용융염화염 원자로용 혁신 구조소재 개발
(Molten Cl-Salt Reactor: Development of Innovative Structural Materials)

Oct. 25, 2023

Changheui Jang

Dept. of Nuclear and Quantum Engineering
KAIST, KOREA

Contents

1. 배경 – 용융염원자로

q 용융염원자로의 개념 (원자력연구원)

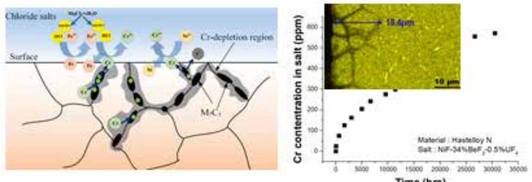
q **운전조건**

- Temperature: 650~700 C
- Coolant (tentative): $KCl\text{-}MgCl_2$
- Neutron spectrum: Fast spectrum (~10-50 dpa (?))
- Lifetime: > 20 years

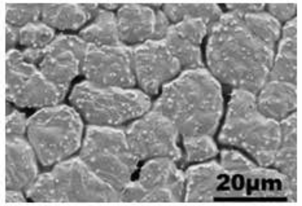
q **용융염원자로 환경에서의 재료 이슈**

- **용융염 원자로에서 구조 소재의 다양한 손상 => 설계 및 운전의 어려움**

고온 용융염 부식



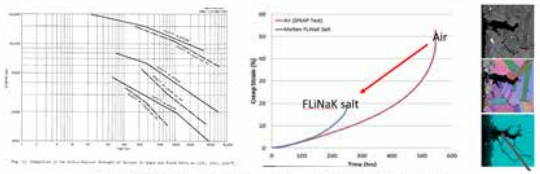
고온 용융염에서 합금의 용해



결정립계 기공 형성

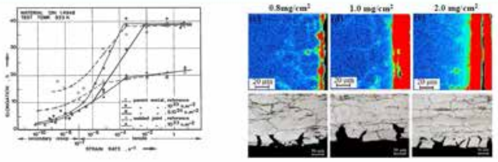
용해원소의 저온부 석출

고온 기계적 물성 저하



용융염 부식에 의한 고온 기계적 물성 저하

조사에 의한 취화



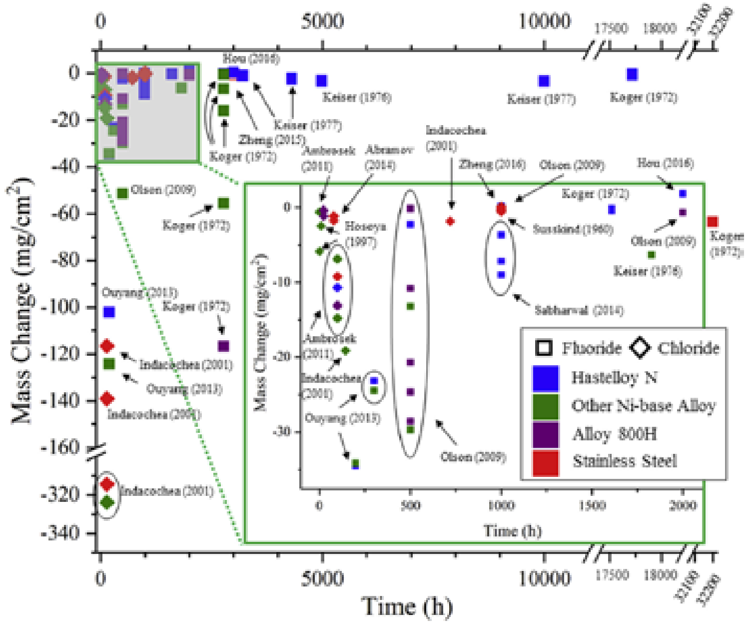
헬륨 취화

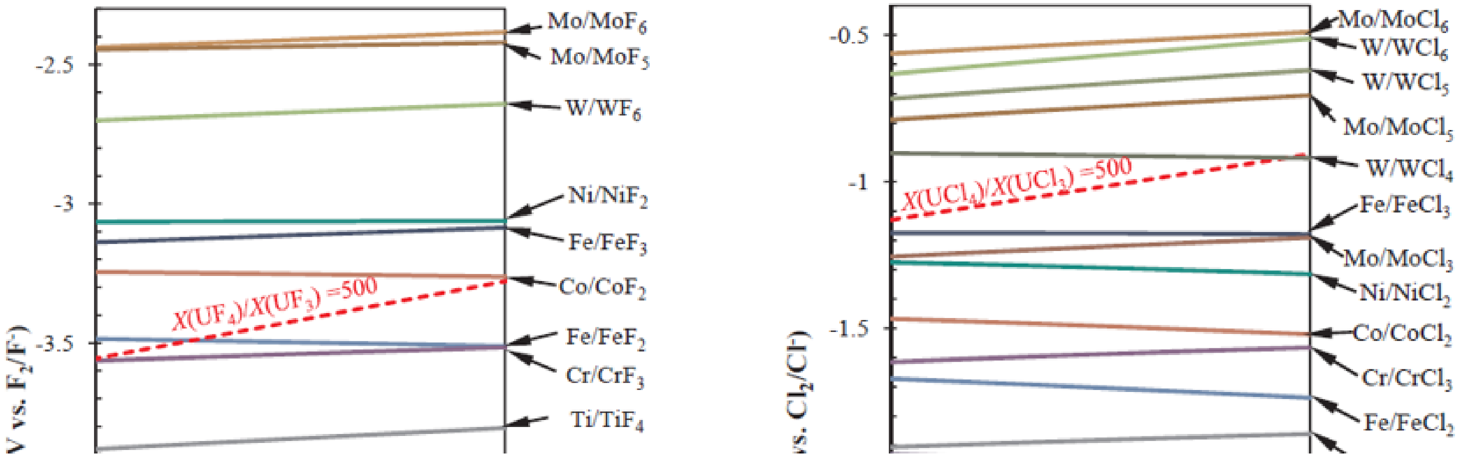
핵분열생성물과의 반응에 의한 취화

1. 배경 - 부식

- **용융염환경 부식연구**
  - **Ni-합금, 스테인리스강 등 대상, 500~850C**
    - 부식저항성: Hastelloy-N >> SS 316 > A800H
    - Large scatter <= 용융염 및 실험장치조건의 영향
  - **용융염화염 환경 부식시험 결과 매우부족**
    - 염화연료염의 redox pontential 이 높음 => 합금원소들이 부식에 더욱 취약

S.S. Raiman, Journal of Nuclear Materials, 2018





용융불화염/염화염환경에서 redox potential

Guo, Progress in Materials Science, 2018.

1. 배경 – 후보소재

용융염원자로 환경에서의 재료 이슈

고온원자로용 기존재료의 한계

- 2¼Cr-1Mo and 9Cr-1Mo steels (up to 650 C)
  - 낮은 고온강도, 낮은 부식저항성, 조사취화
- Type 304 and Type 316 stainless steel (up to 800 C)
  - 낮은 고온강도, 용융염부식 취약
- Alloy 800H (up to 900 C)
  - 우수한 고온강도, 용융염부식 매우취약, 조사취화 및 팽윤
- Alloy 617 Code Case (up to 950 C)
  - 우수한 고온강도, 용융염부식 매우취약, 조사취화 및 팽윤

Hastelloy-N

- 염화염환경에서 낮은 부식저항성
- 낮은 Cr 농도도 일반부식 취약
- 핵분열생성물 Te 에 의한 취화
- 조사팽윤 및 He 취화

혁신소재 요구 특성:
부식저항성(corrosion resistant)-
높은 크립강도(creep resistant)-
조사저항성 (radiation resistant)

2. 혁신 소재개발 – 비교 및 연구방향

q 용융염원자로 환경에서의 재료개발 방향

- Ni-기반 합금
  - Hastelloy-N 개발 경험 활용한 신소재
  - Nb 등의 추가로 Te 취화 완화
  - 염화염환경 및 대기환경에 최적 부식특성을 가지는 Cr 농도
  - 석출물을 통한 고온강도 및 조사저항성 확보
  - 최신 AI 기법을 이용한 합금조성 및 공정조건 도출
- Fe-기반 합금
  - 염화염환경에서 안정한 알루미나 형성 Al 농도 도출
  - 조성 및 석출물 제어를 통한 고온강도 확보
  - 나노탄화물 제어를 통한 조사저항성 확보
  - 고온 상안정성과 He 발생 저감을 위한 최적 조성 도출

q Ni-합금과 Fe-기반 합금 비교 (난제목표 대비)

	부식 저항성		고온 기계적특성		조사저항성		방사화 특성	경제성	지식의 정도	종합 risk
	염화염	대기 및 증기	고온 강도	크립 강도	Te 취화 (Embrittlement)	조사팽윤 (Swelling)				
Ni-합금 (H-N)	-	--	0	-	--	--	나쁨	나쁨	낮음	매우 높음
SS 강 (Hi-Al)	--	+	0	--	-	--	보통	보통	매우 낮음	매우 높음

㈜ "+", "-"는 용융염 원자로 구조재료의 요구조건 대비 충족(+), 미흡(-)의 정도를 나타냄.

2. 혁신 소재개발 - 정량목표

q 연구목표: 용융염 원자로용 고온 내부식 금속 구조소재 개발

기술 난제	난제 해결 여부 판단지표	'27년목표
① 700℃ 이상 고온 복합용융염 환경에서 부식 저항성을 갖는 금속 구조 소재의 부재	700℃ 57mol% NaCl - 43mol% $MgCl_2$ 용융염 환경 내 Static 부식 실험 기준 최소 3,000시간 기준 부식 속도	< 10μm/yr (20μm/yr)
	700℃ 68mol% NaCl - 12mol% $MgCl_2$ - 20mol% UCl_3 용융염 환경 내 Static 부식 실험 기준 최소 300시간 기준 부식 속도	< 20μm/yr (30μm/yr)
② 700℃ 이상 고온 복합용융염 환경에서 구조건전성을 유지할 수 있는 금속 구조소재의 부재	대기 환경의 700℃, 3,000시간 기준 크리프 파단 강도	> 100MPa
	대기 환경의 700℃에서 ASTM 규격의 시험으로 항복강도	> 220MPa
	대기 환경의 700℃에서 ASTM 규격의 시험으로 연신율	> 30 %
③ 700 ℃ 이상 고온 용융염 환경에서 중성자 조사 및 핵분열 생성물(Te)에 의한 취화 저항성을 갖는 소재의 부재	700℃ 57mol% NaCl - 43mol% $MgCl_2$ + 0.1 wt% Te 환경 내에서 25, 100, 225 및 400시간 침지 시험 수행 후 Hastelloy N 소재 대비 반응층 깊이	< Hastelloy N의 Te 반응층깊이 대비 50%

q 연구목표: 용융염 원자로용 고온 내부식 금속 구조소재 개발

l 평가항목 설정근거

평가항목	목표 설정근거
(정량) 고온 용융염 환경 내 부식 속도	• 아직 용융염 원자로의 부식에 대한 권고사항은 미비함. 미국 에너지부(DOE)의 SunShot program은 약 700°C의 용융염 환경에서 운전되는 30년 수명의 집광형 태양광 발전(Concentrated solar power)에 대해 구조재료의 부식 속도를 15µm/yr로 권고함. 이를 20년 수명인 용융염 원자로 수명으로 대치할 시 구조재료의 부식 속도는 약 22.5µm/yr가 요구됨. 경쟁국 대비 성능 우위를 점하기 위해 목표를 용융염 환경에서는 10µm/yr, 용융 연료염 환경에서는 20µm/yr로 설정함.
(정량) 고온 인장 특성	• ASME BPVC Section II에 나타낸 용융염 원자로의 압력용기에 적용할 수 있는 구조 소재의 최대 설계 허용 온도는 705°C 이며, 해당 소재의 인장 특성이 705°C에서 항복강도 220MPa 연신율 30%를 나타냄(Hastelloy N의 Short-Time Tensile Data). 이에 따라, 고온 인장 특성의 목표를 700°C에서 항복강도 220MPa, 연신율 30%로 설정함
(정량) 고온 크리프 특성	• 미국 오크리지 국립연구소의 용융염 원자로의 재료 및 구성요소 구조건전성 이슈에 대한 기술 격차 보고서(ORNL/SPR-2019/1089)에서 용융염 원자로 구조용 후보 재료 중 Hastelloy N과 같거나 향상된 부식 특성과 700°C에 작동하기 위한 더 향상된 크리프 강도를 권고하고 있음. 보고서에 제시된 값을 기준으로 내부식성 구조 소재의 고온 크리프 특성 목표를 3,000시간 기준 크리프 파단강도를 100MPa로 설정함.
(정량) 염화물 환경에서 Hastelloy N 대비 Te 침투 깊이	• 1960년대 MSRE(Molten Salt Reactor Experiment) 연구로에서 용융염 원자로 실증연구를 수행하였으며 여러 개발 소재 중 최적 조성으로 최적 조성으로 상용화된 Hastelloy N을 기준으로 더욱 월등한 Te 취화 저항성을 갖기 위하여 Hastelloy N 대비 50 % 낮은 침투 깊이를 목표로 함.

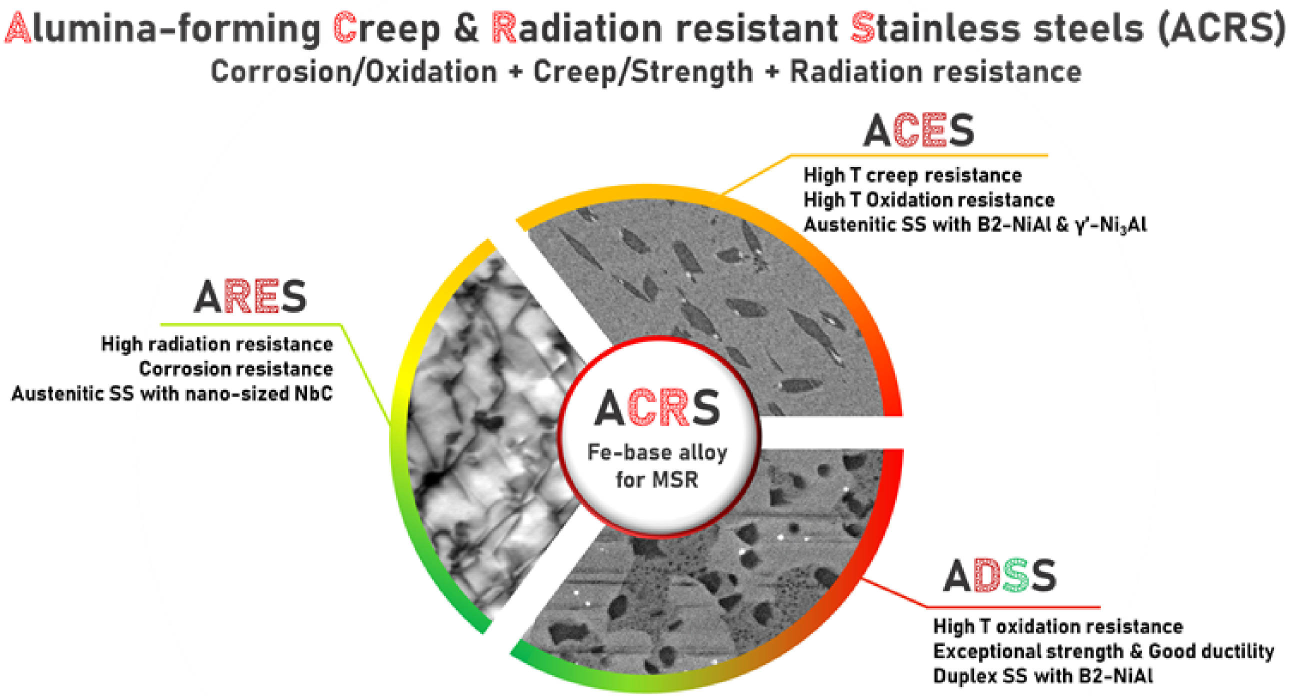
q 추진체계

l 주관 및 참여기관간의 주요 연구개발 역무 및 상호 연관성

용융염 원자로 구조 소재용 내부식성 합금 개발

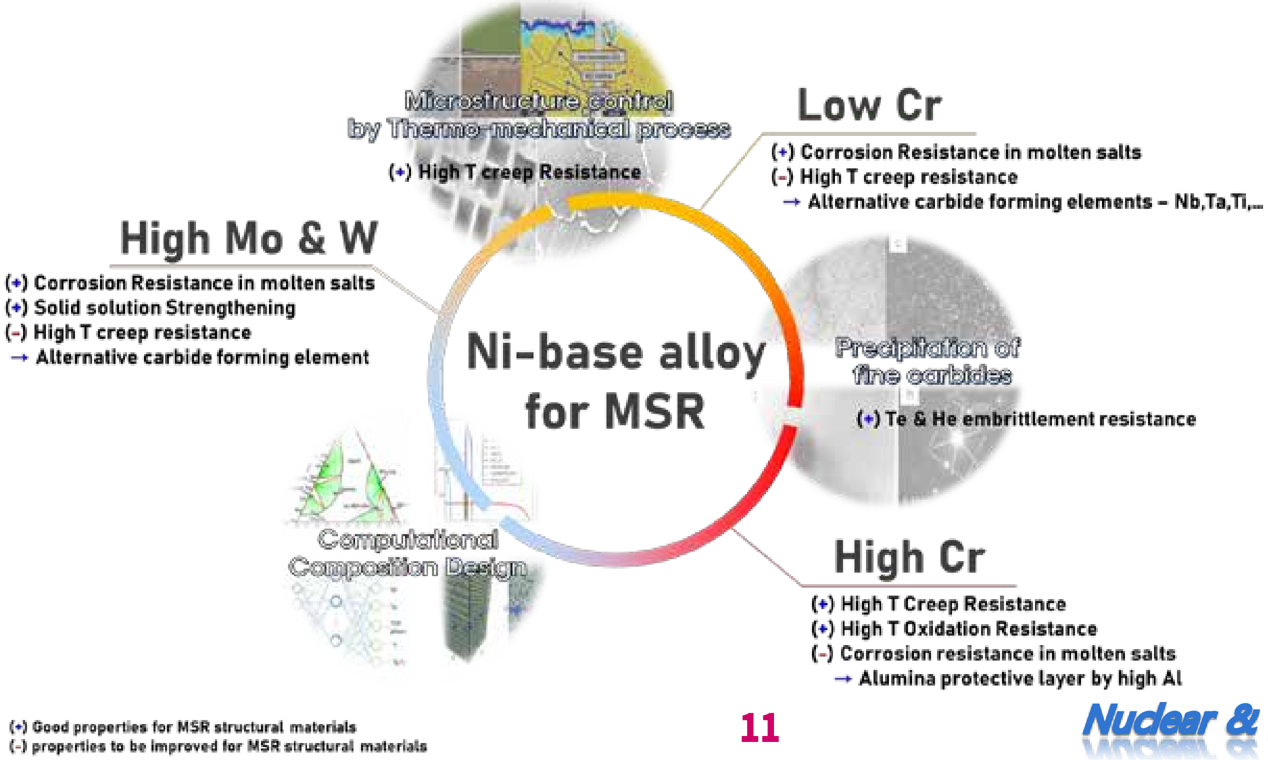
KAIST

- **최종연구목표: Fe 기반 용융염 원자로용 내부식 구조 소재 개발**
- **세부연구목표**
  - (주관1) 고온 용융염화염 환경에서 내부식성 향상 소재 개발
  - (주관2) 고온 크리프 특성 및 고온 인장 특성을 만족하는 석출상 제어 기술 개발
  - (주관3) 조사 저항성 확보를 위한 석출상 제어 기술 개발



KAERI

- **최종연구목표: Ni 기반 용융염 원자로용 내부식 구조 소재 개발**
- **세부연구목표**
  - (공동1) 고온 염화염 환경 내부식 구조 소재 설계기술 개발
  - (공동2) 석출상 제어를 통한 Ni 기반 소재의 부식 및 고온 기계적 특성 향상
  - (공동3) 용융염 원자로 모사 부식 평가법(UCl_3, Te 취화) 개발
  - (공동4) 조사 저항성 향상을 위한 합금원소, 미세구조 제어 기술 개발



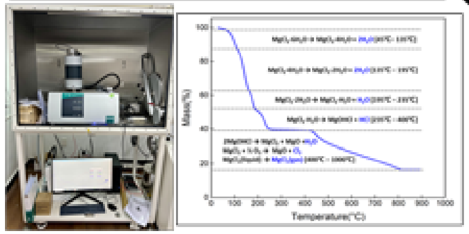
q 서울대학교

- 최종연구목표: 용융염 내 불순물에 따른 구조 소재 내부식성 평가
- 세부연구목표
  - 용융염 환경 내 불순물 제어 및 부식 실험
  - 용융염 환경 구조 소재의 내부식성 평가 및 용융염 모니터링

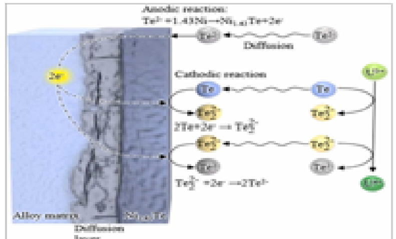
q 경희대학교:

- 최종연구목표: 전산모사 방법론을 통한 용융염원자로 구조소재 열화 평가 방법론 수립
- 세부연구목표:
  - 열역학적 평가 기반 최적의 Fe계 조성 탐색
  - 전산열역학 기법 및 상장 모델을 활용한 미세구조 전산모사

용융염 환경 내 불순물 제어 및 부식 실험

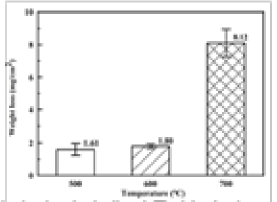


TGA를 활용한 수분 불순물 정량화 및 제어

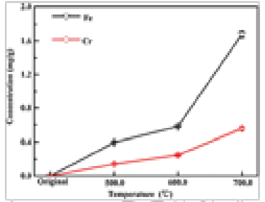


용융염 내 핵분열생성물(Te) 농도에 따른 부식 실험 (Du et al. 2022)

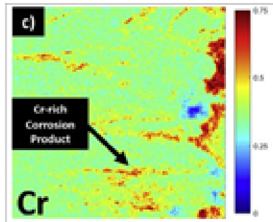
용융염 환경 구조 소재의 내부식성 평가 및 용융염 모니터링



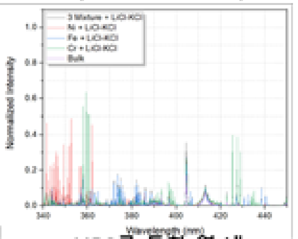
질량 손실량에 따른 부식 속도 평가 (Lu et al, 2023)



ICP-AES를 통한 염 내 부식생성물 농도 변화 (Guo et al, 2020)

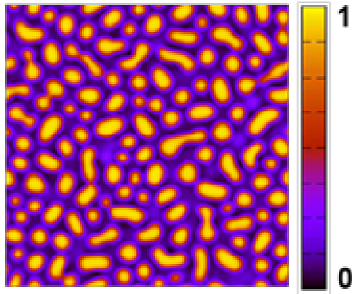


EPMA를 통한 Cr 고갈층 측정 (Guo et al, 2020)



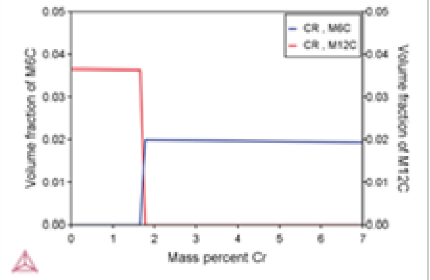
LIBS를 통한 염 내 부식생성물 농도 분석

상장모델을 활용한 미세구조 전산모사



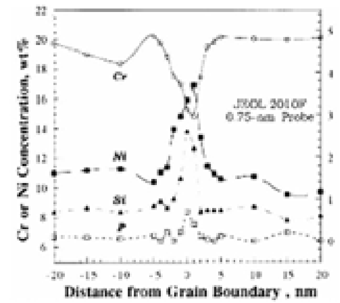
전산열역학 기반의 상장 모델을 활용한 Fe-Cr-Al 시스템의 미세구조

열역학적 평가에 따른 석출물 평가



Cr 조성에 따른 Hastelloy N에서 석출되는 M6C, M12C 탄화물 분율

조사에 따른 미세구조 변화 결과

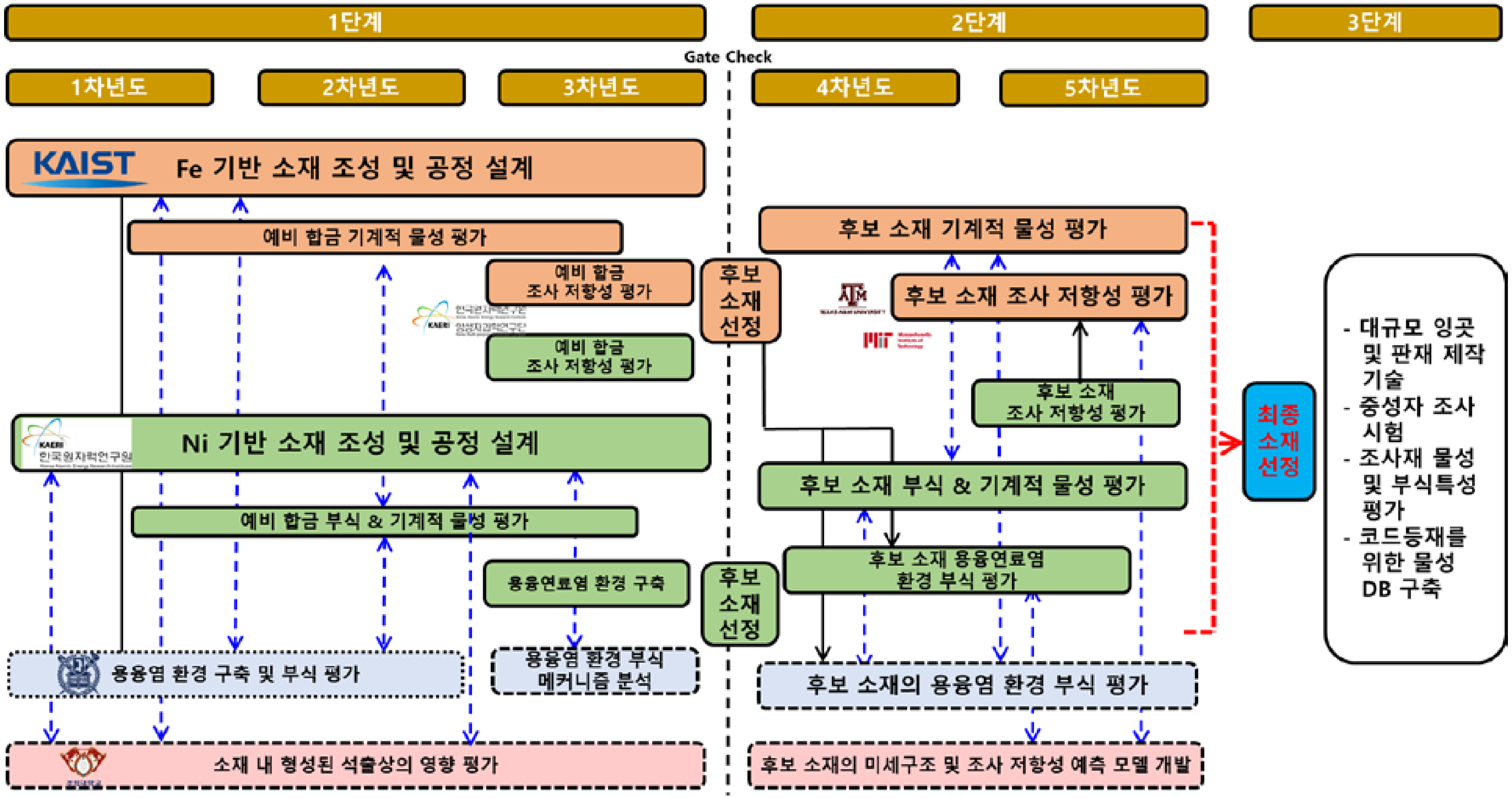


조사 손상된 내식강에서 입계 근처의 조성

3. 주요 연구내용 – Roadmap

q 연구개발 Roadmap

- 단계 및 연도별 연구개발 내용/상호 협력과 후보소재 선정의 roadmap

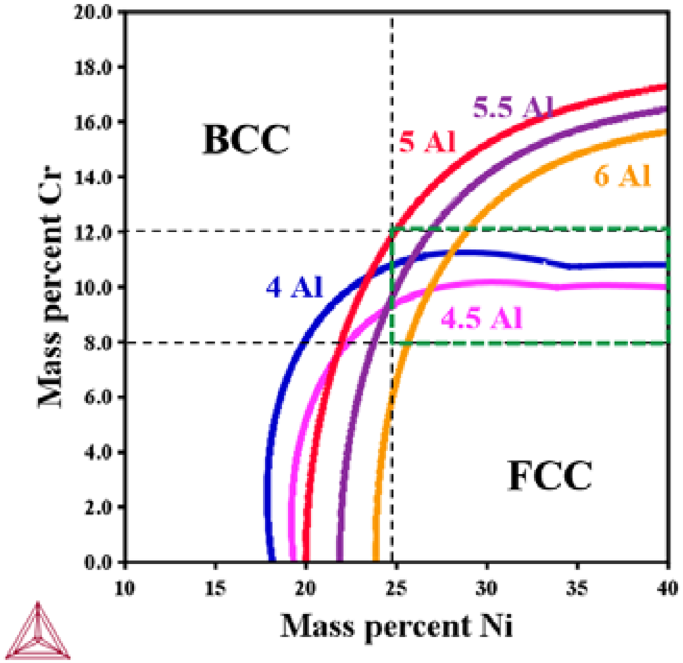


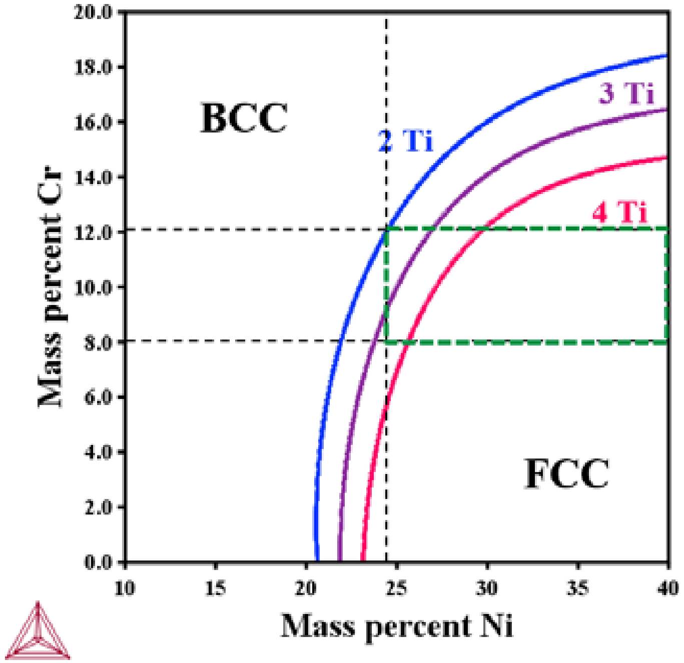
Current Status

q 열역학 계산을 통한 Fe 기반 소재 설계

l 합금 설계 전략 및 열역학 계산 결과

- § **8~12Cr** : 대기 환경 및 3차측 환경에서의 내부식성 향상
- § **5~6 Al** : 용융염 환경에서의 내부식성 확보
- § **Ni > 25wt.%** : 오스테나이트 상 안정화
- § **Ti/Nb/C** : 크리프 및 조사 저항성 향상을 위한 석출상 제어





4. Fe-기반 혁신소재 개발

q 실험실 규모 잉곳 (1kg급) 제작

l Batch 2,3 (8종) 제작

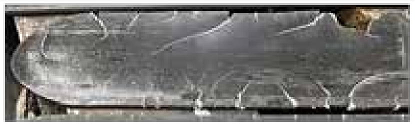
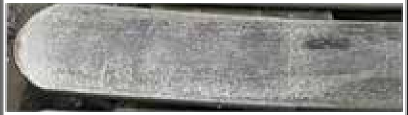
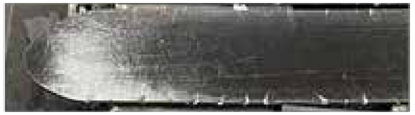
- § 판재 제작 성공을 위한 Nb 함량 조절 및 공정 변수 도입
- § 석출상 제어를 위한 Ni/Ti/C 설정

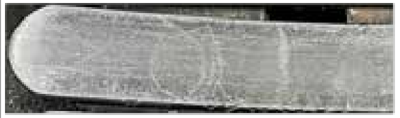
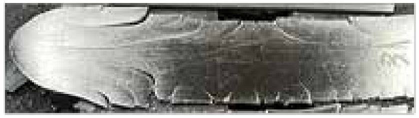
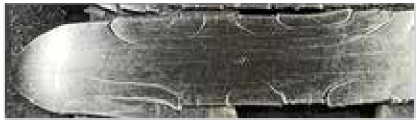
Wt.%	Cr	Ni	Al	Ti	C	Si	Nb	Others
ACRS#21								
ACRS#22								
ACRS#23								
ACRS#24								
ACRS#31								
ACRS#32								
ACRS#33								
ACRS#34								

4. Fe-기반 혁신소재 개발

q 실험실 규모 잉곳 (1kg급) 제작

- **Batch 2,3 (8종) 제작**
  - § 판재 제작 성공을 위한 Nb 함량 조절 및 공정 변수 도입
    - à 모든 조성 열간 압연 성공
    - à 2Ti 판재에서 더 높은 가공성 확인

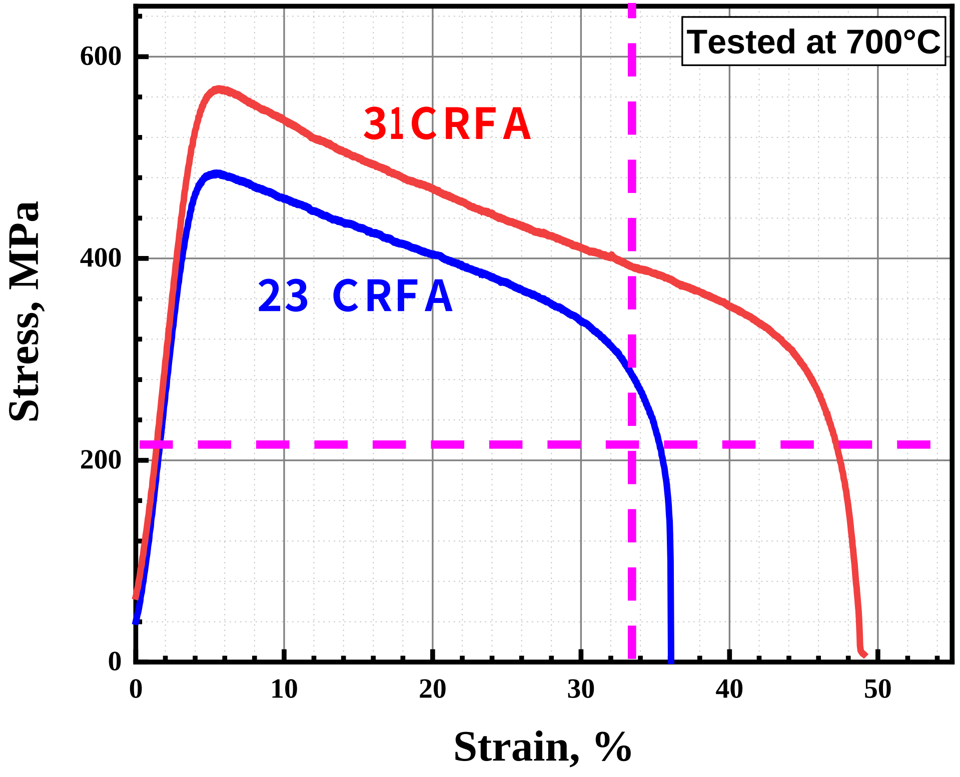
조성 (wt.%)		열간압연	냉간압연	TR (%)
ACRS#21				16%
ACRS#22				36%
ACRS#23				40%
ACRS#24				14%

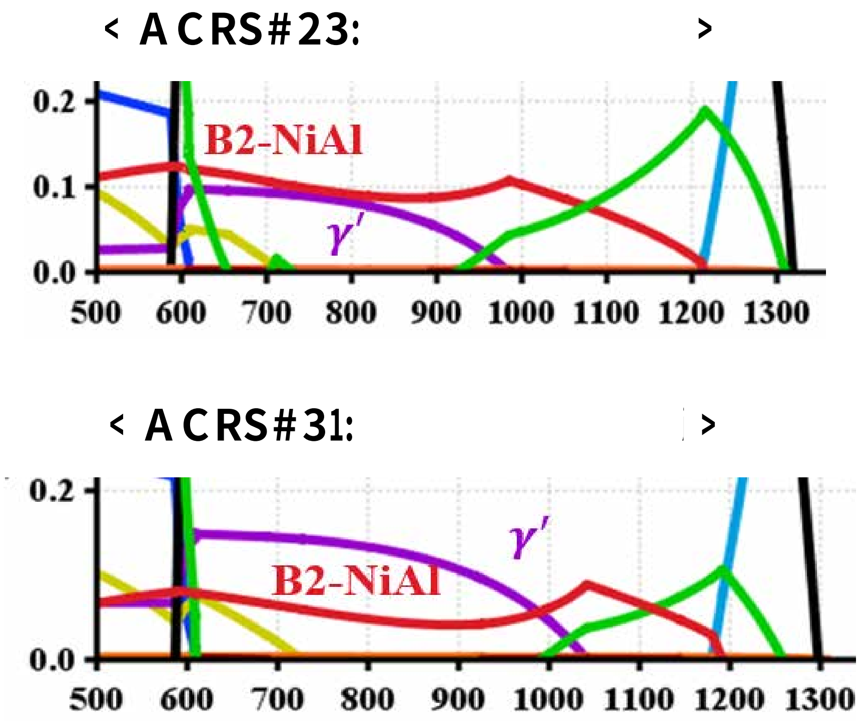
조성 (wt.%)		열간압연	냉간압연	TR (%)
ACRS#31				40%
ACRS#32				40%
ACRS#33				40%
ACRS#34				12%

q 높은 Al함량 Fe기반 소재의 석출물 거동 분석

l 합금원소에 따른 미세구조 분석/인장특성(고온)

§ 23/31 : Ni, Ti 영향





과제 고온 인장 목표

q 용융염 내 부식 거동 분석 (w/ SNU)

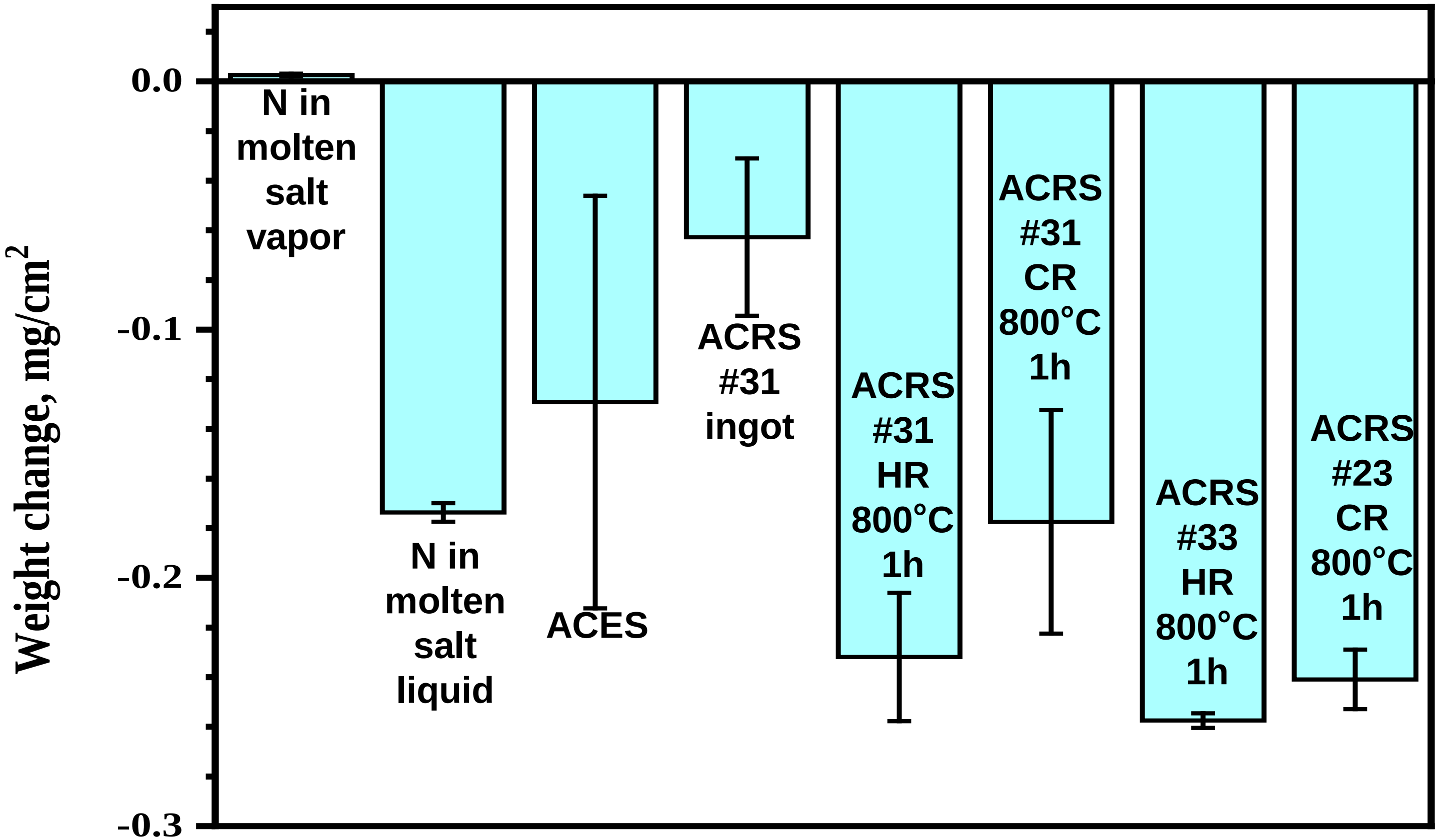
l KCl-NaCl 750 ° C 500h 부식 실험 진행

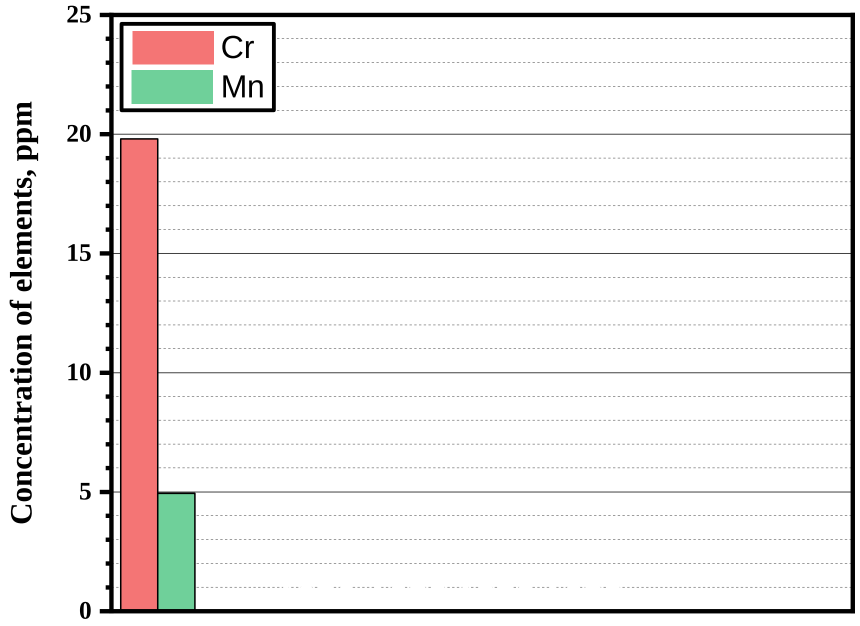
§ 개발합금의 경우 800°C 1h 열처리 후 가공된 샘플 사용

Wt.%	Fe	Cr	Ni	C	Al	Ti	Mo	Others
Hastelloy N	4.28	**7.25**	Bal.	0.06	-	-	**16.56**	Mn, Cu, Si, Al, Ti
ACES #B41	Bal.	**18**	30	0.025	4.5	1	-	Si, Nb, Zr
ACRS#31								
ACRS#33								
ACRS#23								

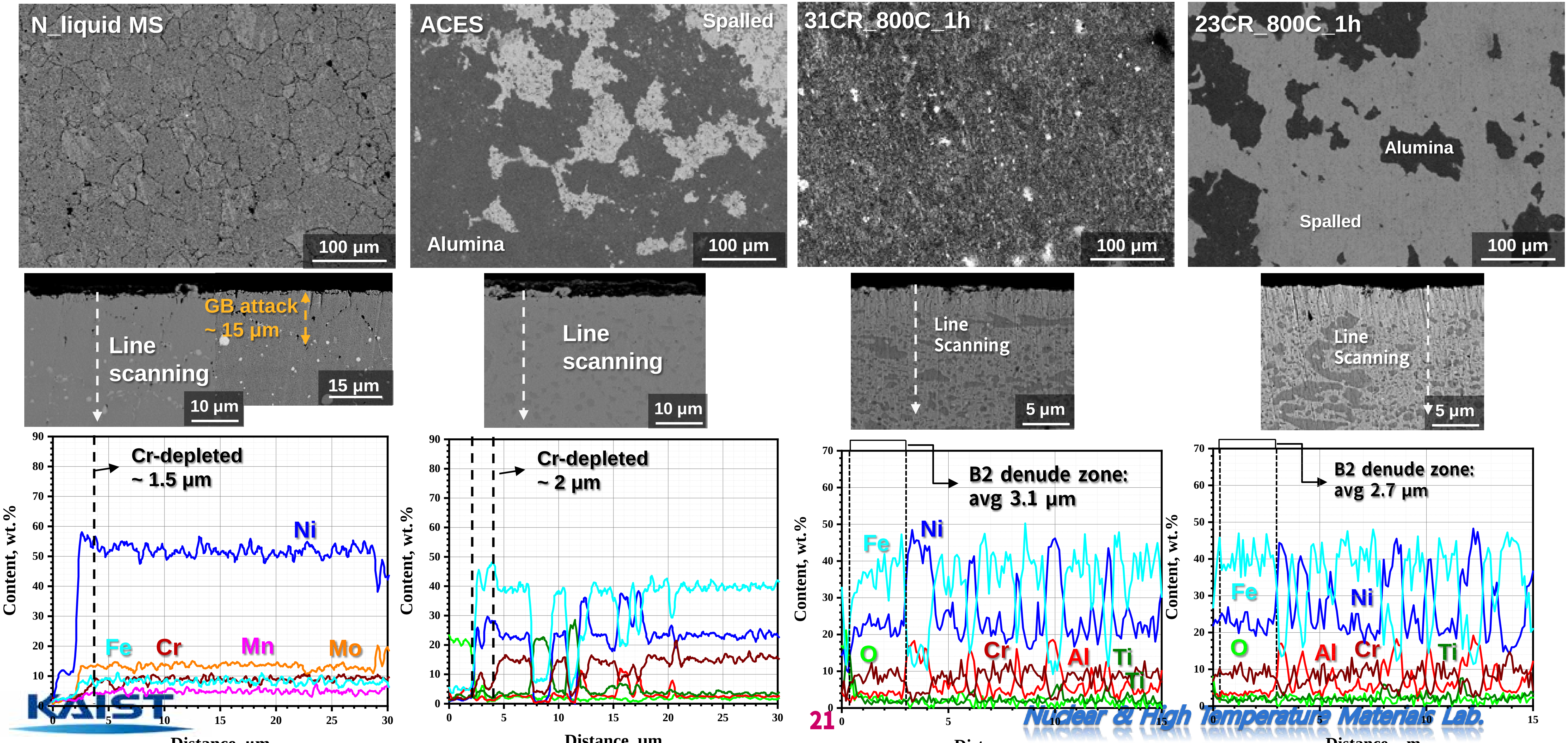
q Batch 2, 3 염부식 실험 결과 (w/ SNU)

l 무게증감 및 염분석 결과



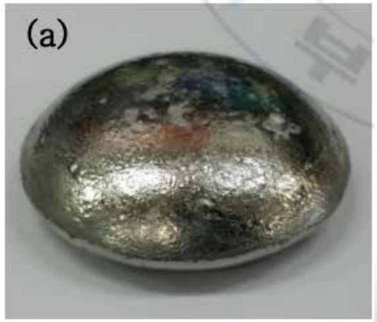


q Batch 2, 3 염부식 실험 결과 (w/ SNU)



5. Ni-기반 혁신소재 개발

- Ni 합금 원소별 부식 영향성 평가
  - 진공 아크 멜팅 (VAR) 로 모합금 제작



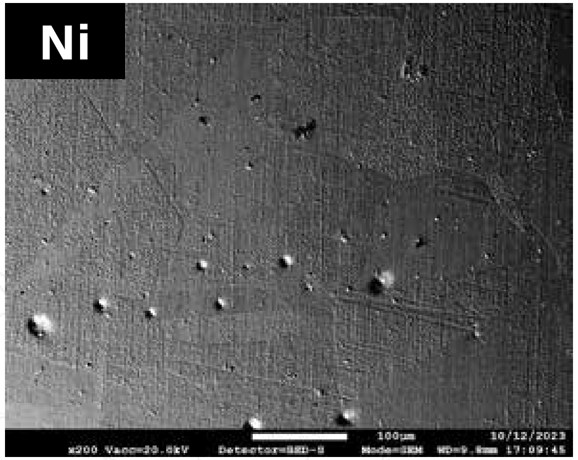
냉간압연 to 1.5 mm

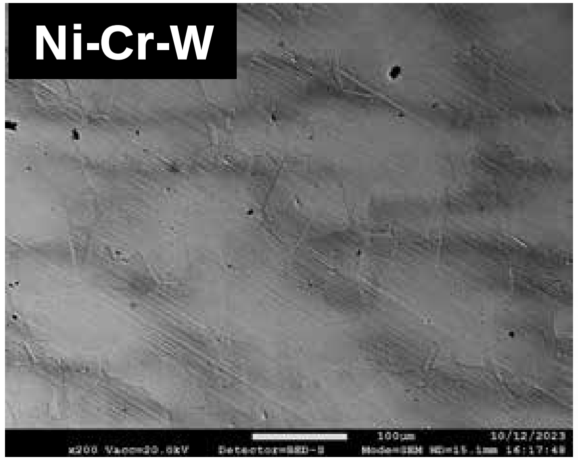
후속 열처리
Water quenching

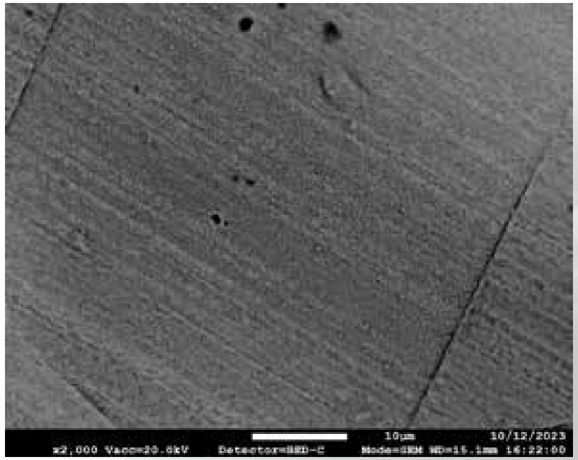
Korea Atomic Energy Research Institute

Ni 합금 원소별 부식 영향성 평가

- Ni grain 자체의 부식저항성 Cr, Mo, W 원소가 미치는 영향 평가
  - Ni, Ni-Cr, Ni-Cr-Mo, Ni-Cr-W, Ni-Mo, Ni-W 조성 6종 제조
  - 0.04 C 추가로 Carbide 영향성 평가용 조성 3종 제조







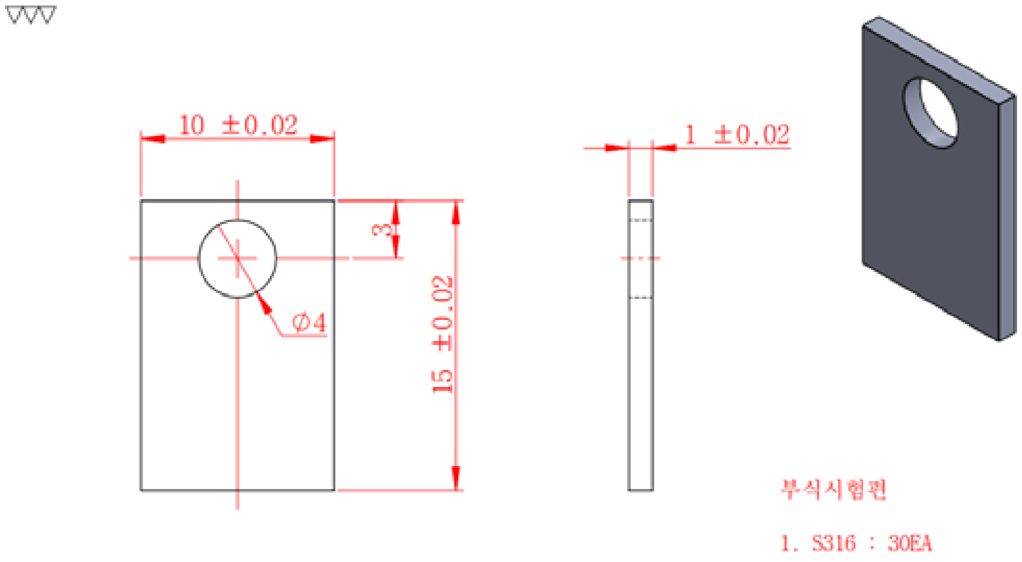
- Cr, Mo, W 추가로 인한 Ni grain size 감소, 석출물 X

- Cr, Mo, W 모두 Ni grain 내로 고용되었을 것으로 판단됨.

5. Ni-기반 혁신소재 개발

Ni 합금 원소별 부식 영향성 평가

- 버튼 합금 용융염 부식 평가 (10.17 기준 330 h 진행 중)
  - 시험조건 : 650 ℃, 500 h
  - 시편 형태 : 10 x 15 x 1 mm^3
  - 용융염 조성 : 43 mol%NaCl – 57 mol%$MgCl_2$
  - 용융염 처리 : 300 ℃, 24 h 열처리 후, 600 ℃ Mg purification, 48 h



5. Ni-기반 혁신소재 개발

Ni 구조 소재 후보 조성 제조 및 평가

상용 Ni 합금 제조 공정을 이용 Ni 구조 소재 후보 조성 제조(w/한국진공야금)

- M1 – 고용강화 및 부식저항성 강화 Mo 함량 증가
- A1 – Cr 함량 증가 및 Al 첨가로 인한 부식저항성 Al_2O_3 피막 형성

	Ni	Cr	Mo	Al	Si	Mn	Fe	Nb	Ti	Ta	C
M1											
A1											

- 용해 후 균질화열처리 및 열간압연 진행

[용해 후 잉곳]

[1200 °C 열간압연]

[1000 °C 열간압연]

열처리 후 용융염 부식 및 기계적 특성 평가 진행 예정

6-1. 부식메카니즘 규명 - 고온 용융염 환경 하 부식유발인자 조사

염 내 부식유발인자들

▌ 수분/ 산소 불순물

$$H_2O_{(g)} + 2X^- \leftrightarrow O^{2-} + 2HX_{(g)}$$

＊ X: F (불화염) / Cl (염화염)

$$HX + e^- \leftrightarrow \frac{1}{2}H_2 + X^-$$

$$H_2O + O^{2-} \leftrightarrow 2OH^-$$

$$OH^- + e^- \leftrightarrow \frac{1}{2}H_2 + O^{2-}$$

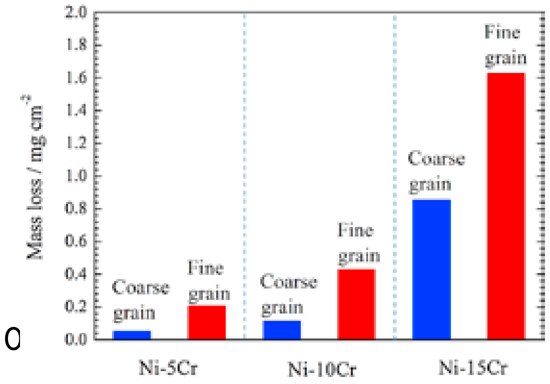
$$M + \frac{n}{2}O^{2-} \leftrightarrow MO_{\frac{n}{2}} + ne^- \quad \rightarrow \quad MO_{\frac{n}{2}} + X^- \leftrightarrow MX_n + \frac{n}{2}O^{2-}$$

산화 부식 생성물의 형성 ⟶ 산화 부식 생성물의 용해

용액 내 수분과 HF/HCl의 농도 ↑ ⟶ 수분 & HF/HCl의 환원반응 ↑ 금속 부식 반응

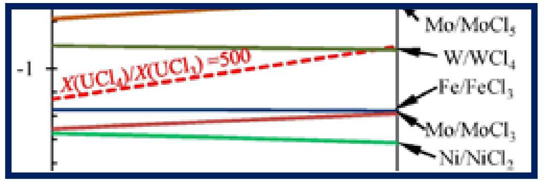
▌ 기타 요인

1. 온도 차이에 의한 부식 가속
2. 중성자 조사에 의한 손상
3. 용융염 유속의 영향
4. 합금 구성성분과 결정입도의 차이



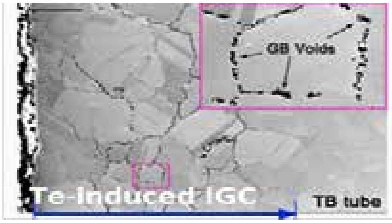
▌ 다양한 불순물

(1) 핵분열 생성물



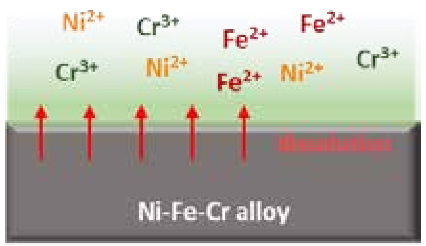
E_{red} of U(IV)/U(III) > E_{ox} of Fe or Cr

U (IV)는 Fe와 Cr에 대한 산화제 역할 수행



- TF(tritium fluoride) by ^6Li + n
- 핵분열 생성 가스 F_2 / Cl_2
- 텔레늄에 의한 입간 균열(IGC) (Ni_3Te_2 or CrTe)

(2) 금속 불순물



Ni(II) Fe(II/III) Cr(II/III) : 구조재 합금 내 Ni, Fe, Cr에 대한 산화제 역할 수행

(3) 다른 물질(합금 등)과의 상호작용

- 용융염을 매개로 하는 갈바닉 부식
- 낮은 산화환원전위 금속 ▯ 양극
  높은 산화환원전위 물질 ▯ 음극

⇩

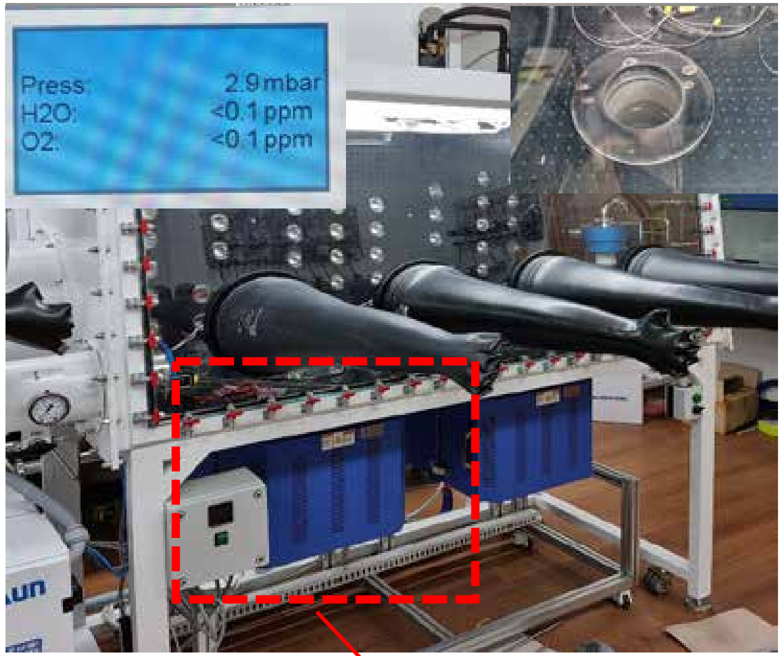
갈바닉 결합으로 인한 양극 용해

[Ref] Guo, Shaoqiang, et al. "Corrosion in the molten fluoride and chloride salts and materials development for nuclear applications." *Progress in Materials Science* 97 (2018): 448-487.

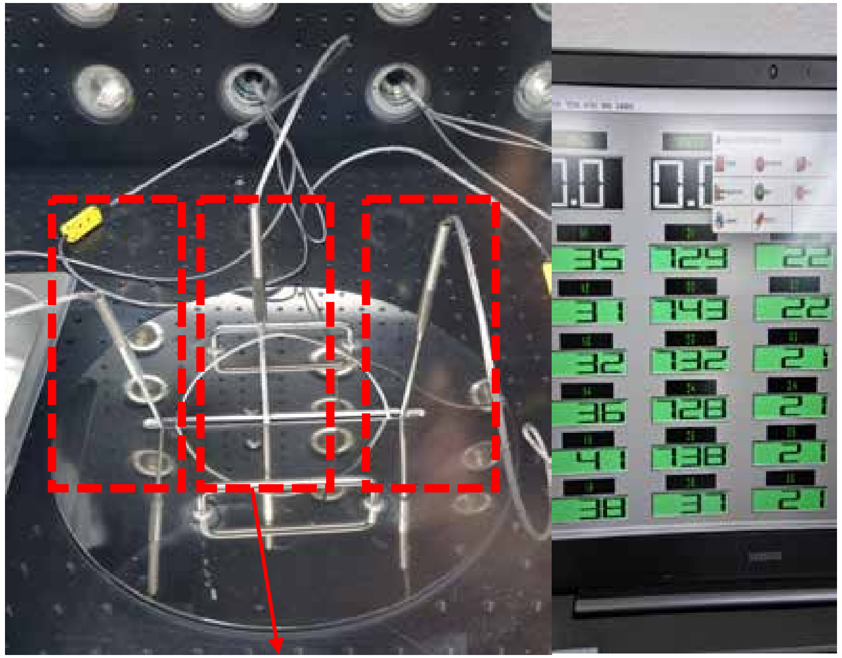
6-1. 부식메카니즘 규명 - 내부식성 평가 장비 설계 및 제작

고온 용융염 환경 구현 장비 설계 및 제작

- 수분 및 산소 0.1 ppm 이하 비활성 분위기 유지 가능한 글러브박스
- 실험용 글러브박스와 염 및 샘플 준비용 글러브 박스 분리를 통한 실험 간 오염 최소화
- 최대 900 ℃ 직경 155 mm 고온 퍼니스 장착
- 온도 센서 활용 실시간 온도 모니터링 가능



고온 퍼니스



온도 센서

6-1. 부식메카니즘 규명 - 내부식성 평가 장비 설계 및 제작

고온 용융염 부식 실험용 도가니 제작

- 도가니 선택 시 주요 고려사항
  - 내식성, 열충격 저항성, 가격
- 장단점을 고려하여 알루미나 도가니를 선택
  - 실험 전후 염 정제 및 다량 부식 데이터 확보 간 다수의 도가니 사용에 따른 가격 우위
  - 열충격을 고려하여 일회성으로 사용함으로써 단점 보완

종류	알루미나	흑연	글래시 카본	니켈	석영
사진					
장점	가공 쉬움 적은 가격	열충격 강함 가공 쉬움	열충격 강함 흑연 입자 유입 X	높은 내식성	높은 내식성
단점	열충격 취약	흑연 입자 유입 (부식유발인자) 전도성 있음	높은 가격 가공이 어려움 전도성 있음	열충격 취약 높은 가격 염 분석 제한	가공 어려움 열충격 높은 가격

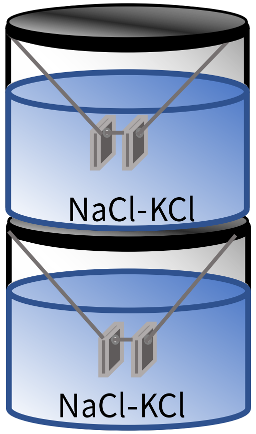
6-1. 부식메카니즘 규명 - 고온 용융염 환경에서 구조 소재의 부식 평가

(1) 용융염 준비 및 정제

- 염 내 불순물로 인한 부식인자 최소화
- 염 조성 성분 동일화

(2) 부식 실험

- 실험 세트마다 온도 및 기타 조건 유지



실험 조건

염: NaCl-KCl 공융염

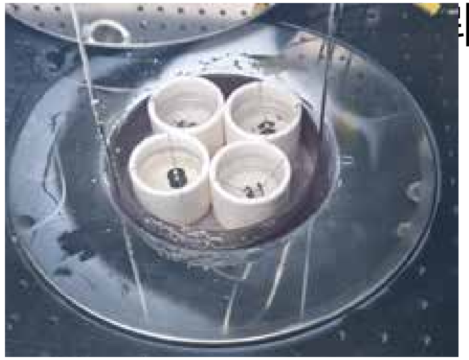
온도: 750 ℃

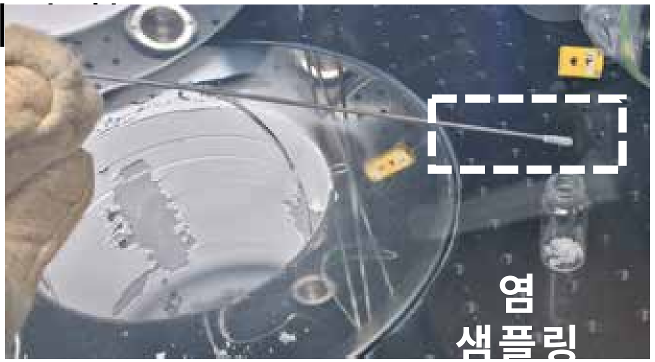
시간: 500 시간

샘플: 카이스트 개발 합금

(3) 부식 후 샘플 및 염 관리

- 급속 냉각 방식 샘플링으로 채취한 염의





(4) 샘플 및 염 분석

- 부식량 및 원소 고갈량 확인

Precision scale

FE-SEM / EDS
(JSM-7800F Prime)

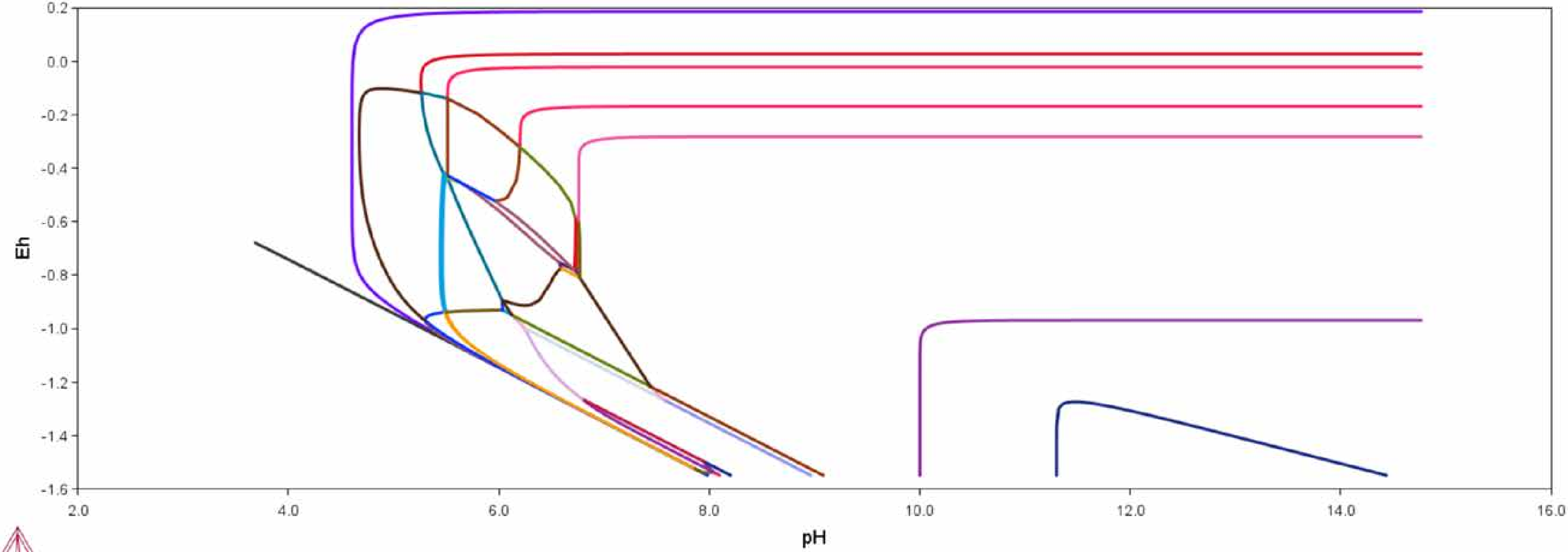
ICP-AES
(OPTIMA 8300)

6-2. 전산모사 - Potential-pH 열역학계산

T = 750℃, P = 100000 Pa
Database = FEDEMO, PAQ2

ACRS#13

□ **Fe-12Cr-30Ni in NaCl aqueous**



T = 750°C, P = 100000 Pa
Database = FEDEMO, PAQ2

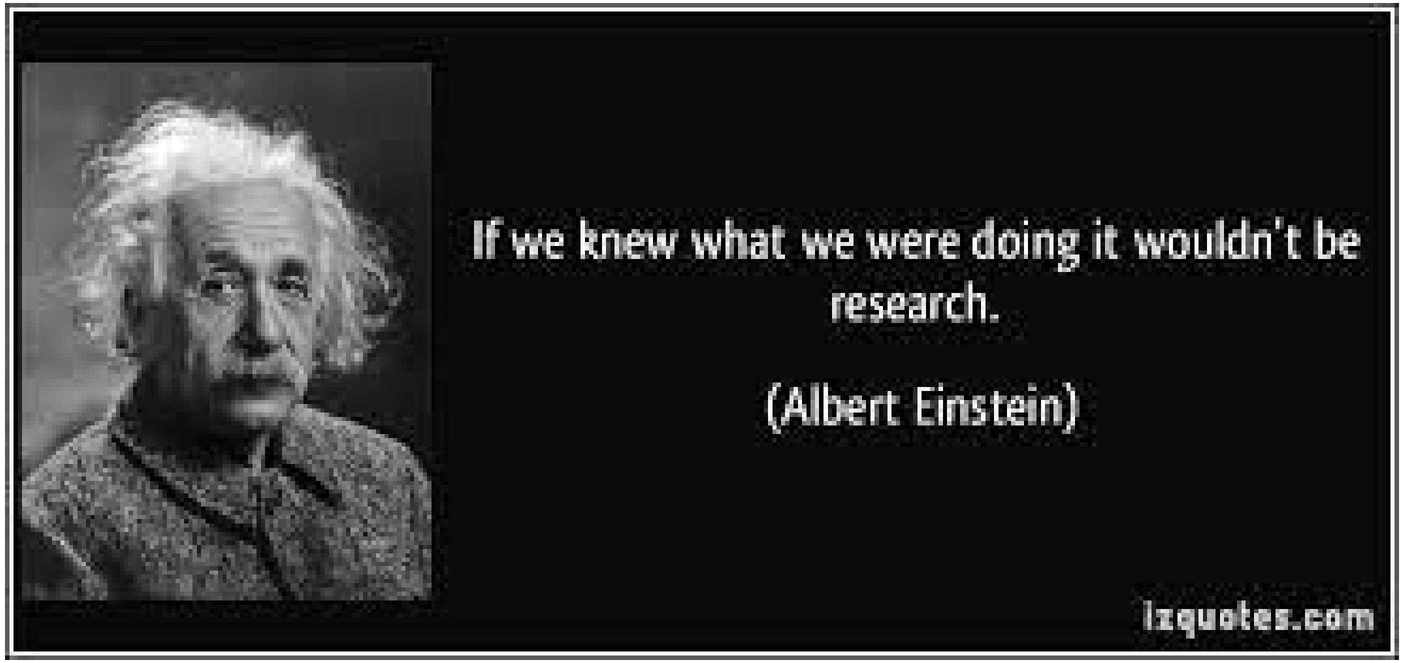
ACRS#13

Fe-12Cr-30Ni in NaCl aqueous

- GAS + AQUEOUS + HALITE + NA2FEO2 + NIO_S2 + NAOH_S2
- GAS + AQUEOUS + HALITE + NA2FEO2 + NIO_S2 + NIFE2O4
- GAS + AQUEOUS + HALITE + NIFE2O4 + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + HALITE + NICR2O4 + NIFE2O4 + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + FECR2O4 + HALITE + NICR2O4 + NIFE2O4 + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + FECR2O4 + HALITE + NIFE2O4 + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + FECR2O4 + HALITE + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + FECR2O4 + HALITE + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + FECR2O4 + HALITE + NIFE2O4 + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + NIFE2O4 + NIO_S2
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + NIFE2O4 + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + NIFE2O4 + MAGNETITE
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + FECR2O4 + HALITE + NIFE2O4 + MAGNETITE
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + FECR2O4 + HALITE + MAGNETITE
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + FECR2O4 + HALITE + WUSTITE + MAGNETITE
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + WUSTITE + MAGNETITE
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + WUSTITE + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + CR2O3 + FCC_A1 + HALITE + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + CR2O3 + HALITE + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + CR2O3 + HALITE + HEMATITE + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + CR2O3 + HALITE + HEMATITE + NIFE2O4 + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + CR2O3 + HALITE + NIFE2O4 + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + CR2O3 + HALITE + NICR2O4 + NIFE2O4 + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + HALITE + NICR2O4 + NIFE2O4 + FECR2O4
- GAS + AQUEOUS + HALITE + NICR2O4 + NIFE2O4 + CR2O3
- GAS + AQUEOUS + HALITE + NIFE2O4 + CR2O3
- GAS + AQUEOUS + HALITE + HEMATITE + NIFE2O4 + CR2O3
- GAS + AQUEOUS + HALITE + HEMATITE + CR2O3
- GAS + AQUEOUS + HALITE + CR2O3
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + CR2O3
- GAS + AQUEOUS + HALITE + FCC_A1
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1
- GAS + AQUEOUS + HALITE
- GAS + AQUEOUS + HALITE + HEMATITE
- GAS + AQUEOUS + HALITE + HEMATITE + NIFE2O4
- GAS + AQUEOUS + HALITE + NIFE2O4 + NICR2O4
- GAS + AQUEOUS + FECR2O4 + HALITE + NIFE2O4 + HEMATITE
- GAS + AQUEOUS + FECR2O4 + HALITE + HEMATITE
- GAS + AQUEOUS + FECR2O4 + HALITE + NIFE2O4
- GAS + AQUEOUS + FCC_A1 + HALITE + WUSTITE

Final words

Every reactors look perfect on paper!



Energy for Earth !!

Thank you!