

## 국내 기술로 만든 철강재, 전 세계 핵융합로에 공급 길 열렸다!

- 핵융합로 핵심 소재, 국내 독자 개발로 핵융합로 건설의 표준이 된 첫 사례
- 향후 핵융합 산업 공급망 시장에서의 참여 확대를 기대
- 핵융합(연)에서 다년간의 집중 연구를 통해 성과 도출

과학기술정보통신부(부총리 겸 과학기술정보통신부 장관 배경훈, 이하 '과기정통부')는 한국형 저방사화 철강재 'ARAA(Advanced Reduced Activation Alloy)\*'가 프랑스 원자력 산업기술기준인 「RCC-MRx\*\*」에 공식 등재(프랑스판 '25년 12월, 영문판 '26년 2월)됐다고 밝혔다.

\* ARAA(Advanced Reduced Activation Alloy) : 핵융합에 의해 발생하는 중성자가 충돌해도 견디도록(저방사화) 설계된 국산 철강재로 핵융합로 구조재의 핵심 소재

\*\* RCC-MRx : 프랑스 원자력기술자협회(AFCEN)가 발간하는 원자력·핵융합 시설의 설계·제작·검사 기준을 규정한 산업기술기준으로 핵융합로에 관한 전세계 유일한 기준

핵융합 장치는 초고온과 고에너지 중성자 환경에서 장기간 운전되기 때문에 구조재의 기계적 특성, 내구성, 방사화 특성에 대한 엄격한 검증이 필요하다. 한국핵융합에너지연구원(이하 핵융합연)에서 개발한 철강재 'ARAA'는 핵융합 장치의 안전성과 성능을 보장해야 하는 엄격한 검증을 통과한 첫 사례로 향후 핵융합로 설계·제작시 표준으로 사용된다는 점에서 의미가 있다.

핵융합(연)은 ARAA의 기계적 특성, 고온 환경에서의 변형 거동, 중성자 조사 조건에서의 특성 변화 등을 분석하여 물성 데이터를 축적해 왔으며 구축된 데이터베이스를 바탕으로 유럽의 'EUROFER97\*' 다음으로 세계 두 번째 RCC-MRx에 등재되었다.

\* EUROFER97 : 유럽 EUROFusion(유럽 핵융합 연구 연합체)이 개발한 저방사화 철강재로 '12년 등재됨

이러한 원천기술 확보는 향후 핵융합 장치 건설 과정에서 우리나라가 관련 소재 시장에 주도적으로 선도할 수 있는 기반을 마련한다는 점에서 의미가 크다. 특히, 핵융합 실증로 1기에는 약 1만 톤 규모의 특수 철강재가 사용될 것으로 예상되기에 이번 RCC-MRx 등재는 향후 핵융합로 설계·제작 단계에서 국내 소재 적용 가능성을 높이고, 국내 산업의 시장 참여와 공급망 경쟁력 강화에 기여할 것으로 기대된다.

이번 성과는 핵융합(연)이 과기정통부의 국제핵융합실험로(ITER) 테스트 블랭킷 모듈(TBM) 개발 지원(주요 사업비)을 통해 10여 년 동안 축적된 연구 성과를 바탕으로 도출되었다. 동 연구 성과를 바탕으로 핵융합로 구조재 뿐만 아니라 내부에 설치되는 핵심 소재·부품·장비에 대한 연구도 계속 수행해 나갈 예정이다. 또한, RCC-MRx 등재와 더불어 미국 원자력 산업기술기준인 ASME\* 등재를 목표로 후속 연구를 이어갈 계획이다.

\* ASME(American Society of Mechanical Engineers) : 미국기계학회가 제정한 원자력 분야 세계적 설계·제작·검사 기준으로, 향후 핵융합 분야 산업기술기준 추가 예정

과기정통부 오대현 미래전략기술정책관은 “이번 프랑스 원자력 산업기술기준 등재는 우리 기술이 국제 기준 체계에서 신뢰성을 확보한 의미 있는 성과”라며 “앞으로도 핵융합 핵심 소재의 연구개발과 산업 기반을 함께 강화해 신산업 분야의 경쟁력을 높여 나가겠다”고 밝혔다.

담당 부서	미래 전략 기술 정책관	책임자	과 장	지은환 (044-202-4670)
	핵융합 에너지 환경 기술과	담당자	서기관	이향수 (044-202-4671)
	한국핵융합에너지연구원	책임자	그룹장	안무영 (042-879-5726)
		담당자	그룹장	박이현 (042-879-5732)

- (명칭) ARAA (Advanced Reduced Activation Alloy)
- (정의) 핵융합로의 극한 환경(고에너지 중성자, 고열속)을 견디기 위해 국내 기술로 독자 개발한 페라이트-마르텐사이트(RAFM)강
- (목적) 미래 핵융합로의 핵심 부품인 '테스트 블랭킷 모듈(TBM)'의 설계 및 제작
  - 운전 종료 후 방사성 잔존량을 최소화하여 폐기물 처리 부담 경감
  - 해외 소재(Eurofer97 등) 의존 탈피 및 소재 공급망 자립화

## □ 주요 연구 및 개발 내용

- (합금 설계 및 최적화) 몰리브덴(Mo), 니오븀(Nb) 등 고방사화 원소를 저방사화 원소로 대체
  - 100여 종 이상의 모델 합금 평가를 통해 최적 조성 도출 및 결정립 미세화 등 미세조직 제어
- (상용 제조 기반 확립) 산업체 연계를 통해 수 톤급의 상용 규모 제조 및 품질 관리 체계 구축
  - 설계용 물성 확보를 위한 대표 Heat 및 판재 확보
- (물성 데이터베이스(DB) 구축) 물리·열·기계적(인장, 충격, 피로, 크립 등) 및 전기·자기적 특성 정밀 시험수행
  - 국제 시험규격(ASTM, ISO 등)에 기반한 체계적 데이터 축적 및 DB화

## □ 핵심 성과

- (RCC-MRx 공식 등재) 2025년 12월, 프랑스 원자력 산업기술기준 RCC-MRx (2025 Edition) 등재 완료
  - 유럽의 Eurofer97 다음으로 세계 두 번째 산업기술기준에 등재된 핵융합 구조재
- (국제적 신뢰성 확보) 해외 산업기술기준 체계 반영을 통해 국내 개발 소재의 국제적 공신력 및 기술 경쟁력 입증
  - 핵융합로 설계 및 제작 단계 적용을 위한 객관적 법적·기술적 근거 확보

[그림 1] RCC-MRx\_Section IV (2025 Edition) 목차 및 ARAA 소개 페이지

CONTENTS	
SECTION IV: PROBATIONARY RULES	
SRP 1000	INTRODUCTION..... 1
SRP 1100	General..... 1
SRP 1110	Use of a probationary phase rule..... 7
SRP 1120	Introduction of a probationary phase rule in the code..... 7
SRP 1200	List of RPPs..... 2
SRP 1300	List of references and their applicable version..... 3
SRP 2000	PROBATIONARY PHASE RULES..... 7
RPP1-2020-RA2000	MANAGEMENT SYSTEM..... 9
RPP2-2012-PR2000	PROHIBITION OF COLDING ALLOY STEEL FROM ANNEX A3.18.A5..... 13
RPP3-2012-RM2432	RM 2432 TECH PLATE..... 31
RPP4-2012-EUR2000	EUROPEAN RAFA STEEL..... 34
RPP5-2012-PR2000	AS 2A CASE HARDING 9001-T8..... 63
RPP7-2012-PR2000	SLURRY TESTS..... 67
RPP8-2013-2015-SM2Z	USE OF THE SMCZ METHOD..... 71
RPP9-2015-RO091	RO091 ALLOY..... 79
RPP10-2015-A3.18.B	SMELTING OF 9001-T8 ALLOY..... 103
RPP11-2018-18MND5	18MND5 STEEL..... 107
RPP12-2022-718	NiCr19Fe18Ni9Mn3Al Alloy..... 130
RPP13-2015-RM2134	EX-TEMPERATURE EXAMINATION OF STEAM GENERATOR TUBES PROCURED FOLLOWING RM #14-1..... 153
RPP15-2015-QAD	ALUMINUM ALLOYS (WELD ANODES)..... 157
RPP16-2022-SSA 48	EFFICIENCY DIAGRAM FOR ALLOY 800 IN NEGLECTABLE CREEP..... 163
RPP17-2022-FFC	CONSIDERATION OF COMPRESSION DURING THE HOLDING TIME FOR THE RB 3200 COLD-CHAMFER CRACKING TEST..... 171
RPP18-2022-SAL30	X2CrNi19-10 CONTROLLED-HARDEN CONTROL STEEL..... 185
RPP19-2022-PR2000	CHESS-FATigue ALTERNATIVE METHOD..... 185
RPP20-2022-SPT	SMALL PUNCH TESTS (SPT)..... 193
RPP21-2022-Via E	SURFACE E-METALLOGRAPHY..... 201
RPP22-2022-PR2000	SLURRY TESTS..... 226
RPP23-2022-CL-CL20	CL-CL20 ALLOY..... 238
RPP24-2022-HUB	HUB STITCHING..... 245
RPP26-2025-TADV	TADV TITANIUM ALLOY..... 252
RPP27-2025-2FA	COMPONENTS MANAGED BY ADDITIVE MANUFACTURING – LASER POWDER BED FUSION (LPBF) PROCESS..... 270
RPP28-2025-ARAA	ARAA RAFA STEEL..... 300
RPP29-2025-A3.34	ENVIRONMENTAL DECONTAMINATION..... 304
RPP30-2025-42E	NiCr20Mn9Al Alloy..... 308

**RPP28-2025-ARAA ARAA RAFA STEEL**

**RPP28 – Purpose of change**

This rule introduces the possibility of using the denominated ARAA steel, a reduced activation alloy steel with 6% chromium, 1.2% tungsten and 0.01% zirconium. This rule includes a reference procurement specification (ARAA) and Appendix A3 which covers the mechanical properties associated with this RPS. The rule only includes data from tests or methods which comply with the other rules in the Code. Missing data and feedback from applying the RPS must be collected so as to review the rule's probationary classification.

In addition, the following aspects of the material file must also be completed:

- Justification of applicability of the Design Rules for the specified conditions of use
- Manufacturing: industrial experience, metallurgy
- Fabrication: industrial experience, formability, etc.
- Welding: weldability (RB 1300), feedback on qualification of welding procedures, feedback on qualification of repair processes involving welding
- Ease of mounting
- In-service behaviour: thermal ageing, corrosion, erosion-corrosion, irradiation, etc.

Furthermore, due to the lack of data, some characteristics have not been implemented, in order to finalize the introduction of the proposed rules into the code, specific characteristics must be additionally proposed. These characteristics are as follows:

- Instantaneous Coefficients of thermal expansion ( $\alpha$ ),
- Negligible creep and thermal ageing curves,
- Maximum allowable irradiation,
- Symmetrisation coefficient  $K_{\sigma}$ ,
- Fatigue-creep interaction diagram,
- Fatigue crack growth  $da/dN$ ,
- Regarding  $R_{\sigma}$  and  $R_{\sigma}$  values, justification of the consistency between the RPS and the A3 appendix.

**RPP28 – Modification status**

The chapters for these rules are in addition to the rules currently available in the Code.

[그림 2] ARAA 제조 과정 및 시험

(용해 ⇨ 예열 ⇨ 압연 ⇨ 판재 생산 ⇨ 열처리 ⇨ 성능평가)

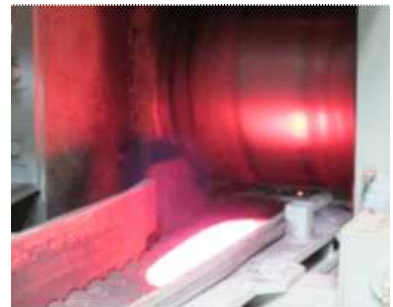
① VIM 잉곳 제작 (30kg/ingot)



② 예열 (1,150°C/2시간)



③ 열간압연 (90% 압연)



■ 미세조직 분석  
■ 기계적 시험  
(인장, 크리프, 충격, 피로)

⑥ 최종 성능 검증



⑤ 열처리 (노멀라이징 1050°C / 1시간, 템퍼링 760°C / 1시간)



④ 열간압연 판재 (15mm)