

[2023년 KEPIC Week]

한국형 비파괴검사 기량검증(KPD)

기술개발 및 운영체계 개선

2023. 9. 7.

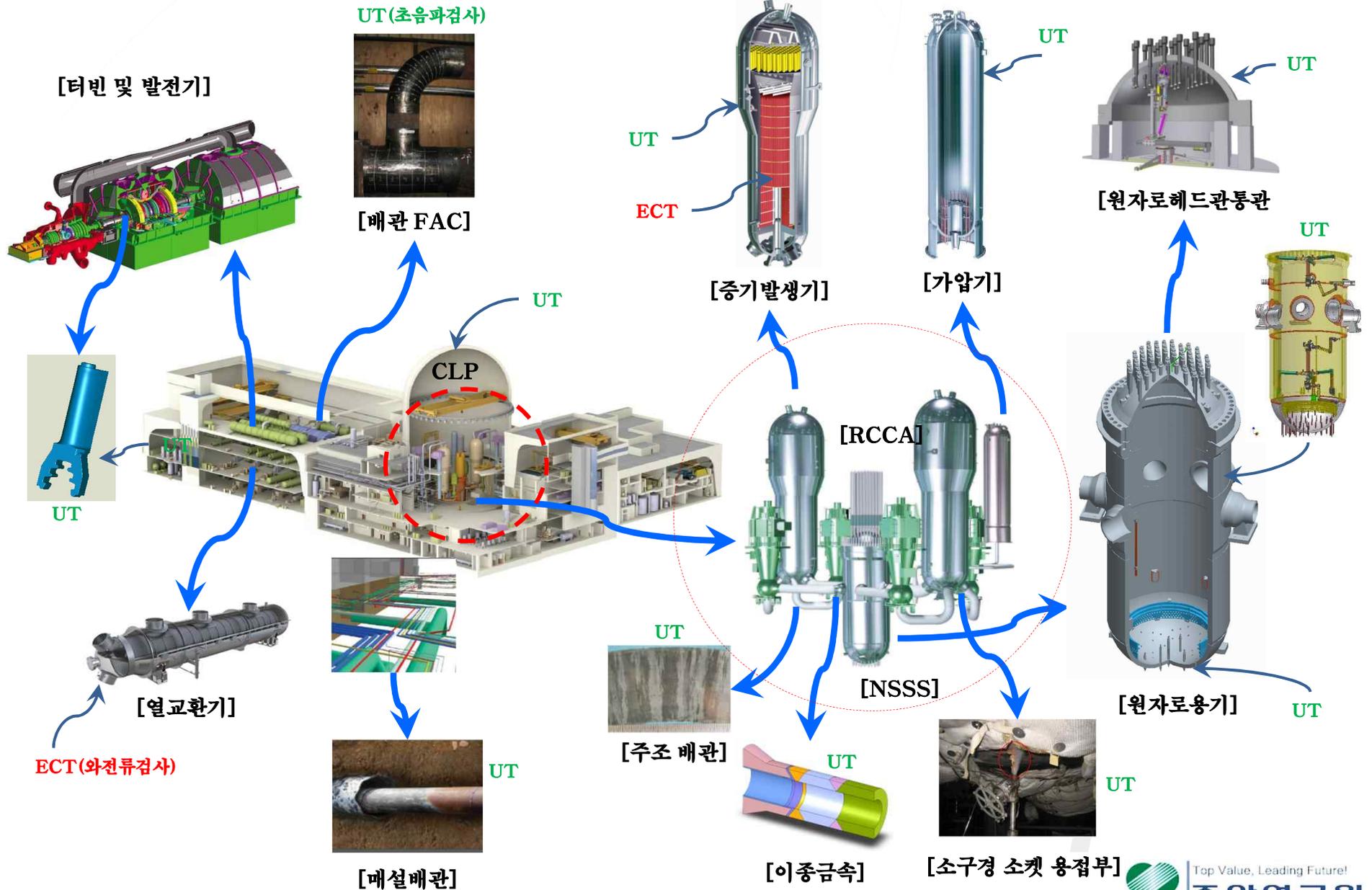
김창수 그룹장, 이승표 부장

한수원(주) 중앙연구원 비파괴기량검증그룹

목 차

- I. 원전 안전설비 비파괴검사
- II. 비파괴검사 기량검증 요건
- III. 안전설비 비파괴검사 기술개발
- IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화
- V. 가동중검사 고시 개정 검토
- VI. 결론 및 향후 계획

I. 원전 안전설비 비파괴검사



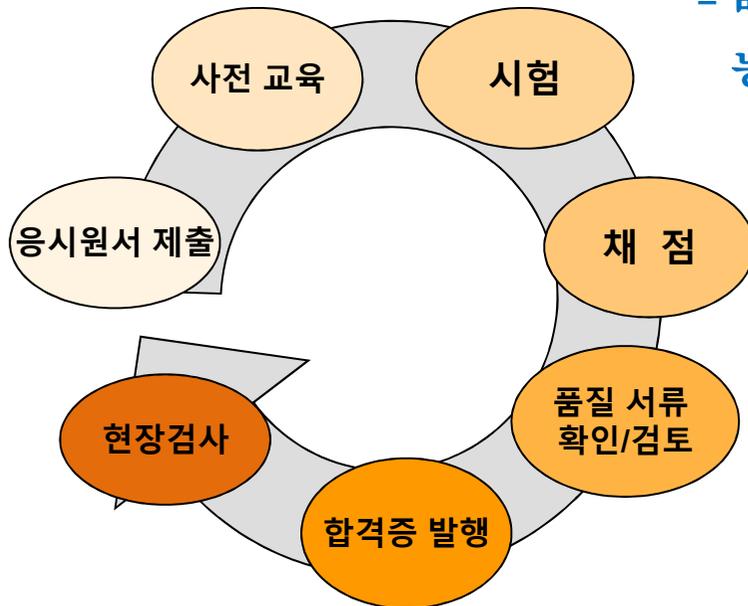
II. 비파괴검사 기량검증 요건

1. 원자력안전위원회 고시 제2023-2호 “원자로시설의 가동중검사에 관한 규정”에 의거 원전 비파괴검사 기량검증 수행

■ 제 11조 제11조(비파괴검사 기량검증)

- ① 발전용 원자로 설치자 또는 운영자는 가동중 검사에서 수행되는 비파괴검사 중에서 안전관련 설비에 대한 **초음파탐상검사(UT)**와 증기발생기 세관에 대한 **와전류탐상검사(ECT)**에 대해 기량검증 수행중임

❖ 비파괴검사 기량검증(Performance Demonstration, PD) 정의
- 비파괴검사 시스템(절차서, 장비, 검사자)의 결점 검출 및 크기측정 능력을 사전에 검증하는 제도



III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

1. 국외 기량검증 개발 경위

❖ PVRC^{주1)}, PISC^{주2)} I & II 및 EPRI 연구결과 가동중검사에 적용되는 초음파검사(UT) 기술의 신뢰도에 의문이 제기됨

❖ ASME Sec. XI & V에서 신규발생 기술적문제를 해결하지 못함
- IGSCC, 복잡한 형상의 검사대상, 신 검사기술 및 장비의 적용

주 1) PVRC : Pressure Vessel Research Council, 2) PISC : Program of Inspection of Steel Components

❖ 1983년 NRC의 기량검증(Performance Demonstration) 시행 요구

❖ 미국 산업위원회에서 NRC 규제요구를 대체할 수단 개발 합의

❖ 1986년 Code Task Group 구성 (Proposal 개발)

❖ 1989년 Winter Addenda App. VIII 발행

❖ 1991년 EPRI PDI 구성 (Appendix VIII 이행)

❖ 1995년 미국 최초 PDI/App. VIII 절차서 적용(운영자)

❖ 1995.11월 10CFR50.55a에 ASME Sec.XI App. VIII, PD 적용 공시

❖ 2000.5월 미국 기량검증(EPRI PD) 시행

III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

2. 국내 기량검증(KPD : Korean Performance Demonstration) 개발 경위

가. '00.08 - '04.01 한국형 비파괴검사 기량검증체계 개발

- 초음파검사(UT) 분야 : 페라이트/오스테나이트계 배관, 스티드/볼트
- 와전류검사(ECT) 분야 : 증기발생기 세관 와전류검사 평가자격(QDA/SSPD)

※ '04.06 특정기술주제보고서 승인(국내 비파괴검사 기량검증 최초 시행)

나. '11.05 이중금속 배관 초음파검사 기량검증체계(KPD) 개발 및 적용

다. '18.03 원자로헤드관통관 기량검증체계 개발 및 적용

라. '22.06 중수로 원전 초음파검사 기량검증체계 구축(I) 과제 착수

- '23.08 월성#3 피더관 두께측정 초음파검사 최초 적용 예정

마. '23.7 증기발생기 와전류검사 기반기술 개발 착수

[EPRI PD 적용]

가.'06.01 원자로용기 UT 기량검증 적용(EPRI PDI)

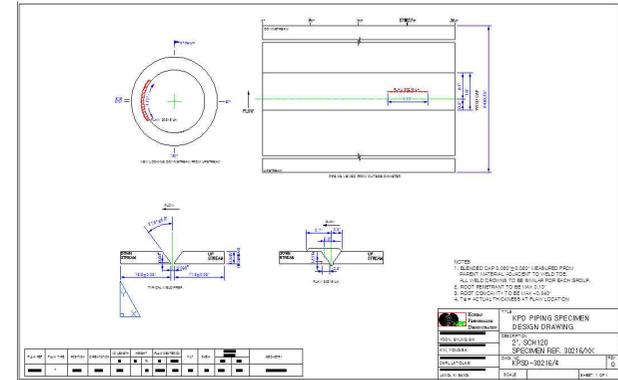
나. '10.04 오버레이용접부 UT 기량검증 적용(EPRI PDI)

III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

□ 동종금속 배관 용접부 초음파검사

KPD SAMPLE DIMENSION										
STAINLESS STEEL SPECIMENS										
Small Category(<0.05")				Medium Category(≥0.50" to ≤1.60")				Large Category(>1.60")		
Sample ID	O.D	SCH.	Thickness	Sample ID	O.D	SCH.	Thickness	Sample ID	O.D	Thickness
30216	2	160	0.344"	31280	12	80	0.688"	No Sample in this Category		
30440	4	40	0.237"	32410	24	100	1.5"			
30480	4	80	0.337"	31280H	12	80	0.688"			
30680	6	80	0.432"	32410H	24	100	1.50"			
30480H	4	80	0.337"							
30680H	6	80	0.432"							

CARBON STEEL SPECIMENS										
Small Category(<0.05")				Medium Category(≥0.50" to ≤1.60")				Large Category(>1.60")		
Sample ID	O.D	SCH.	Thickness	Sample ID	O.D	SCH.	Thickness	Sample ID	O.D	Thickness
40280	2	80	0.218"	41280	12	80	0.688"	55038H	50	3.850"
40480	4	80	0.337"	41280H	12	80	0.688"			
40680	6	80	0.432"							
40480H	4	80	0.337"							
40680H	6	80	0.432"							



[시험편 설계]

[현장조사, 시험편 대상 선정]



[검사자/절차서 기량검증]



기계 가공

결점 제작

용접

비파괴검사

[시험편 제작]

III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

□ 볼트/스터드 초음파검사

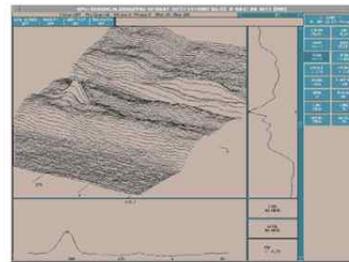
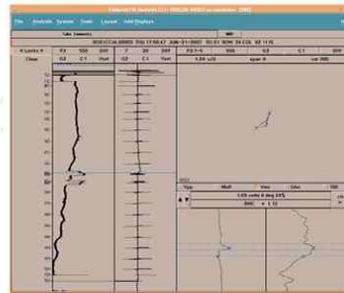


□ 증기발생기 세관 와전류검사(ECT)

[Bobbin Probe]



[QDA/SSPD User LAN 구성]
Computer Based Test(CBT)



[Rotating Probe]



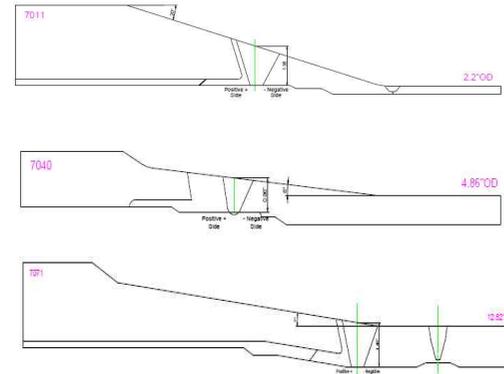
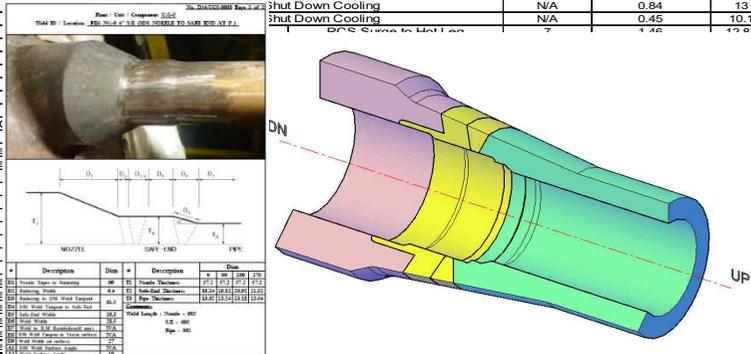
[QDA/SSPD 시험 설비]

* QDA : Qualified Data Analyst, SSPD : Site Specific Performance Demonstration

III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

□ 이중금속 배관 초음파검사

KPD SAMPLE DIMENSION							
DMW SPECIMENS							
Sample ID	Plant	System	Sub	Name	Taper Angle	Thickness at CL	Pipe OD
7011	OPR 1000	RCS	Charging Inlet	RCS Charging Inlet	20	1.38	2.2
7012	OPR 1000	RCS	Charging Inlet	RCS Charging Inlet	17	1.37	2.4
7013	OPR 1000	RCS	Letdown Drain	RCS Letdown Drain	15	0.98	2.44
7020	OPR 1000	RCS	Spray	RCS Spray	16	1.1	3.42
7030	OPR 1000	Pressurizer	Spray	Pressurizer Spray	21	0.98	4.7
7040	W/F	Pressurizer	Spray	Pressurizer Spray	6	0.86	4.86
7051	W/F	Pressurizer	Safety Relief	Pressurizer Safety Relief	6	1.26	6.63
7052	W/F	Pressurizer	Safety Relief	Pressurizer Safety Relief	9	1.26	6.63
7061	CANDU		Shut Down Cooling	Shut Down Cooling	N/A	0.84	13
7062	CANDU		Shut Down Cooling	Shut Down Cooling	N/A	0.45	10.1
7071	OPR 1000		RCS Spray to Letdown	RCS Spray to Letdown	7	1.42	17.87
7072	OPR 1000						
7073	OPR 1000						
7074	OPR 1000						
7080	OPR 1000						
7090	OPR 1000						
7101	OPR 1000						
7102	OPR 1000						
7110	W/F						
7121	W	Stk					
7122	W	Stk					
S7035	OPR 1000						
S7036(Nozzle-SE)	W						
S7036(SE-Pipe)	W						
S7055	OPR 1000						
S7085	W						
S7086	F						
S7115	W						
S7116	F						
S7123	W	Stk					
S7124	W	Stk					
S7125	W	Stk					
S7126	W	Stk					
S7127	F	Stk					
S7128	W	Stk					



[시험편 설계]

[현장조사, 시험편 대상 선정]



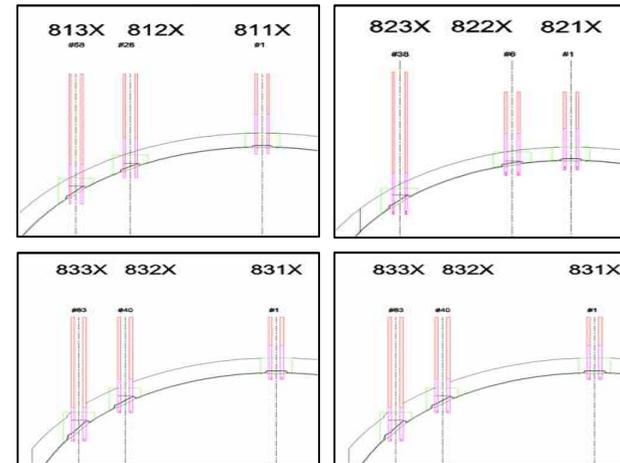
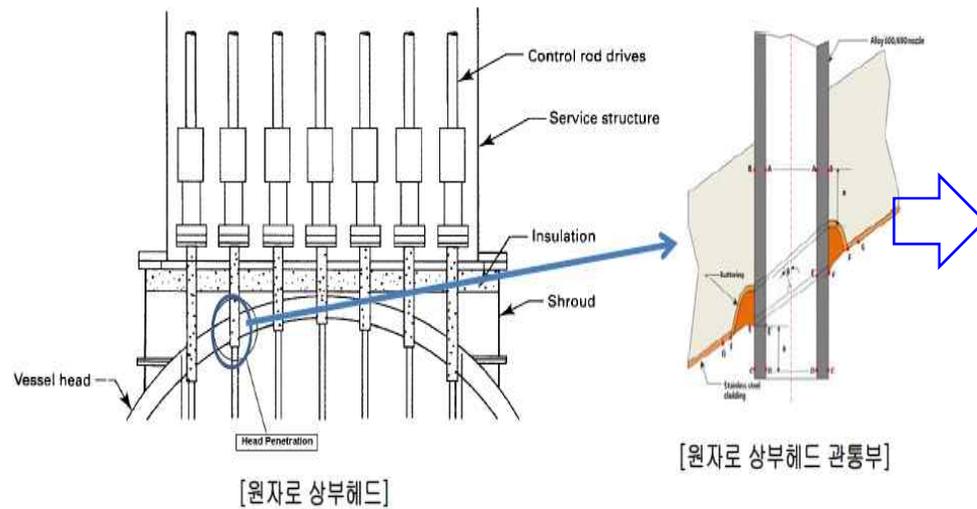
[검사자 및 절차서 기량검증]



[시험편 제작]

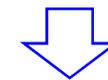
III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

□ 원자로헤드관통관 초음파검사



[시험편 설계]

[현장조사, 시험편 대상 선정]



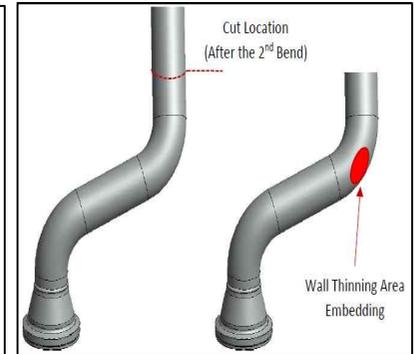
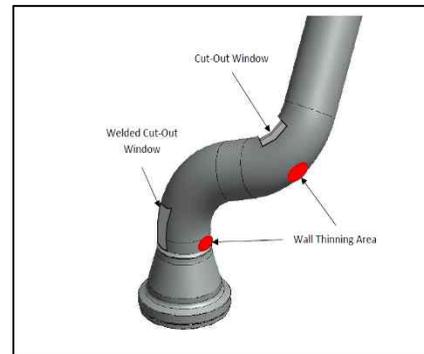
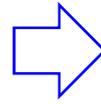
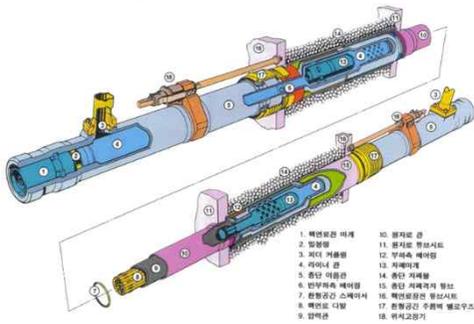
[검사자 및 절차서 기량검증]



[시험편 제작]

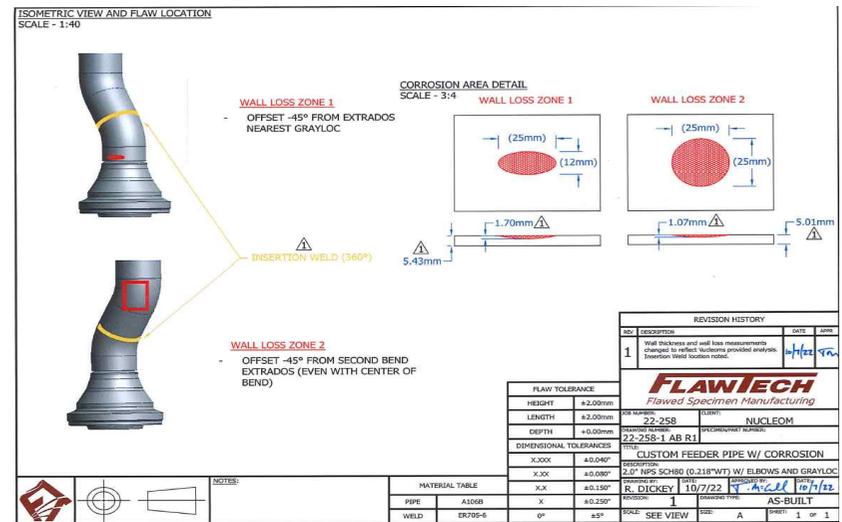
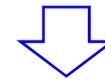
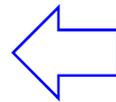
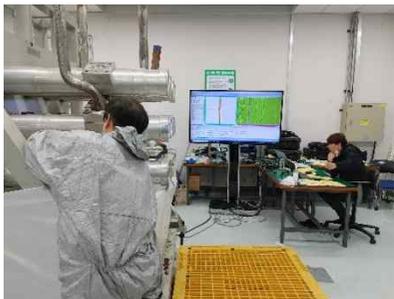
III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

□ 중수로 피더관 초음파검사



[현장조사, 시험편 대상 선정]

[시험편 설계]



[검사자 기량검증]

[시험편 제작]

III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

□ ASME Code Case N-824(주조 스테인리스 용접부 검사)

- 검사절차서 개발 완료
 - 반자동 엔코딩 PAUT 기법(저주파수 탐촉자) 적용 결함 시험편 Data 취득
- PAUT 검사절차서 검출능 분석, 절차서 피드백 및 개정 완료
 - 취득 Data를 활용한 검출, 길이/깊이측정 시행(다자간 비교시험)
 - 자동 및 수동 검사절차서 성능 및 평가결과 분석 완료
- CC N-824 적용 PAUT 절차서 시범 적용 완료('21.11월 고리 #4)
 - Encoded PAUT 데이터 취득 및 평가 등 검사 전반 점검
 - 검사접근성, 소요시간, 제한영역 및 검사자 피폭 등 평가
 - 현장 시범적용 규제기관 협의 등
 - 개발 검사기법 및 절차서 개선사항 도출 및 반영
- 규제기관 설명 완료 : ' 21.12월

III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

□ ASME Code Case N 770-2(이종금속 용접부 엔코딩 UT)

※ 가동중검사 고시 개정안 반영(당해 용역분야 등록업체 인력 기준 및 PQ 평가기준에 반영 추진)

1) 검사절차서 개발

- Encoding 적용 스캐너 설계 및 제작: Semi-Auto(반자동) 기법
 - 스캐너 적용 데이터 취득(Encoding)
- 검사절차서 Setup 및 사전 검증

2) 절차서 기량검증 진행 중

- 1단계 : General 시험편 Data 취득 완료
- 2단계 : Specific 시험편 Data 취득 및 평가 중

3) 검사자 기량검증('22년 하반기 예상)

- 최소 2~3개월 소요 예상(6명/3주, 업체별 최소 2명 확보 기준)

4) DM Encoded UT 적용 계획

- 현장검사 적용 준비 및 전원전 검사 적용 : '23.1월

III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

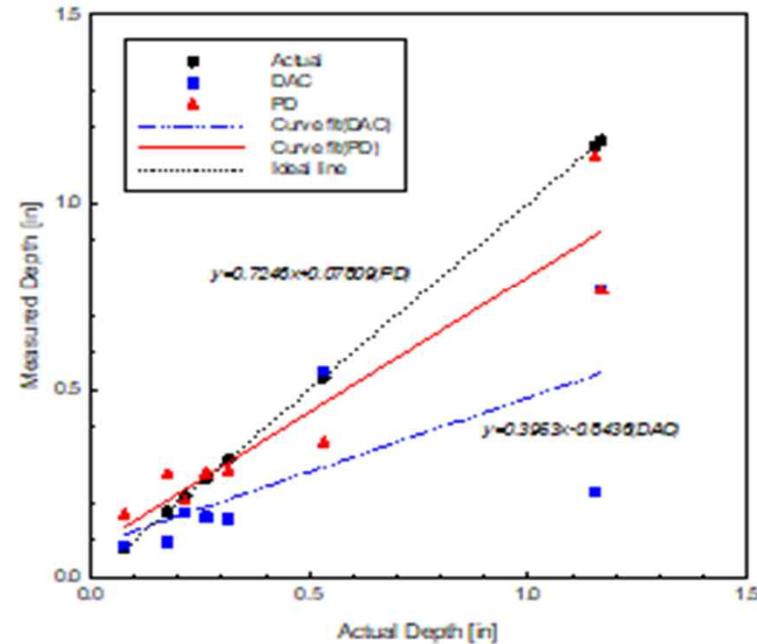
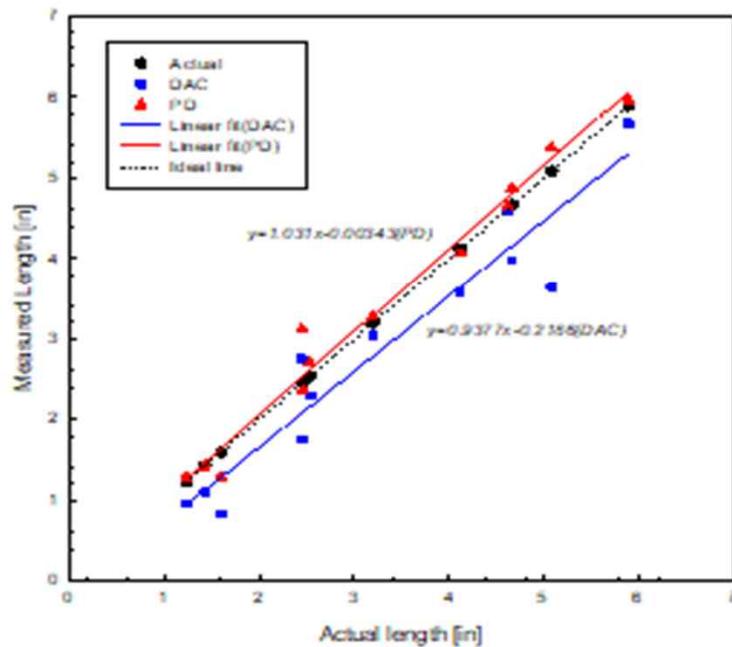
□ SG 와전류검사 기량검증체계 기반 기술개발

- 연구기간: 2023.7. ~ 2025.6. (24개월)
- 2차측 이물질 검사기법 개선 관련 규제 요구사항 적극 대응
- 배열형코일 검사기술 기량검증체계 구축
- 가상화 시뮬레이션 SW 활용 특정 결함신호 생성
- 자동평가용 기량검증 시스템 신규 구축



III. 안전설비 비파괴검사 기술개발

■ 기량검증 적용 효과 : 비파괴검사 신뢰도 향상



주) 적색 : 기량검증 적용, 청색 : 기존 검사방법(기량검증 미적용) 검사 결과

■ 초음파검사자 연차 실기훈련

- ❖ 기존 검사업체에서 자체 수행하던 실기훈련을 기량검증이 시행됨에 따라 매년 기량검증용 시험편을 이용하여 CRI에서 실기훈련을 수행(고시 요건, 최소 8시간)
- ☞ 실기훈련의 객관성 확보 및 검사 신뢰도 제고

IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화

❖ 2004년부터 20년간 국내원전 고유의 KPD 운영

✓ 원전 안전설비 비파괴검사 신뢰도 제고



『KPD 20주년 기념
유공기관
감사패 증정
(한수원 사장)』



『“비파괴검사 기량검증 수행기관”
현판식』



IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화

- ❖ 초음파검사 기량검증 기술 개발(한수원 6건/협력사 6건)
- ❖ 가동중검사/비파괴검사자 1,000명 양성
- ❖ SG 와전류검사 발전소별 기량검증 DB 구축(13개)
- ❖ 2009년 UAE 수출원전 KPD 적용

IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화

□ 초음파검사 기량검증 기술 개발(12건)

번호	절차서 번호	절차서 명	비고
1	KPD-UT-1	페라이트계 배관 용접부의 초음파탐상검사	한수원 개발
2	KPD-UT-2	오스테나이트계 배관 용접부의 초음파탐상검사	
3	KPD-UT-3	배관 용접부의 결점 깊이 측정을 위한 초음파탐상검사	
4	KPD-UT-4	스터드 및 볼트 내경으로부터의 초음파탐상검사	
5	KPD-UT-5	스터드 및 볼트의 수직 초음파탐상검사	
6	KPD-UT-10	이종금속 용접부의 초음파탐상검사	
7	KPD-협력UT-001	배관 자동초음파검사	협력사 개발
8	KPD-협력UT-002	원자로 상부헤드 관통관검사 신호수집	
9	KPD-협력UT-003	원자로 상부헤드 관통관검사 신호평가	
10	KPD-협력UT-004	이종금속 용접부 배관 위상배열 초음파검사	
11	KPD-협력UT-005	배관 자동 초음파탐상검사	
12	KPD-협력UT-006	주조 오스테나이트 용접부의 인코딩 PAUT	

IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화

▶ 비파괴검사자 자격체계 국가 인증('21.5월)

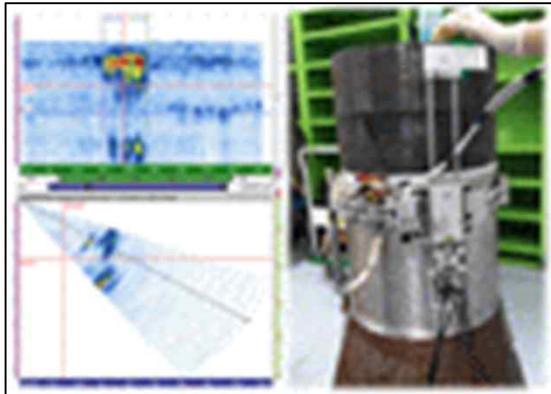
✓ 사내 자격체계 고용노동부 비파괴검사 자격 분야 인증 → 대외 신인도 제고



IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화

▶ 최신 NDE 검사기술 개발 및 적용

- ✓ CASS 배관 초음파검사 기술개발 완료
- ✓ 이중금속용접부 PAUT 기술개발
- ✓ 중수로 피더관 비파괴검사 기량검증체계 구축(진행 중)
- ✓ BOP Hx. 신호평가자 자격인증 체계 개발 완료



IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화

❖ 비파괴검사 기량검증 절차서 제.개정

Ⅰ 위·변조/오적용 방지: 보안 문구 및 워터마크 삽입

Ⅰ 협력사 절차서 관리방법 개선: 수기 관리 → 한수원(주) SAP 문서 등록 및 주기적 관리

Ⅰ 기량검증 운영/검사 절차서 제. 개정(80종)

- 참조/적용 기술기준 유효성 검토 및 최신 기술기준 유효연도 반영

- 대상: KPD 운영절차서(48종), 검사절차서(26종), 협력사 절차서(6종)

Ⅰ KPD 영문절차서 개발

❖ 비파괴검사 기량검증 요건 합리적 개선

Ⅰ 초음파 검사자 실기훈련 기준시간 단축·규제 승인

- 연간 10시간→8시간(연간 소요인력 110MD 절감)

Ⅰ 재자격시험/실기훈련 유효기간 신규 설정(만료일±3개월)

❖ 가동중검사 KPD 기술자 관리 강화

Ⅰ 협력사 기량검증 자격 정보 전산 등록 및 관리

- 가동중검사 참여 인력의 자격 유효성 검증, 연차훈련 유효성 확인으로 오적용 방지

IV. KPD 운영 성과 및 운영체제 고도화

❖ 안전등급 초음파검사장비 성능검증 및 승인

○ 안전등급 기기 Mercury 검사장비 성능 검증, 규제협의를 및 사용 승인

※ 장비 제작사의 성능 미검증에 따른 현장검사 사용 불가

- 대상: 가동중검사회사 7개사 보유 Mercury 장비 12대(36억원)

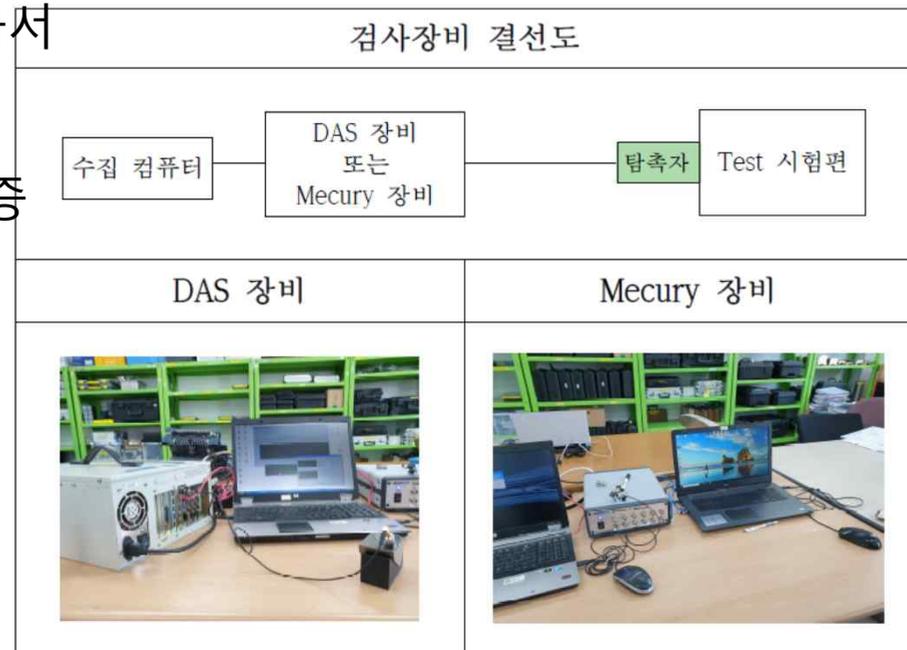
○ 검증 기간: '21.1월~'21.7월

○ 장비 등재: KPD-Intraspect-D-1 절차서

○ 검증 요건: KEPIC MIZ 부록 VIII 4000
필수변차 공차 요건에 따른 성능검증

- 중심주파수, 수신대역폭

○ KPD 절차서 개발: '23.1월~23.7월



V. 가동중검사 고시 개정 사항 검토

- 원자력안전위원회 고시 『원자로시설의 가동중검사에 관한 규정』 개정 및 공포(2023-02호, ' 23.1.31)됨에 따라 기량검증 요건 검토
 - ※ 중앙연구원이 비파괴검사 기량검증 수행기관으로 지정 및 운영중임
- 주요 개정사항

1. 전력산업기술기준(KEPIC) 등 기술기준 발행년판 확장

가동중검사 기술기준	발행년판 · 추록	
	현행	개정
KEPIC MI	2000년판~2009년추록	2000년판~2015년판
ASME Code Sec.XI	1995년판~2008년추록	1995년판~2013년판

2. (검사대상 신설) 노즐-기기 맞대기 용접부 부칙 신설

- 미국 신규 노형(ABWR*, AP1000)에서 기존에 없던 원자로용기 및 증기발생기 노즐과 냉각재 펌프가 직접 연결된 신규 형상이 적용됨에 따라 검사 부칙이 신설 *ABWR(Advanced Boiling Water Reactor)
 - 초음파검사의 절차, 장비, 검사자는 기량검증 되어야 함
 - 검사 체적은 용접부 체적의 100% 포함되어야 하며, 유효범위가

용접부

체적의 100% 미만인 경우 대체적용

- 검사 불가능 영역에 대한 최대의 가상 균열에 대한 결함 평가 수행

V. 가동중검사 고시 개정 사항 검토

□ 기술기준 확장 검토 내용

가. 기술기준 발행년판 및 추록 확장판의 절차서 반영 검토

- 중앙연구원 기량검증 절차서 : **先 반영**
- 협력사 기량검증 검사절차서 : **반영 필요**

나. 적용되는 KPD, EPRI 검사절차서의 유효성 평가 및 결과

- 검사절차서인 KPD-UT-1, 2, 3, 4, 5, 10 및 KPD-Intraspect-D-1은 검토 결과에 따라 ASME Code Section XI, 2013년 판 및 KEPIC MI 2015년 판까지 유효함이 확인됨
- 미국 EPRI 검사절차서인 EPRI-WOL-PA-01는 EPRI 기술기준 유효성 평가 보고서를 검토한 결과, ASME Code Section XI, 2013년 판 및 KEPIC MI 2015년 판까지 유효함이 확인됨

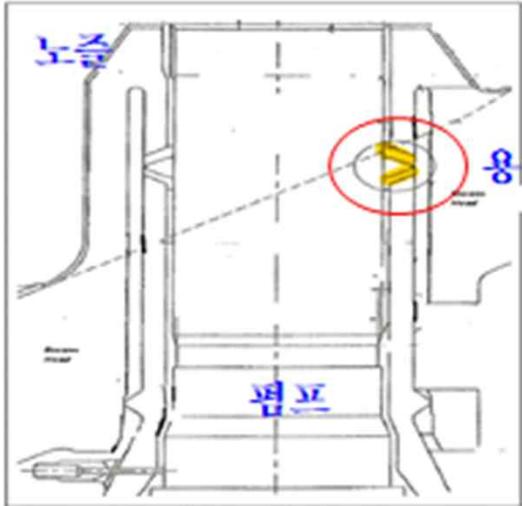
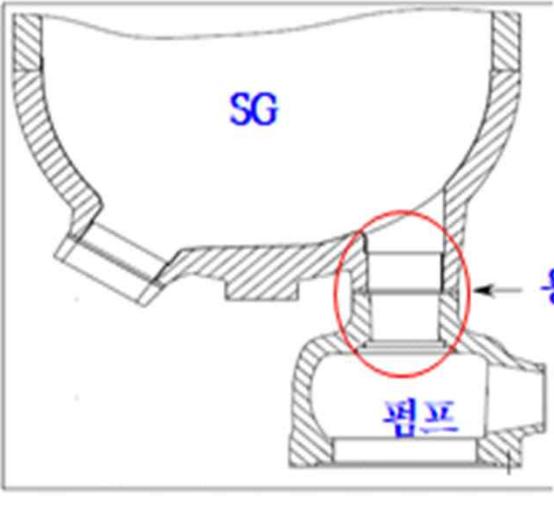
V. 가동중검사 고시 개정 사항 검토

□ 검사대상 신설(노즐-기기 맞대기 용접부 부칙) 검토

가. 노즐-기기 맞대기 용접부 부칙 반영 검토

- 국내원전에 적용 필요 용접형상이 없음.
- 다만, SMR 노형에서는 노즐-기기 용접부 형상이 존재할 수 있으므로, 설계단계 시 검토 및 반영 필요(설계사, 제작사 및 CRI)

※ NRC는 ABWR 및 AP1000의 신규 용접형상에 대한 검사 기술기준을 제시하기 위해 노즐-기기 맞대기 용접부 부칙을 신설함

ABWR 노즐-펌프 검사 대상	AP1000 펌프-SG 검사 대상
 <p>The diagram shows a vertical nozzle assembly connected to a pump. A red circle highlights the weld joint between the nozzle and the pump body, with a yellow arrow pointing to it. Labels include '노즐' (nozzle) at the top, '용접부' (weld joint) next to the red circle, and '펌프' (pump) at the bottom.</p>	 <p>The diagram shows a steam generator (SG) connected to a pump. A red circle highlights the weld joint between the pump and the SG. Labels include 'SG' at the top, '용접부' (weld joint) next to the red circle, and '펌프' (pump) at the bottom.</p>

V. 가동중검사 고시 개정 사항 검토

- 가동중검사 기량검증 요건 변경 관련 검토내용 공유
 - 기술교류회 및 워킹그룹 등을 통해 기술검토 내용 공지 등
- SMR 노즐-기기 용접부 형상 확인 및 기량검증 기술 개발(필요시)
 - 관련 검토내용은 내부 보고 및 공유를 위해 SMR 연구부서에 피드백
- 검사절차서 개정
 - KPD 검사절차서는 기술기준 확장 내용 반영하여 개정 완료
 - 협력사 초음파검사절차서는 개정 중
 - 배관 AUT 검사절차서, RVHP 검사절차서 및 DM 검사절차서 등
- 고시 차기 개정 대비 기량검증 기술요건 검토 수행 및 절차서 개정
 - ASME Code Section XI 2017년 판 및 KEPIC MI 2019년 추록 적용
 - 관련 기술기준의 기량검증 요건 검토 및 반영

VI. 결론 및 향후 계획

■ 결론

- ◆ 지난 20년간 KPD를 신뢰성 있게 운영하여 원전 안전설비 비파괴검사 신뢰성 확보
- ◆ 원안위 고시/기술기준 요건 충족 및 검사신뢰도 향상을 위한 검사 기술의 고도화 지속 추진
- ◆ 기량검증 기술 및 검사자 적용 오류 예방 시스템 구축
- ◆ 기량검증은 요건은 엄격히 적용하되, 협력사의 애로사항은 최대한 해소하여 국내원전 생태계 복원 기여

■ 향후 계획

- ◆ 기존 검사기술 대체 최신 기술 개발 : PAUT, 자동 UT, Semi-Auto
- ◆ 검사기술 고도화를 위한 국내 검사회사와의 협업 강화

세계 최고 수준의 원전 안전설비 비파괴검사 기술개발 및 검사자 양성

원전을 더 안전하게
한국형 비파괴검사 기량검증(KPD)

감사합니다.

