

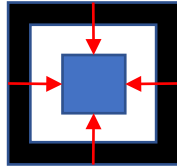
차세대 원전용 소재, 부품, 장비 혁신제조기술 개발현황

2022년 10월 19일
두산중공업 원자력BG

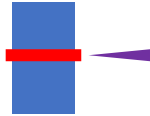
- **Trend of Advanced Manufacturing for SMR**
- **Advanced Manufacturing Technologies**
- **Materials and Welding Automation**
- **Summary**

As-is

소재 제작
주/단조 → 가공



원주심용접
(SAW Process)



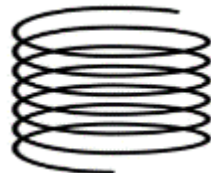
Cladding
(SAW Process)



수동용접



2D Bending



To-be

PH-HIP

Additive Manufacturing

전자빔 용접

Peening / Cold Spray / FSW

Diode Laser
Cladding

Laser / Hybrid

로봇 용접

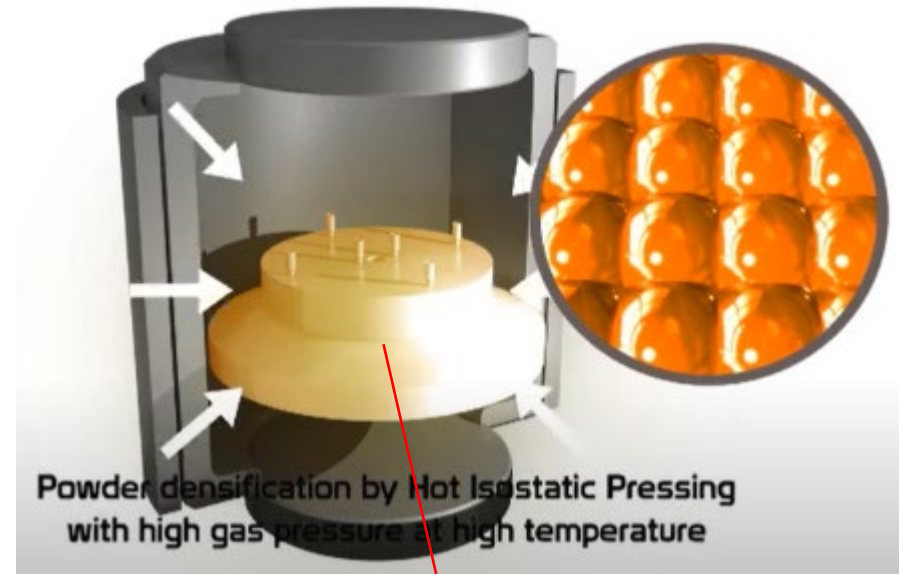
AM- WAAM
(Wire Arc Additive Manufacturing)

3D Helical
Tube Bending

Flange and Shell Forging for Reactor Pressure Vessel



PM-HIP



Forging

- Ingot melting and forging
- Machine extra metal (loss amount of base metal)
- Nozzles and attachments weld required after forging
- NDE the weldments
- ISI required

PM-HIP

- CAN module fabrication
- Metal powder fill into CAN
- High isostatic pressing
- Machine extra metal but not so much

Advantages

- Metal Powder used
- Near Net Shape
- Application for Specialized Material
- Big Size HIP Machine
- Reduce the production lead time up to 90%
- Increase the integrity
- Delete and minimize welds and ISI

Required Code & Regulatory Requirements for PM-HIP

- Material specification designated by Code
- Filler metal needed for repair welding of specialized metals produced by PM-HIP
- Irradiation embrittlement test if it is used for core region of RPV

- ASME Section II, Part A & Section III, Appendix D

- Chemical & Mech. Composition
- Mechanical Properties
- Drop Weight Test / Charpy V-Notch Impact Test

No Material Specification for **PM-HIP Material** → **Develop ASME Code Case**

- ASME Section II, Part C

- Applicable welding material required for repair PM-HIP materials

Not so much data for repair welding of PM-HIP Material
→ **Required welding material test**

- 원안위고시 제2021-28호 제15조

원자로 감시시험 대상 모재 및 용착금속 최대습수에너지

- 조사전 : 102J 이상 / 설계수명 만료일까지 : 68J 이상

- 원자로규제기준 KINS/RS-N03.00, Rev. 4

3.8.2.1 금속재료 - 2항

원자로내 중성자 조사범위 내의 모든 금속재료

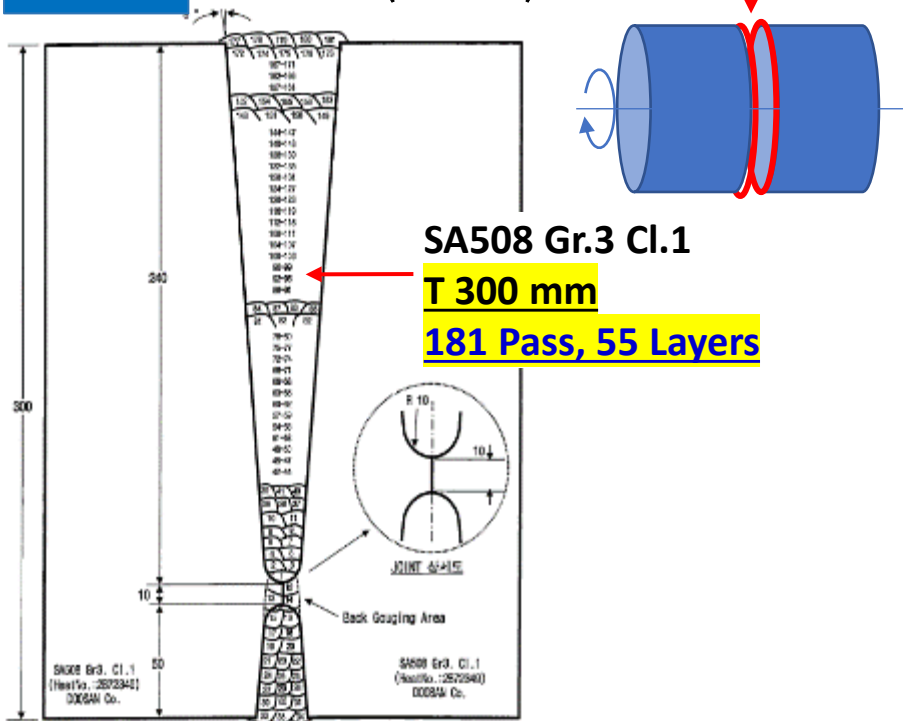
- 조사취화 평가 필요, 충분한 취성 저항성 보유

Perform the irradiation embrittlement test if the regulatory requests the soundness of **PM-HIP & Welding Materials** during the design life of SMR

기존 용접방법

SAW

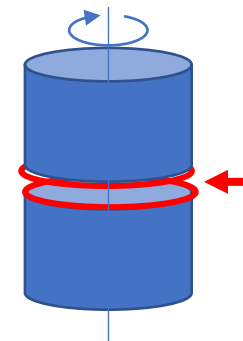
- 셀과 셀 용접을 위해 수십패스 용접
- 용접재료(=용가재) 사용



혁신 용접기술

EBW

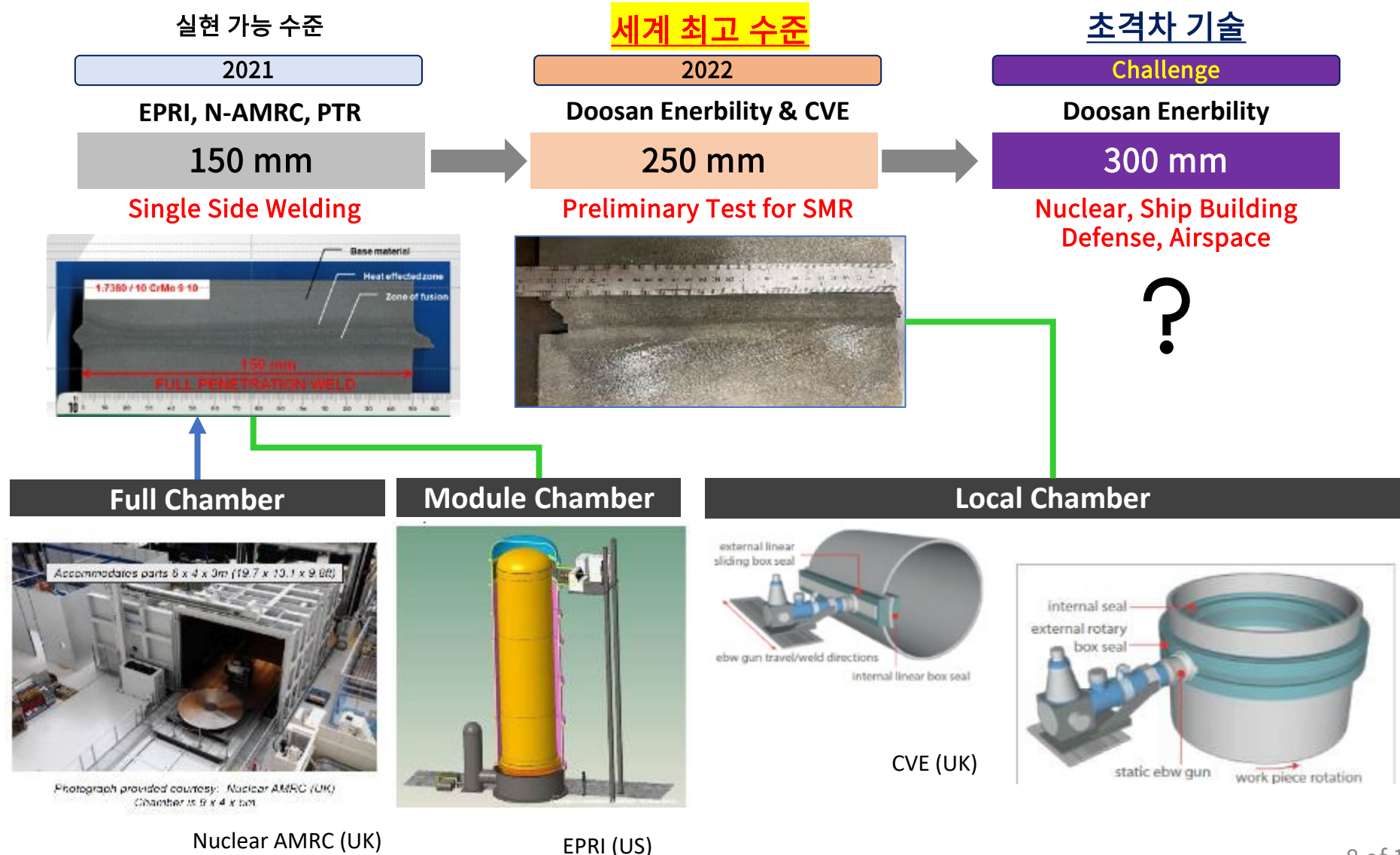
- 1개의 셀과 셀 용접을 위해 One Pass 용접
- 용접재료(=용가재) 불필요



✓ 원자로 압력용기 용접시간 90% 이상 단축 가능

노형	모재두께 (mm)	원주심 1개 용접시간(일)		예상효과(일)	비고
		SAW	EBW		
NuScale	130	13	1	12일 절감	제품이 두꺼울수록 EBW 효과 극대화
I-SMR	250	25	1	24일 절감	

Maximum Thickness possible to be welded by EB



- Preheat Temperature for welding P-No. 3 materials
- Welding and repair welding materials for EB weld
- Irradiation embrittlement test if it is used for core region of RPV

- Regulatory Guide 1.50 Rev. 1 (March, 2011)

Weld fabrication1 for low-alloy steel (P Nos. 3, 4, and 5A)

1. Max. interpass & min. preheat temp. of WPS is the same of PQ
2. Preheat temp. until PWHT or Post weld hydrogen bakeout 200 and 400°C (400 and 750°F, Min. 4 Hrs)

- Preheat temp - ASME Section III, Appendix D : 250°F (121°C)
- Preheat maintained after welding : 400 ~ 750°F (200 ~ 400°C)

Exemption for Preheating and Post Heating in Vacuum Chamber for EBW
→ Development of ASME Code Case

- ASME Section II, Part C
 - Applicable welding material required for repair EB Welds

Not so much data for repair welding of PM-HIP Material
→ Required welding material test

- 원안위고시 제2021-28호 제15조
원자로 감시시험 대상 모재 및 용착금속 최대습수에너지
 - 조사전 : 102J 이상 / 설계수명 만료일까지 : 68J 이상
- 원자로규제기준 KINS/RS-N03.00, Rev. 4
3.8.2.1 금속재료 - 2항
원자로내 중성자 조사범위 내의 모든 금속재료
 - 조사취화 평가 필요, 충분한 취성 저항성 보유

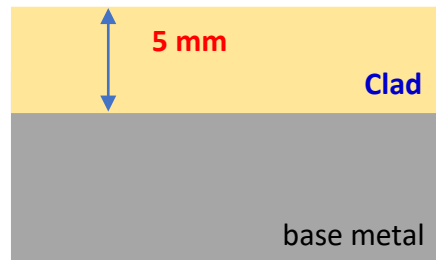
Perform the irradiation embrittlement test if the regulatory requests the soundness of EB weld and Repair welding materials during the design life of SMR

Diode Laser Cladding

기존 용접방법

SAW
ESW

- SAW 또는 ESW 용접
- 클래딩 표면 기계가공 필요

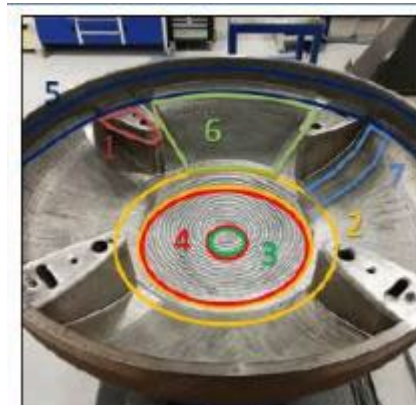
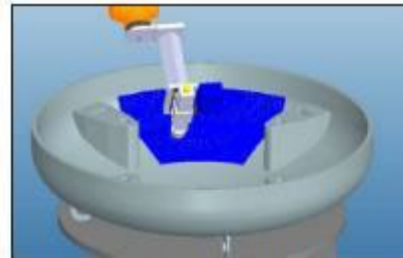


- ✓ 대입열 용접에 따른 모재 열영향
→ Hot cracking 가능성 증가
- ✓ 최소 Clad 두께 3.2 mm / 평균 5 mm

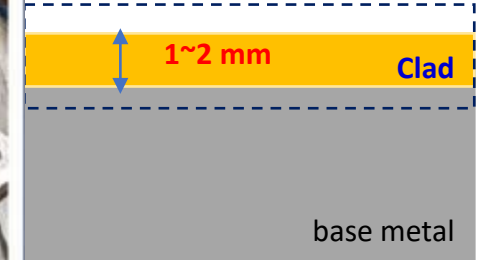
혁신 용접기술

DLC

- 다이오드레이저 및 로봇 시스템 적용
- 클래딩 표면 기계가공 최소화



Source: [EPRI advanced Materials and Manufacturing INFUSE Workshop Dec. 1-2, 2020](#)



- ✓ 저입열 용접으로 용접희석률이 낮음
- ✓ 자동화 및 대용량 용착을 통한 작업시간 50% 단축
- ✓ Clad 두께 감소로 제품 경량화 가능

Preliminary test of Diode Laser Cladding

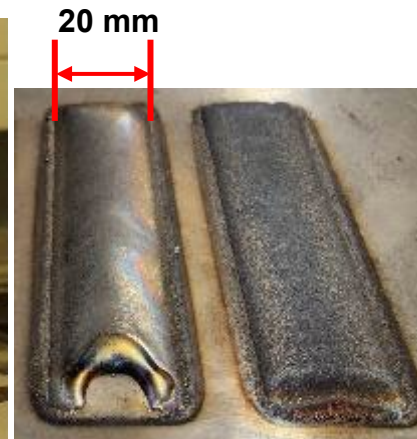
SAW Strip Cladding



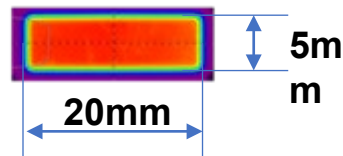
Square Beam



Clad width



Robot & Laser WD M/C



Development Targets for DLC

Single Layer thickness : Under 2mm

- ✓ *Soundness compared to clad thickness 3.2mm*
- ✓ *Repair welding including temper bead welding*
- ✓ *NDE plan for UCC*
- ✓ *Corrosion thickness evaluation on design life (80 years)*

Wider width deposition up to 45mm

- ✓ *High-capacity LASER power supply*
- ✓ *High-capacity welding head*

No preheat and extended preheat

- ✓ *Data package for hydrogen induced test*
- ✓ *Developing Code Case*

Surface roughness : Max. 5 micrometer

- ✓ *Optimum welding condition*

Single Powder materials: 308L

- ✓ *Low dilution*
- ✓ *Constant chemical analysis from 1~3mm*

No measuring Delta Ferrite

- ✓ *Data package to show low dilution*

기존 용접방법

SMAW

- 용접사의 의한 수동용접

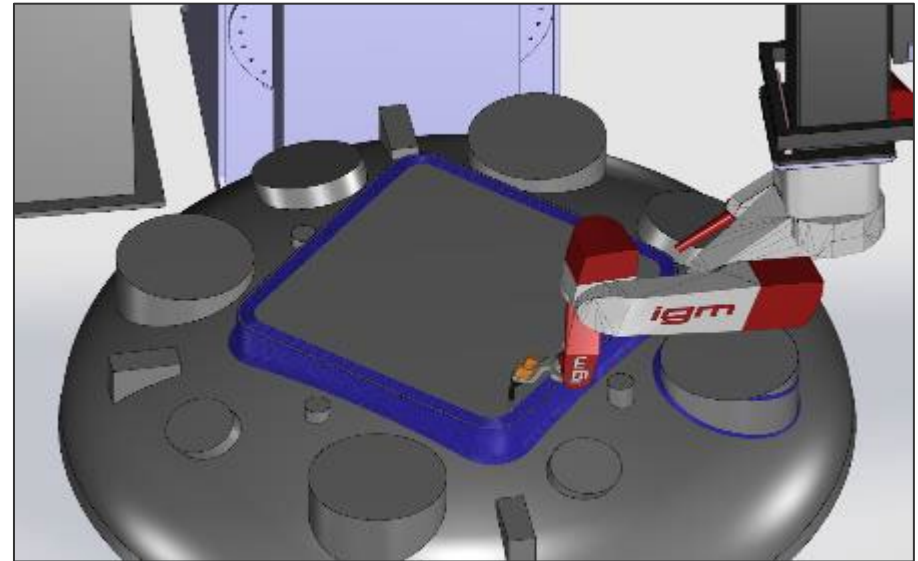


- ✓ 수동용접에 의한 작업시간 증가
- ✓ 용접인력 고령화로 인한 숙련공의 감소
- ✓ 고열 작업에 따른 안전사고 증가

Robot Welding

GMAW GTAW

- 로봇을 사용한 무인화 및 자동화
- 3D Printing (WAAM) 기술 개발

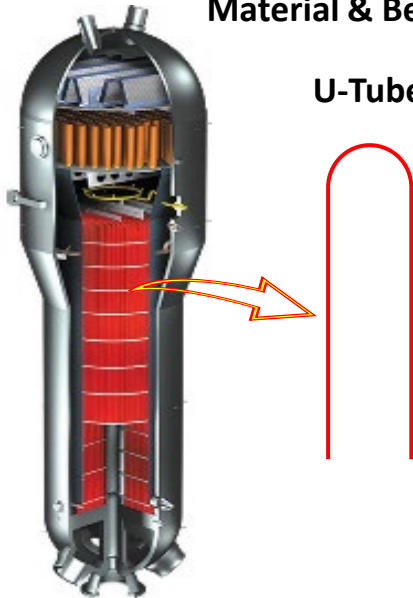


- ✓ 단품 용접작업시간 50% 단축
(생산성 및 작업안전 확보)
- ✓ 품질 표준화 및 무인화/자동화
- ✓ WAAM 적용 제품 ASME Code Case 개발 필요

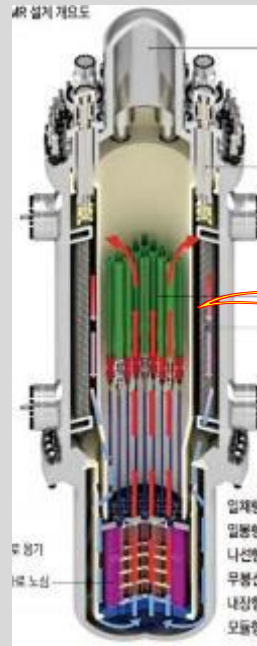
APR-1400 Steam Generator

100 % Import
Material & Bending

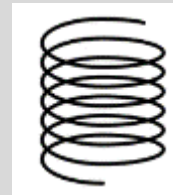
U-Tube



i-SMR



Helical
Tube



50 % Import
Material – Foreign Maker
3D Bending – Doosan Enerbility

- 고정형 자동 Helical Tube Bending 기술
- 이동형 자동 Helical Tube Bending 기술
- Helical Tube 검사 기술(소재검사기술 및 전열관검사기술)
- Helical Tube ECT 비파괴검사/평가 기술
- SMR 원자력을 위한 Helical Tube 건전성 평가

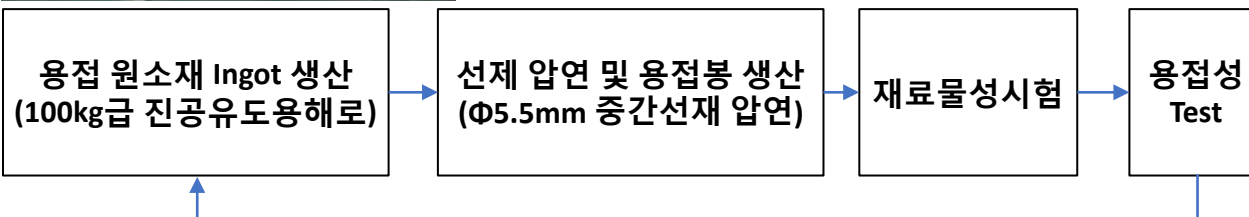
- SMR 및 HTGR 대상 고강도, 내열/내식성 합금 적용 검토 추세
 - 저합금강 : SA508 Gr.3 Cl.2 & 4N (국내 혁신형 SMR 후보 소재)
 - 스테인리스강 : XM-19¹, F6NM²
 - 초내열/내산화 합금 : Alloy 617³
 - 내고온균열성 용접재료 : ERNiCrFe-15⁴, 52XL⁵

각종 신소재 대상
방사선조사 환경에서
적용 가능한 용접재료와
용접공정 개발 필요

[Note]

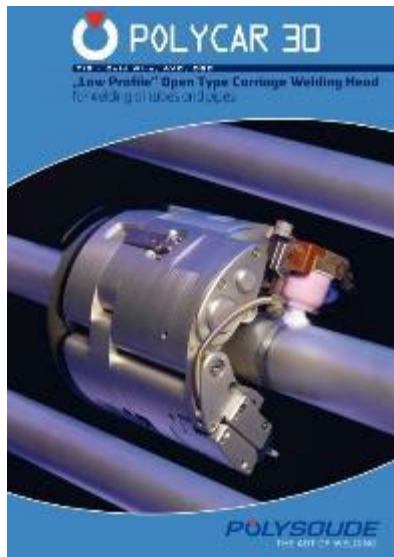
1. 질소강화 고강도 오스테나이트계 스테인리스강 – NuScale Lower RPV 및 CNV 소재 / X-energy 후보 소재
2. 마르텐사이트계 스테인리스강 – NuScale Upper CNV 소재, 수력발전기기용 재료
3. 초내열 내산화 니켈 합금 – 초고온가스로 (VHTR) 후보소재
4. 내 고온균열성이 개선된 용접재료 – RR-SG 의 Alloy 690 용접용 후보 용접재료
5. 내 고온균열성 및 작업성이 개선된 용접재료 – EPRI에서 기존 Alloy 690 용접재료를 대체하기 위해 개발된 재료

소규모 특수용접소재 생산
및 시험이 가능한
국내업체 및 기반시설 필요
(해외수입 의존도 100%)



- 원자력 용접장비는 약 90% 해외장비에 의존
(고정밀 자동 GTAW 용접기는 전량 해외수입)
- 높은 투자비, 부품수급기간 장기화, A/S 지연으로 인한 생산단가 증가 및 제작일정 지연 발생

- 국내 중소기업 중심 장비 국산화 필요
 - ✓ 설비 및 부품 구매비 30~40% 절감
 - ✓ 용접 작업지연 해소



Polysoude사(프랑스)

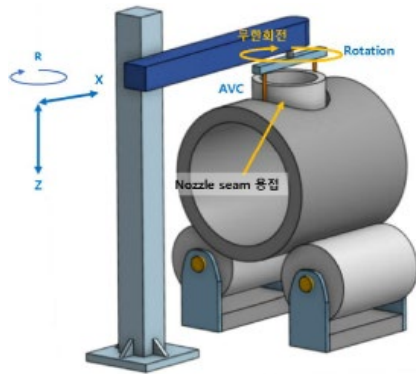


Liburdi사(캐나다)

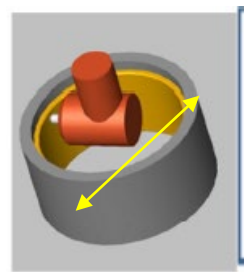
- 국산화 개발 문제점 (원자력 적용)
 - ① 소규모 중소기업 중심 개발
 - 재무안정성 취약
 - 지속적인 장비개발 투자 불가
 - ② 취약한 기술기반
 - ③ 전문인력 부족
 - ④ 원자력용 소량 공급(규모의 경제 불가)
 - ⑤ 개발장비 국내외 판로개척 어려움

Localization of Welding Machine & accessories

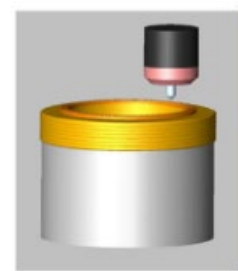
Nozzle to Shell 자동용접장비



소구경 및 3차원 Cladding & Buttering 용접



Noz. 내경 40 mm

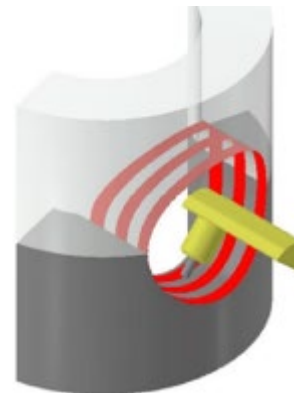


Noz. Buttering

용접용 초소형 특수 카메라 (고온환경 내구성 및 운영 SW)

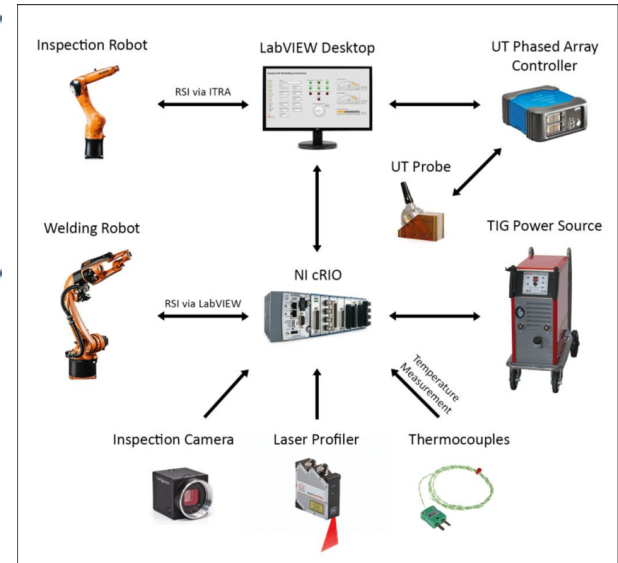


Source : Xiris Weld
Monitoring Cameras



3차원 내면 용접

Robot Welding System Integration



Source : [Continuous monitoring of an intentionally-manufactured crack using an automated welding and in-process inspection system](#)

- SMR 경쟁력 : 안전성과 경제성
 - 혁신제조기술은 경제성 확보를 위한 필수요소
 - 해외 경쟁사 대비 월등한 품질, 생산성 확보
 - RPV 12개월 제작 목표
- 국내 특수소재 및 특수용접 장비분야 기술력 부족
 - 국내 중소기업의 기술개발 지원 (정부 및 지자체)
 - 단순장비개발 외 특수부품 및 시스템 통합기술 개발 포함
 - 전문인력 육성 및 지속적인 영업지원
 - 안정적인 물량 확보

감사합니다!