



대한민국
핵심 한국원자력학회
KOREAN NUCLEAR SOCIETY
2023 추계학술대회

2023. 10. 25.



방사능재난시 실내대피시설의 거주성보장 방호기술개발



(일반주거시설: 아파트를 대상으로)



연세대학교

은 종 화

(eunjeon0626@hanmail.net)

☎ 010-7107-6026

들어가기

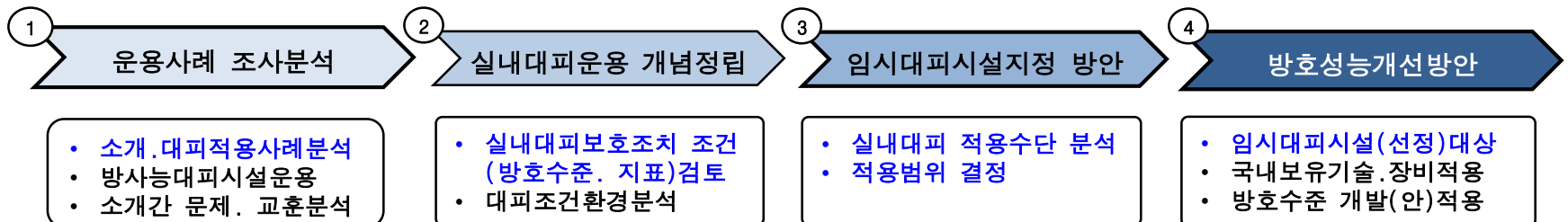
● 연구 중점/방법

✓ 방사능 원전사고 시의 현 실내(옥내)대피개념은 최적의 주민보호를 제공하는가?

- 원전사고시 소개(Evacuation)가 주민보호의 최선의 방안인가?
- EPZ내에서 실내대피(Shelter In Place)상황(조건)은 어떻게 발생할 것인가?
- 국내 방사능재난에서 실내대피운용의 주 위협요인은 무엇인가?
- 실내대피간 주거시설(아파트)의 방호도(거주성)는 주민안전에 충분한가?

✓ 현 주거시설(아파트)에서 최적의 주민보호를 제공하는 방법(기술)은?

- 임시대피시설로 거주성보장을 위한 최소 방호성능 개선목표의 설정은?
- 저비용, 고효율의 주거시설의 방호성능 개선방법과 기술은?



목차

CONTENTS

CHAPTER/ 1. 운용사례분석

CHAPTER/ 2. 국내 원전지역 주민보호조치 현상

CHAPTER/ 3. 실내대피시설의 방호도 강화 방안

CHAPTER/ 4. 방사능 거주성 방호기술

CHAPTER/ 5. 방호성능 개선 방안



Key Word

주민보호조치 / 실내대피 / 임시대피소 / 방호기술 / 거주성

1. 운용사례분석

● 주민보호조치(소개.대피)적용(1)

□ 개요(INES: 5이상/ 주민대피 실시 재난)

TMI-2	미국 Three mile 섬 (해리스버그시/16km)
사고일시	1979.3.28. 04:00
피해	3명(피폭:근무자)/4,000mRem
주민보호	자발적 소개:114,000명/3일)
방출량 (일)	250Ci I:150,000Ci/3일

Chernobyl	우크라이나Chernobyl (키예프 북쪽130km)
사고일시	1986.4.26.01:23
피해	고 피폭:1,000명/31명 사망 500만 명 피폭
주민보호	강제대피(220,000명/1년)
방출량 (일)	5.2E+18(Bq) 7,300,000Ci/ 10일

Fukushima	일본 Fukushima
사고일시	2011.3.12.18:00
피해	사망:2명/167명(근로자) 피폭/ >100mSv
주민보호	계획대피(91,500명/14일)
방출량 (일)	7.6E+17(Bq) I: 900PBq/13일

□ TMI-2: 비 연속 2단계 비상대피: 07일

구 분		비상계획지역(EPZ)		
폭발	소개/대피 령	8km	>16km	비고
3.28 04:00 (1차 누출)	3.30 12:30	소개 (81시간 후)		
3.30 11:00 (2차 누출)	3.30 22:00		자발적 대피 실내대피 (91시간 후)	그림자 대피발생

□ Chernobyl : 비 연속 3단계 비상대피: 110일

구 분		비상계획지역(EPZ)		
폭발	소개 령	10km	>30km	30km<
4.26. 01:23 (방사능 노출)	4.27 14:00	소개 (36시간 후)	PAZ소개 완료(46,614명) (3시간 소요)	
	5.3~5.7(05일)		소개 (8일경과)	
	5.14~8.16 (94일)			소개 (19일경과)

□ Fukushima : 연속 4 단계 계획대피 : 14일

구 분		비상계획지역(EPZ)			영향지역
폭발	소개 경보	3km	10km	20km	20~30km
방사능 비 노출 (18시간)	3.11. 21:23	소개 (21시간 전)	대피 (옥내)	PAZ소개 완료(5,862명) (27시간 소요)	
	3.12. 05:44		소개 (13시간 전)	대피 (옥내)	
방사 능 노출	1호기 (15:36)	3.12. 18:25	방사능 노출(피폭) - 원전내 강도 400mSv/h(3.15) 1,000mSv/h(3.16) 정문: 10mSv (3.15.10:40) - 방사능노출기간 (3.12~23:11일간)		소개 (수소 폭발)
	3호기 (11:01)	3.14 11:01			
	4호기 (06:01)	3.15. 11:14		170μSv/h (3.17)	대피 (옥내)
대피소개 기준		비 적용			30mSv
비 고		<ul style="list-style-type: none"> 지진발생(3.11.14:46) 쓰나미 도착(3.11.15:37. 정전) 원자력비상사태 발령(3.11.19:03) 외부전원복구(3.20) 			<ul style="list-style-type: none"> 자발적 대 피지역전환 (3.25)

1.운용사례분석

● 주민보호조치(소개.대피)적용(2)

□ 실내대피가 필요한 상황 (임시대피시설 소요)

실내대피(SIP: Shelter In Place): 옥내대피 유사용어. 화재방 상황 하에서 기존시설에 차폐. 밀폐. 양압 등 거주성보장 시설을 한 임시대피시설에 단기간 방호목적으로 체류하는 것

• EPZ:PAZ + UPZ
(비상계획구역)
전 지역 실내대피
발생조건 상존

구분(양상)	발생조건	대피시설소요지역	비 고
계획대피 (완만진행형)	<ul style="list-style-type: none"> • 단계적 비상발령(내부-외부) - 비상선포- 소개 령- 대피 령 • 주민대피령: OIL(개입 준위) - 원전외부 부지: 환경방사능 강도 	<ul style="list-style-type: none"> • UPZ(긴급보호조치지역) - (1) 3km (2)3~10km (3)10~20km (4) 20~30km 	Fukushima 사고 (3~4단계 :실내대피2회) -1.2단계: 계획대피(비 노출)
비상대피 (결과수습형)	<ul style="list-style-type: none"> • 단계적 비상발령 - 초기 방사능 누출(외부) 주민소개령- 대피 령 	<ul style="list-style-type: none"> • UPZ(긴급보호조치지역) - (1) 8~16km 	TMI사고 (2단계 실내대피 1회) -1단계: 소개
	<ul style="list-style-type: none"> • 비정상 비상발령 - 초기 대량 방사능 누출(외부) 주민소개령 	<ul style="list-style-type: none"> • EPZ(비상계획구역) - (1) 10km (2)10~30km (3) 30km< 	Chernobyl사고 (1~3단계 :실내대피 3회)

□ 실내대피의 방호영향 조건 (방사능노출시간/강도)

• 계획대피
(사전대피)불가시
초기 노출시간
(3~4일/ 최대8일)
증가

구 분	소개대피체계형태	기간(일)	초기 노출시간/선량	지역(구간)	비고
Fukushima 사고	연속 4 단계 (계획대피)	14	11일(3일) /10~30mSv	20~30km	초기노출전 사전대피
TMI사고	비 연속 2단계(비상대피)	07	81~91시간/9mSv	>16km	자발적 소개
Chernobyl사고	비 연속 3단계 (비상대피)	110	36시간~8일	> 32km	강제소개(3단계)

□ 재난취약자 실내대피 영향(병원시설 방호조건)

• 일반인 소개보다
3배 준비시간
소요**(2~3일)**

구 분	지역	대상(환자)	소개지연	이동수단	비고
Fukushima 사고	3~10km (PAZ)	338 (1차:209/2:60/3:35)	48~96시간	BUS/ 헬기 (230km/10시간 소요)	3차 이동 이동(소개)간 사망(60명)

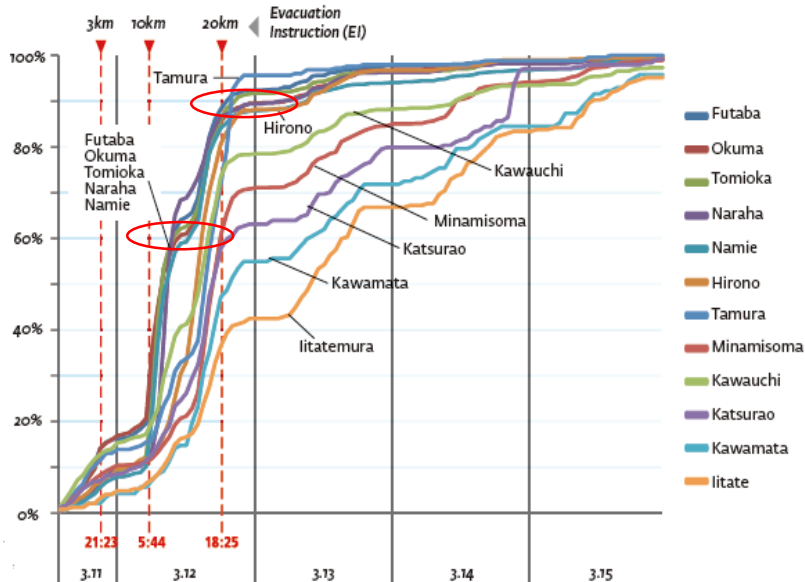
비 정상 방사능 오염 피폭상황 위협으로 실내대피 상황. 빈도 및 기간 증가로[주민보호조치 강화 수단] 필요

1. 운용사례분석

● 주민보호조치(소개.대피)적용(3)

□ 주민보호조치 결과: Fukushima 사고사례

▶ 주민사고인지시기

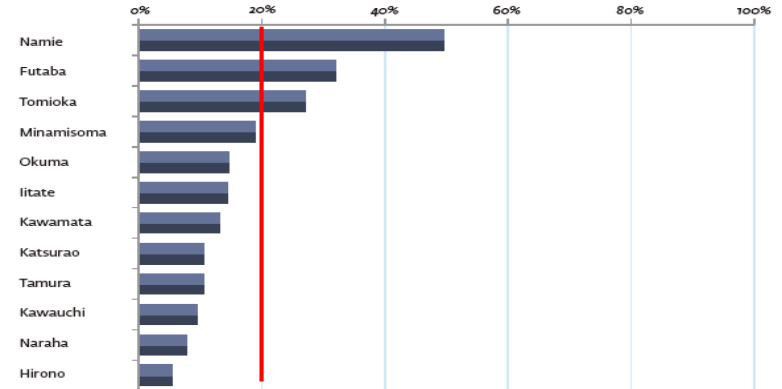


- 사고인지시간지연: **소개의 효과 감소**
주민60%: H+9시간/ 주민90%: H+24시간
- 사고지역 재 후송(소개)율: **20%**(12개 지자체)
- 지자체별 주민소개 회수: **5~6회**/ 30%/지자체

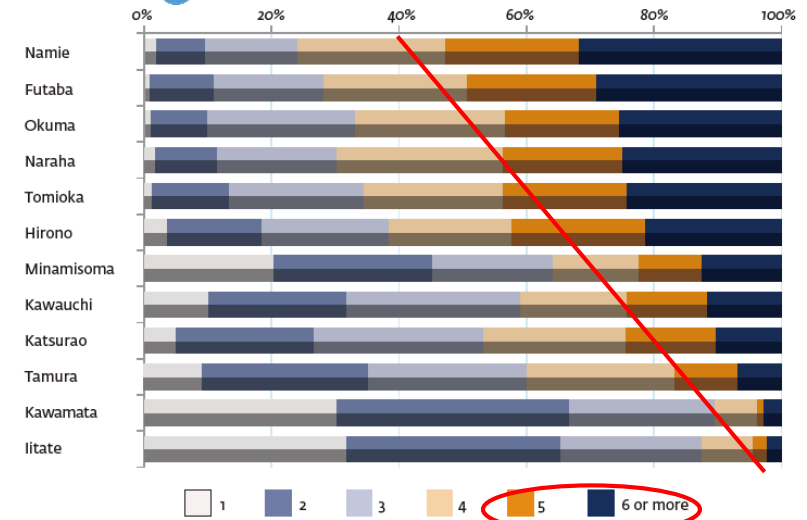
빈번한 소개(Evacuation)로
주민 피로도 증가/ 정부 신뢰도 저하

일본국회 후쿠시마 원전사고 조사보고서(2012. 7). Pp52~57

▶ 사고지역 지자체별 재 후송(소개)율(%)



▶ 원전사고간 지자체별 주민소개 회수(회)



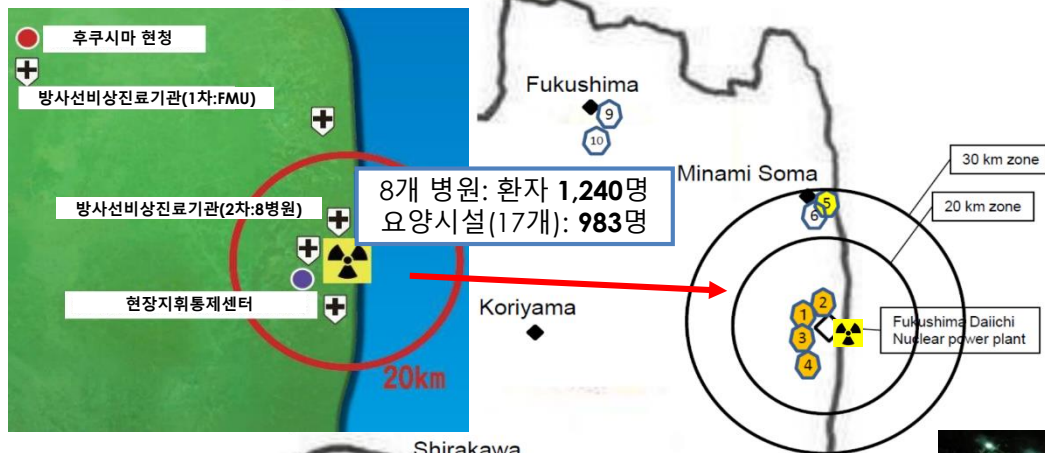
1. 운용사례분석

● 재난취약자 소개. 대피운용(1)

Five years after Fukushima NP accident Health consequences after the accident.(FMU.2016)

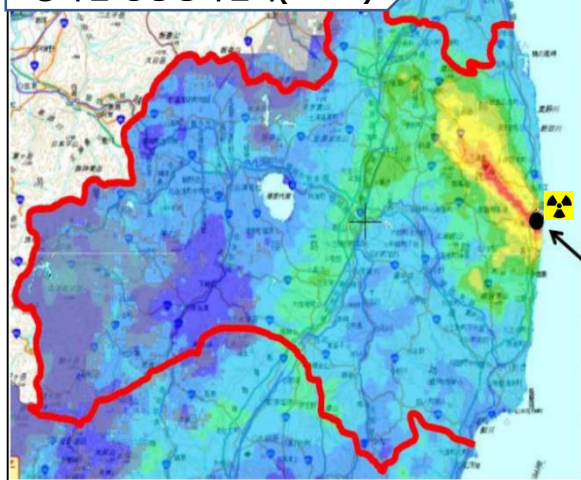
□ Fukushima 원전사고(2011.3.11)

▶ 재난취약자 피해영향



- 후쿠시마 현 인구: 2,055,325명
- 소개(대피)인원: 164,845명 (8%)
- **재난취약자: 20,000명**
(인구: 1% / 소개인원: 12%)
- 재난사망자: 2011.3~2013.3
- **2,688명**
- 66세 이상: 90%
- 지진 후 1개월내 사망
- 2011.3~5월 사망률:
1%→3%(1,000명당: 평소 3배)
- 후쿠시마 사망자: 최고
(1,914명: 71.2%)

방사선 영향평가결과(SPEED)



□ 분석

- 요양시설 노약자//입원환자의 **긴급소개간 사망자** 발생
- 요양보호요구 노약자의 **재배치장소(대피소) 사망률** 증가
- 정신건강/생활양식 관련된 보건 **부작용 효과** 발생
- **방사능피폭 사상자** 보다 **소개로 인한 사상자 발생 증가**



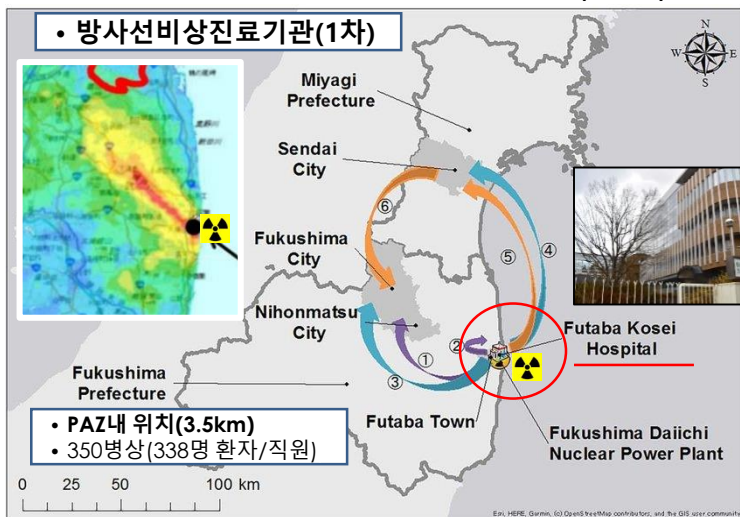
1. 운송사례분석

● 재난취약자 소개. 대피운송(2)

후쿠시마 핵사고와 후타바 병원 참사를 통해 본 방사능재난과 대책
(이헌석, 2014. 부록p12~16)

□ 일본 Futaba 병원 사례

▶ 재난취약자 대피소개간 피해발생(개요)



일본 후타바 병원 환자 이동 경로



자료: 일본 국회 후쿠시마사고조사위원회 보고서

□ 분석

- 소개명령(3.12.05:44)
- BUS수배((3.12.12:00/ 5시간소요)
- 1차 소개(209명: 보행/ 4명 사망)
- 1호기폭발(3.12.15:36):구조중지
- 2차 구조대도착(3.14.04:00)
- 40시간지연(5명 사망)
- 3호기폭발(3.14.11:00)
- 우회소개(230km:10시간소요)
- 구호소도착(60명 소개/15명 사망)
- 최종구조(3.16. 35명 헬기)
- 소개시간:4일소요/사망:50명



구 분	지 역	대 상(환자)
Fukushima	3~10km (PAZ)	338 (1차:209/2:60/3:35)
소개지연	이동수단	비고
48~96시간	BUS/ 헬기 (230km/10시간 간 소요)	3차 이동 소개간 사망(50명)

일반인보다 소개준비시간 과다소요(2~3일/3배)
이동(소개)간/ 후 사망률 증가 (14.8%)
소개보다 실내(옥내)대피 필요성 증가

1. 운송사례분석

● 재난취약자 소개. 대피운송(3)

□ 사례#2: 일본 Etatea 요양 병원

▶ 재난취약자 미 소개/사상자 미 발생 사례



재난취약자 미 대피 후송사례#2



□ 분석

- 소개명령: 2011.3.22
- 요양원 환자: 100명
- 환자상태: 이송간 건강위험 초래
- 지자체/ 중앙정부: 미 소개. 대피로 결정
- 대응방법
 - 병원 스텝 그룹: 안전지역 소개 대피
 - 교대로 외곽지역에서 요양원 방문 간병 지속
 - 요양환자 및 직원 피폭량 지속 모니터링 실시 (기준 준위: 20mSv/년 적용)

사망자 없음

방사능 피폭상황에서 소개 (Evacuees) 없이 실내대피와 개입 준위 조정을 통한 재난 취약자(양원 환자) 보호가능 입증

방사능재난시 재난취약자의 대피 및 소개에 대한 사상자발생을 고려한 지침 구체화 필요

1. 운용사례분석

● 주민보호조치사례 교훈/변화

Yasuda H, "Implications of the evacuation of hospitalized patients in a nuclear emergency", Front. Public Health 11:1217118 (2023). P3~4

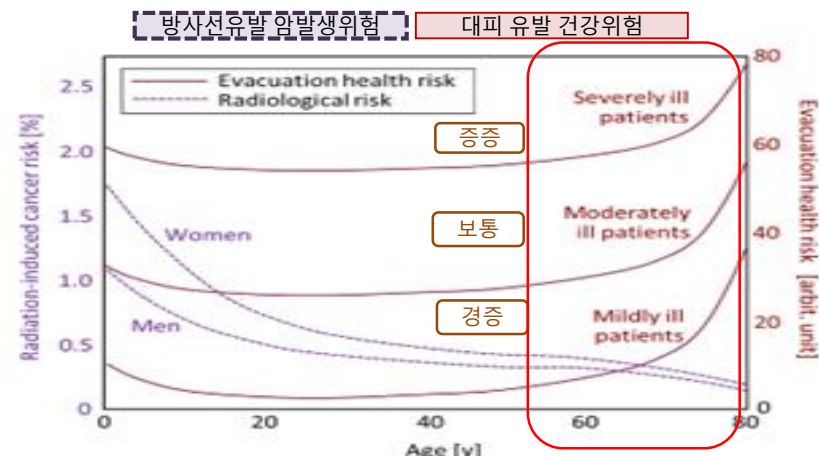
□ 원전의 복합재난시의 주민보호영향(2011. 미국)

□ 재난취약자의 주민보호조치방향 변화(2023. 일본)

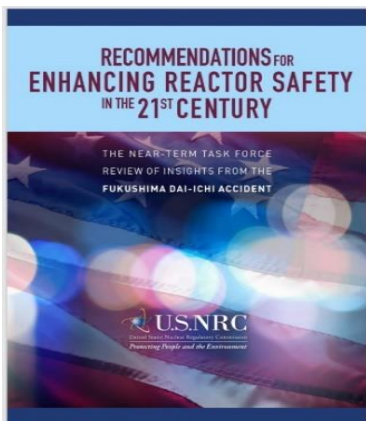
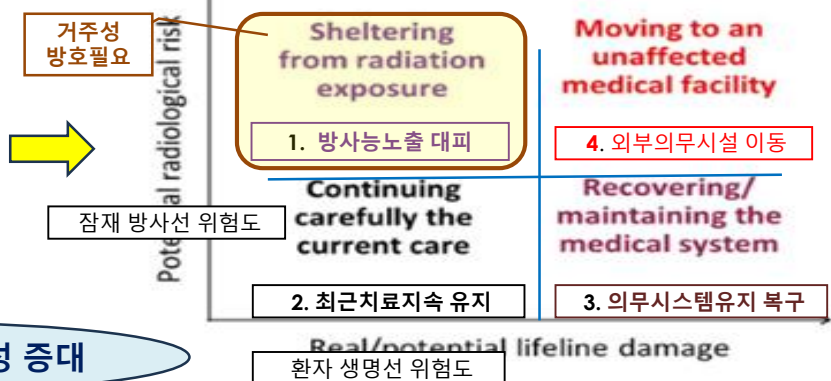
● 자연재난의 정상적 주민보호조치 시행제한

● 재난취약자 주민보호조치 변화/정당화 근거

자연재난의 원전사고 영향분석/대응 (미 NRC-TF)	
주민보호	<ul style="list-style-type: none"> • 소개경로 훼손 (교량, 도로, 철로 손실 붕괴) • 주민소개 위협요소 발생 (침수, 빙판, 연기, 교통제어) • 비상통신기능 상실 (정전: 경보, 전파, 사이렌, 방송기능) • 주민보호조치 적시 수행제한(지연, 시기상실) <ul style="list-style-type: none"> - 주민소개시간(ETE): 자연재해 고려 판단 제한
원전사고	<ul style="list-style-type: none"> • 원전사고 위협요소 발생 (화재, 침수, 붕괴, 정전) • 긴급대응, 복구를 위한 외부자원 동원제한 <ul style="list-style-type: none"> - 외부자원 자연재해 복구 투입 우선순위 - 원전 진입로 차단, 붕괴 제한
건의 (대응)	자연재해 도달 전 선 조치, 주민소개(Evacuation) 대피필요



재난취약자(고령, 환자): 방사선 암발생을 보다 소개(Evacuation)간 생명위험 사망률이 더 높다 (30배)



Recommendations for Enhancing Reactor Safety in the 21Century, (NRC.US.2011). P58

NRC-TF Fukushima 원전사고보고서(2011.7)

비정상적 재난상황: 정상적 주민소개 시행 제한(지연)

주민보호조치 선정기준 변화: [이득] > [위험]

2. 국내 원전지역 주민보호조치 현상

● 국내 원전 비상계획구역(EPZ) 운용(1)

□ 원전사고 주민소개.대피체제 모형(현장조치 행동매뉴얼)

구 분	징후감지	초기대응	비상대응				비고
위기단계	관심,주의	경계	심각	재난선포			비상해제
	백색비상	청색비상	적색비상				
상황조건	• 원자로 이상 • 원전부지 누출 • 원전외부지역 누출 • 수소폭발						
적용지역	원자로	원전	PAZ	UPZ			EPZ개념 확대적용 (2015)
			5km	5~10km	10~20km	20~30km	
피폭수준	비 노출	비 노출	방사능 노출(약)	방사능 노출(중)	방사능 노출(강)	방사능 노출(약)	
계획대피 (4단계)		소개(재난취약자)	(소개준비)				
			소개	실내대피			
				소개	실내대피		
					소개	실내대피	
구호소					347개소		609개소(30km<)
병원			1개소		4개소	6개소	방사선진료

거주성 : 방사능 피폭 위험지역의 비상계획구역내 위치한 임시대피 시설에 방사능 피해저감수단 보강을 통하여 일정시간 및 일정수준의 방사능 위협에 대한 방호, 생존 및 안전을 제공해 주는 것.

□ 원전지역 구호소운용 현황(2020년 이전)

구분	고리/새울	월성	한울	한빛
구호소(개)	956	369	113	134
EPZ 외부 지정	609	22	113	106
EPZ 내부 지정	347	347	0	28
내부지정비율(%)	36	94	0	21

원자력안전위원회, 제2차 국가방사능 방재계획(2020~2024), 2020

□ 구호소지정요건 변화(2022년)

- 비상계획구역 외부 우선지정(30km<)
- 지정제한시 비상계획구역 내부 원거리시설 지정
- 특정방향집중방지. 분산지정
- 시설요건(편리/접근/안전/공공성 중점 고려)

방사능 방재 주민보호계획 수립방향(행안부. 원안위. 2022. 5. p17~18)

□ 원전지역 병원운용 현황(4개원전지역)

원전	병원(방사선비상진료)	원전-거리(km)	비고
월성(2)	울산대병원(2차) 동강병원(1차)	21.8 23.5	UPZ: 20~30km(2)
고리 새울(5)	동남권원자력의학원(1차) 기장병원(1차) 대동병원(2차) 울산대병원(2차)* 동강병원(1차)*	4.2 11.4 22.9 25.5 26.0	PAZ: 5km(1) UPZ: 10~20km(1) UPZ: 20~30km(3)
한울(1)	울진군의료원(1차)	12.0	UPZ: 10~20km(1)
한빛(3)	영광종합병원(1차) 영광 기독교병원(1차) 고창종합병원(1차)	16.7 18.0 24.2	UPZ: 10~20km(2) UPZ: 20~30km(1)
11개소	1차(8)/2차(3)	4~26km	



2. 국내 원전지역 주민보호조치 현상

● 국내 원전 비상계획구역(EPZ) 운용(2)

OIL(Operational Intervention Level): 공간 방사선량율이나 환경시료 중 방사선 물질의 농도 등의 예측 가능한 수치로 표기하는 운용상의 개입 수준.

□ 분석

● 현실내대피개념: 사전 우선 소개(Evacuation) 위한 제한적 장소에 일정시간 대기 개념

- EPZ: PAZ + UPZ (비상계획구역) 전 지역 실내대피 구체적 지침 결여

- PAZ지역에서 실내대피의 우선적 실시 경우
 - PAZ지역 거주성 확보 위한 [임시대피소] 필요성
- UPZ지역에 대한 실내대피 적용. 소개와 연계운용 방법
- UPZ지역(외부)에 대한 장기간 실내대피 적용

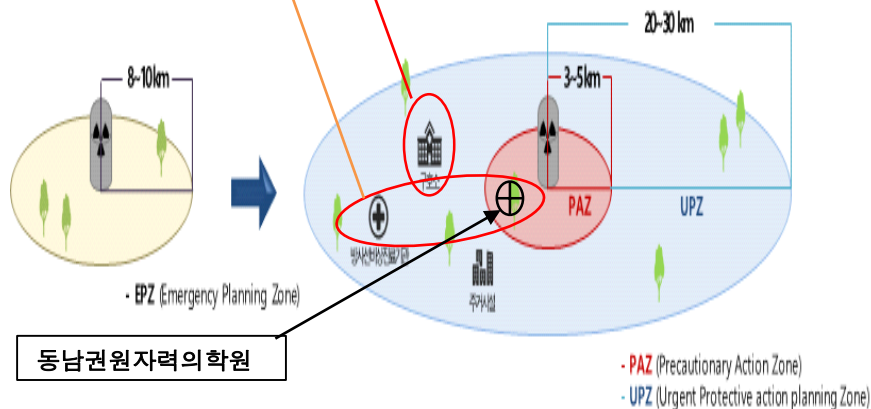
- 주민 대피기준(실내대피: OIL#1)
 - 10mSv/2일 이하 피폭
 - 초과할 경우 소개 실시
- 50mSv/7일 이하 피폭지역
 - 구호소설치 가능한 지역

- EPZ내 구호소(기존)의 실내대피시 활용 필요성

- UPZ지역 내부 위치 구호소에 대한 실내대피 운용여부
 - 실내대피전환시 [임시대피소] 기능부여 여부

- EPZ내 병원(요양)시설의 실내대피 지침 결여

- EPZ(PAZ/UPZ)내 위치한 병원에 대한 실내대피 적용
 - PAZ위치 병원에 대한 계획대피(소개)간 실내대피 방안



비상계획구역(EPZ)내의 다양한 방사능 피폭상황에 대한 구체적 주민보호 [실내대피 운영지침] 미흡

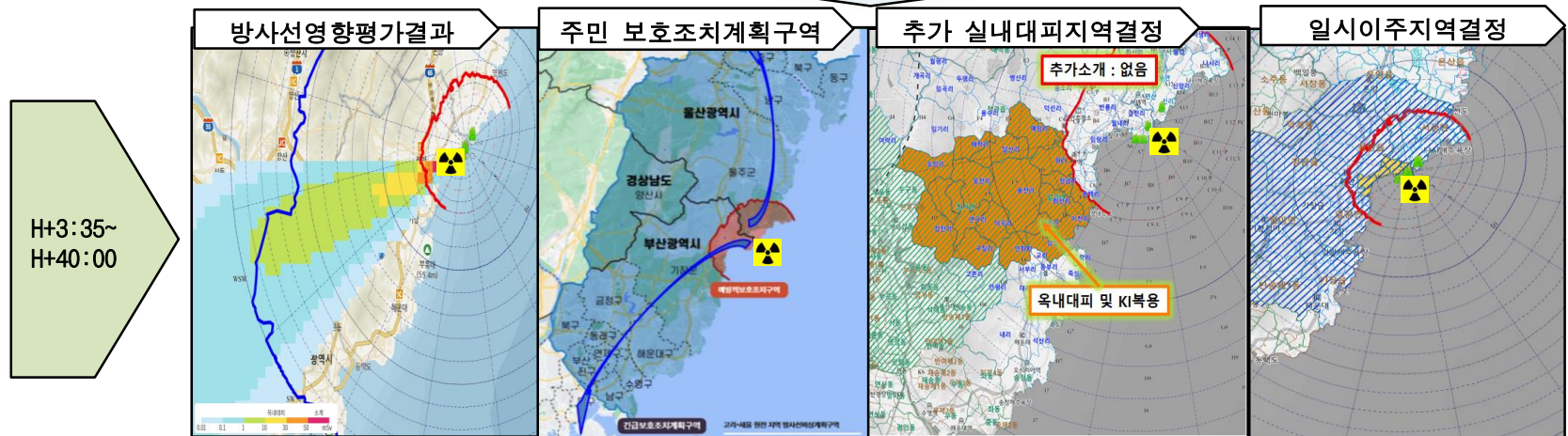
2. 국내 원전지역 주민보호조치 현상

2022년 안전한국(연합방사능 방재)훈련결과(고리원전)

□ 대책협의회 주요 안건(1~4차)

▶ 고리원전사고 현장방사능 합동방재센터: 합동방재대책협의회 결정사항(11.23.16:35~11.24.11:55)

구 분 백색비상 :14:30 (H+1:15)		합동방재대책협의회			
		1차(11.23.16:35)	2차(11.23.17:05)	3차(11.24.10:20)	4차(11.24.11:55)
		청색비상:15:40(H+2:35)	적색비상:17:00(H+3:55)		
주 민 보 호	안건	안전 취약계층사전소개	일반주민소개(PAZ)	추가소개 실내대피지역결정	일시이주결정
	대상	6개 시설(기장/울주군) 환자:238명/직원:106명	기장. 울주군 16,900명	기장군:5개 지역:44,2654명 (방사선영향평가결과)	4개 지역(기장):길천 / 월내리/ 온양/양산 덕계
비상진료			현장방사선비상진료소 운용(1 단계:2소):15:40	현장대응 → 병원 대응전환 (10:00)	(방사능사상자진료)
비고			실내대피: UPZ 내 주민	UPZ내 반경16km실내대피	



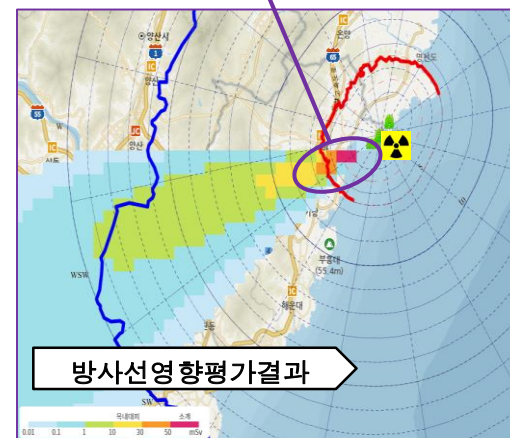
2. 국내 원전지역 주민보호조치 현상

● 2022년 안전한국(연합방사능 방재)훈련결과 (고리원전)

□ 분석

▶ 재난취약자 및 시설에 대한 방사능 피해 최소화를 위한 소개 및 대피개념 불명확

<ul style="list-style-type: none"> 사전대피, 소개범위 불명확 (청색비상) 	<ul style="list-style-type: none"> 사전대피, 소개 재난취약자 범위에 병원환자 누락 <ul style="list-style-type: none"> - 안전취약계층(어린이, 노인, 장애인, 저소득층)대상 - 노인요양시설, 장애인시설만 사전소개계획 반영 (재난안전기본법제3조 9-3호/ 표준매뉴얼 80p)
<ul style="list-style-type: none"> EPZ내 병원의 비상 대피계획지침 미비 	<ul style="list-style-type: none"> 비상진료지정병원 및 일반병원의 운용개념 불명확 <ul style="list-style-type: none"> - 비상진료병원의 소개대피개념의 부재(PAZ/UPZ내) (동남권 원자력의학원/대동/기장병원)
<ul style="list-style-type: none"> 복합재난상황에 대한 주민보호조치 사태목록(MSEL) 미흡 	<ul style="list-style-type: none"> 복합재난(태풍+설계기준사고)시 도로붕괴/침수 등 대피소개 장애요인에 대한 대응검토 누락 <ul style="list-style-type: none"> - 방사능오염사상자 상황만 반영



원전	병원(방사선비상진료)	원전(km)	비고
월성 (2)	울산대병원(2차) 동강병원(1차)	21.8 23.5	UPZ: 20~30km(2)
고리 새울 (5)	동남권 원자력의학원(1차) 기장병원(1차) 대동병원(2차) 울산대병원(2차)* 동강병원(1차)*	4.2 11.4 22.9 25.5 26.0	PAZ: 5km(1) UPZ: 10~20km(1) UPZ: 20~30km(3)
7개소	1차(4)/2차(3)	4~26km	

2. 국내 원전지역 주민보호조치 현상

● 국내 원전사고 실내대피 발생조건 및 유형정립 필요

□ 실내대피 상황도출

- 3개유형의
실내대피 상황도출

구분(사례)	상황내용	주민보호상태		실내대피 발생
후쿠시마 원전사고	<ul style="list-style-type: none">• 원전사고후 단계적 비상발령 진행<ul style="list-style-type: none">- 비상선포- 소개령- 대피령- 주민소개령: 20시간이상 가능	<ul style="list-style-type: none">• 정상	<ul style="list-style-type: none">- 사전경보발령 가능- 거리에 따른 단계적 실내 대피-소개 형태 적용	<ul style="list-style-type: none">• 2~3회- 통제가가능- 짧은 시간
TMI 원전사고	<ul style="list-style-type: none">• 짧은 시간 단거리 방사능 누출사고- 시간적 제약(단계적 경보발령 제한)- 주민소개령: 시간제한/ 불가	<ul style="list-style-type: none">• 비정상 (1)	<ul style="list-style-type: none">- 단순 방사능 누출사고- 소개(Evacuation) 제한	<ul style="list-style-type: none">• 1회- PAZ지역 포함- 짧은 시간/ 통제제한
체르노빌 원전사고	<ul style="list-style-type: none">• 비정상 비상발령- 폭발사고/초기 대량 방사능 누출주민소개령: 불가	<ul style="list-style-type: none">• 비정상 (2)	<ul style="list-style-type: none">- 폭발적 누출사고/ 중대사고- 경고 및 소개제한	<ul style="list-style-type: none">• 3회- PAZ~EPA지역- 장시간(수일)/통제가능

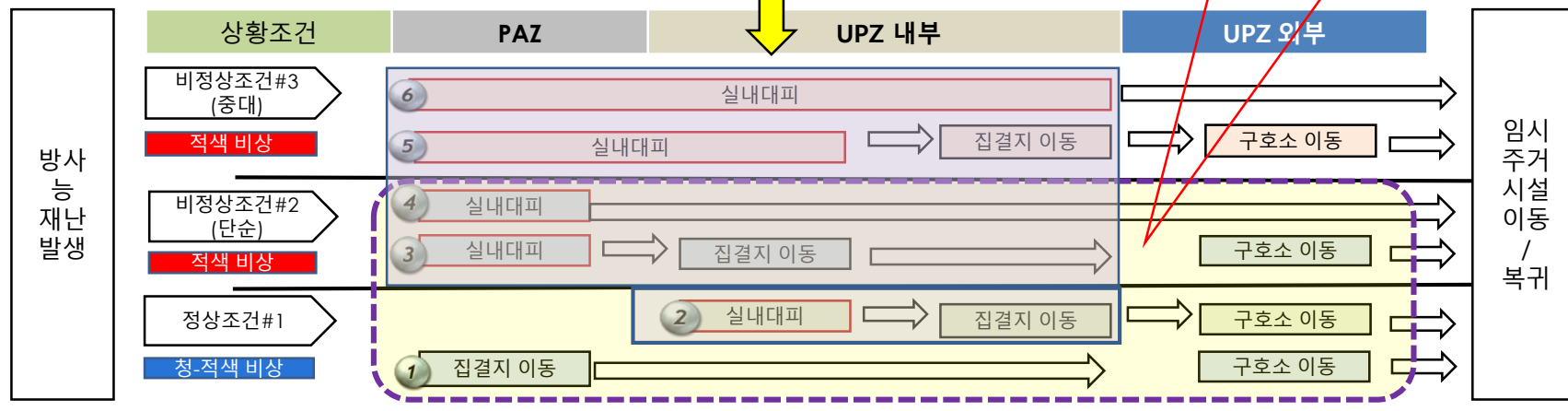
□ 국내 원전사고시 EPZ 적용가능 실내대피 조건 선정

- 국내 발생가능
실내대피조건
(3개 유형)

구분	#2:비정상(단순)조건	#1: 정상조건	#3:비정상(중대)조건
실내대피 적용 영역	• PAZ 지역(1개 지역) - 0~5km	• EPZ 지역(2개 지역) - 5~10km / 10~20km	• EPZ지역(1개 지역) - 0~30km

□ 국내 원전사고시 주민보호조치(소개, 대피)유형 정립(6개 모형)

방사능 방재 주민보호 계획수립방향(2022.5) p9.
대피, 소개시설 운용개념절차: 1.2.4 유형(3개 모형) 제시



방사능 오염지역에서 다양한 실내대피 모형[6개 중 5개 모형]에 대한 주민 방호대책 구체화 필요

3. 실내대피시설의 방호도 강화방안


실내대피시설의 취약성

U.S, EPA, *Manual of Protective Action Guides And Protective Actions For Nuclear Incidents*, 1992.

p.1-4, Table1-1.

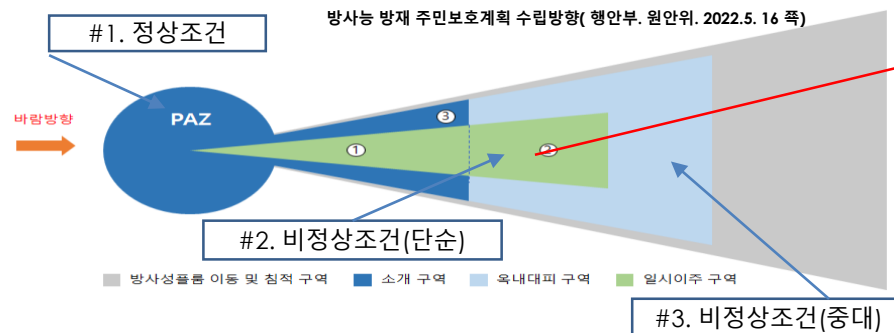
□ 방사능재난 초기단계 주 위협

- 주요오염원: 방사성 물질(**방사능 분진**, **방사능 낙진**)
- 핵연료 연소물질/ 냉각재 물질/오염 위험: 기상에 의한 대기중 부유 거동 확산. 지면 침착오염
- 오염형태: **흡입에 의한 호흡기 내부 피폭**.. **피부 흡착에 의한 외부피폭**

<div>구분</div>	비상계획구역(EPZ): 내부(PAZ+UPZ)					비상계획구역(EPZ):외부	
	외부 방사능		흡입(공기)	오염 (피부피복)	오염(지역)	섭취 (음식,음료)	흡입(부유)
	시설	오염구름(누출)					
사고 단계	초 기 단 계 (발생 → 수시간)						
				중 기 단 계(수시간→1-2일)			

□ 취약요소(거주성)

• 3개 실내대피유형 적용시 취약성



•일시 이주지역 형성 위험
초기단계 고농도 방사능
입자 침적으로 거주불가
지역 형성 지역
(정상조건#1지역/
비정상 조건#2지역)

□ 분석

- 건물 구조물의 차폐도에 의한 **방호도(PF)**
취약으로 방사능 **전신피폭 노출위험**
- 건물 밀폐도의 취약으로 외부 **방사능 입자**
(구름)에 의한 **건물 침투로 흡입피폭 발생**
위험 증가 주민보호 취약

구 분	#2:비정상(단순)조건 0~5km	#1; 정상조건 5~20km	#3:비정상(중대)조건 20~30km
실내대피 가능시설	<ul style="list-style-type: none"> •일반 주거시설 (아파트) •공공용 대피소 •병원시설 	<ul style="list-style-type: none"> •일반 주거시설 (아파트) •임시 구호소(중간/2015이전 지정시설) •공공용 대피소 •병원시설 	

3. 실내대피시설의 방호도 강화방안

FEMA.2011. Key Planning Factors: Response to an IND in the NCR. P21/C-2

실내대피시설의 임시대피시설화 개념전환

□ 일반주거시설(아파트)임시대피시설 선정이유

방호도 영역	건물 예시(구조특성)
불량(PF<4)	차량. 목재, 벽돌구조의 단층건물(지하실 없음)
부적절 (4 ≤ PF ≤ 10)	단독형 건물.아파트(2~4층 구조. 지하실 없음)
적절 (10 ≤ PF ≤ 40)	3층 벽돌 연립주택. 아파트 지하실/ 콘크리트벽 구조 중.고층 건물(5층 이상).아파트의 외부영역
최적 (PF ≥ 40)	대규모 지하시설. 구역/콘크리트벽 구조 중.고층건물. 아파트의 내부영역

□ 미국 대피소 분류(낙진대피소기준;FEMA)

등급	분류	기준(거주성)
1	I 급 (장기)	핵 대피소 압력 (Over Pressure) 화생방 방호 (우수) 75pa 압력유지 PF:100 HVAC 가동 (HEPA 필터적용)
2	II 급 (장기)	핵(낙진) 대피소 압력 (Over Pressure) 화생방 방호 (우수) 5-12pa 압력유지 PF:100 AHU가동 (HEPA부분적용)
3		낙진대피소 화생방 방호 (우수) 5-12pa 압력유지 PF:10 AHU가동 (HEPA부분적용)
4	III 급 (단기)	개선(Enhance) 출입구, 창문 폐쇄구조 보강PF:10
5		임시 (Expedient) 테이프, 밀봉작업 PF:10
		보통(Normal) 출입구, 창문폐쇄 PF:10

□ 방호성능 개선 목표

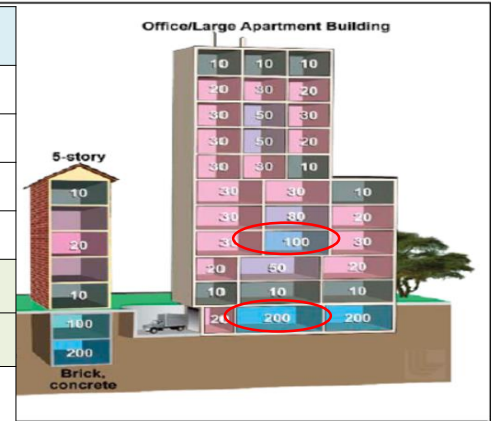
- 임시대피시설의 방호성능 개선 목표: 방사능재난(노출. 피폭) 상황에서 3~7일 이상 방호제공
- 방사능 피폭 공황(PANIC)방지 / 주민 재난심리 안정감 제공 / 안정적 소개준비시간의 확보
- 대상: 임시구호시설(UPZ내) / 병원시설(UPZ내) / 공공용대피소/일반주거시설(아파트)

• 이유

- 3대 원전사고사례분석결과: 방사능 노출시간(최소3~4일/ 최대 8일)
- 대피(Sheltering) 개입 준위(0IL)기준:10~50mSv/2일~7일
- 재난구호소 체류기간: (구호법 :7일)

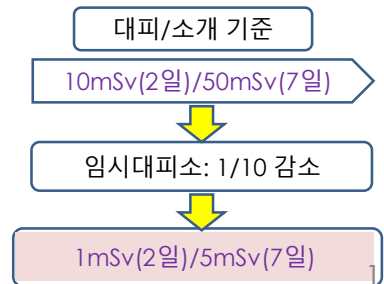
임시 대피시설:방사능 피폭위험지역에서 일반시설에 최소 거주성(방호)를 제공하여 단기간 주민에 대하여 주민보호조치(소개)를 위한 방사능 방호를 제공하는 시설

대피소특성	방호도(PF)
지하(흙:1m)	5,000
목재구조 주택	2~3
지하실	10~20
차량	1.7~2
아파트(지하층)	100
아파트(저층)	10
콘크리트 건물 벽 두께(23cm) 벽 두께(30cm)	10~150 30~1000



SECURITY ENGINEERING: PROCEDURES FOR DESIGNING AIRBORNE CHEMICAL, BIOLOGICAL, AND RADIOLOGICAL PROTECTION FOR BUILDINGS DOD.2007. UFC4-024-01. p.3-21. Table3-5

- 일반주거시설 : 밀폐 이용/ 기존 환기시스템 이용 2.5등급(압력+개선)대피소 수준(미FEMA기준)
- 기존건물 구조보강제한: 보조 차폐수단 적용 (예: 방사선 차폐용 커튼)
-건물의 고(高) 방호공간 활용 방안 강구



4. 방사능 거주성 방호기술



실내대피시설의 방사능 위협/ 대응

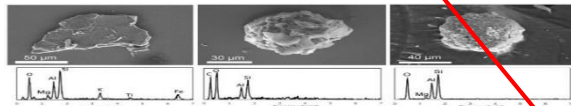
U.S, EPA, *Manual of Protective Action Guides And Protective Actions For Nuclear Incidents*, 1992.

p.1-4, Table 1-1.


□ 방사능위협실체

방사능입자	후쿠시마 원전	체르노빌 원전
연료입자 (내화성물질) + 응축입자 (휘발성물질)	Cs. 0.53~0.64 μm	Ru. I. Te. Cs 0.33~0.93 μm
	0.3~1 μm	

방사능입자의 기초적 성질(2016.환경산업기술원). p8



□ 요구기술

차단(여과)장비	기능/특성	비 고
방사능입자 침투방지 실내공기 환기 시스템 -전열교환기 -공기청정시스템 -배기팬	입자여과기 (HEPA Filter) HEPA(MERV:17)	

여과기요구수준

Suggested Application Table					
MERV Std 52.2	Dust Spot Efficiency	Ability to Remove Dust	Dust Particle Sizes	Common Uses	Filter Types
MERV 1 - 4	Less than 20% < 20%	60% -80%	10 micron +	Residential Filters Light Commercial Minimum Equipment Protection	Washable Metal Loose Fibreglass Disposable Panels
MERV 5-8	20% - 60%	80%-95%	3-10 micron	Industrial Work Spaces Commercial Application Better Residential Application Paint Booths	Pleated Filters Extended Filters Media Panel
MERV 9-12	40% -- 85%	90%-98%	1-3 micron	Superior Residential Better Industrial Better Commercial	Pocket Filters Rigid Box Rigid Cell Cartridge Filters
MERV 13- 16	70%-98%	95% - 99%	0.3- 1	Smoke Removal General Surgery Hospitals & Health Care Superior Commercial	Ridge Cell V-Cells Pocket Filters H10 - H12 HEPA
MERV 17 - 20	More than 98%	99% or	0.3 micron	Clean Rooms <u>Radioactive Materials</u> Pharmaceutical Carcenogens	HEPA 13 HEPA 14 ULPA 15 ULPA 16

Illustration Provided by TakeAir / www.takeair.com

Adachi, K., et al. (2013). "Emission of spherical cesium-bearing particles from an early stage of the Fukushima nuclear accident." Scientific reports 3.

□ 거주성 요소별 기술범위

MERV : Minimum Efficiency Reporting Value

HEPA: High Efficiency Particulate Air

PF: Protective Factor

ACH : Air Change per Hour

요구성능		방사능 입자(Fall out)침투방지			방사능 투과방지	비 고
거주성 요소 기술구분		양 압(차압) (Over Pressure)	밀폐 (Sealing)	여과 (Filtering)	차폐 (Shielding)	<ul style="list-style-type: none"> PF: 방호인수 Pa: 양(차)압 계수 ACH: 공기교환율 HEPA: 고효율 입자 여과기 MERV: 여과효율
단위		Pa(in/w)	ACH	HEPA(MERV)	PF	
적용	구호소/병원	적용	적용	적용	적용	
	일반주거시설	제한	적용	적용	적용	

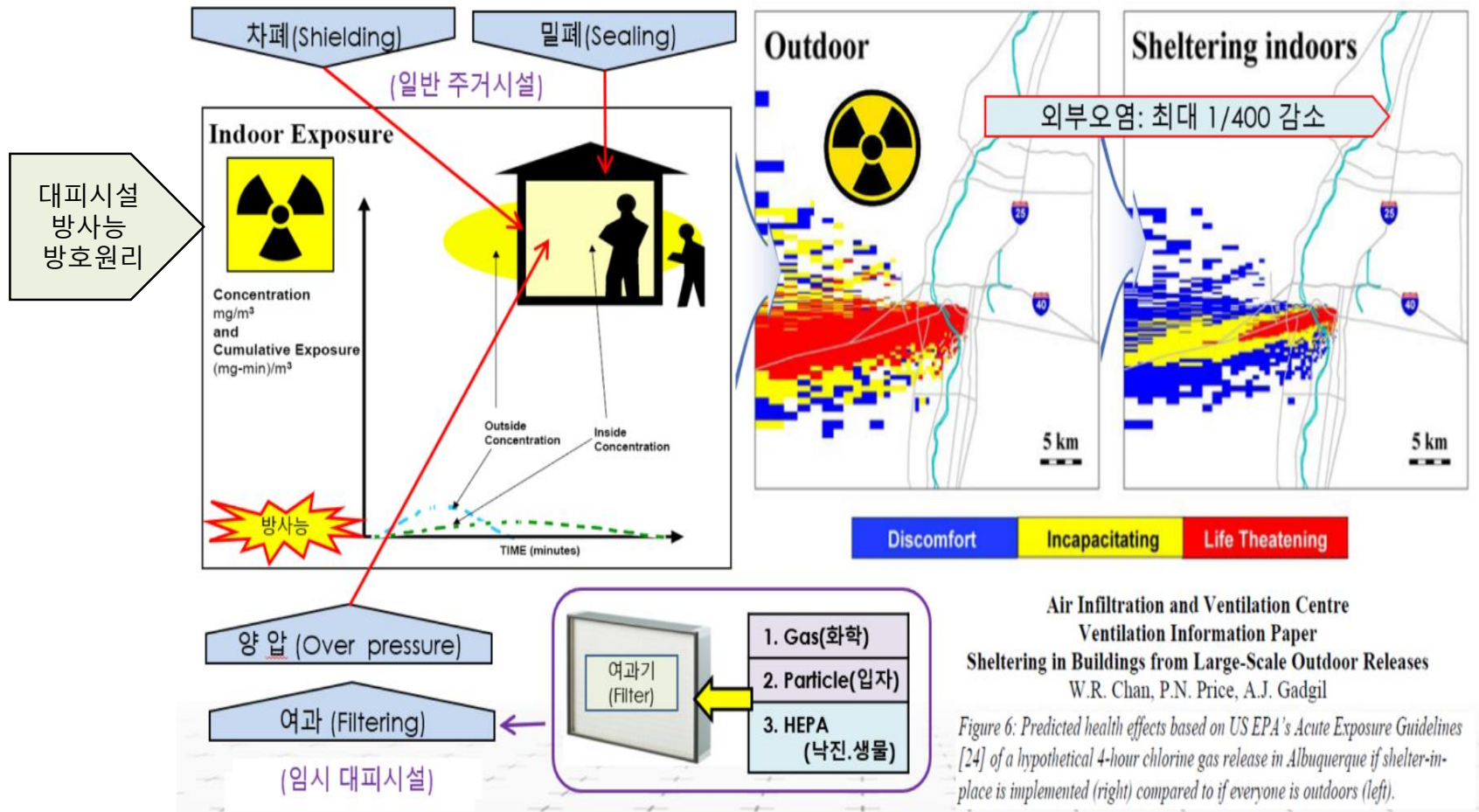
• 방사능 재난에 대한 병원의 주 위협은 방사능 입자(분진/낙진 fallout)이며, 고효율입자여과기술(HEPA)적용 요구

4. 방사능 거주성 방호기술

● 임시 대피시설 거주성 적용 방호기술분석

□ 거주성 확보기술 개념

차폐(Shielding), 밀폐(Sealing), 양압(Over pressure) 및 여과(Filtering) 기술적용. 대피공간내 외부 공기교체율(ACH) 최소화. 개인 방호장비(방독면, 방호복) 없이 일정시간 외부 고농도 치사 유해물질, 입자로부터 생존 제공 기술



4. 방사능 거주성 방호기술

● 임시 대피시설 거주성 적용 방호기술분석

HVAC: Heating Ventilating and Air Conditioning

AHU: Air Handling Unit

CPU: Collective Protection Unit

□ 적용기술특성분석(1)

양(차)압 (Over Pressure)	구 분	내 용	비 고
	작용기능	• 대피공간내부 압력을 외부보다 일정 높은 압력(양압:Over Pressure))을 유지하여 방사능입자의 대피공간내 침투방지를 통한 방사능 피폭 저감 • 대피공간의 인체유효온도(>28°C)유지위한 적정 공기 환기량 유지 필요	외부공기의 오염물질 여과장치(Filter Unit) 필수
	기술단위	내부/외부 공기압력차이 : • Pa(차압:Pascal) . • in/w (Inch water gauge)	집단보호기(CPU) 최저:5~12Pa . 0.3in/w
	수단(장비)	• 여과기탑재 공조기(AHU) . 냉난방환기시스템(HVAC) • 집단보호기(CPU)	
	기술특징	• 대피시설의 노후에 따른 밀폐수준에 의한 내.외부 공기 교체율 (ACH)영향 • 지역의 외부기상(년 평균풍속)특성에 따른 내.외부 공기 교체율 (ACH)영향	송풍량(CCFM: ft ³ /m) 증가 양(차)압 수준(Pa. in/w) 증가

밀폐 (Sealing)	구 분	내 용	비 고
	작용기능	대피공간내부의 공기누출 통로를 적절한 수단을 통해 밀봉 함으로서 외부로부터 오염물질, 가스, 입자의 대피공간내 침투방지를 통한 방사능 피폭 저감	대피공간내 공기누출 통로 최소화 필요 (건물 누출검사)
	기술단위	대피공간내부와 외부공기교체율(시간): • ACH	• 공공용 시설:0.5 ACH • 일반주거시설:1~ 5 ACH • 건물 열효율 등급:1~2등급
	수단(장비)	• 대피소용 밀폐키트(SIP Kit) • 공기폐쇄실(Air Lock) • 이중창호system	
	기술특징	• 대피공간내 제한된 밀폐 공기량으로 대피체류(수용)시간 제한	공기교환율(ACH) 개선수단요

차폐 (Shielding)	구 분	내 용	비 고
	작용기능	방사능(선)투과에 차폐능성이 있는 수단으로 대피공간구성의 벽,천정두께 및 창문 보강을 통한 방사능 차단으로 방사능 피폭 저감	3~5층 이상 콘크리트 건물. 지하층 선정 필요
	기술단위	내부/외부 방사능 강도차이 : • PF	• 일반주거시설: PF 4 • 공공시설,아파트(지상): PF10~30 / 지하(1층):PF100
	수단(장비)	• 건물재질,구조 고려. • 차폐 커튼. • 차폐 도배지 • 차폐 도료(페인트)	
	기술특징	• 대피소 시설의 재질,층수 지하시설 유무,개구부의 수에 따른 방호도 차이	최적대피공간선정 (환경조사)

실내대피가능시설의 [현 보유 및 운용장비 적용기술]의 최대한 적용을 통한 임시대피소 거주성 확보

4. 방사능 거주성 방호기술

● 임시 대피시설 거주성 적용 방호기술분석

□ 적용기술특성분석(3): 방호기술 적용가능 장비, 물자

양(차)압 장비	기능/특성	비 고
공기조화기 AHU (Air Handling Unit)	저비용 차압형성용 냉난방조절 제한 (화학제한, 생물선택)	
냉난방 공기 정화기 HVAC (Heat. Ventilating. Air Conditioning)	고비용(대형시설) 고정용 양압 형성 용 냉난방조절기능	
	고비용(대형시설) 이동용 양압 형성 용 냉난방조절기능	
집단보호기 Collective Protection Unit	고비용 (공공대피시설) 화생방 방호 기능 (냉난방 조절 제한)	
실내환기 시스템	저비용 주거시설용 차압형성가능 (화학, 냉난방제한)	
입자여과기 (HEPA Filter)	고비용 방사능입자 침투방지 공기조화기(AHU) 냉난방환기시스템 화생방 방호 기능	

차폐장비(물자)	기능/특성	비 고
차폐용 도료 (페인트)	실내용 건물방사능 방호도 증가 (방사능입자 침투방지 차폐효과)	
실내대피용 키트 (SIP Kit Shelter In Place)	저비용 건물 밀폐용 주거시설 임시대피시 설용 화학저항성 비닐 닥트용 테이프	
방사능 차폐커튼	저비용 실내 창문 방사능 차단용 (건물내부 방호도 증가)	
공기폐쇄실 (Air-Lock)	저비용 방사능입자침투방지 실내 양압 유지기능 방사능 오염상황 출입가능기능	

실내대피시설의 양압 장비(AHU/HVAC) 및 밀폐수단(비닐, 테이프, Air Lock)이용 2~3등급 대피소화 가능

5. 방호성능개선방안

● 임시대피시설 방호성능개선(안): 일반 주거시설(아파트)

□ 시설개요 (방사능 거주성 특징: 울주군)



C 언양e편한세상 아파트

- 언양읍 어음리
- 2022년 건축
- 지상25층 철근 콘크리트
- 10개 동(지하2층)
- 934세대
- 공기청정시스템 설치



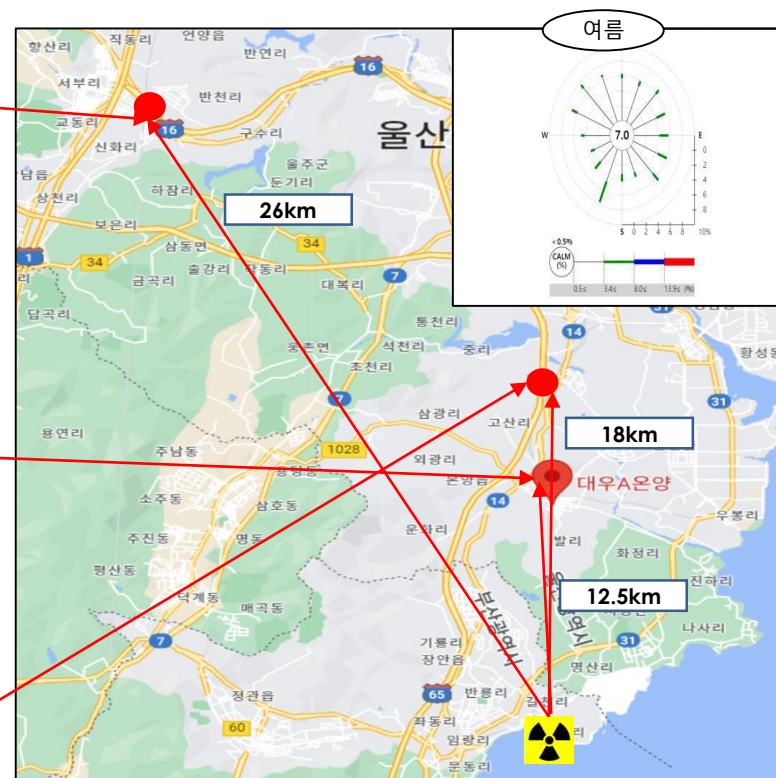
B 대우 아파트

- 온양읍 망양리
- 2015년 건축(계단식)
- 지상20층 철근 콘크리트
- 6개 동(비 내진설계)
- 918세대
- 환기장치 설치(전열교환기)



A 희야 리버 아파트

- 온양읍 대안리
- 1998년 건축(계단식)
- 지상15층 철근 콘크리트
- 10개 동(비 내진설계)
- 690세대
- 배기 송풍기(화장실)설치



□ 아파트 유형분류

울주군아파트	A형:1990~2009	B형:2010~2018	C형:2019<
221동(100%)	155(70%)	58(26%)	8(4%)
실내환기기준	미적용	적용:환기장치	적용:공기청정기
건축법개정 (2006년)	건축물설비기준규칙(국토부 훈령 제882호.2021. 8.21) 제11조:자연/기계식 환기장치 설치/0.5회/시간/30세대 이상		

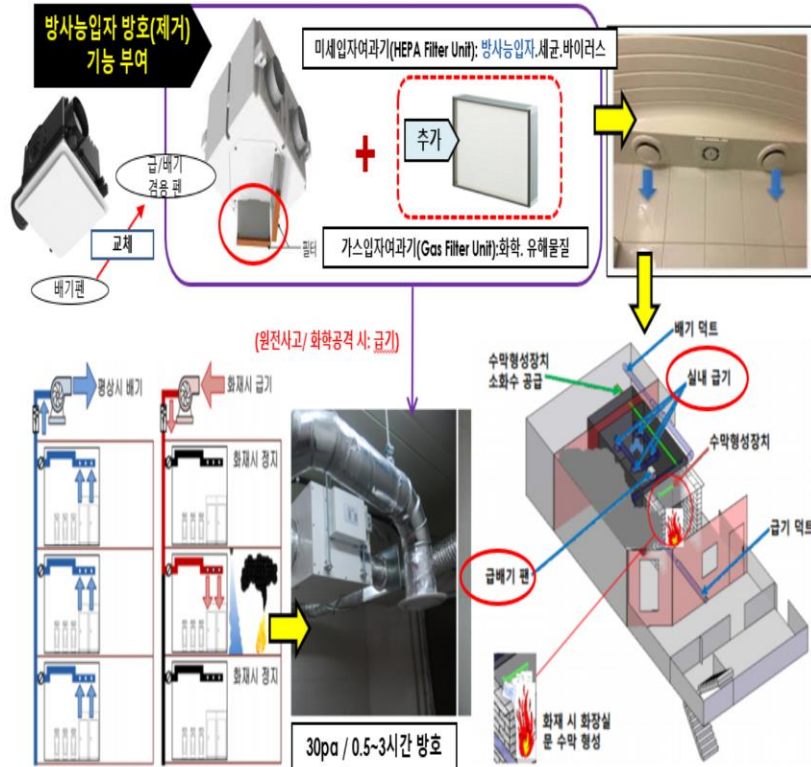
임시 대피시설 대상인 일반 아파트에 대한 특성(유형)분석을 통한 방호성능 개선방향 선정

5. 방호성능개선방안

● 임시대피시설 방호성능개선(안): 일반 주거시설(아파트)

□ 적용기술(A형:2010년 이전 준공)

▶ 화장실 대피공간 활용기술 이용 아파트 방호성능개선 적용 방안

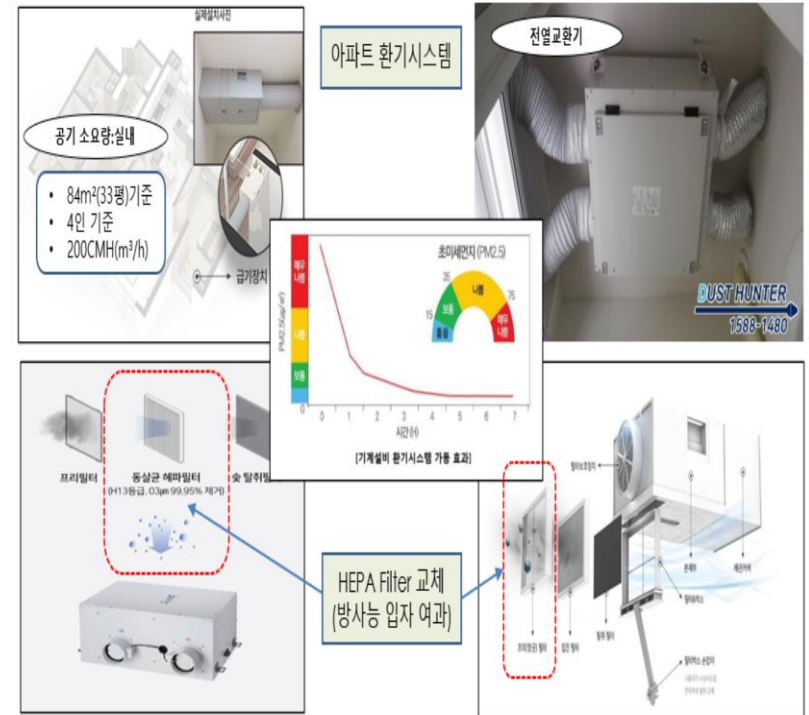


- 급배기 겸용 팬 및 미세입자 여과기(HEPA Filter)로 교체하여 배기팬을 급기상태(30~40pa)전환 운용
- 실내 대피소 기술(SIP Kit)과 병행하여 창호를 통한 방사능 입자 실내침투 방지 / 밀폐 보장

□ 적용기술 (B형:2010~2018년 준공)

▶ 아파트 기 설치 실내환기장치(전열교환기) 이용한 방호성능 개선 적용 방안

- 단순 실내 공기 질 개선 목적의 기계식 환기장치(전열교환기)설치로 일반수준 먼지(PM10)제거가능
- 초미세먼지(PM2.5이하)제거 불가로 방사능 입자(0.3~1μm)제거 제한(HEPA Filter 미 설치)
- HEPA Filter 추가 제작/교체를 통한 실내 방사능 오염입자 제거 기능 부여



일반 아파트 유형에 따른 거주성 보장을 위한 방사능 방호 성능 개선에 적용할 최적 기술 선정

5. 방호성능개선방안

● 임시대피시설 방호성능개선(안): 일반 주거시설(아파트)

□ 보강방안 (A형:2010년 이전 준공)

□ 보강방안 (B형:2010~2018년 준공)

목표(성능)

- 방호도(PF): 10 ≤ (최대3~4일 대피)
- 양압(차압): $2 \leq Pa$
- 대피인원: 4명 수용
- 실내 방사능오염입자 침투방지/제거($0.3 \sim 1\mu m$)

밀(차)폐 시설

- 방사능 차폐 커튼 설치(선택)
- 이중창호 설치(선택)
- 밀폐용 키트(SIP Kit): 비닐/테이프 밀봉

창문

- 밀폐용 키트(SIP Kit): 비닐/테이프 밀봉

출입문

- 밀폐용 키트(SIP Kit): 비닐/테이프 밀봉

차압(양압)

- 배기용 송풍기: 급·배기 겸용 교체 설치
- 급/배기전환용 송풍기+비상전원충전기

화장실

- 급·배기 겸용 팬

여과(필터)

- 급·배기 송풍기 여과기(Filter)보강
- HEPA Filter 추가설치 (MERV13~15/H10~12)

기타

- 차폐 커튼
- SIP Kit
- 배란다 창호
- 기실
- 배란다
- HEPA필터

목표(성능)

- 방호도(PF): 10 ≤ (최대3~4일 대피)
- 양압(차압): $2 \leq Pa$
- 대피인원: 4명 수용
- 실내 방사능오염입자 침투방지/제거($0.3 \sim 1\mu m$)

밀(차)폐 시설

- 방사능 차폐 커튼 설치(선택)
- 이중창호 설치(선택)
- 밀폐용 키트(SIP Kit): 비닐/테이프 밀봉

창문

- 밀폐용 키트(SIP Kit): 비닐/테이프 밀봉

출입문

- 밀폐용 키트(SIP Kit): 비닐/테이프 밀봉

차압(양압)

- 실내환기 시스템 기능 보강 이용
- HEPA Filter 설치(교체)

배란다

- 실내환기 시스템 기능 보강 이용
- HEPA Filter 설치(교체)

여과(필터)

- 여과기(Filter)보강
- HEPA Filter 교체(MERV13~15/H10~12)

전열 교환기

- 여과기(Filter)보강
- HEPA Filter 교체(MERV13~15/H10~12)

기타

- 차폐 커튼
- SIP Kit
- 배란다 창호
- 기실
- 배란다
- HEPA필터

아파트 유형별 특성에 따른 방호성능 개선 기술과 장비를 적용한 보강방안 제시

5. 방호성능개선방안

● 임시대피시설 방호성능개선(안): 일반 주거시설(아파트)

□ 보강방안 (C형: 2019년 이후 준공)

▶ 아파트 실내공기 청정시스템 이용한 방호성능 개선 적용 방안

- 최근 아파트 전건설사: 초미세먼지(PM2.5 이하) 제거 가능 부여 공기청정 시스템(H13이상 HEPA Filter) 설치로 방사능 오염 입자(0.3~1μm) 자동 제거 가능으로 실내 대피 조건 충족
- 대형 창호(창문) 밀폐 취약성 보강만 필요

□ 건설사별 아파트 공기청정시스템 성능/특성

건설사	LH	S+공사	대림산업	대우건설
제품				
특징점	-미세먼지·CO₂ 농도감지 자동온전·냉방·공기청정·제습·환기가능 통합 유인환기 개발 중	-해피필터 적용 환기장치 -홈네트워크 연동 원격제어	-미세먼지·CO₂·VOCs·온습도 통합센서 -주방후드 연동 -휴대용 센서연동 자동환기 개발 중	-주방후드·전열교환기 연동 -센서감지 자동제어
건설사	롯데건설	GS건설	포스코건설	현대건설
제품				
특징점	-환기장치 거실 위치 -바닥열환기시스템	-천장형 공기청정기 -환기장치 시스템연동	-4단계 필터박스 -쉬·IoT 원격제어	-주방후드 연동 시스템 -실별제어 개발 중

목표(성능)

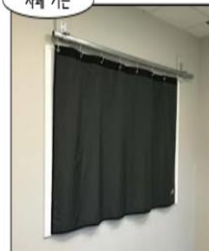
- 방호도(PF): 10≤ (최대3~4일 대피)
- 양압(차압): 2 ≤ Pa
- 대피인원: 4명 수용
- 실내 방사능오염입자 침투방지/제거(0.3~1μm)

밀(차)폐 시설

- 방사는 차폐 커튼 설치(선택)
- 밀폐용 커트(SIP Kit): 비닐/ 테이프 밀봉

- 출입문: 밀폐용 커트(SIP Kit): 비닐/ 테이프 밀봉

차폐 커튼



SIP Kit



□ 아파트 A/B형 방호성능 개선 공사 방안

▶ 아파트 A형/ B형 경우: 개별 가구형 개선/ 동 단위(별) 통합형 개선공사 가능 구분

구분	A형 아파트(2010년 이전 준공)	B형 아파트(2010~2018년 준공)
#1 (개별/ 가구별)	<ul style="list-style-type: none"> • 양압 기능: 양압 필터박스(화장실) • SIP KIT 적용: 창문 및 도어 • 가구별 화장실 배기 개통 보완 	<ul style="list-style-type: none"> • 양압 기능: 보완된 환기시스템 적용 • SIP KIT 적용: 창문 및 도어 • 가구별 화장실 배기 개통 보완 ※ 기존 환기시스템 FAN, 필터 및 기능 보강
#2 (통합/ 동별)	<ul style="list-style-type: none"> • 양압 기능: 공통 양압 송풍기 장치(실외) • SIP KIT 적용: 창문 및 도어 • 가구별 화장실 필터 추가 및 배기 개통 보완 	<ul style="list-style-type: none"> • 양압 기능: 공통 양압 송풍기 장치(실외) • SIP KIT 적용: 창문 및 도어 • 가구별 화장실 필터 추가 및 배기 개통 보완 ※ 기존 환기시스템 막음 조치

□ 예산소요(만원)

구분	A형 아파트(가구당)	B형 아파트(가구당)
#1	36,000 (450)	65,000 (650)
#2	43,500 (545)	63,000 (630)
비고	20층(80가구x 3인)	25층(100가구x 3인)

임시 대피시설 전환에 따른 최적 보강공사방안과 고보강공사 소요예산 판단 근거 제시

5. 방호성능개선방안

● 임시대피시설 방호성능개선(안): 일반 주거시설(아파트)

□ 임시대피시설별 소요예산

▶ 아파트 A형/ B형 경우: 개별 가구형 개선/ 동 단위(별) 통합형 개선공사 가능 구분

- 개별형: 아파트 가구당 개별 시공/ 운전 가능 / 통합형: 아파트 동 단위 시공/ 통합 운전(가구당 가동 불가)

구분 (보강소요)		군민체육관 (울주군)	아파트A형(2010년 이전 준공)		아파트B형(2010~2018년 준공)	
			개별형(동)	통합형(동)	개별형(가구)	통합형(동)
기밀 공사	누설공사	-	5,600	5,600	7,000	7,000
	기밀도어	2,400	-	-	-	-
	밀폐용길		1,600	1,600	2,000	2,000
환기 시스 템 공사	급 배기	-	-	-	50,000	-
	개폐기	-	-	-	-	10,000
	화장실		4,800	4,800	6,000	6,000
양압 (여과) 공사	송풍기	3,000	-	5,500	-	6,000
	필터박스	-	24,000	24,000	-	30,000
	크레인	1,000	-	2,000	-	2,000
차폐	차폐커튼	2,600	-	-	-	-
합계(만원)		9,000	36,000	43,500	65,000	63,000
가구당(만원)		-	450	(545)	650	(630)
비 고		1동/ 520명 기준	20층(80가구x 3인)		25층(100가구x 3인)	

2023 원자력학회 추계학술대회

감사합니다.

THANK YOU FOR KIND ATTENTION

