회·조사참가의 횡행(橫行)

→ 해외연구소와의 공동·위탁연구 증대

❖ 80년대, 일본PNC가 EBR-II를 이용한 공동연구비명목으로 지불한 금액은 약 30억円으로, EBR-II의 가동이 일본의 돈으로 행해지고 있다는 말까지

❖ 이론적으로 계산된 예측을 과학이라는 권위를 앞세워 예산을 확보하지만, 실현가능성의 여부에는 관심이 없어진다. → 결과책임은 전혀 지지않는다.

3. 재처리와 고속로 개발은  를 위한 것인가?

해외의 고속로 개발동향(2016.12)

1. 미국----고속로 개발계획은 없다.
 - (1) 소형PWR(소형모듈로, SMR)의 적극적인 개발
 - ❖ NuScale의 설계인가 신청→INL내에 건설
 - (2) 고온가스로(HTGR) 및 용융염로(MSR) 중심
2. 러시아---BN-1200(상업로)계획의 무기한 연기
3. 프랑스---ASTRID(실증로)개발의 방기
 - (1) 2019년이후의 설계비 확보?
 - (2) 운전개시가 2020년에서 2030년대로
4. 일본---2018년이후의 차후 추진계획 수립?
5. 중국(2만kWe 실험로 가동), 인도(50만kWe 원형로 완공)
군사용목적(IAEA 사찰대상외)

한·미연료주기공동연구(JFCS)의 의문점? -Integrated Recycle Test-

INL에서 실험하는 **실제의 사용후핵연료**는?

1. 미국의 경수로에서 나온 사용후핵연료(UO_2)---**미사용**
2. 미국의 **혼합산화물(MOX)**의 사용후핵연료

사용후핵연료의 조성(組成)에 있어 MOX와 UO_2 는 다르다. 예를 들면, MOX쪽이 Np는 적으나 Am, Cm는 오히려 많다.

❖국내에서는 MOX연료를 사용하고 있지 않다.

후행주기에 대한 제언

1. SF는 **중간저장**을 중심으로
 - ❖ 건식방법(Cask)으로 수십~수백년 저장
 - ❖ 이후 최종처분장으로 직접처분
2. 재처리와 고속로 개발의 **즉각 중지**
 - ❖ 연구는 실험실에서만
3. **해외위탁 재처리**는 백해무익한 **매국행위**
4. 원자력정책은 국민적 토론을 통해

기술의 "맹신과 낙관주의" 의 타파

수단과 목표의 본말전도!

1. 연구(?)를 위한 연구!

- ❖ 최악의 연구는 미리 정한 결론에 분석내용을 끼워 맞추는 것

2. 실용화의 선행은 연구개발을 왜곡

- ❖ 연구개발은 실용화 검증을 위한 시험이지만,
반드시 **실용화를 전제로 한 것은 아니다.**

3. 연구개발전략

- ❖ 다양한 연구 → 확증입수 → 실증단계
- ❖ 실용화의 여부는 연구성과에 근거하여 판단

IV. 맺는 말을 대신하면서

1. "불확실한 기술" 에 국민의 생명과 재산을 거는 "도박" 이다.
 - ❖ P&T는 최종처분기술의 대체물이 아니다.
2. Innovation은 "사회의 요구"에 적합해야 한다.
 - ❖ 기술개발만이 Innovation이 아니다.
 - ❖ 종합적 판단(知的 통합)
 - 대체안, 경제성, 지자체의 영향, 리스크, 환경부하 등
 - ❖ 제3자기관의 검증
3. 핵연료주기 완성 주장은 "제2의 신화" 의 창조 즉 환상(幻想)이다.
4. 일본, 독일 등의 실패로 부터의 교훈은 ?

대국민사기극

경청해 주셔서 감사합니다

