

사용후핵연료의 건식 캐스크 저장 및 직접 처분의 경제, 환경, 안전성 장점

프랭크 반 히펠

과학과국제안보프로그램, 프린스턴대학교

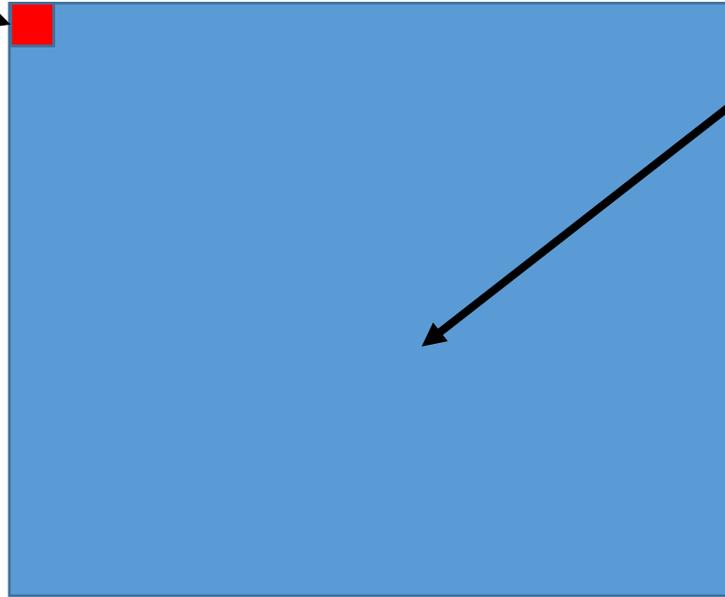
서울, 2019. 6. 3

개요

- 재처리에 대한 최초의 근거: 우라늄을 보다 효율적으로 사용할 수 있는 액체 나트륨냉각 플루토늄 증식로의 시동 연료
- 그러나 증식로는 비용 때문에 상업화되지 못했음
- 분리된 민수용 플루토늄은 사용되지 않고 누적되고 있음
- 프랑스와 일본은 경수로에서 플루토늄을 재활용하고 있지만 저농축우라늄 핵연료보다 10배나 비쌈
- 고속로의 새로운 근거는 방사성 폐기물 위험을 줄이는 것이었지만 이는 잘못된 견해
- 한편, 재처리공장의 실패로 인해 저장조에 사용후핵연료가 축적되면서 사용후연료 저장조 화재로 인한 엄청난 위험 초래
- 건식 캐스크 중간저장이 최소의 비용과 덜 위험한 전략

사용후핵연료로부터 플루토늄을 분리하는 재처리의 원래 이유는 고속 중성자 플루토늄 증식로에 시동 핵연료를 공급하기 위한 것

핵분열 연쇄
반응하는 U-235
(0.7%)를 경수로
핵연료로 이용하기
위해 3~5%로
농축.



핵분열연쇄 반응하는
플루토늄은 U-238에서
중성자 흡수에 의해
원자로에서 생산되며
재처리공장에서
화학적으로 분리

미국 원자력위원회의 “플루토늄 경제” 비전

고품질 우라늄 광석 자원의 U-235로는 많은 수의 원자로에 핵연료를 공급할 수 없다고 믿었음.

액체나트륨냉각고속로는 소비 한 것보다 더 많은 플루토늄을 만들어 U-238을 궁극적인 핵연료로 만들 수 있을 것.

평균적으로 지각 암석의 1톤에 함유된 U-238 평균 3그램의 핵분열은 9톤의 석탄 연소와 동일.

따라서 증식로가 지구의 지각을 슈퍼 석탄으로 바꿀 것

~ 연간 GWe 당 U-238 (plutonium) 1톤

동시에 이는 핵무기 100-300기를 만드는데 충분한 분량

그러나 경제적 환경은 플루토늄의 경제성에 불리하게 작용해 왔다.

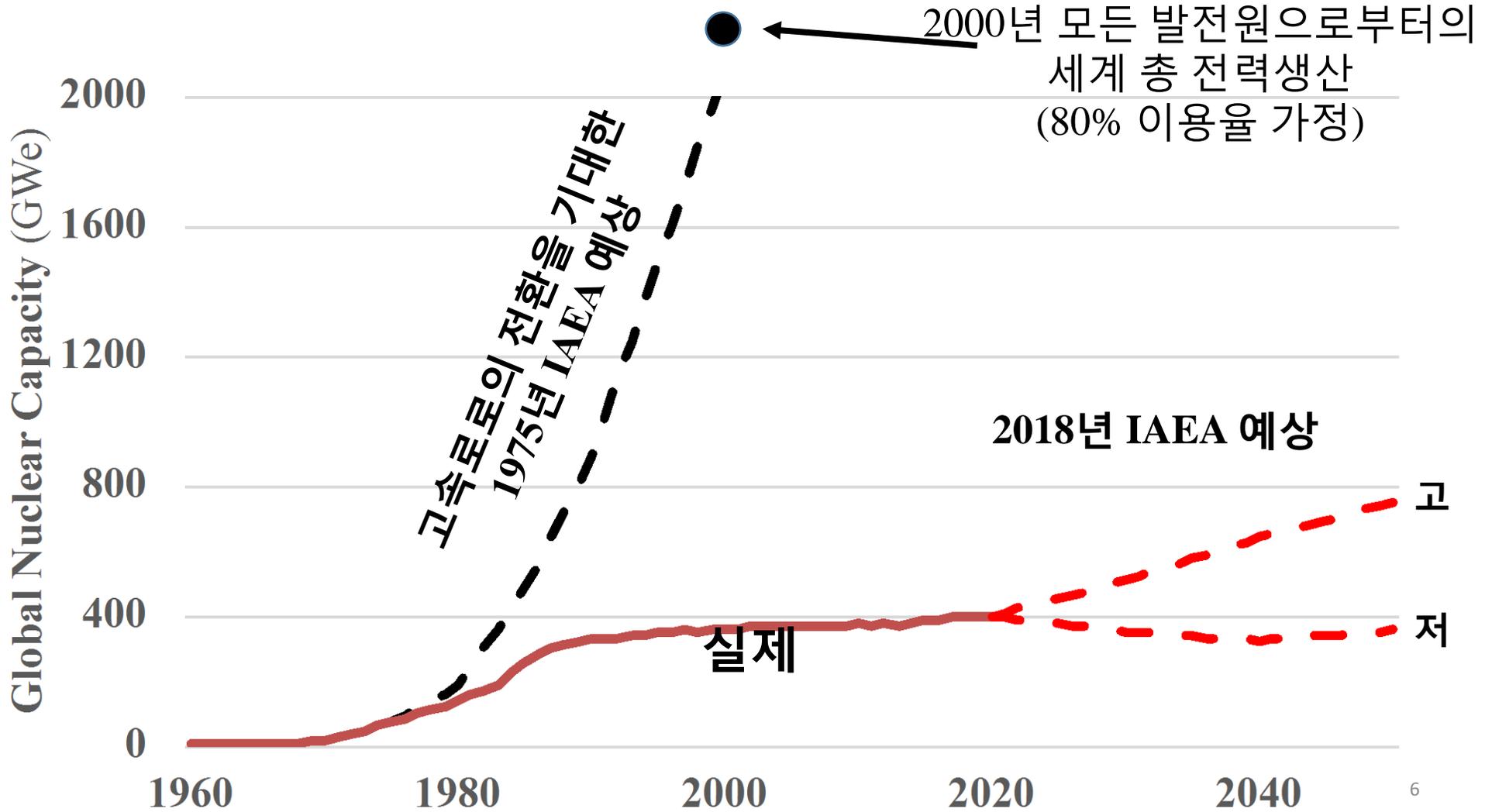
고속로는 비용이 많이 들며 건설 후 대부분 신뢰하기 어려웠음 첫 시연 이후 57년이 지났으나 여전히 경수로에 비해 경쟁력 없음

Grid-connected Breeder Reactors (country)	Power (MWe)	Lifetime	Lifetime capacity factor
Light-water reactors	~1000		~80%
Demonstration Fast Reactor (UK)	11	1962-1977	35%
Fermi-1 (US)	61	1966-1972	0.9%
Phénix (France)	130	1973-2010	40%
Prototype Fast Reactor (UK)	234	1976-94	18%
BN-600 (Russia, HEU-fueled)	560	1980-	76%
Clinch River Breeder (US)	350	Cancelled, 1983	cancelled
Superphénix (France)	1200	1986-98	6%
SNR-300 (Germany)	300	Cancelled, 1991	cancelled
Monju (Japan)	246	1995-2017	0%
BN-800 (Russia)	789	2015-	68%
China Exp. Fast Reactor (HEU fueled)	20	2011-	0%

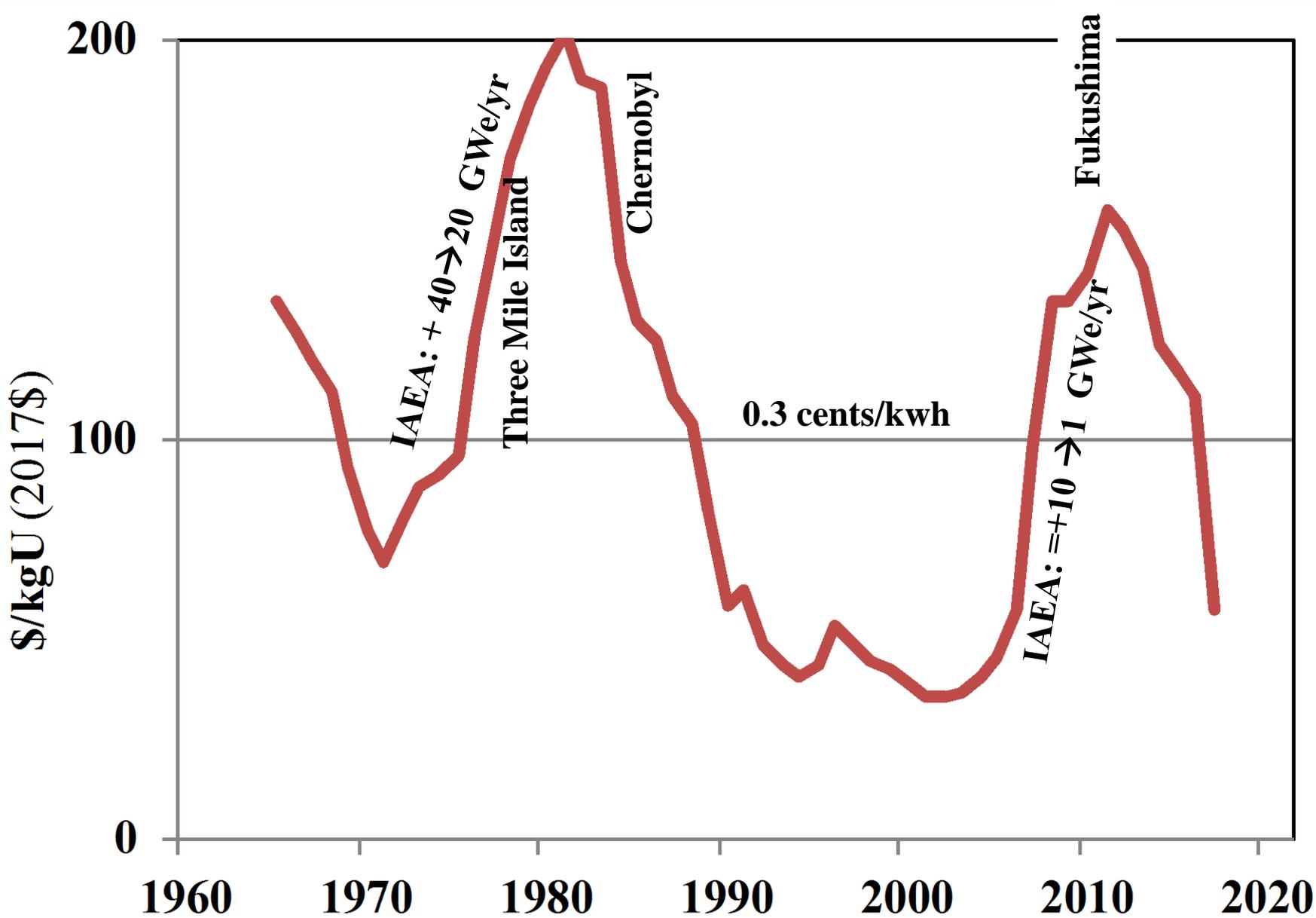
“건설 비용이 비싸고, 운영이 복잡하며, 사소한 오작동으로도 시스템 정지 기간이 길어지고, 수리가 어렵고 시간이 오래 걸림” – Rickover, 1957, 62 년전!

전세계 원자력발전용량은 정체상태, 우라늄은 풍부

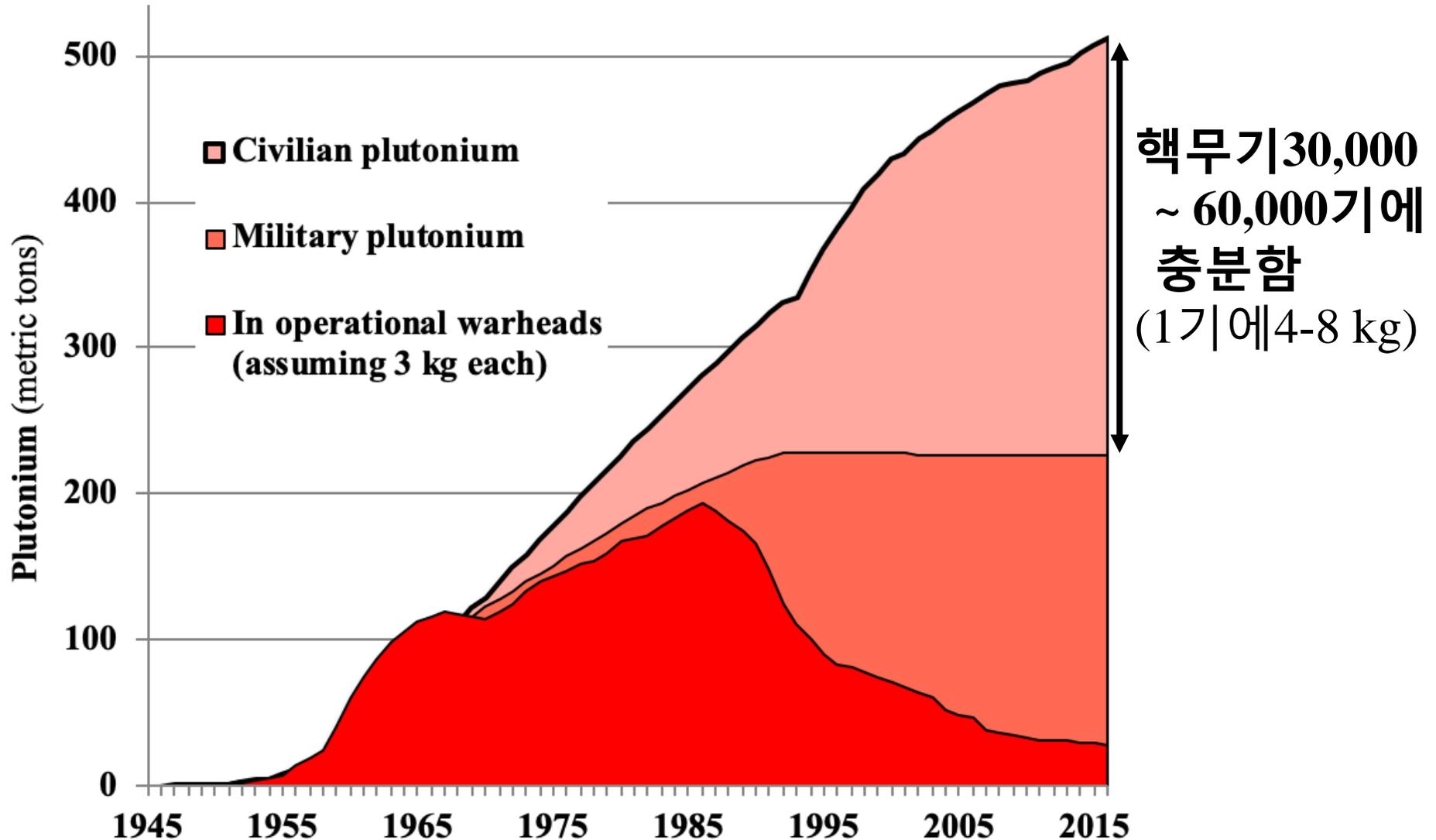
현재 단 2종의 고속로 원형(러시아) 외에는 인도와 중국에 각 1기 건설 중



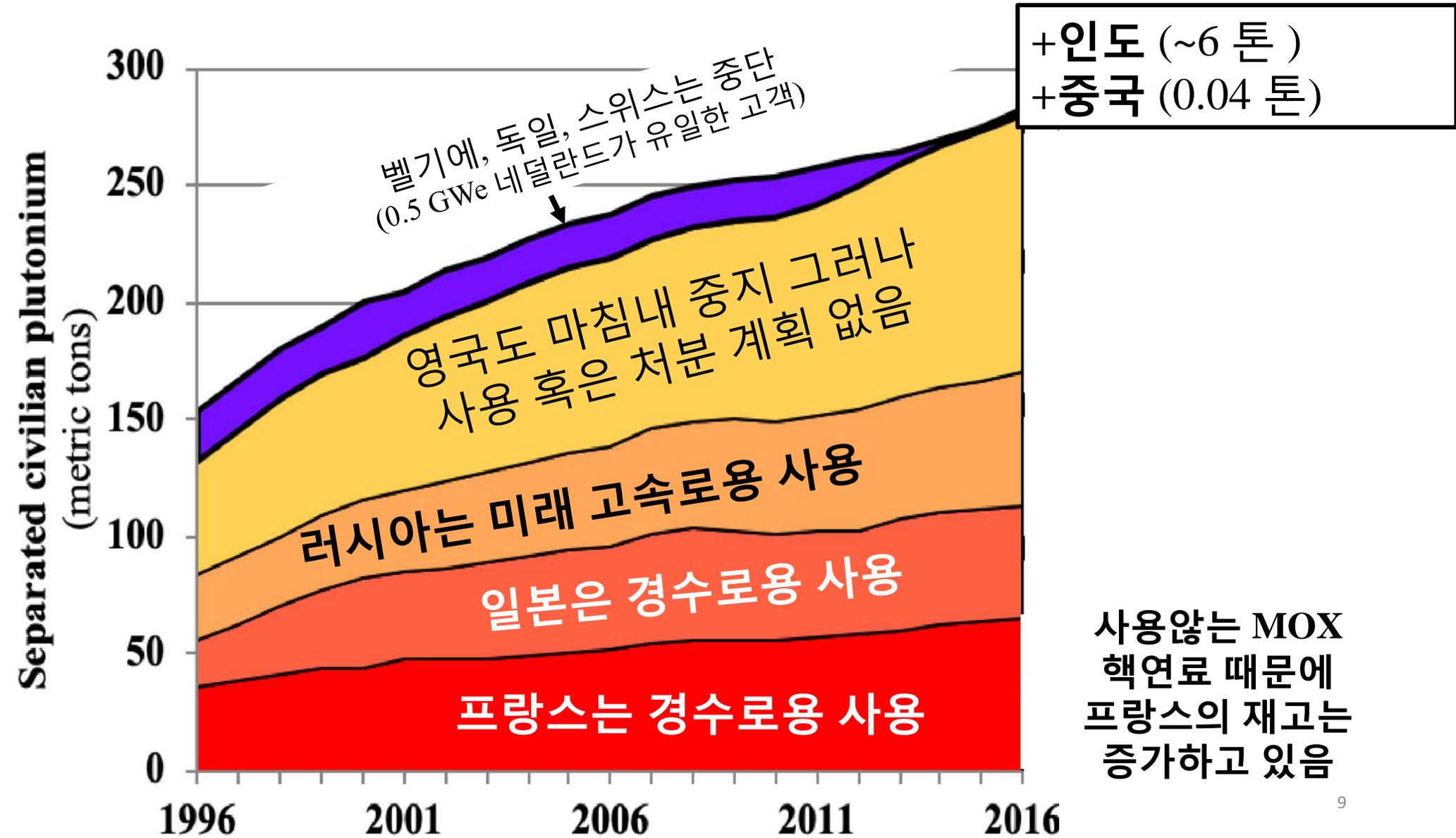
우라늄 가격의 장기 추세는 오르지 않음. 우라늄 가격절약으로
Pu 분리 비용과 고속로의 비싼 건설비용이 정당화되지 않음



냉전 이후 군사용 플루토늄은 정체되었지만, 고속로의 실패에도 불구하고 일부 국가에서는 정부 명령에 따라 민간 재처리가 계속되고 있음

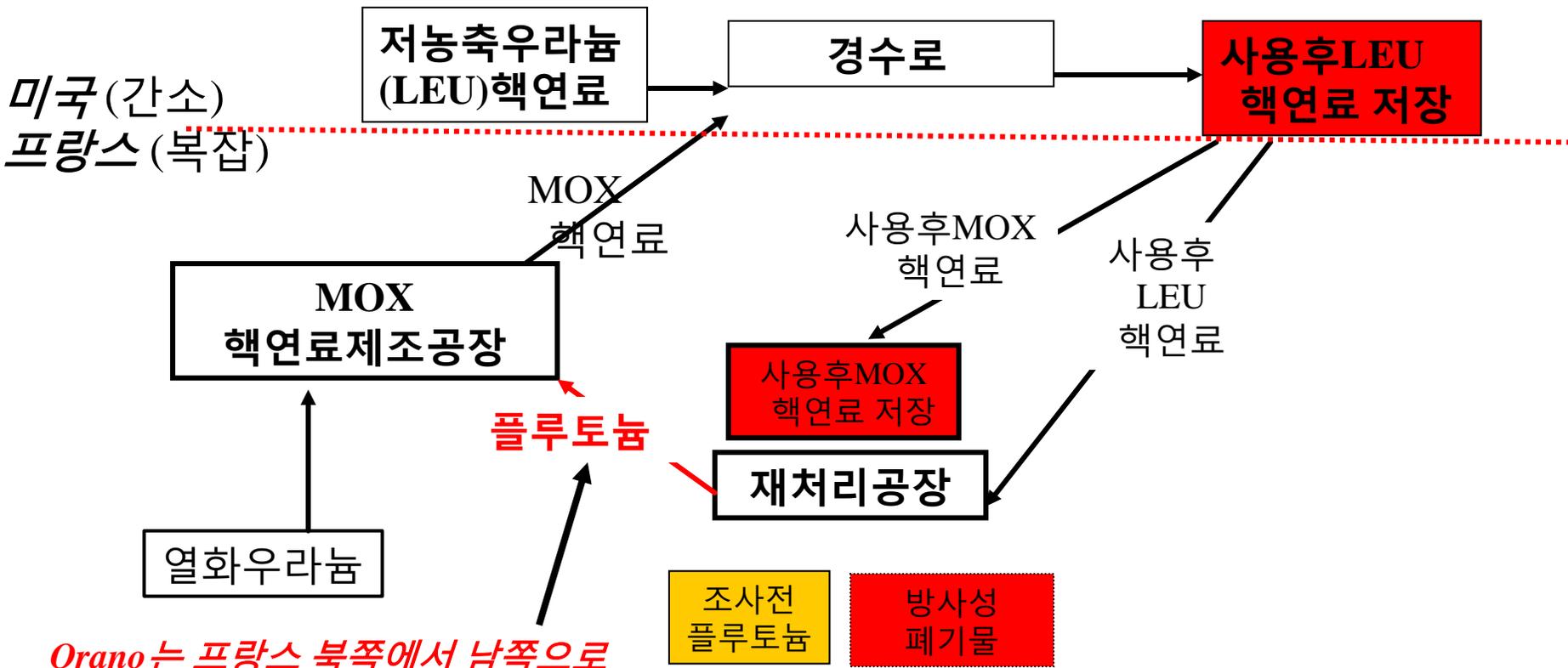


5개국은 재처리를 선언: 4개 핵무기보유국 + 일본



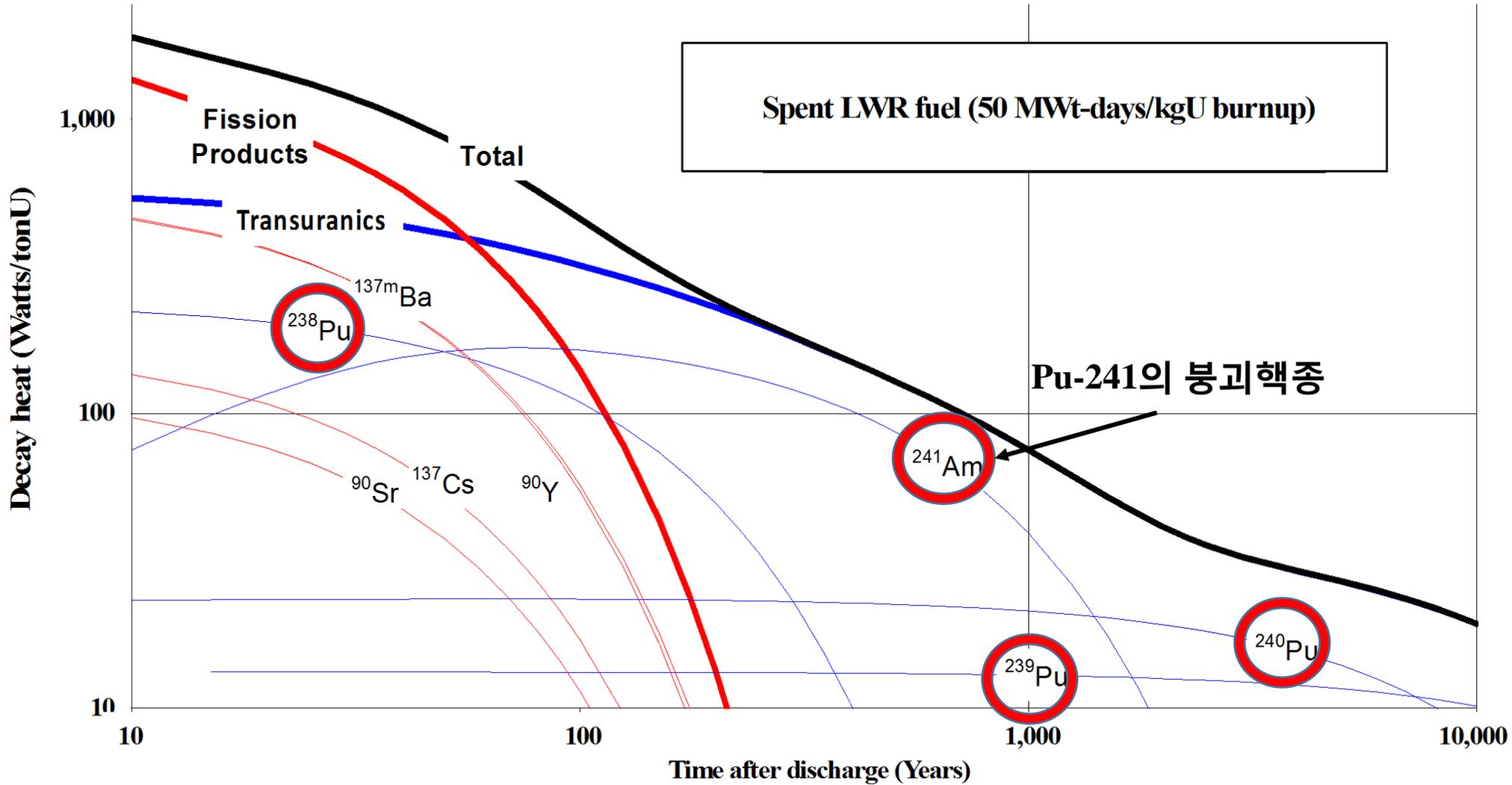
프랑스와 일본은 고속로 프로그램을 포기했지만 경수로 핵연료에 플루토늄을 사용하기로 결정

비용은 플루토늄 사용으로 10% 절약되는 LEU 핵연료 가격의 약 10배
 왜 그들은 그렇게 할까? 플루토늄 정부-산업 복합체?

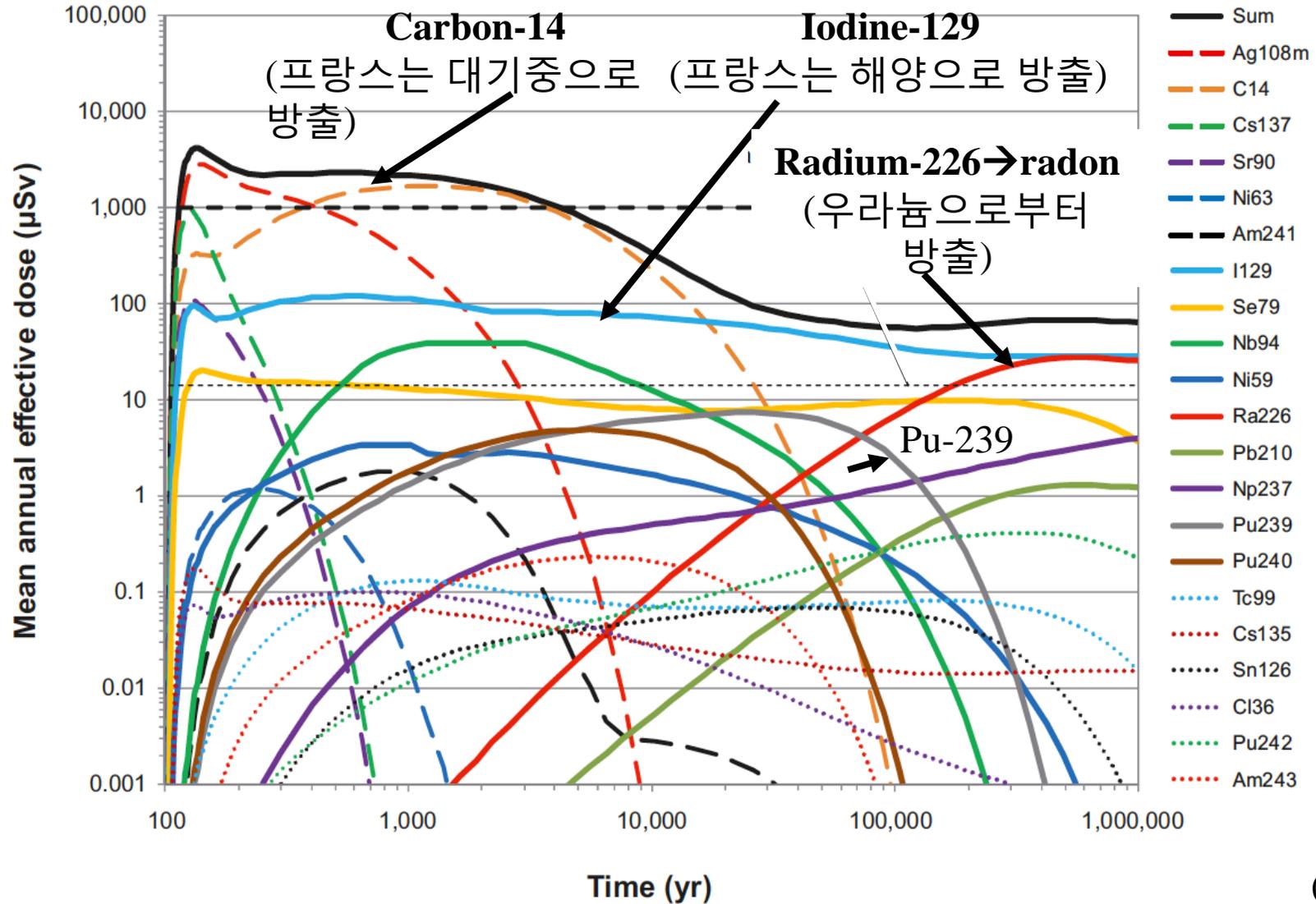


Orano는 프랑스 북쪽에서 남쪽으로 트럭으로 운송함. 그린피스가 주유소에서 가로챈 적 있음

새로운 핑계: 고속로에서 플루토늄을 핵분열시켜 방사성폐기물의 독성을 줄임

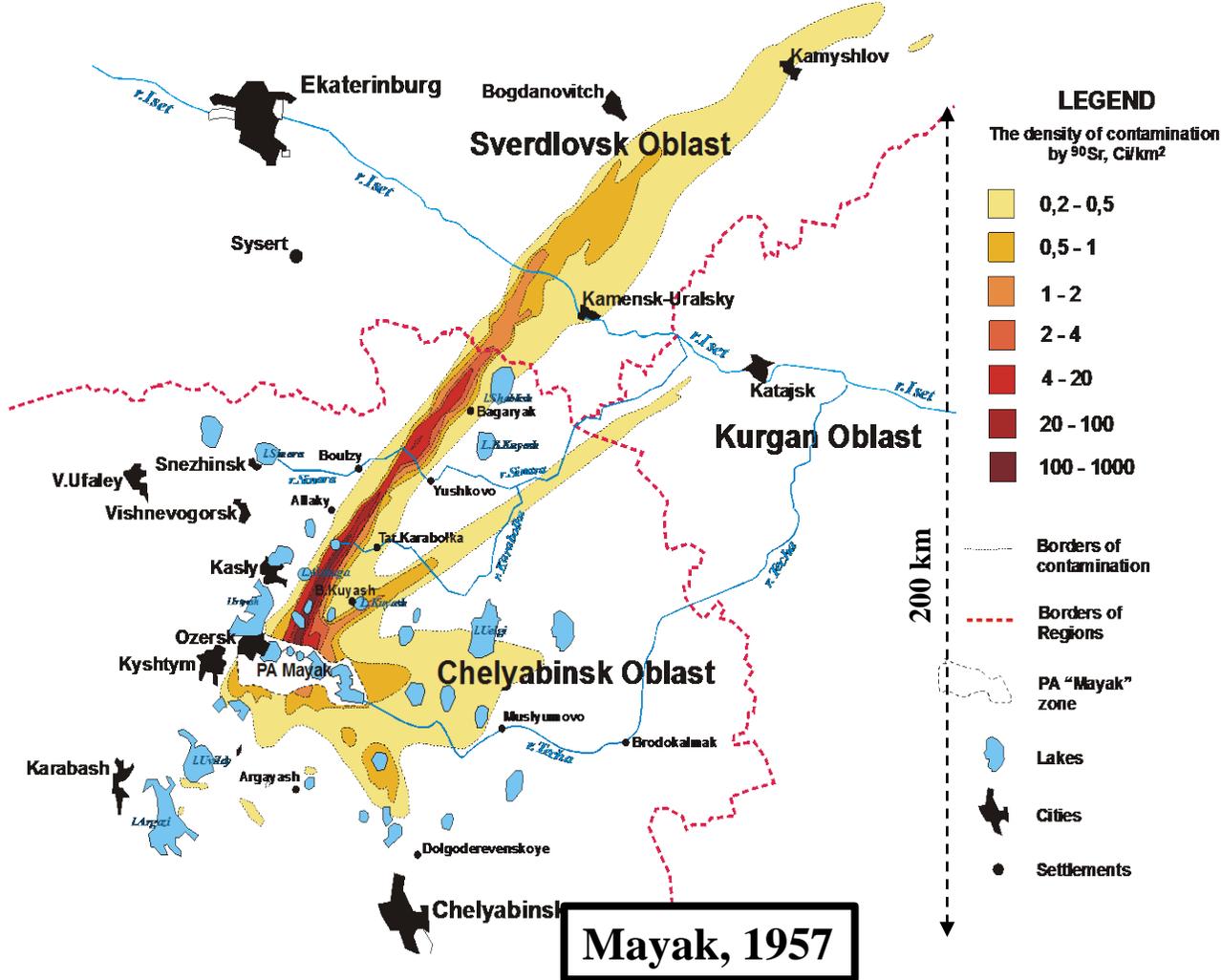


그러나 저수용성 플루토늄은 최악의 경우를 넘어서는 처분장 사고의 컴퓨터 모델 실험에서도 표면선량에 지배적이지 않음 (KAERI도 유사한 계산을 수행하였음)



재처리공장의 사고: 훨씬 큰 위험

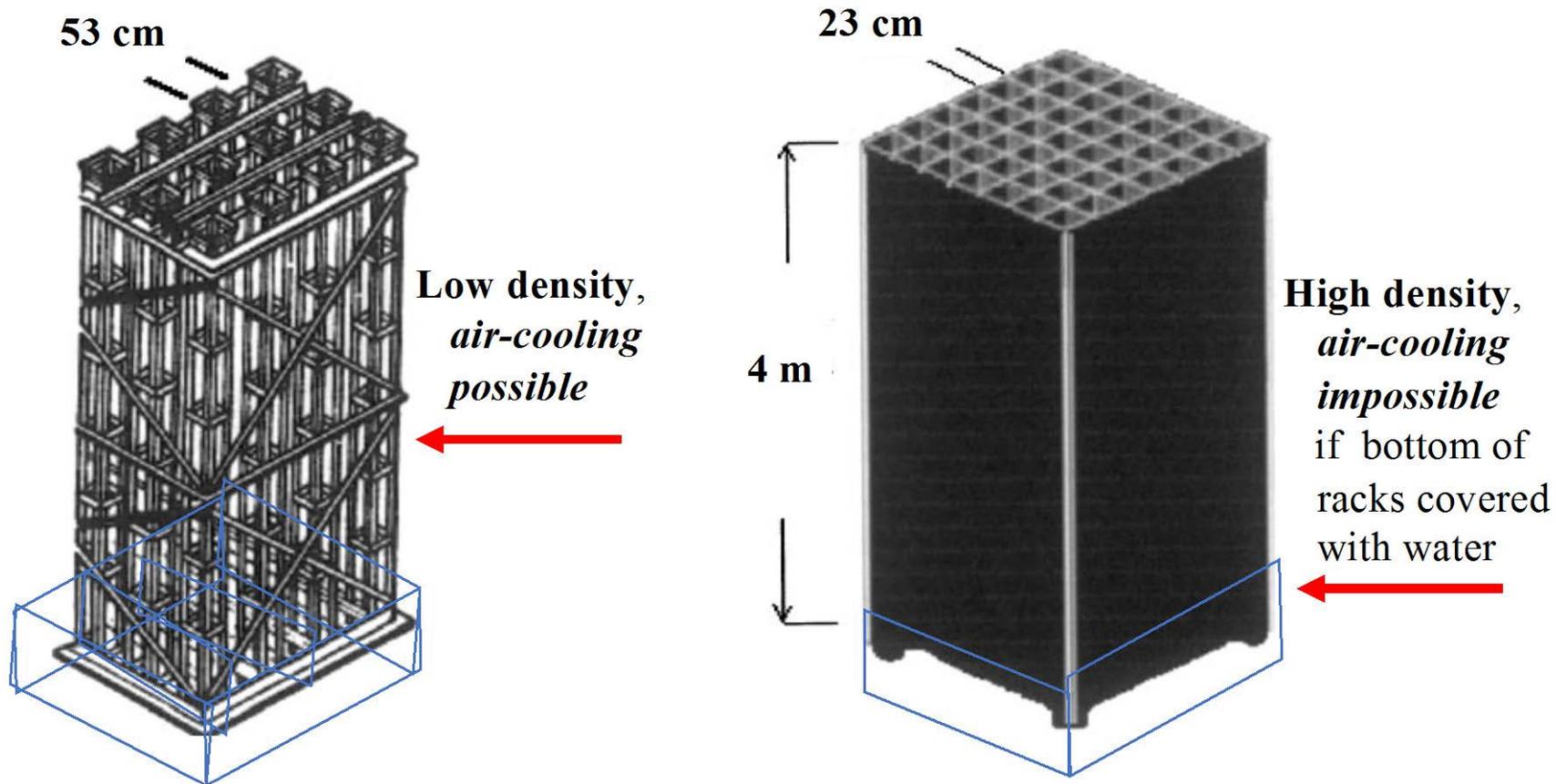
SCHEMATIC MAP OF DENSITY CONTAMINATION BY STRONTIUM-90 (ON 1997) OF THE TERRITORIES OF THE SOUTHERN URALS REGION



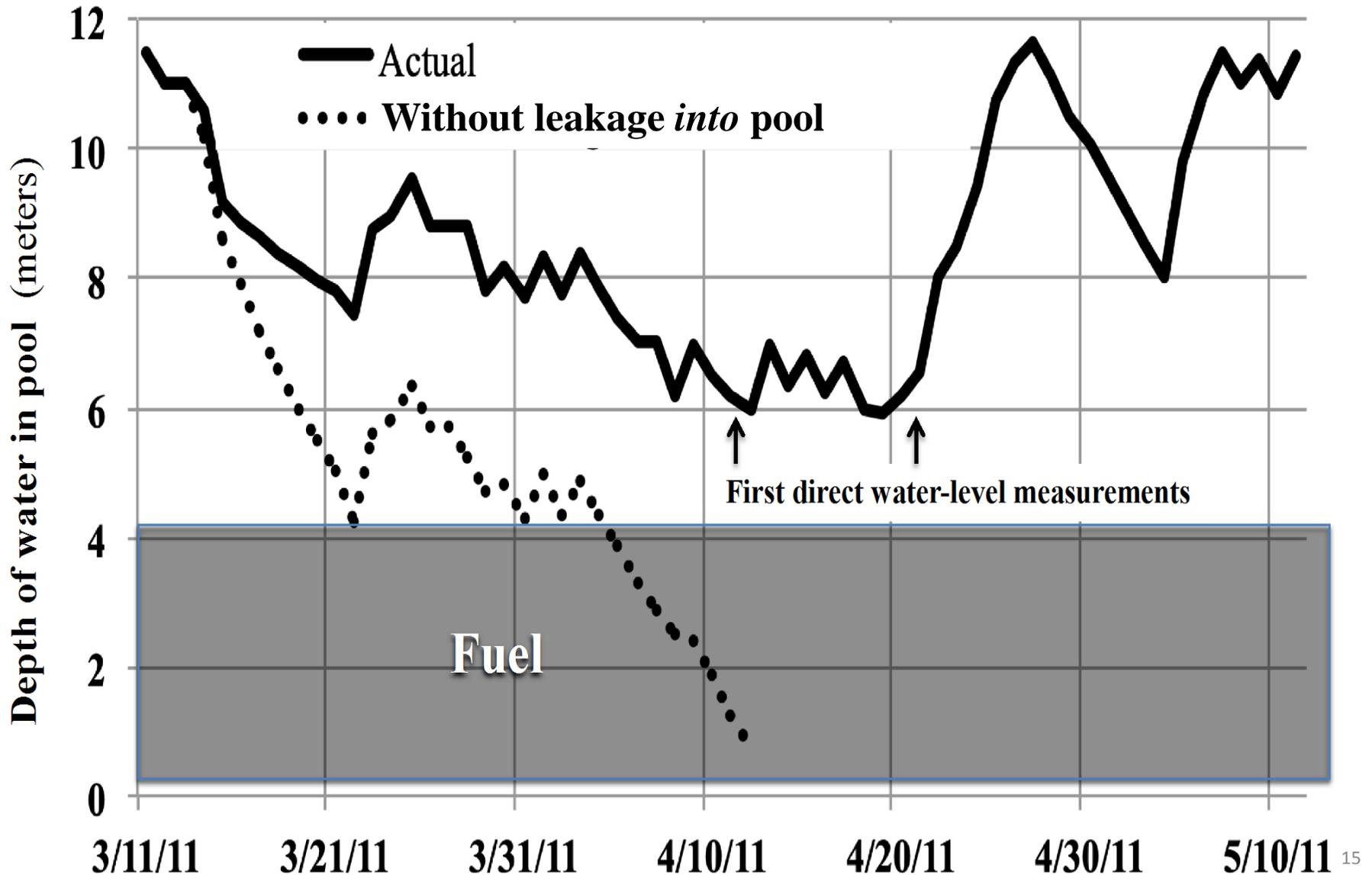
Tomsk, 1993

고속로의 또 다른 유산: 사용후핵연료 화재 위험

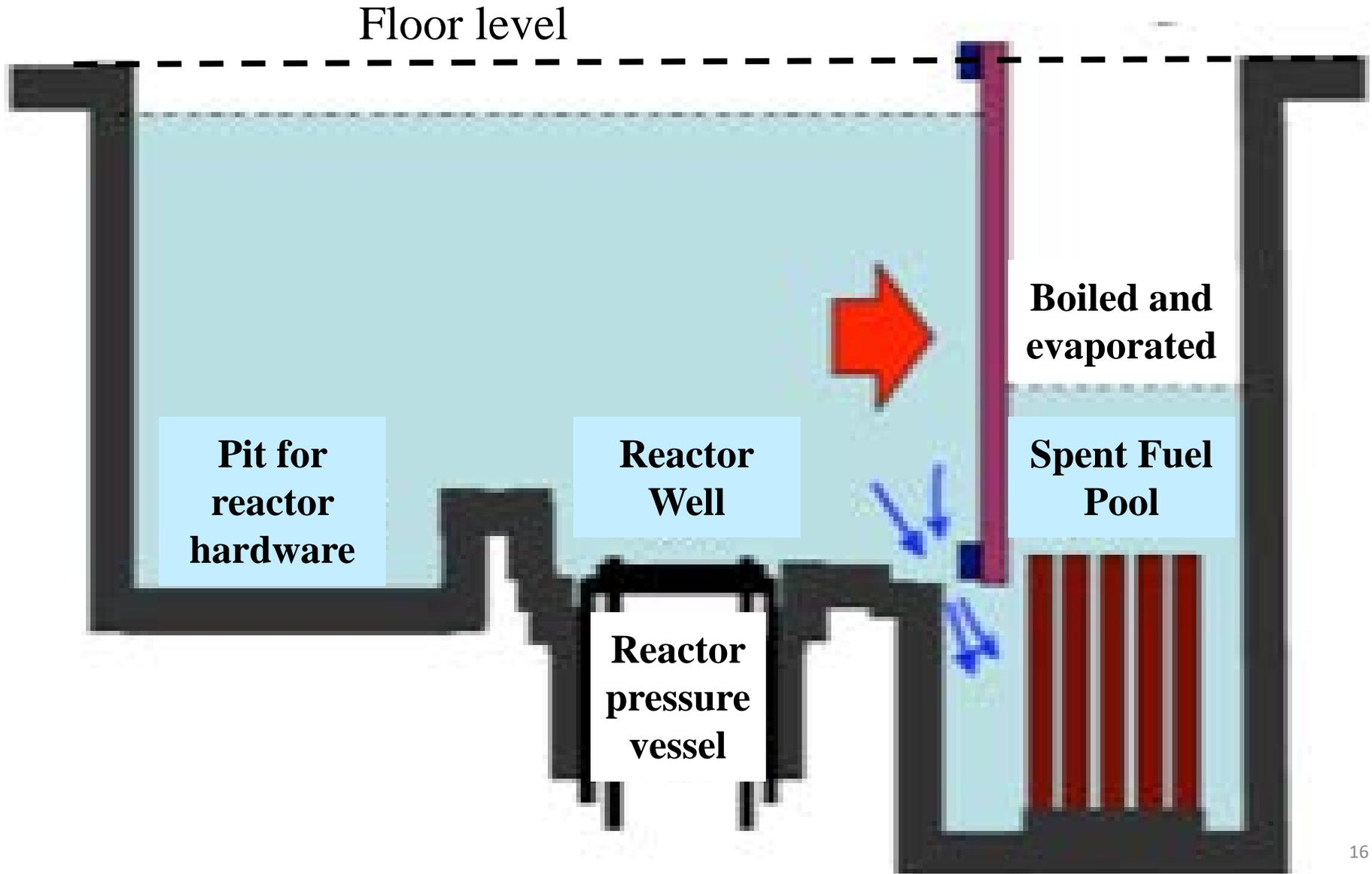
저장조는 초기 4-6년 사용후핵연료 방출분 용량 저장으로 설계되었으나 지금은 20-30년 방출분 저장중



후쿠시마 사고의 100배 규모의 사고가 일어날 뻔 했었음 (미국은 1-2주간 그 사고가 일어나는 것으로 믿었음)



운 좋게 핵연료가 수면 위로 노출되는 것을 면했음: 원래는 비어있었어야 할 원자로 상부 벽으로부터 저장된 물이 새어 흘러 들어갔음.



일본원자력에너지위원회 콘도 위원장은 “도쿄를 소개시켜야 할 필요가 있을 수 있다”고 칸 수상에게 말했다

실제 후쿠시마사고

88,000 이주 (1,100 km²)

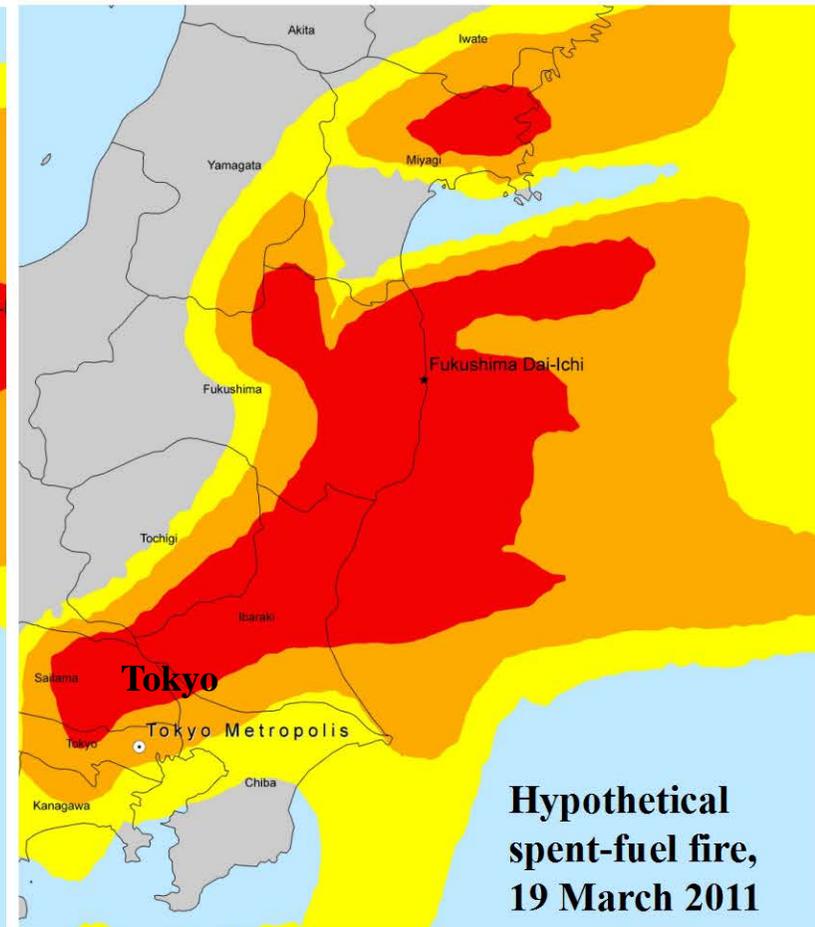
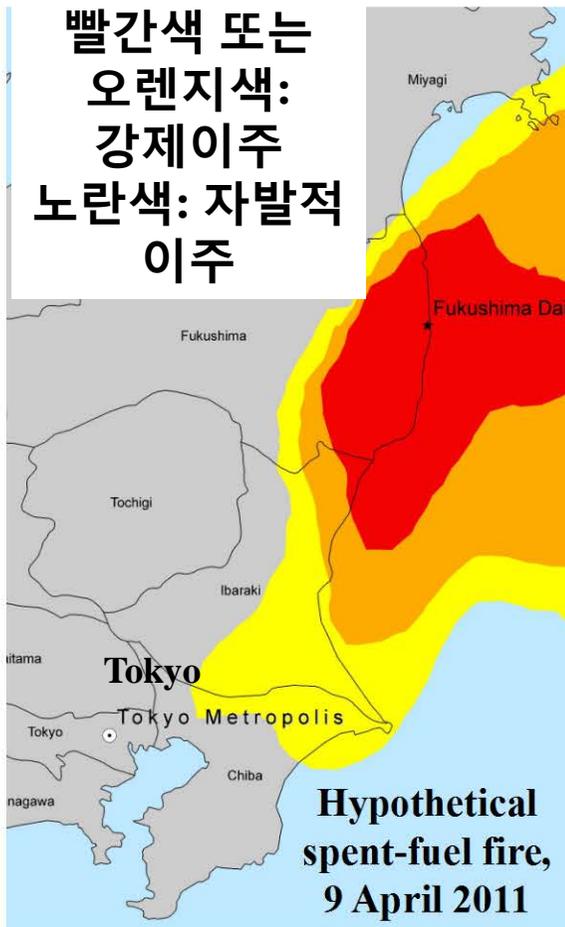
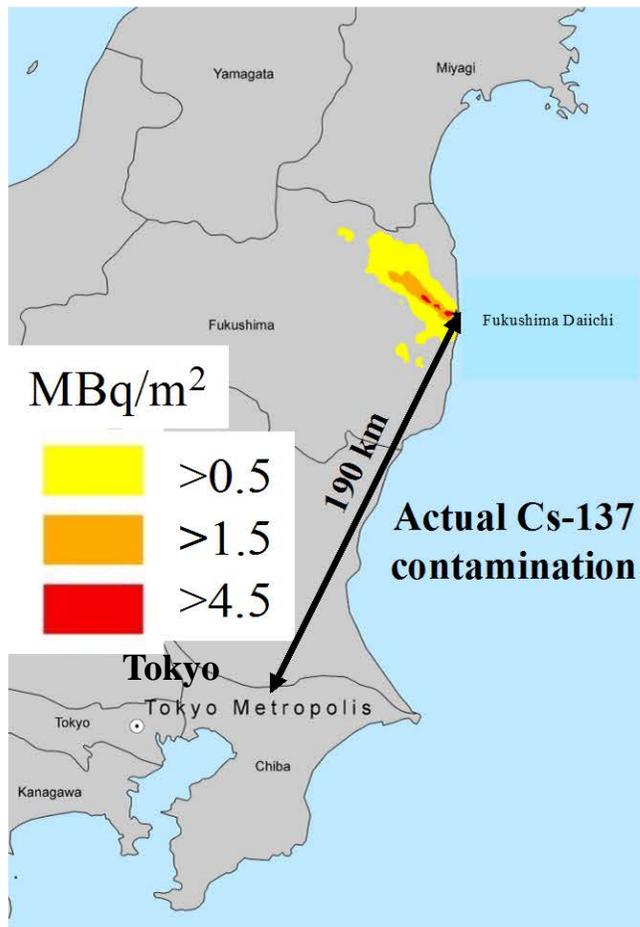
저장조 #4 가상화재시

바람방향이 바다 쪽

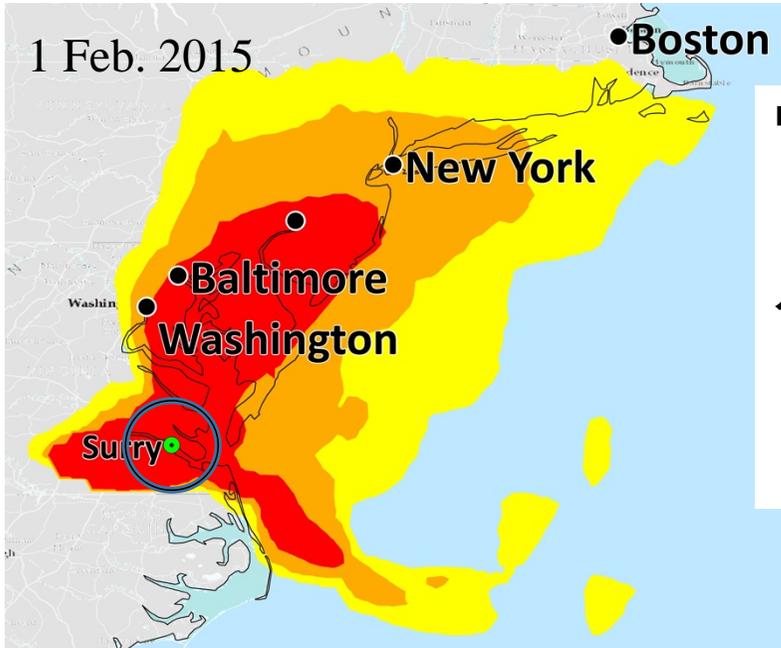
800,000 from 2,600 km²

바람방향이 도쿄 쪽

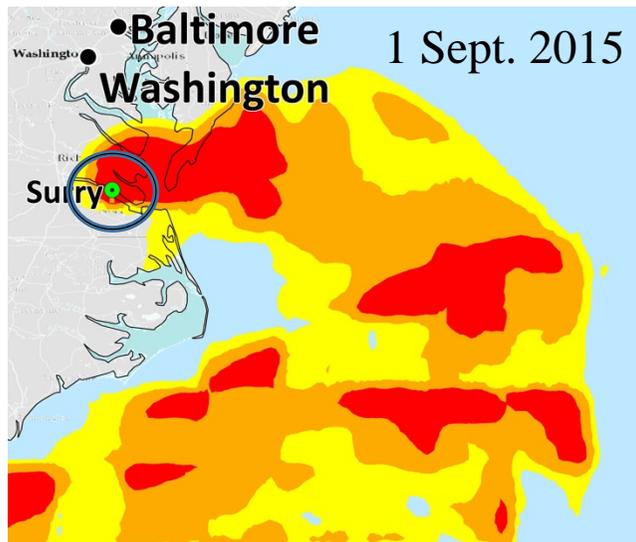
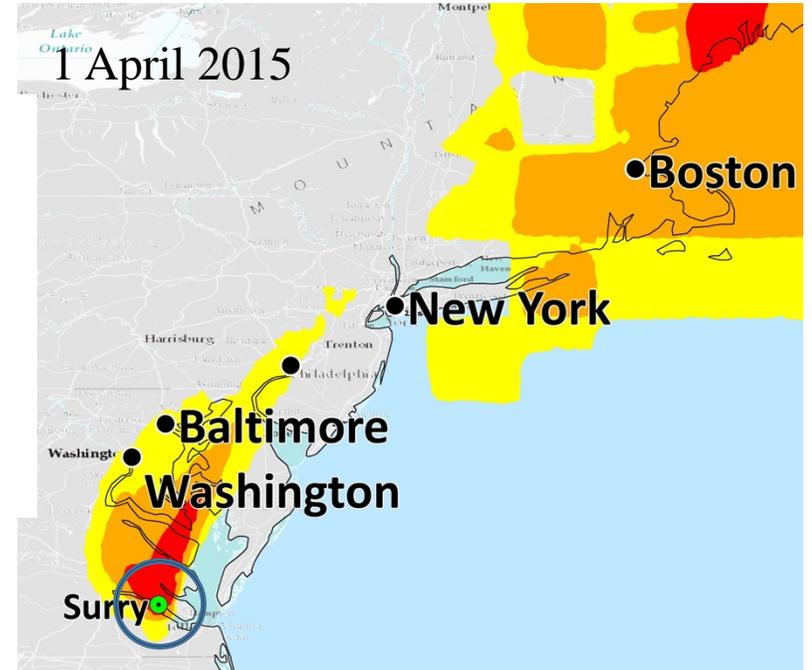
29,000,000 from 25,000 km²



버지니아 서리 원전의 사용후핵연료 밀집저장조에서의 가상 화재



빨간색 또는
오렌지색:
강제이주.
서클 바깥의
결과는 NRC의
비용편익계산
에서 배제



평균 8백만명 강제이주
평균 2조달러 경제손실

저장조에서 5년 냉각 후 건식캐스크로 옮기면
화재로 인한 방사능방출은 1%로 NRC는 추정
저장조 당 5천만달러 비용 때문에 NRC는 원전
측에 요구하지 않음

미국에서의 건식 중간저장



월성 사용후핵연료 건식 캐스크 저장

6,000톤 건식캐스크 저장용량은 한국의 경수로 사용후핵연료 30년분 저장 가능



결론: 재처리 불필요

천연우라늄은 충분함.

플루토늄 분리의 환경적 이익은 없음.

고속로는 고비용. 러시아, 인도, 중국만 계속 추진.

러시아 원전회사는 신규 고속로 “실증로” 건설을 확신하지 못하고 있음.

프랑스, 일본, 한국, 미국의 고속로 지지자들은 고속로 유지를 위해 다른 국가들의 프로그램을 찾고 있음.

재처리는 모두의 부담이 되고 있음.

이제는 이 사람들에게 좀 더 유용한 일이 주어져야 할 때?