

사용후핵연료 관리

- 현안과 선택 -

김 창효

한국 원자력 학회 춘계 학술회의

2013 년 5월 30, 광주

표제 이슈 발표자 최근 경험

연구보고서 57

고준위 방사성 폐기물 관리

Management of High Level Nuclear Wastes

2009



연구책임자 : 김 창 호 (서울대학교 명예교수)

KAST 한국과학기술원
The Korean Academy of Science and Technology

표제 이슈 발표자 최근 경험

Contents

요약문	1
영문요약문 (SUMMARY)	v
1. 서론	1
2. 사용후핵연료의 관리 현황 분석	6
2.1. 고준위 폐기물의 분류 및 형태	6
2.2. 사용후핵연료의 자원경제적 정치사회적 특성	8
2.2.1. 사용후핵연료의 특징	8
2.2.2. 사용후핵연료의 자원경제적 특성	11
2.2.3. 사용후핵연료의 사회적 특성	14
2.2.3.1. 사용후핵연료의 붕괴열	14
2.2.3.2. 사용후핵연료의 방사성 독성도	19
2.2.4. 사용후핵연료의 국제 정치적 특성	20
2.3. 사용후핵연료 발생과 관리 현황	21
3. 사용후핵연료 관리의 단기 현안 문제와 해결 방안	25
3.1. 소내 임시저장 용량 포화 문제와 대책	25
3.2. 사용후핵연료 저장관리 대안 비교	26
3.2.1. 소내 임시저장 용량 확충	27
3.2.2. 소외 집중식 중간저장 시설의 확보	28
3.3. 사용후핵연료의 소내 임시 저장시설 포화 문제 해결 방안	30

Contents

4. 사용후핵연료의 최종 관리방안 비교 분석 및 정책 수립 ..	33
4.1. 최종 관리방안 개요	33
4.2. 최종 관리방안 장단점 분석	34
4.2.1. 직접 처분	34
4.2.2. 재래식 재처리 후 처분 방식	35
4.2.3. 선진 재처리기술을 이용한 분리소멸 처리처분	37
4.2.4. 해외 위탁 재처리 방식	39
4.2.5. 초 장기 저장 방식	39
4.3. 사용후핵연료 최종 관리 정책 수립	40
5. 사용후핵연료 관리 정책 건의사항	45
6. 결론	51
참고 문헌	53
부록 A : 외국의 고준위 방사성 폐기물의 분류기준	
부록 B : 우리나라 원전 운영, 건설 및 계획 현황	
부록 C : 외국의 사용후핵연료 정책과 관리 현황	
부록 D : 파이로프로세싱 기술	
부록 E : 사용후핵연료 정책 관련 연구 현황	

발표순서

머리 말

사용 후 핵연료 저장 현황

원전부지 별 저장 현황

예상 포화 년도

소내 저장시설 포화용량 해결방안

방안

선택과 핵심 이슈

방안 비교

사용 후 핵연료 영구 처리 처분 방안

맺음 말

머리 말

사용후핵연료 관리 문제 해결을 위한 공론화 추진 정책

✓ 원전 사상 획기적 정책 → 당면한 원자력 숙제에 대한 슬기로운 해답을 기대

✓ 공론화 의제가 불분명

공론화 위원회 = 중간 저장을 위한 소외 부지 선정 위원회 ?

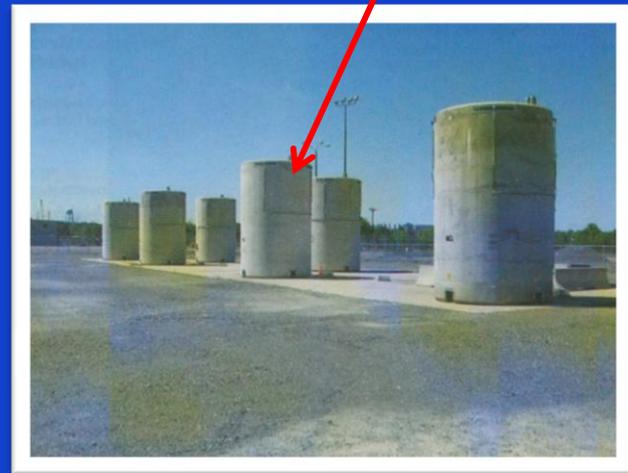
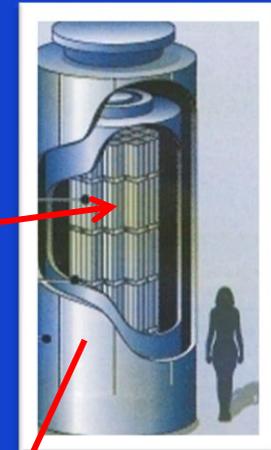
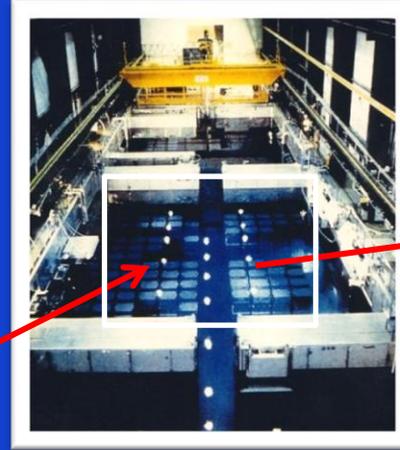
✓ 공론화 요건

- 가능한 실제적 해결 방안들을 모두 의제로 채택
- 공개 토론에 의한 의사 진행
- 객관적이며 합리적인 평가기준에 기초한 합의도출

사용후핵연료 소내 저장시설 포화 문제 해결 방안 별 쟁점 사항들에 대한 철저한 과학기술적·사회경제적·제도적 비교 검토

사용후핵연료 저장 현황

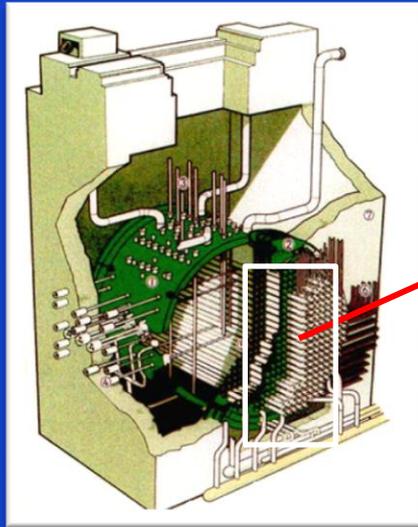
가압 경수로 사용후핵연료 소내 저장 시설



Steven P. Nesbit, "Centralized Interim Storage
Past, Present, and Future," Radwaste Solutions,
V.19, No.5, p.14 (Nov.-Dec. 2012).

사용후핵연료 저장 현황

캔두 가압 중수로 사용후핵연료 소내 저장 시설



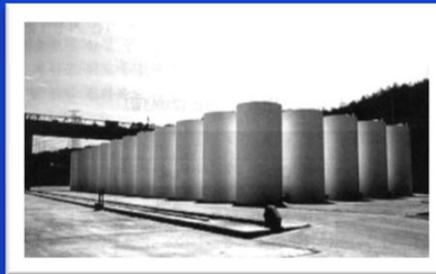
캔두 가압중수로



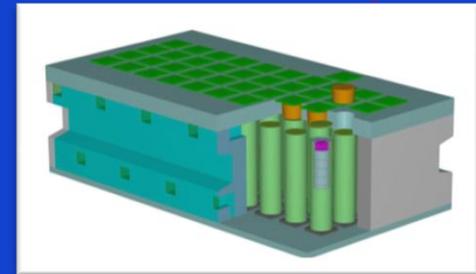
사용후
핵연료 다발



습식저장조



건식저장캐스크



조밀건식저장시스템

사용후핵연료 저장 현황

고리본부 저장시설 현황 및 예상 포화연도

호기	상업운전 (인가수명)	현 용량		저장현황 ('12말)	발생량		포화연도 (현행/확충)
		설치	저장*		년간	EFPD	
고리 1	78.4 (30)	562	441	370	35	400	2016/ 2028**
고리 2	83.7(40)	920	799	714	38	480	
고리 3	85.9(40)	2,260	2,103	2,003	48	490	
고리 4	86.4(40)	2,262	2,105	1,762	48	490	
합계		6,004	5,448	4,849	169		
신고리 1	11.2(40)	700	523	60	49	450	
신고리 2	12.7(40)	700	523		49	450	
신고리 3	13.9(60)	1,021	780		69	450	
신고리 4	14.9(60)	1,021	780		69	450	

* 비상노심 혹은 교체노심 제외

** 고리원전 사용후핵연료: 신고리 원전이송 및 저장

사용후핵연료 저장 현황

울진본부 저장시설 현황 및 예상 포화연도

호기	운전기간 (인가수명)	현 용량		저장현황 ('12말)	발생량		포화연도 (현행/확충)
		설치	저장*		년간	EFPD	
울진 1	88.9(40)	1,114	957	741	46	510	2018/ 2026**
울진 2	89.9(40)	1,062	905	802	46	510	
울진 3	98.8(40)	1,498	1,321	928	49	450	
울진 4	99.12(40)	1,498	1,321	853	49	450	
울진 5	04.7(40)	700	523	386	49	450	
울진 6	05.4(40)	700	523	399	49	450	
합계		6,572	5,550	4,109	288		
신울진 1	16.6(40)	1,021	780		69	450	
신울진 2	17.6(40)	1,021	780		69	450	
합계		8,614	7,110	4,109			

* 비상노심 혹은 교체노심 제외

** 울진원전 사용후핵연료 신 울진 원전이송 및 저장

사용후핵연료 저장 현황

영광본부 저장시설 현황 및 예상 포화연도

호기	상업운전 (허가수명)	현 용량		저장현황 (12말)	발생량		포화연도 (현행/확충)
		설치	저장*		년간	EFPD	
영광 1	86.8(40)	2,262	2,105	1,357	46	510	2021/ 2024**
영광 2	87.6(40)	1,152	995	894	46	510	
영광 3	95.3(40)	1,302	1,125	818	49	450	
영광 4	96.1(40)	1,302	1,125	837	49	450	
영광 5	02.5(40)	1,458	1,281	519	49	450	
영광 6	02.12(40)	700	553	517	49	450	
합계		8,176	7,154	4,942	288		

* 비상노심 혹은 교체노심 제외

** 영광 원전 내 사용후핵연료 호기간 이송 및 저장

사용후핵연료 저장 현황

월성본부 저장시설 현황 및 예상 포화연도

호기	상업운전 (인가수명)	현 용량		저장현황 ('12말)	발생량		포화연도
		설치	저장		년간	EFPD	
월성 1	83.4 (30)	44,688	42,408	34,668	4757	-	2017/ 2026*
월성 2	97.7 (30)	44,688	42,408	36,092	5112	-	
월성 3	98.7 (30)	44,688	42,408	39,108	5342	-	
월성 4	99.10(30)	44,688	42,408	38,032	5461	-	
캐니스터		162,000	162,000	216,000			
Maxtor 1		168,000	168,000				
합계		508,752	499,632	363,900	20,691		
신월성 1	12.3 (40)	700	523		49	2,132	2038
신월성 2	13.1 (40)	700	523		49	2,132	
합계		1,400	1,046				

* Macstor/KN-400 추가건설

사용후핵연료 저장 현황

부지별 예상 포화연도

구분	예상 포화연도		확충방법
	현행	저장용량 확충시	
고리	2016	2028	고리원전 → 신고리 원전이송 및 저장
영광	2021	2024	영광#2 저장대 교체 영광 원전 내 호기간 이송 및 저장
울진	2018	2028	울진원전 → 신울진 원전이송 및 저장
월성	2017	2026	Macstor/KN-400 추가건설

* 송명재, "사용후핵연료 관리정책의 패러다임이 바뀐다!" 원자력 산업 2013.3/4, 9~13면

소내 저장시설 포화문제 해결 방안

< 방안 >

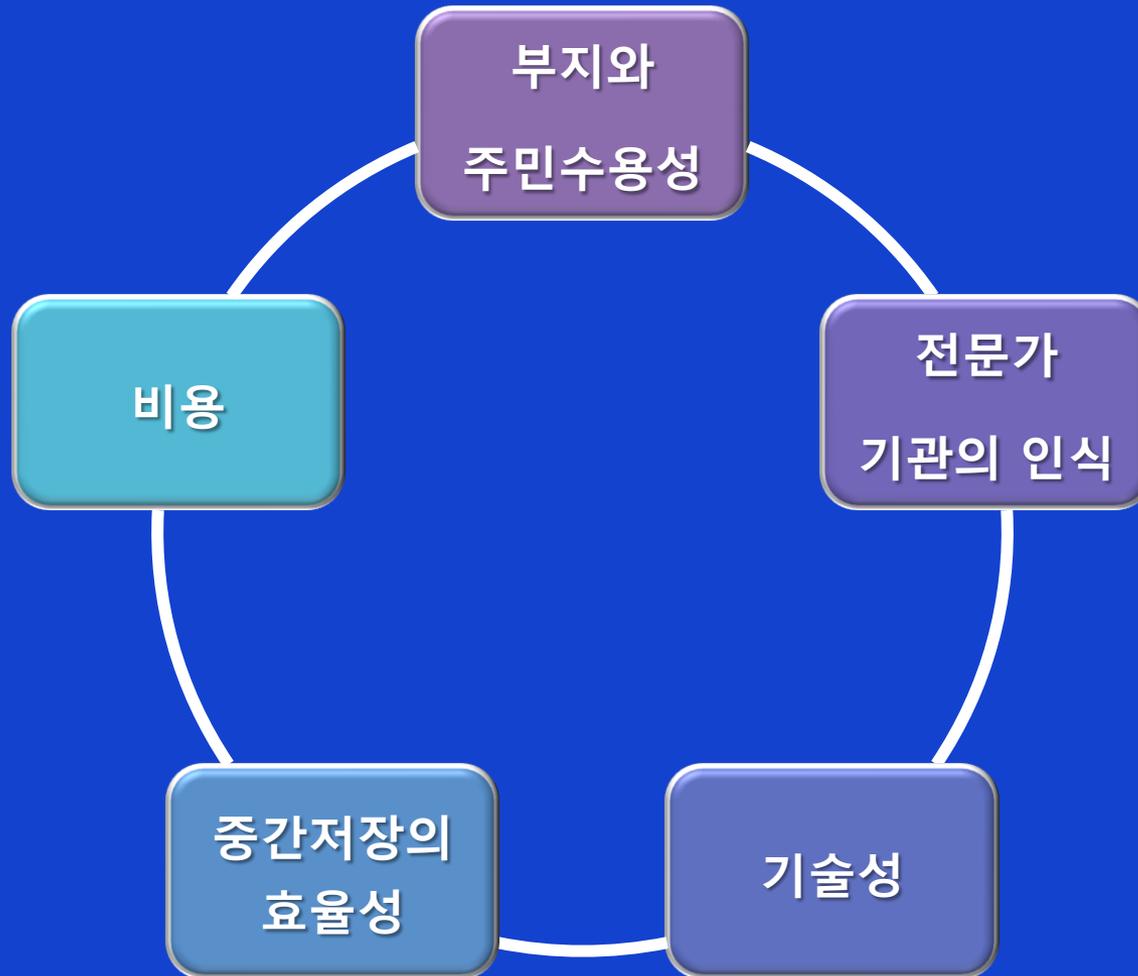
소내 저장시설 확충

소외집중 중간시설 건설

소내 중간시설 건설은 방안에서 제외

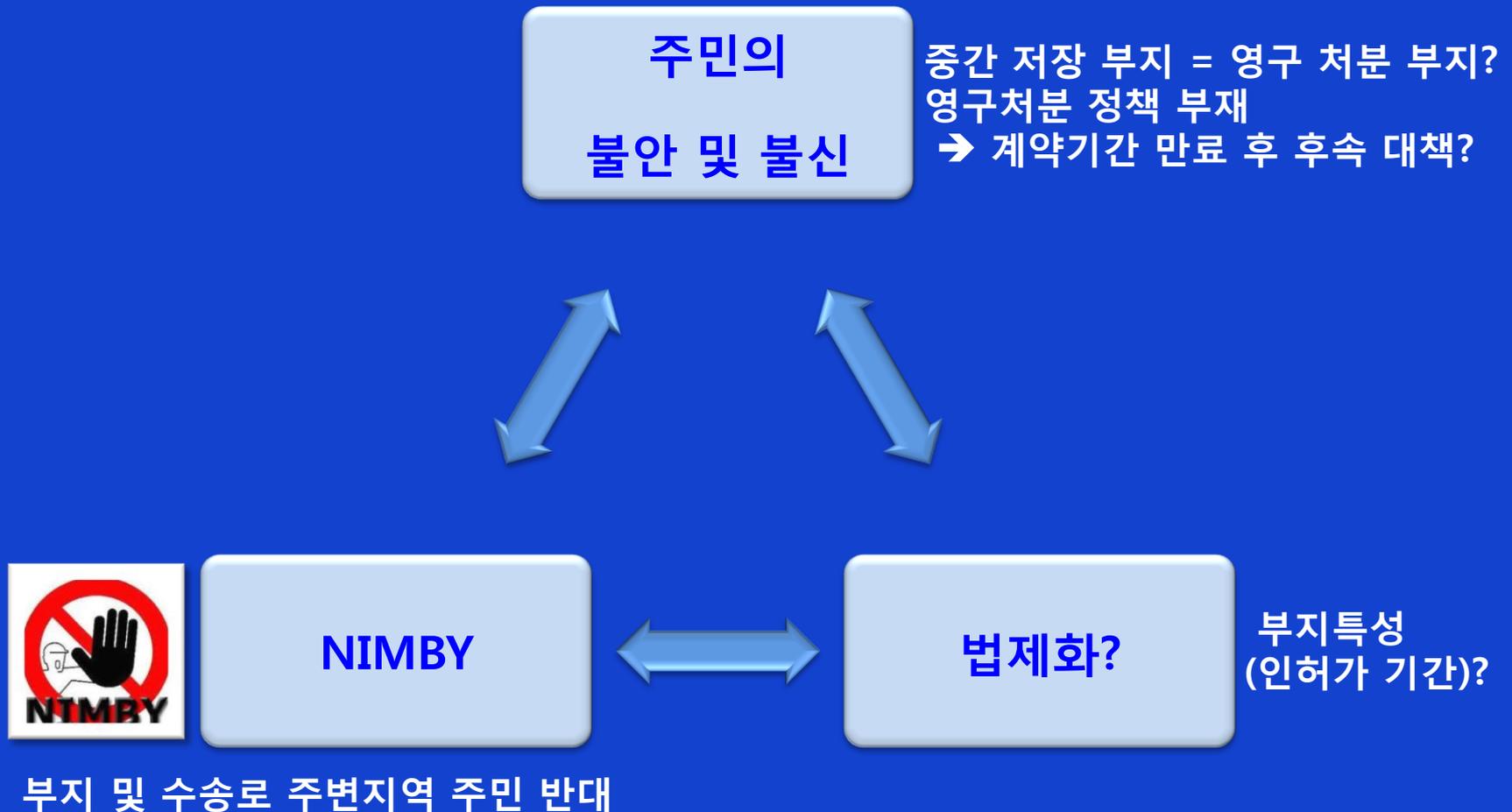
- ✓ 소내 저장 시설의 확충 방안과 소내 중간시설의 건설 방안은 사용후 핵연료 관리 주체의 관점에서 구분되는 방안으로 저장 용량 시설 포화 문제의 해결에 관한 한 실질적으로 동일한 방안
- ✓ 원전의 배타지역 경계 내에 원전 소유자가 아닌 다른 사업자 (예컨대, 사용후핵연료 중간시설 관리 사업자) 의 상주를 허용(?)

선택과 핵심이슈



선택과 핵심이슈 : 부지와 주민 수용성

소외부지확보 장애요인



선택과 핵심이슈 : 부지와 주민 수용성

중간저장관련법 기술기준

사용후핵연료 중간저장시설의 위치에 관한 기술기준 : 원자력 안전 위원회 고시 제 2011-51 호 (12년 1월 20일)

- 제2조 (인구)인구밀집 지역에서 떨어진 곳
- 제3조(지질 및 지질학 적 특성):반경 8 Km 범위 내에 활동성 단층 위치 없음
 - : 지진발생 빈도, 규모 및 진동이 낮거나 그렇게 예상되는 지역
 - : 지각변동으로 인하여 해당시설에 미치는 영향이 없다고 판단되는 지역
- 제4조 (인위적 사고) 항공기 추락, 군사활동, 가스, 석유, 폭발등과 같은 인위적 사건의 위험이 적은 곳
- 제5조 (확산 및 희석) 방사성물질이 대기로 방출될 경우 그 확산 및 희석이 용이한 곳
- 제 6조 (자연현상) 강우, 강설 및 낙뢰, 해일, 회오리, 바람, 쓰나미 및 태풍 등 자연현상으로 인하여 중대사고의 발생 원인이 없다고 판단되는 곳
- 제7조 (하천범람) 내수면 범람 시 예상 최대홍수 위 보다 상부에 위치
- 제8조 (수문학적 특성) 지하수 유입 등 수문학적 특성으로 인한 장애가 없는 곳

사용후핵연료 인도규정 : 원자력 안전위원회 고시 제 2012-58호 (12년 1월 20일)

사용후핵연료 중간저장시설 부지특성 보고서 작성지침 (습식 중간 저장) : 원자력 안전 위원회 고시 제 2012-57호 (12년 1월 20일)

운영 허가 기간?

✓ 사용후핵연료 연소도[고 연소 (>45,000 MwD/T)/ 저 연소(<45,000 MwD/T)]에 따른 중간 저장시설 운용 인 허가기간 설정

✓ 미국 (10CFR PART 72 : §72.42 Duration of License and Renewal : 40 년 이하)

선택과 핵심이슈 : 부지와 주민 수용성

10CFR PART 72 :

PART 72 :

**LICENSING REQUIREMENTS FOR THE
INDEPENDENT STORAGE OF SPENT NUCLEAR
FUEL , HIGH-LEVEL RADIOACTIVE WASTE, AND
REACTOR-RELATED GREATER THAN CLASS C
WASTE**

PART INDEX :

Subpart A – General Provisions

Subpart B – License Application, Form, and Contents

Subpart C – Issuance and Conditions of License

**Subpart D – Records, Reports, Inspections, and
Enforcement**

Subpart E – Siting Evaluation Factors

Subpart F – General Design Criteria

Subpart G – Quality Assurance

Subpart H – Physical Protection

Subpart I – Training and Certification of personnel

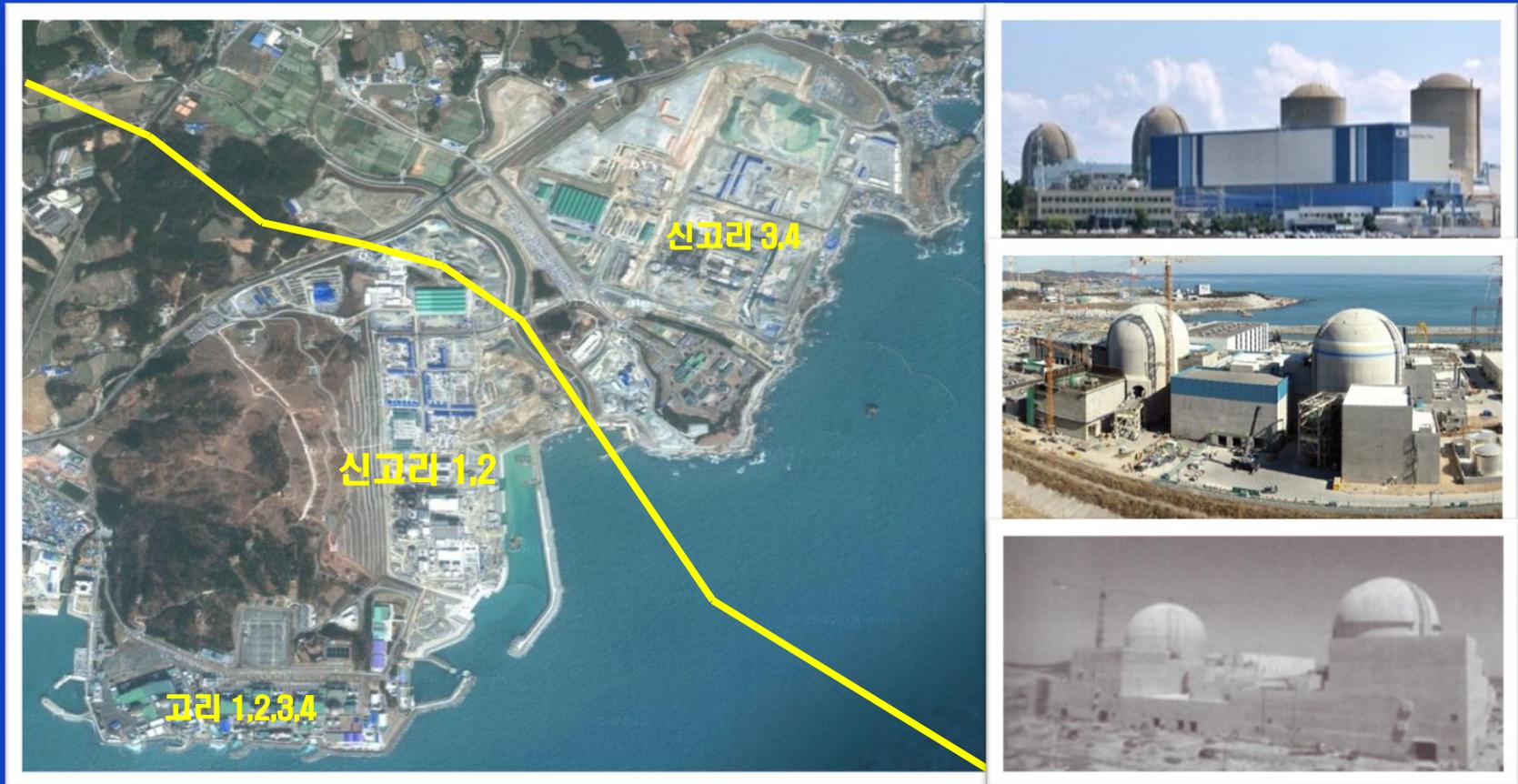
**Subpart J – Provision of MRS Information to State
Government and Indian Tribes**

**Subpart K – General License of Storage of Spent Fuel at
Power Reactor Sites**

Subpart L – Approval of Spent Fuel Storage Cask

선택과 핵심이슈 : 부지와 주민 수용성

고리원전 관할 지자체 : 부산 광역시 기장군 장안읍 고리/
효암리/비학리/
울산 광역시 울주군 서생면 신암리



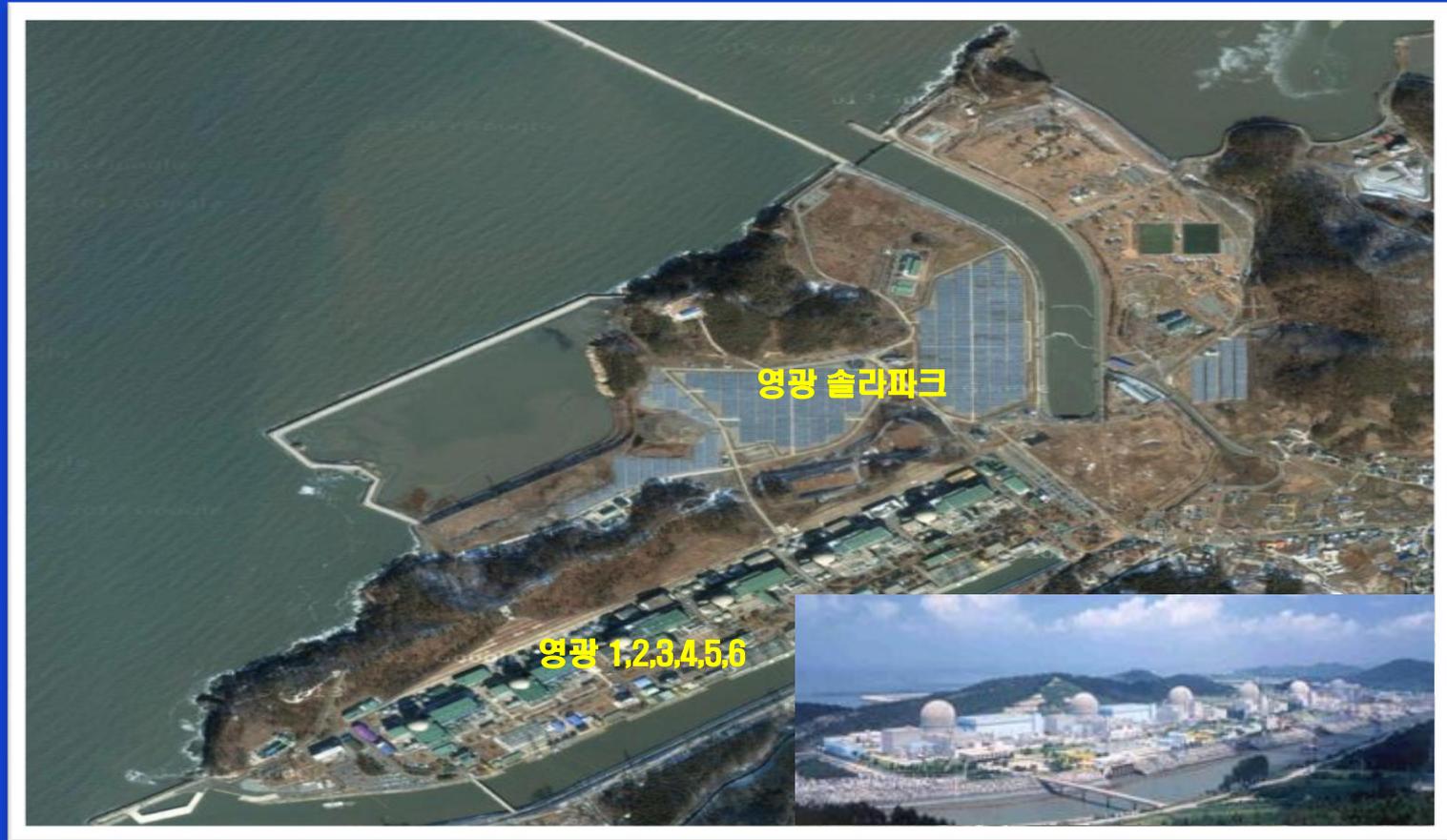
선택과 핵심이슈: 부지와 주민 수용성

울진 원전 관할 지자체 : 경북 울진군 북면 부구리/
덕천리 (신울진 3,4)



선택과 핵심이슈: 부지와 주민 수용성

영광 원전 관할 지자체 : 전남 영광군 홍농읍 계마리



선택과 핵심이슈: 부지와 주민 수용성

월성 원전 관할 지자체 : 경북 경주시 양북면 봉길리



선택과 핵심이슈 : 소요비용

소내 대비 소외 건식저장시설 건설

소외 건식 중간저장 건설

~수십 조원 ?

- ✓ 부지 사용료
- ✓ 건설비용
: **저장시설**, 행정건물, 방사성 폐기물 관리 및 물리적 방호시설 및 수송로 건설
- ✓ 장비 및 장치비
: 수송 및 저장용기/수송 차량 및 선박
- ✓ 운영비 : 노무비 및 수송비 및 행정비
- ✓ 사회적 비용
: 보상 (부지주변지역/수송로인근지역 주민)
- ✓ 원상 복구비 (decommissioning):

소내 건식 저장 건설

~5조원 ?

- ✓ 건설비용
: **저장시설** (저장/수송겸용 용기기준)
~5조원 = 50,000(다발) x ~1(억/다발)

선택과 핵심이슈 : 기술성

국내외 습식저장시설 운영현황 (습식 AR 제외)

국명	시설/위치	핵연료형태	저장형태	용량(톤)	현황	비고
스웨덴	CLAB	LWR	AFR	5,000	운영중(86)	1차 용량확장
프랑스	LA Hague	LWR	AFR	14,400	운영중(76)	재처리시설내 저장
	Marcoule	GCR	AFR	800	운영중(80)	
영국	Sellafield	MAGNOX/GCR/LWR	AFR	13,500	운영중	재처리시설내 저장
핀란드	TVO-KPA	LWR	AR독립*	1,270	운영중(87)	
불가리아	Kozloduy	LWR	AFR	600	운영중(92)	
일본	Aomori	LWR	AFR	3,000	운영중	재처리시설내 저장
	Tokai Mura	LWR	AFR	237	운영중(77)	재처리시설내 저장
독일	Greifswald	VVER	AFR	560	운영중(85)	구동독 시설
벨기에	Tihange	PWR	AR 독립	1,500	운영중(97)	

* <http://incis.iaea.org/NFCIS/Facilities.cshtml>

선택과 핵심이슈: 기술성

국내외 건식저장시설 운영현황 (습식 AR 제외)

저장방식	국명	시설/위치	핵연료형태	저장형태	용량(톤)	현황	비고
볼트 방식	미국	Fort St. Vrain	HTGR	AR 독립	약 120	운영중(91)	MVDS
	영국	Wylfa	MAGNOX	AR 독립	700	운영중(71)	MVDS
	헝가리	Paks	VVER	AR 독립	1,080	운영중(98)	MVDS
	프랑스	Cadarache	GCHWR/HLW	AFR	180	운영중(90)	CASCAD
콘크리트 사일로	미국	Oconee	PWR	AR 독립	900	운영중(90)	NUHOMS 24P
		H.B.Robinson	PWR	AR 독립	30	운영중(89)	NUHOMS 7P
		Calvert Cliffs	PWR	AR 독립	1,200	운영중(93)	NUHOMS 24P
		McGuire	PWR	AR 독립	-	운영예정	NUHOMS 24P
	캐나다	Whiteshell	CANDU	AR 독립	24	운영중(85)	
		Gentilly 1	CANDU	AR 독립	67	운영중(85)	
		Douglass Point	CANDU	AR 독립	298	운영중(87)	Concrete Canister
		Chalk River	CANDU/NPD	AR 독립	75	운영중(87)	
		Point Lepreau	CANDU	AR 독립	1,026	운영중(91)	
		Pickering	CANDU	AR 독립	1,424	운영중(90)	
		Gentilly-2	CANDU	AR 독립	684	운영중(95)	DSC CANSTOR
	한국	Wolsung	CANDU	AR 독립	140 silos	운영중(92)	Concrete Canister

선택과 핵심이슈 : 기술성

국내외 건식저장시설 운영현황 (습식 AR 제외)

저장방식	국명	시설/위치	핵연료형태	저장형태	용량(톤)	현황	비고
금속 용기	미 국	Surry	PWR	AR 독립	811 casks	운영중(86)	CASTOR V/21
			PWR	AR 독립	-	운영중(96)	TN-32
		Prairie Island	PWR	AR 독립	필요시 증설	운영중(95)	TN-40
		Point Beach	PWR	AR 독립	6 casks	운영중(99)	TN-32
		Northern State Power	PWR	AR 독립	12 casks	-	TN-40
		PECO Energy	BWR	AR 독립	9 casks	-	TN-68
		INEL	PWR		93	운영중(86)	TN-24P
	독 일	Gorleben	PWR	AFR	3,800	운영중	CASTOR
		Ahaus	THRT	AFR	3,960	운영중(92)	CASTOR
		Juelich	AVR	AR 독립	158 casks	운영중지	CASTOR 106개 저장
	스위스	Wuerenligen	PWR/HLW	AFR	약 600	운영중(96)	CASTOR-1c
		Goegen	PWR	AR 독립	-	운영중(99)	TN 24G
	벨기에	Doel	PWR	AR 독립	600	운영중(95)	TN 24XL
	일본	무쯔	LWR	AFR	5,000	운영예정(2012)	Slide 참조
체코	Dukovany	VVER	AFR	600	운영중(96)	CASTOR 440/84	
콘크리트 용기	미 국	Palisades	PWR	AR 독립	165 casks	운영중(93)	VSC-24
		Point Beach	PWR	AR 독립	8 casks	운영중(96)	VSC-24
		Nuclear One	PWR	AR 독립	14 casks	운영중(96)	VSC-24

선택과 핵심이슈 : 기술성

미국의 사례

- ✓ 150,000개 (67,000 MT) 사용후핵연료집합체
 - 62,000 개: 건식 캐스크
 - 88,000 개: 습식 수조
 - 거의 모두 소내 저장시설
- ✓ 현 소내 저장방식을 중단해야만 할 기술적 문제 없음
 - 단, 장기 저장을 뒷받침 할 연구 필요.

* Stefan Anton, Vice President of Engineering HOLTEC International,
“The Spent Fuel Dilemma, ” ANS Annual Meeting (June 25,2012).

저장시설 포화용량 해결대안 비교

비교 항목	소내저장용량 확충	소외 중간저장 시설 건설	
근거 법	원자력법 제2조 제10항 (관계시설)	원자력법 제2조 제20항 (원자력 이용시설)	
경제성	부지비	추가비용 없음	대규모 부지 (100,000톤 경우 약 30만 평) 방폐물부지는 판매자시장:부지비 예상 어려움
	건설비	건식저장 건설 부대시설 건설 없음 (소내 기존 시설 활용)	건식저장 건설 부대시설 (행정건물, 방사성 폐기물 관리시설, 물리적 방호시설) 및 수송로 건설
	운영비	소내 기존 인력 및 운영비로 총당	별도의 운영인력, 방사선 방호 및 폐기물 관리요원 및 시설 보안인력과 운영비 필요
	사회적 비용	기존 4개 원전 부지별로 해당 지역주민 및 지자체와의 복잡한 협의 필요	고준위폐기물을 보관한다는 인식때문에 경주 중저준위 처분장 경우 (3천억 현금과 4조원지원)보다 더 큰 지원 기대할 가능성 있음
기술성	시설안전성	40~50년 경험 습식/건식 저장안전성 입증	좌동
	저장연료건전성	40~50년간의 장기 저장 연료의 건전성 입증	좌동
실현 용이성	4/개 부지지역주민과의 합의가 요구됨 고리/신고리 원전의 경우 복수지방단체와의 협의 필요	1개 부지 지역 주민 및 지자체와의 합의로 해결	
입지요건	기존부지 활용으로 추가적 요건 없음	3000톤 급 사용후핵연료 수송선박 접안가능지역/ 원전입지기준에 적합한 지질학적 조건 충족지역/	
인허가	계속 보관이므로 별도부지에 비해 추진 용이	복잡하고 장기간 소요	
수송량	비교적 적음	수송량이 많고 수송로 주변지역 반대 예상	

요약

소내 저장시설 확충

장점

- ✓ 경제성 관점에서 압도적으로 유리한 선택
- ✓ 입지요건·인허가 관점에서 비교적 단기간에 실현

쟁점사항

- ✓ 부지별 건식·습식 저장시설 확충할 공간은 있는가?
- ✓ 원전 부지별 해당 지역 주민·지자체 의 예상되는 민원을 어떻게 극복할 것인가?
- ✓ 장기 저장에 따른 사용후핵연료 건전성 과 저장용기의 장기 안전성 확보 대책은?
- ✓ 폐로 후 대책은? 영구처분 과의 연계 계획은?
- ✓ 시설 확충 비용조달은?

요약

소외 중간 저장 시설 건설

장점

- ✓ 만성적 소내 저장 용량 문제 일거에 해결
- ✓ 중앙집중식 종합관리로 사용후핵연료 관리의 효율성 극대화

쟁점사항

- ✓ 40~50년 기간의 한시적 중간 저장 이라면, 이 때문에 상황에 따라 제2의 중간 저장 시설로 옮겨야 한다면 적어도 수 십조(?) 원이 소요될 것으로 예상되는 이 방안이 과연 현명한 선택인가? 우리의 경제 사정이 그만큼 여유가 있는가? 제2의 중간 저장시설의 확보대책과 실행 계획까지도 고려한 선택인가?
- ✓ 고준위 폐기물 영구 처분장 부지 확보에 어떤 영향을 끼칠 것인가?

고려사항

- ✓ 원전 수명 : 연장 운전 까지 고려하면 초기 80년대 원전을 제외하면 대부분의 현 원전의 폐로 시기가 지금부터 40~60년 후가 아닌가?

맏음 말

성공적 공론화를 위한 제언

- 핵심 이슈에 대한 객관적이며 공정한 과학기술적·경제적 · 제도적 · 사회문화적 평가 기준을 개발
- 정책, 법제화 및 (국내) 기술 수준과 능력을 고려한 의사결정
- 기관 · 부처 의 이해가 아니고 국익을 우선한 방안 도출
- 공개 토론에 의한 의사진행

감사 합니다

Max Planck :

A new scientific truth does not triumph by convincing opponents and making them see the light, but rather because its opponents eventually die, and a new generation grows up that is familiar with it.”