

재료 전용 중이온가속기(KAHIF) 및 중성자원 개발 현황 (KCANS 활동 현황 포함)

WS(I): 중성자 및 하전입자 생산, 활용 연구 동향과 전망



한국원자력학회 2023 춘계학술발표회 워크숍

이 동 원

한국원자력연구원 핵물리응용연구부

CONTENTS



10 KCANS 구성 및 운영 현황 (국외 UCANS/IAEA 활동 포함)

20 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동

21 부서 현황과 전략

22 재료전용 중이온가속기(KAHIF) 현황

23 싸이클로트론 기반 중성자원 개발 현황

30 요약 및 제언

10 KCANS 구성 및 운영 현황 (국외 UCANS / IAEA 활동 포함)

» KCANS 구성 및 워크숍 개최 경과

- ◆ '16 제1회 KCANS (경주 추계KNS): 발표 11건
 - ✓ '16.12.16 참여 의사 확인 메일 → '17.01.17 발기문 송부
- ◆ '19 제2회 KCANS (일산 추계KNS): 발표 11건
 - ✓ '19.11.09 가입 요청 메일
- ◆ '21 제3회 KCANS (온라인 추계KNS): 발표 9건 (1건 취소)
- ◆ '22 제4회 KCANS (창원 추계KNS): 발표 9건 => '23 제5회 KCANS 개최 예정
- ◆ 현재, 총 14개 기관 / 장치 및 54명의 참여의사 확인: 지속적인 체계/틀 보완이 필요 (협조)

K-CANS 네트워크 결성을 위한 초청문

여러분께,

2016년 한국원자력학회 추계학술대회에서 여러 연구자분들을 모시고 “소형 중성자원 개발과 이용 현황”이라는 주제로 워크숍을 개최하였습니다. 이 행사에서 여러 형태의 소형 중성자원 선원과 다양한 에너지 범위의 중성자 발생, 선원의 이용 계획에 대한 국내외 현황과 전망을 공유하고, 연구 개발기간 교류를 위한 소중한 첫 발을 내디뎠다고 생각합니다.

전통적으로 중성자 과학과 기술은 주로 고중성자속 연구를 필요로 하였고 같은 대형연구시설을 기반으로 발전되었으나, 최근에는 고에너지 대용량 양성자 가속기 기반 파쇄중성자원이 비약적으로 발전하고 있어서 새로운 패러다임이 열리고 있습니다. 최근 국제적으로도 가속기 기반 기술의 발전에 따라 소형 중성자 발생 장치가 다양하게 개발되고 있습니다. 이를 바탕으로 해외에서는 원자로 또는 대형가속기 시설과 같은 대형연구시설 기반 중성자자원과 함께 소형, 중형 중성자자원 개발과 그 다양한 적용을 위한 1st Meeting of Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Source를 추진하고, 많은 연구자들이 모여서 활발한 논의를 하고 있습니다. 기초과학 및 산업기술 차원에서 학제적 접근이 필요한 지속적인 요구가 있음에도 불구하고, 주변 수용성 문제로 선진국에 비해 부족한 연구조건을 대체할 새로운 고중성자속 발생 대형 연구로 전성기이지 않은 상황에서, 규모가 작은 파쇄중성자원보다는 크게 작지만 지역적, 국가적 수준의 수요를 감당할 수 있는 소형 가속기나 이온원 기반의 중성자원 구축을 검토하고 있습니다.

지난 10여년 사이 국내 여러 기관에서 다양한 가속기와 이를 이용한 중성자선원 (선형 양성자 가속기, 사이클로트론, 전자선가속기 등)이나 핵융합 중성자원 (DD/DT선원) 기반이 갖추어지고 있고, 산업부 지원으로 붕소 중성자 포획 치료 (BNCT) 개발이 진행 중이며, 2015년에는 중성자 영상에 의한 비파괴 검사용 소형 중성자원 개발 가능성에 대한 조사도 수행한 바 있습니다.

이에 지난 워크숍에서 일부 논의된, 중형 중성자 선원 개발과 이용에 대한 국내 연구자들과의 네트워크와 국제적인 교류, 지속적인 연구를 위해 K-CANS를 설립하고자 하오니, 관심 있는 많은 분들의 참여를 요청 드립니다. 취지에 찬성하시고, K-CANS에 동참하시고자 하는 분들은 아래 연락 사항을 메일로 간략히 회신해 주시고(마감: 2017-02-25), 주변의 원자력계 전문가를 소개 부탁드립니다. 장정적으로는 일정 수의 참여자가 모여낸 다자요는 원자력학회 춘계학술대회에서 간소한 모임을 가질 예정입니다. 많은 관심과 성원을 부탁드립니다. 감사합니다.

문의: 한국원자력연구원 이창희(leech@kaeri.re.kr), 이동원(dwlee@kaeri.re.kr),
성균관대학교 세종시(Seochai@sjtu.edu), 홍승우(whong@skku.ac.kr)

소형 중성자원 개발과 이용 현황 (Compact Neutron Sources and their Applications)

일시·장소 2016년 10월 26일(수) 13:00~18:00 · 경주 화백컨벤션센터(HICO), 1층 105호
주최 한국원자력학회 방사선이용 및 방사 연구부회

일정	내용
13:00 ~ 13:25	정책과제 (현장 기동형 중성자방사선검출기 시스템 기술개발 방안 연구 결과 소개와 해나로 중성자원과 활용 이창희 (한국원자력연구원)
13:25 ~ 13:50	양성자 가속기 연구센터의 중성자원 현황 및 계획 조영성 (한국원자력연구원)
13:50 ~ 14:15	RAON 중성자 연구시설 구축 현황 및 계획 김재현 (이온가속기사업단)
14:15 ~ 14:40	이온원 기반 고에너지 중성자 발생장치 개발 현황 및 계획 두희 (한국원자력연구원)
14:40 ~ 15:05	다목적 이온빔 발생장치 개발 현황 및 계획 이창희 (한국원자력연구원)
15:05 ~ 15:30	사이클로트론 기반 중성자 발생장치 개발 현황 및 계획, 세종시 (성균관대학교)
15:30 ~ 15:50	휴식
15:50 ~ 16:15	중성자 측정 표준과 중성자 표준화 계획서 (한국표준화연구원)
16:15 ~ 16:40	KSTAR 고중성자선의 산업적 활용 - 고속중성자 이미징, 이명식 (국가핵융합연구소)
16:40 ~ 17:05	암 치료용 중성자 기반 붕소중성자포획 기술이 1시간 이내에 가능한 시스템 개발, 김동수 (다원시스)
17:05 ~ 17:30	고선속 중성자 선원발생 기술개발 현황 - 핵융합 분석, 이동원 (한국원자력연구원)
17:30 ~ 17:55	KAERI neutron Time Of Flight (KAERI nTOF) 실험시설 구축 현황 및 계획, 김유중 (한국원자력연구원)
17:55 ~ 18:00	폐회

기타사항 - 20분 발표, 5분 질의/응답
- 등록비: 3만원 (석식 제공)
- 문의처: 이창희 / 한국원자력연구원 / 042-868-8443 / leech@kaeri.re.kr
이동원 / 한국원자력연구원 / 042-868-4659 / dwlee@kaeri.re.kr

소형 중성자원 개발과 이용 - II

일시·장소 2019년 10월 23일(수) 13:00~18:00 · 제2전시장 (3F) 304호
주최 한국원자력학회 방사선이용 및 기기 연구부회 양자공학 및 핵융합기술 연구부회

일정	내용
13:00 ~ 13:20	개회사, UCANS 현황 및 KCANS 구성 제언, 이동원, 이창희 (한국원자력연구원)
13:20 ~ 13:45	소형 DD 선원 개발 현황과 활용 계획, 정경재 (사천대학교)
13:45 ~ 14:10	다선형 고속중성자원 개발 현황 및 계획, 이창희 (한국원자력연구원)
14:10 ~ 14:35	KBSI 가속기 기반 중성자 발생장치 개발 현황 및 계획, 이창희 (한국원자력연구원)
14:35 ~ 15:00	소형가속기 기반 광대역 중성자 발생장치 개발 현황, 문영국 (KAERI)
15:00 ~ 15:20	Coffee Break
15:20 ~ 15:45	KAERI nTOF 전자가속기 구축 현황, 이동원 (KAERI)
15:45 ~ 16:10	PAL 소형전자가속기를 이용한 중성자 연구시설의 운영성과 및 향후 전망, 이희석 (포항공가속기연구소)
16:10 ~ 16:35	KOMAC 중성자원 현황 및 계획, 김한성 (KAERI)
16:35 ~ 17:00	중성자 측정 및 스펙트럼메트리, 박현서 (표준연)
17:00 ~ 17:25	Development Status of Compact Neutron Source for A-BNCT, 김동수 (다원시스)
17:25 ~ 17:50	정현형 가속기 기반 붕소중성자포획치료(BNCT)용 중성자원, 민선홍 (원자력연구원)
17:50 ~ 18:15	Design of High Flux Accelerator Based Neutron Source, 방정배 (고려대학교)
18:15 ~ 18:20	마무리 / 이창희, 이동원

기타사항 - 등록비: 무료 (식자 제공 없음)
- 문의처: 이동원 / 한국원자력연구원 / 010-6403-0655 / dwlee@kaeri.re.kr
이창희 / 한국원자력연구원 / 010-5505-3696 / leech@kaeri.re.kr

소형 중성자원 개발과 이용 - III

일시 2021년 5월 12일(수) 14:00~18:00
주최 한국원자력학회 양자공학 및 핵융합기술 연구부회, 방사선이용 및 기기 연구부회 (공동주최)

일정	내용
14:00 ~ 14:10	인사말 (연구부회장) 사희(이창희, 이동원)
14:10 ~ 14:30	국내외 CANS 현황 - KCANS (KNS) / KAERI, 이창희, 이동원(이창희, 한국원자력연구원)
14:30 ~ 14:50	소형중성자 선원 개발 현황 및 계획, 이창희 (한국원자력연구원)
14:50 ~ 15:05	30MeV 사이클로트론 기반 중성자 발생장치 개발 현황, 이창희 (한국원자력연구원)
15:05 ~ 15:20	KOMAC 100MeV 중성자원 개발 계획, 문영국 (한국원자력연구원)
15:20 ~ 15:35	A use of 70-MeV cyclotron facility of RISP for CANS study (김종현, 기초과학연구원)
15:35 ~ 15:50	PAL 전자가속기를 이용한 중성자원 개발 현황 (이희석, 포항공가속기연구소)
15:50 ~ 16:05	중성자 측정 (김동수, 다원시스)
16:05 ~ 16:20	KIRAMS R&D project for tandem accelerator based BNCT (홍용환, 원자력연구원)
16:20 ~ 16:40	휴식
16:40 ~ 17:10	BNCT 최신 동향 소개 (서희정, 다원시스)
17:10 ~ 17:40	반도체 가속 평가 최신 동향과 평가용 빔의 중요성 (정성수, ORT)
17:40 ~ 18:00	마무리 / 이창희, 이동원 (한국원자력연구원)

기타사항 - 문의처: 이동원 / 한국원자력연구원 / 010-6403-0655 / dwlee@kaeri.re.kr
이창희 / 한국원자력연구원 / 010-5505-3696 / leech@kaeri.re.kr

제4차 소형 중성자원 개발과 이용 워크숍

일시·장소 2022년 10월 19일(수) 14:00~18:00 · 창원컨벤션센터, 6층 606호
주최 한국원자력학회 양자공학 및 핵융합기술 연구부회, 방사선이용 및 기기 연구부회 (공동주최)

일정	내용
14:00~14:10	인사말 (연구부회장) 권혁중, 문영국 사희(이창희, 이동원)
14:10~14:30	Development of neutron source based on 30 MeV cyclotron and neutron radiography system 이희석 (포항공가속기연구소)
14:30~14:50	Status and applications of compact neutron source 이창희 (한국원자력연구원)
14:50~15:10	KAERI 100-MeV cyclotron based neutron source 이창희 (한국원자력연구원)
15:10~15:30	Progress of the Neutron Source Development Using an Electron Linac for Bragg-edge Imaging at Pohang Accelerator Laboratory 이창희 (한국원자력연구원)
15:30~15:50	기초과학연구원 70 MeV 양성자 사이클로트론의 빔 사용 현황 및 중성자원 사용에 대한 고려, 김종현 (기초과학연구원)
15:50~16:00	휴식
16:00~16:30	다원시스 BNCT 시설의 LINAC 기반 고출력형 열외중성자원, 배영준 (다원시스 & 다원메디스)
16:30~16:50	The first beam of 500 MeV high current proton tandem accelerator in KIRAMS 이창희 (한국원자력연구원)
16:50~17:20	BNCT system 국내 의료환경 도입 과정, 서희정 (다원메디스)
17:20~17:40	Domestic introduction process for the clinical use of BNCT system 이창희 (한국원자력연구원)
17:40~18:00	Limited Beam Facilities and Growing Radiation Test Needs 이창희 (한국원자력연구원)

기타사항 - 등록비: 등록비 무료 (만찬 없음)
- 문의처: 이동원 / 한국원자력연구원 / 010-6403-0655 / dwlee@kaeri.re.kr
이창희 / 한국원자력연구원 / 010-5505-3696 / leech@kaeri.re.kr

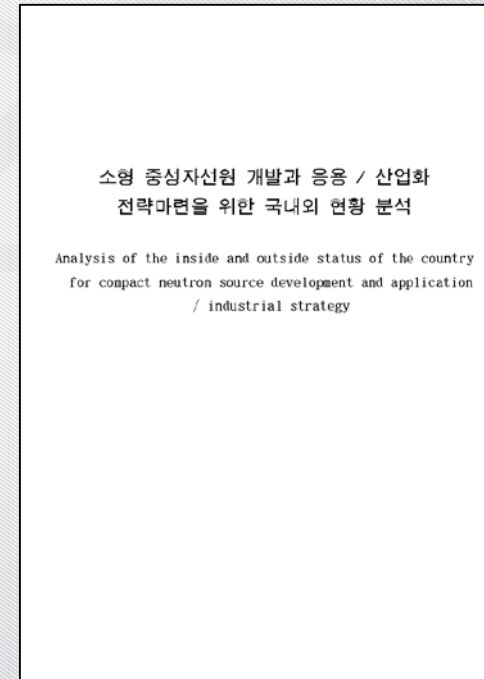
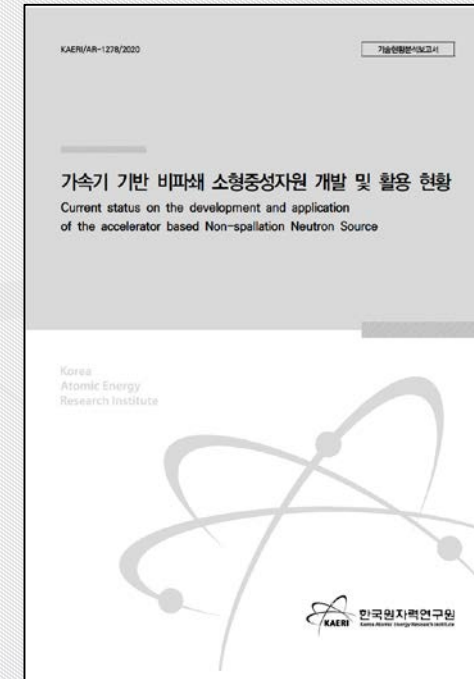
» 주요 활동 (1) : 국내 중성자원 관련 워크숍 주관 및 자문 활동

- ◆ KCANS 운영/제안 시설의 구성 파악/갱신
 - ✓ 10개의 CANS 운영/개발/계획 소개
 - ✓ 대형 중성자 선원 3기
 - ✓ Driver로서의 가속기, 활용/측정 분야 등
- ◆ 발표 내용을 토대로 국내 현황 지속 갱신 예정
 - ✓ 현재 운영 중인 중성자선원은 2건
 - ✓ 개발 중인 선원은 3건으로 확인
 - ✓ 수요 확인할 수 있는 계획 소개 시설은 6건

			계획	개발	운영/활용기술		
		[현황]	2016	2019	2021	2022	2023
정책/현황조사					운영/개발		
선원/활용	KAERI 핵물리 DD	운영/개발	운영/개발				
	KAERI 핵물리 nTOF(전자->양성자)	신규 계획	계획	계획			신규 계획
	KAERI 핵물리 핵융합/핵자료	계획		계획			
	KAERI 핵물리 KAHIF(재료이온조사)						운영/계획
	KAERI 경주 100MeV 선형 양성자가	운영/계획	운영/계획	운영/계획	운영/계획	운영/계획	운영/계획
	KAERI 정읍 30MeV 사이클로트론	개발/운영/계획		계획	개발	개발	개발/운영/계획
	IBS 중이온가속기	운영/계획	계획		계획	계획	운영/계획
	KBSI 부산 중이온가속기	계획	계획	계획(영상)			
	다원시스 BNCT	운영/계획	개발	개발	개발	개발	
	포항 소형전자선가속기	계획	계획(영상/의료동위원소(영상/의료동위원소			계획	
	KIRAMS BNCT	계획		계획	계획	계획	
	고려대(세종) ECR 이온원	계획		계획			
	핵융합연 CANS	계획					계획
기타선원	KAERI 본원 하나로	운영	운영			운영	
(Not CANS)	핵융합연 KSTAR(DD)-not CANS	운영	운영				
driver	성균관대 사이클로트론		기술				
활용/측정	표준연 측정기술		기술	기술			
	서울대 DD/측정			기술			
	QRT/정읍 반도체시험				기술	기술	기술
	KAERI 본원 분석		기술				

» 주요 활동 (2) : 국외 중성자원 관련 학회/회의/워크숍 참석/발표 및 자문 활동

- ◆ 국내 KCANS 자료들과 오늘 발표 2장에 설명될 UCANS, IAEA 관련 활동 등을 통해 입수한 자료 정리
 - UCANS core member, IAEA 비파쇄 중성자원 자문/기술회의 참석, IAEA 핵융합중성자원 CRP 참여 등 국외 동향 정리
 - KCANS 결성 및 워크숍 개최 결과 등 국내 동향 정리
- ◆ 기술현황조사 보고서 발간 (KAERI) -> '23 UCANS 참석 후 갱신본 발간 예정
- ◆ 응용/산업화 전략 정책보고서 1건 (성균관대-채종서교수)



» UCANS 구성 배경 및 경과 ('19 워크숍 소개 내용)

◆ ICANS-XIX Meeting ('10.03)의 위성회의에서 출발

- ✓ Int' Collaboration on Advanced NS (pulsed & spallation NSs)
- ✓ 이 회의에서 Union for Compact Accelerator-driven NS (UCANS) 출범 만장일치 동의

◆ 1차 회의 ('11, 중국)을 시작으로 '20년 9차 회의 개최

- ✓ (2011) 1차 Beijing (China)
- ✓ (2012) 2차 Bloomington (U.S.A)
- ✓ (2013) 3차 Bilbao (Spain)
- ✓ (2014) 4차 Sapporo (Japan)
- ✓ (2015) 5차 Legnaro (Italy)
- ✓ (2016) 6차 Xi'an (China) – KAERI KOMAC
- ✓ (2018) 7차 Bariloche (Argentina) – KAERI 핵융합기술개발부
- ✓ (2019) 8차 Paris (France) – KAERI KOMAC
- ✓ (2020) 코로나 상황으로 pre-Web(화상) 형식으로 진행, 2021 다시 일본에서 개최 예정
- ✓ (2022) 9차 Japan (온라인) – KCANS 자격으로 참석(이동원/이창희)
- ✓ (2023) 10차 부다페스트 (헝가리)

◆ 학회 참석 결과 공유 @ KCANS 워크숍

◆ 기술결과보고서 발간 및 국내외 배포

신규 UCANS 대표(member)

Organization

UCANS Charter

UCANS Board Members (Being re-define)

UCANS Members

C. Alba-SIMIONESCU	CEA/CNRS, France
C. ANDREANI	University of Rome Tor Vergata, Italy
D. V. BAXTER	Indiana University, USA
T. Brückel	Jülich GmbH, Germany
S.H. CHEN	Institute of Nuclear Energy Research, Taiwan
J. DAWIDOWSKI	Comision Nacional de Energia Atomica, Argentina
M. FURUSAKA	Hokkaido University, Japan
J. R. GRANADA	Comision Nacional de Energia Atomica, Argentina
T. GUTBERLET	Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany
K. HIROTA	Nagoya University, Japan
W. Hines	Univ. Tennessee Knoxville, USA
E. Iverson	SNS, USA
T. KAMIYAMA	Hokkaido University, Japan
H.S. KIM	KOMAC, Korea
Y. KIYANAGI	Nagoya University, Japan
C. H. LEE	Korea Atomic Energy Research Institute, Korea
D. W. LEE	Korea Atomic Energy Research Institute, Korea
Y. LIU	CAE, China
Y. LU	Peking University, China
D. Marquart	Univ. Windsor, Canada
P. MASTINU	INFN, Italy
A. Menelle	LLB Sacray, France
Y. OTAKE	ESS, Sweden
F. OTT	RIKEN, Japan
R. SENESI	CEA/CNRS, France
H. M. SHIMIZU	University of Rome Tor Vergata, Italy
V. SHVETSOV	Nagoya University, Japan
F. SORDO	Frank Laboratory of Neutron Physics, Russia
X. WANG	ESS-Bilbao, Spain
S. WANG	Tsinghua University, China
Y. YAMAGATA	Xi'an Jiaotong University, China
	RIKEN, Japan

UCANS-10 조직위 참여

ORGANIZERS AND COMMITTEES

Local Organizing Committee of UCANS 10

- Ferenc MEZEI, CEO of Mirrotron Ltd., Hungary
- Ákos HORVÁTH, Director General, Centre for Energy Research, Hungary
- László ROSTA, Senior Research Associate, Energy Research Centre for Physics, Hungary
- Rita MEZEI, CEO of Mirrotron Ltd.
- Zsolt LUDÁNYI, Chief Sales Officer, Mirrotron Ltd.
- Péter SIPOS, Site Manager Chief Engineer, Mirrotron Ltd.
- Eszter DIAN, Head of Scientific Services, Mirrotron Ltd.
- Veronika PULAI, Project Assistant, Mirrotron Ltd.
- Szonja SIPOSNÉ MEHLHOFFER, Project Assistant, Mirrotron Ltd.

Scientific Program Committee of UCANS 10

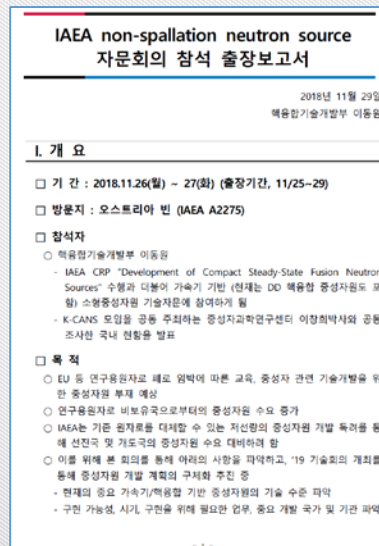
- Javier DAWIDOWSKI, CBA/CNEA, Argentina
- Michihiro FURUSAKA, Hokkaido University, Japan
- Thomas GUTBERLET, Forschungszentrum Jülich, Germany
- Kim HAN-SUNG, KOMAC, KAERI, Korea
- Katsuya HIROTA, Nagoya University, Japan
- Ákos HORVÁTH, Director General, Centre for Energy Research, Hungary
- Yoshiaki KIYANAGI, Hokkaido University, Japan
- Arik KREISEL, SARAF, SNRC Israel
- Hiroaki KUMADA, Tsukuba (iBNCT), Japan
- Dong Won LEE, KAERI, Korea
- Pierfrancesco MASTINU, Legnaro National Laboratories, Italy
- Ferenc MEZEI, Mirrotron, Hungary
- Yoshie OTAKE, RIKEN, Japan
- Frédéric OTT, CEA, France
- László ROSTA, Energy Research Centre for Physics, Hungary
- Javier SANTISTEBAN, CNEA, Argentina
- Fernando SORDO, ESS-Bilbao, Spain
- Sheng WANG, Xi'an Jiaotong University, China
- Xiaobo LI, Xi'an Jiaotong University, China
- Xuewu WANG, Tsinghua University, China

IAEA 비파쇄중성자원 자문/기술회의의 참석

» '18.11.26-27 자문회의의 개최

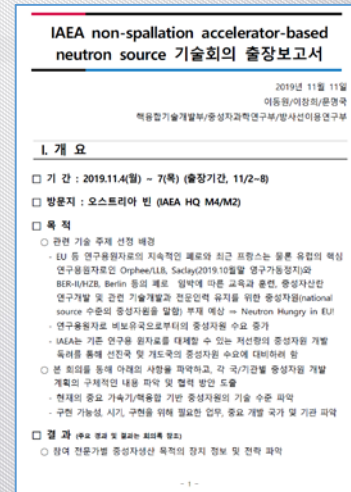
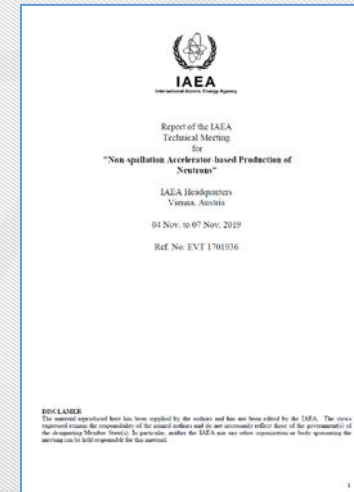
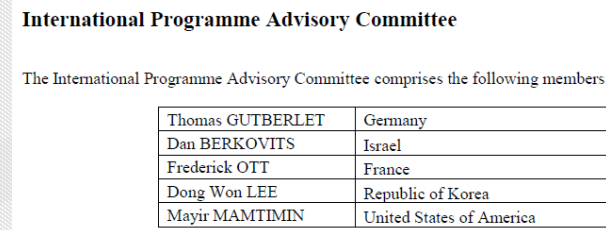
- ◆ 목적: 전문가 초빙을 통해 세계적 현황을 파악하고, 기술회의의 개최 준비를 위해 자문회의의 개최
- ✓ IAEA는 기존 원자로를 대체할 수 있는 저선량 중성자원 개발 독려를 통해 선진국 및 개도국의 중성자원 수요 대비하려 함

소 속	성 명	직 위
IAEA Division of physical and chemical science	Danas RIDIKAS	physics section head
	Ian Peter SWAINSON	physics section
	Sotirios Charisopoulos	physics section
	Valeriia Starovoitova	physics section
LLB-Saclay, France	Frederick Ott	SONATE 개발그룹
Niowave, USA	Mayir Mamtimin	화상참석
FZ-Julich, Germany	Thomas Gutberlet	HBS 개발책임자
Soreq, Israel	Dan Berkovits	SARAF 개발그룹
KAERI, Korea	Dong Won LEE	DD/DT 선원, K-CANS



» '19.11.4-7 기술회의의 개최

- ◆ 목적: 결정된 세션/초빙논문을 중심으로 회의 진행
- ◆ 주요 내용: 23개의 talk (25명 내외 참석)
- ✓ EU: HBS/Juelich-독일과 SONATE/LLB-프랑스 등
- ✓ 한국/일본/중국은 별도의 CANS를 활용한 산업화 모색
- ✓ 이스라엘, 아르헨티나 등 가속기 기반 중성자원 연구 지속
- ✓ 미국은 PNL을 중심 고선속 DD 발생기 등 가장 앞선 산업화 시도 지속
- ✓ BNCT에 많은 재원이 투자되고 있으며, 일본, 핀란드, 미국 중심으로 가속기 기반 BNCT 가속화
- ✓ 회의 결과는 결과보고서 및 IAEA-TECDOC으로 발간



10 요약: 국내외 접근방식의 차이

KCANS 구성 및 운영 현황 (국외 UCANS / IAEA 활동 포함)

» (국외 현황)

- ◆ 미국: 산업체(PNL) 중심의 DD/DT 선원 개발 → 영상, 의료용 동위원소 생산
- ◆ 일본: compact linac 기반 비파괴/영상, 파쇄중성자원(J-PARC)과의 연계·지원, 다수의 BNCT 연구 추진 중
- ◆ 프랑스/독일 등 EU: CANS → ELENA, 연구로 이후의 중성자 과학 연구 연속성 확보를 위한 사업 기획 중 ('19 Orphee 원자로 중단)

» (국내 현황)

- ◆ 하나로 활용 다양한 중성자 측정/활용 기술 보유
- ◆ 아직은 초입단계이나, 선형가속기와 사이클로트론을 이용한 과제는 진행 중 (BNCT, 중성자영상화/TMRS기술 확보)
- ◆ 경주 양성자 가속기 등 다양한 기관에서 자체 시설을 활용한 중성자 생산/활용 연구 추진 중

Neutron Radiography

Medical Isotope Production

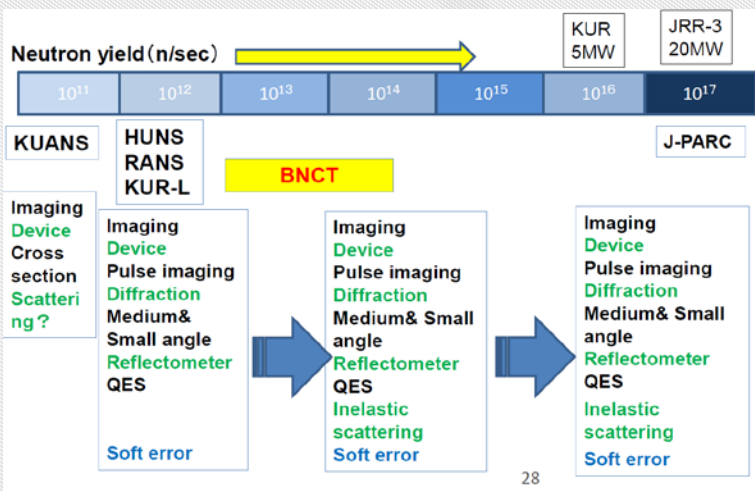
Neutron Detector Calibration

Explosive Detection

Nuclear Fuel Scanning

Fielded Systems:

- Semiconductor Ion Implantation
- Radiation Effects Testing



Accelerator Based Neutron Sources

Scalable Neutron Sources

0.01 kW	0.1 kW	1 kW	10 kW	100 kW
0.001-0.01 mA	0.01-1 mA	0.5-5 mA	1-20 mA	50-100 mA
$\sim 10^{11}$ n/s	$\sim 10^{12}$ n/s	$\sim 10^{13}$ n/s	$\sim 10^{14}$ n/s	$\sim 10^{15}$ n/s

Cost scale: 10 MEUR (130억) to 400 MEUR (5200억)

Logos: MIRROR, LENS, Sinate, NOVA ERA, etc.

CONTENTS



10 KCANS 구성 및 운영 현황 (국외 UCANS/IAEA 활동 포함)

'16부터 KCANS 결성 및 정례 워크숍 진행 중 (추계 원자력학회 기간 활용)
14개 기관/장비, 54명의 회원 : 국내외 활동과 주기적인 현황보고서 갱신
국외 UCANS, IAEA 활동 등 연계 강화 노력 중

20 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동

21 부서 현황과 전략

22 재료전용 중이온가속기(KAHIF) 현황

23 싸이클로트론 기반 중성자원 개발 현황

30 요약 및 제언

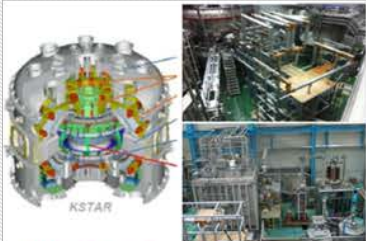
21 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동 부서 현황과 전략 : “핵융합(가열/로공학) + 핵자료”

» 핵융합: 핵융합에너지 및 중성자 연구 (융복합연구소 산하 (과거 시스템 중심 연구소))

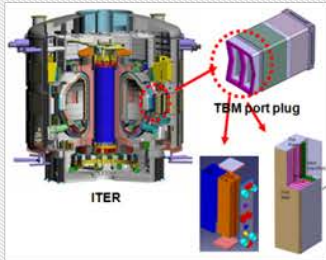
- ◆ 주요 마일스톤: KSTAR(물리) > ITER(공학실험) > DEMO(실증로) > FPP(핵융합발전소)
- ◆ KAERI 연구분야: KSTAR 가열장치 > ITER TBM/FW > DEMO 선행장비(고속중성자원)



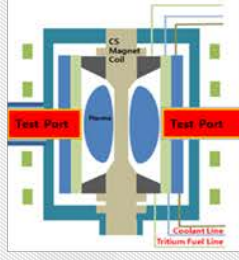
KT-1 & KT-2 Design
(Tokamak Research)



KSTAR Heating System
& ITER Blanket



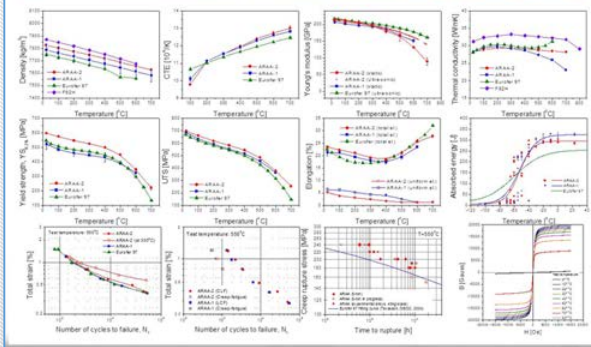
ITER TBM & Fusion Neutron Source



Demonstration Reactor

핵융합로용 고유구조소재(ARAA) 개발

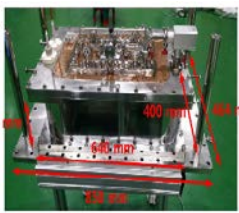
- 고유 저방사화구조소재 개발 ('12-'16)
 - 18톤 규모의 ARAA-3 제조 완료
(세계 최대용량 제조 성공)
 - 불순물 제어 성공, 구조재 물성평가 및 DB 구축
(C&S 등재 준비)



핵융합 가열장치 개발

핵융합로공학 기술 개발

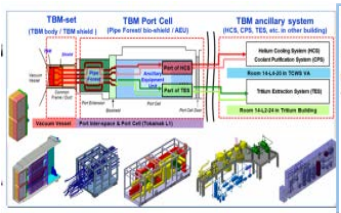
고속중성자원 기반 구축



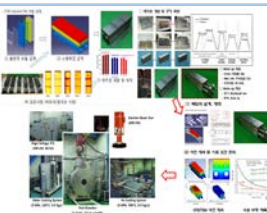
ECR/RF 이온원



중성입자빔 시험장비



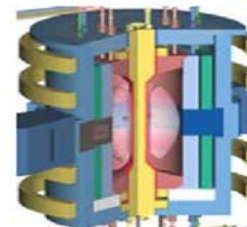
삼중수소증식
블랑켓시스템 설계



플라즈마대면부품
개발/성능시험



중이온가속기

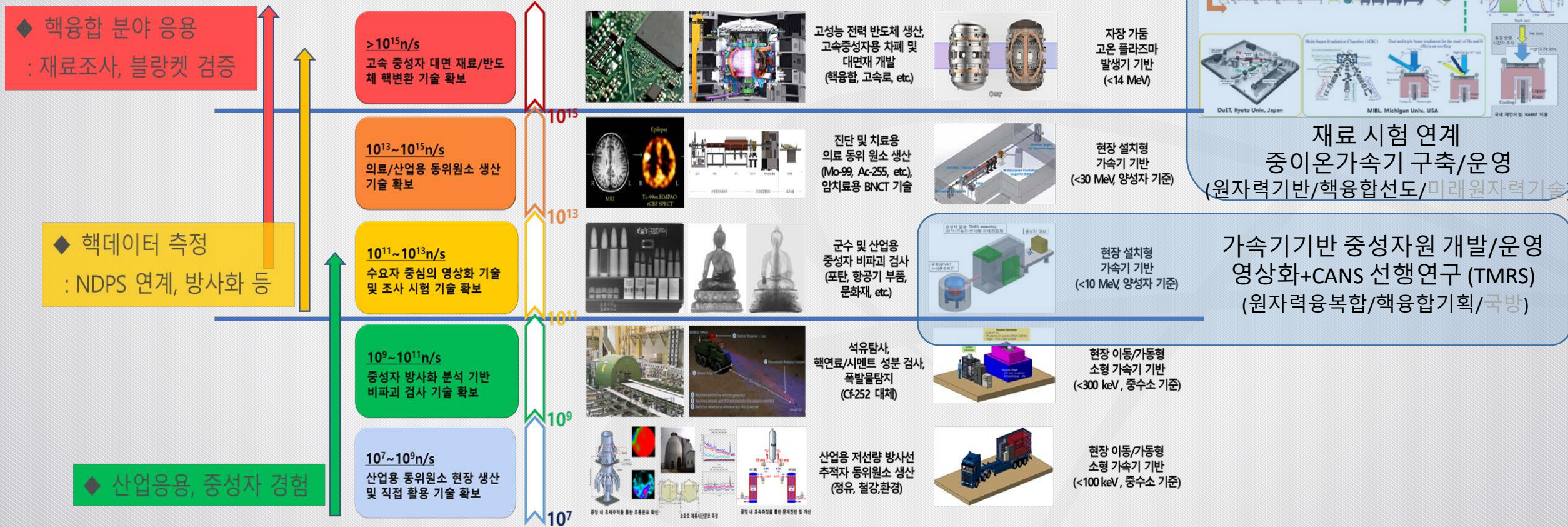


핵융합중성자원
개념도

21 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동

부서 현황과 전략 : “핵융합(가열/로공학) + 핵자료”

» 소형 DD(DT) 선원에서 가속기 기반 중성자원, 대용량 체적형 중성자원까지의 개발 전략 수립과 이행

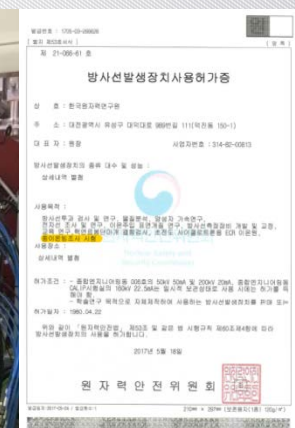
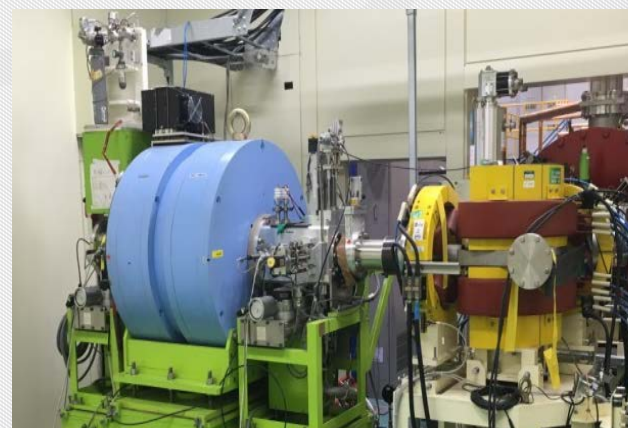
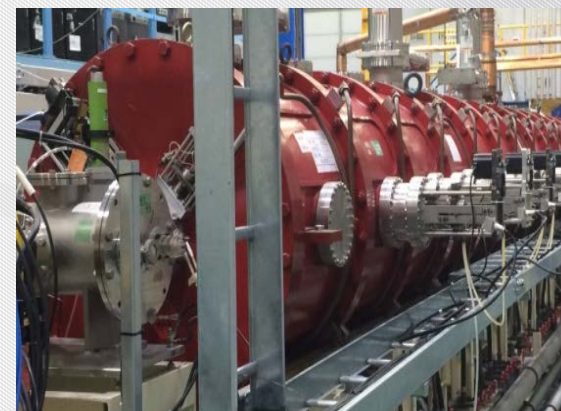
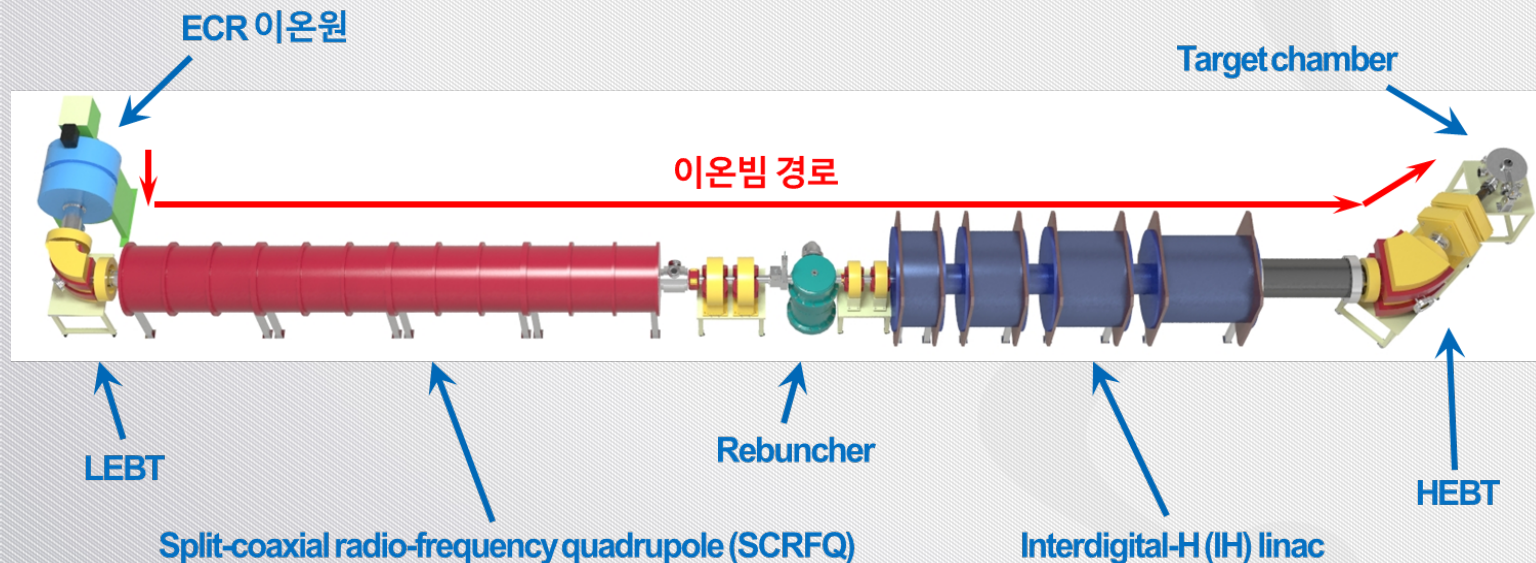


22 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동

재료전용 중이온가속기(KAHIF) 현황

» 원자력기반확충사업('15~'19)

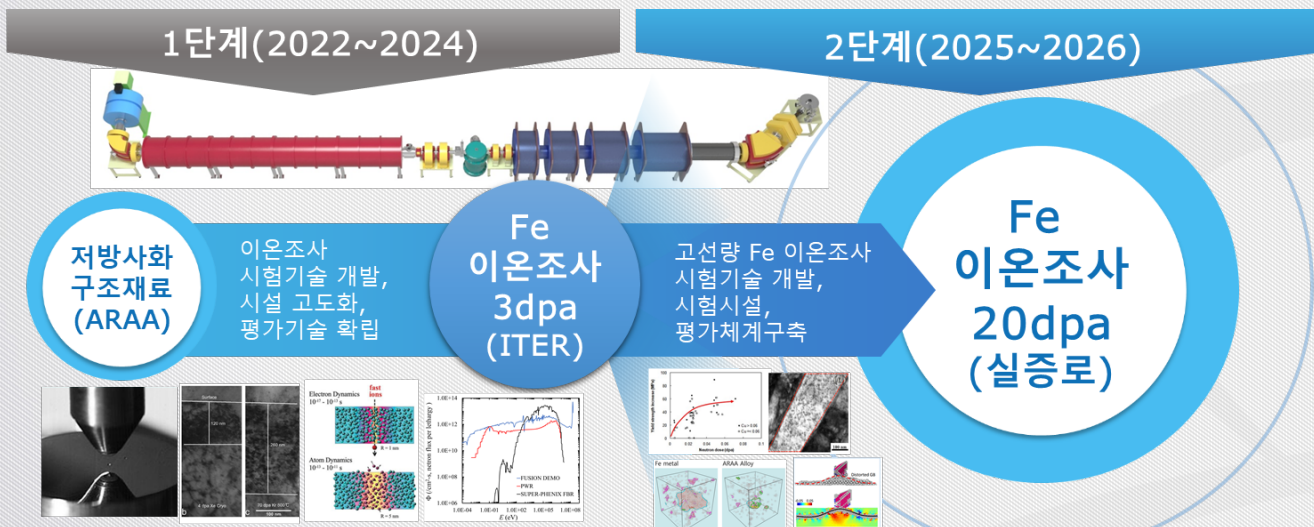
- ◆ 일본 TRIAC 이전 및 재료전용시험시설로 변경 구축
- ◆ 국내 최초·유일 이온빔 조사시험시설 성공적 구축 완료('19)
- ◆ Target chamber 설치 및 온도 제어(< 1,500 °C) 시스템 구축
- ◆ 빔가속 시험결과: He⁺, Ar¹⁰⁺ 가속 성공



22 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동 재료전용 중이온가속기(KAHIF) 현황

원자력기반확충사업('15~'19) > 핵융합선도센터('22~'26)

- ◆ 철강재료(ARAA: 핵융합 저방사화소재) 조사 기능 (Fe 이온원)
- ◆ 빔 안정성 강화를 위한 시설 개량



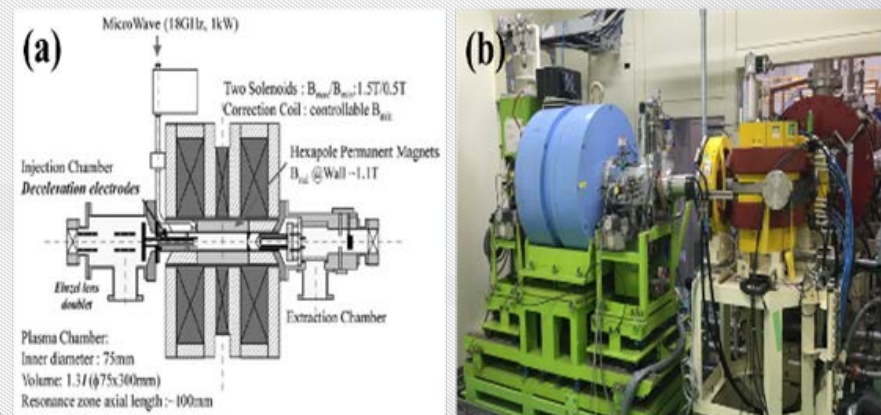
- 미세구조 조사손상 분석 및 기계적 특성 평가
- 이온조사 챔버 히터 및 시험편 제어 시스템 설계
- 핵융합 구조재료 조사 손상 다차원 시뮬레이션 요소기술 개발

- 핵융합로 구조재료 이온조사 시험절차/평가기술 확립
- 이온조사에 의한 미세구조 및 기계적 특성 평가 체계 구축
- 중성자/이온 조사에 의한 다차원 시뮬레이션 분석 체계 구축
- 조사 손상 상관관계 예측

최종
목표

핵융합 재료 중성자 조사손상 모의를 위한 이온조사 시험기술 개발, 시험시설 및 평가 체계 구축

이온(금속)빔 조사용 ECR 이온 소스



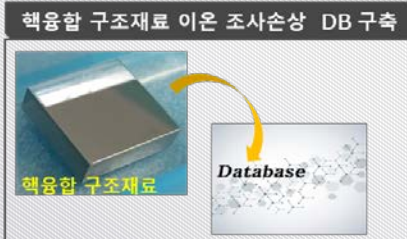
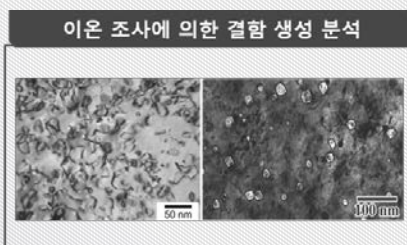
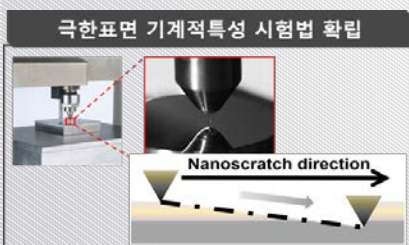
이온빔 조사 가속기 성능/안정성 개선



22 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동 재료전용 중이온가속기(KAHIF) 현황

원자력기반확충사업('15~'19) > 핵융합선도센터('22~'26)

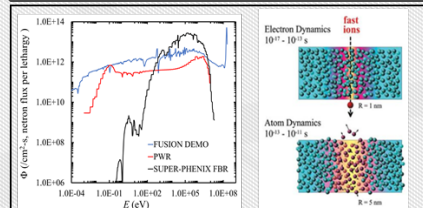
- ◆ 철강재료(ARAA: 핵융합 저방사화소재) 조사 기능 추가
- ◆ 빔 안정성 강화를 위한 시설 개량
- ◆ 사용자(학연) 통한 미세구조/기계적특성 평가
- ◆ 해석/평가기술+연구로 조사시험 비교



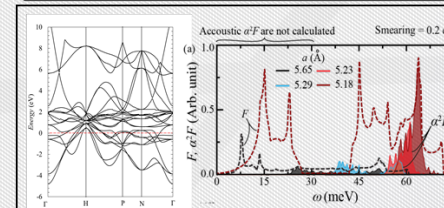
이온조사손상
분석/예측용
다차원 모사기술

미세구조 및
기계적특성
시험 평가
체계 구축

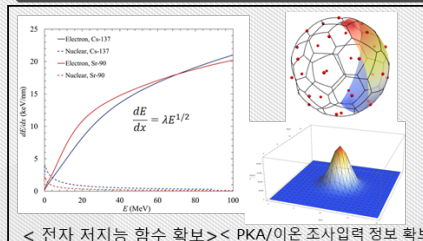
중성자/이온 조사 환경 분석



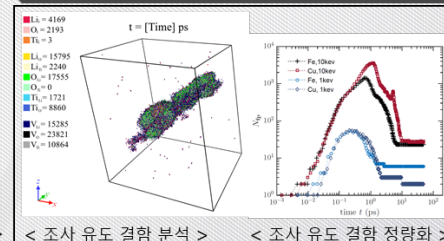
전자구조/전자-포논 스펙트럼 분석



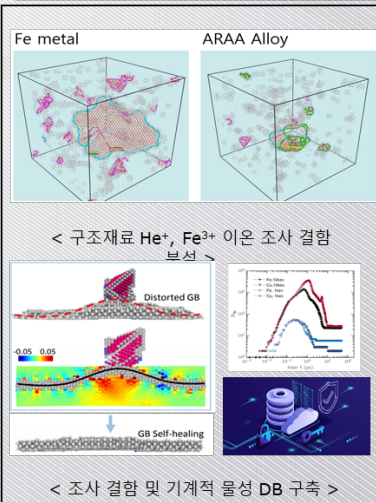
조사 손상 시뮬레이션 데이터 분석



조사 손상 정량화, 물성 모델 도출



핵융합 소재 조사 결함 DB구축



22 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동 재료전용 중이온가속기(KAHIF) 현황

원자력기반확충사업('15~'19) > 핵융합선도센터('22~'26) + 미래원자력기술시설('24~'26)

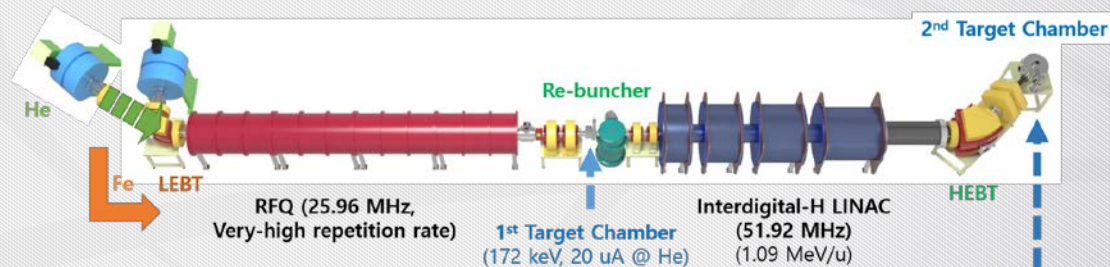
	일시	시료명	시료 성분	수량	실험 횟수	에너지 전류, 입자	입자속
1	'22.10	핵융합 구조재	ARAA강	20개	12회	0.688 MeV, 20 uA, He2+	50,000 appm
2	'22.11	중성자흡수재 소재	알루미늄B4C	16개	4회	0.688 MeV, 20 uA, He2+	14,000 appm
3	'22.11	핵연료 피복관 소재	Fe alloy	8개	2회	6.871 MeV, 12 uA, Ar8+	40 dpa
4	'23.03	핵융합 구조재	ARAA강	16개	10회	0.688 MeV, 20 uA, He2+	50,000 appm
5	'23.04	중성자흡수재 소재	알루미늄B4C	10개	4회	0.688 MeV, 20 uA, He2+	100,000 appm
6	'23.04	핵연료 피복관	316L Stainless steel	8개	4회	0.688 MeV, 20 uA, He2+	5x10 ¹⁶ ions/cm ²
7	'23.05	핵연료	가돌로니아	4개	2회	6.871 MeV, 12 uA, Ar8+	20 dpa
8	'23.11 (예정)	핵연료	가돌로니아	40개	20회	6.871 MeV, 12 uA, Ar8+	20 dpa
9	'23.12 (예정)	우라늄 시편	UO ₂ , U ₃ Si ₂	4개	2회	6.871 MeV, 12 uA, Ar8+	100 dpa

◆ 현재 이용자 현황

- ✓ 핵융합선도센터: 부경대/국민대/울산대/한양대(핵융합재료)
- ✓ UNIST/KAIST: 원자력재료

◆ 지원사업 통한 성능 개량, 노후 설비 교체 및 이용자 확대

- ✓ 이용율 향상: 16% ('18) -> 30% ('23) -> 50% ('26)
- ✓ 핵융합/원자력재료 수요 확대 및 지원 강화: 연 1회 사용자 워크숍 정례화 등



Fe alloy

(핵연료 피복관 소재)



알루미늄 B4C

(중성자 흡수재 소재)



ARAA 강

(핵연료 구조재)



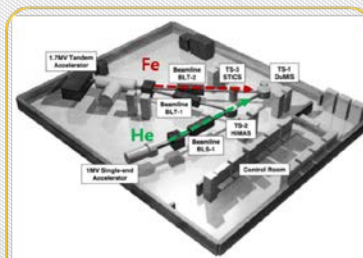
SUS 316L

(핵연료 피복관 소재)

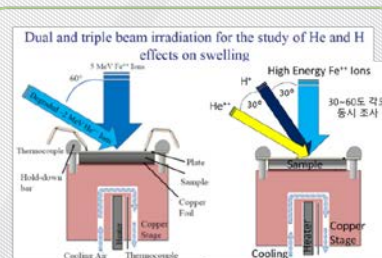


Gd 세라믹

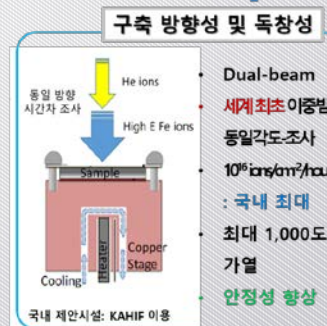
(가연성 흡수재 핵연료)



DuET, Kyoto Univ., Japan



MIBL, Michigan Univ., USA

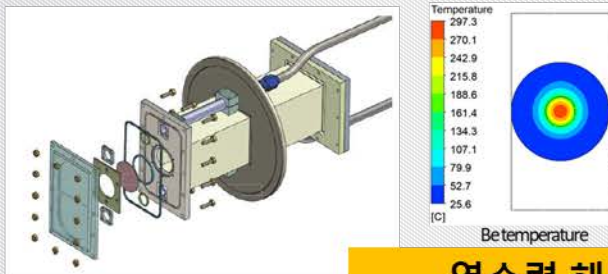


23 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동

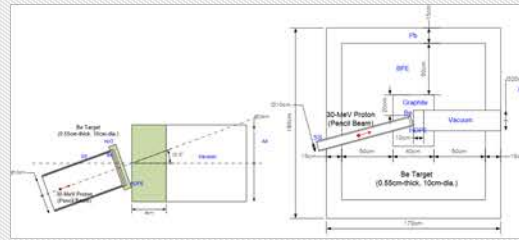
사이클로트론 기반 중성자원 개발 현황

» 원자력융복합사업 ('20~'23): 하나로 중성자 영상 기술의 CANS 이용 현장화

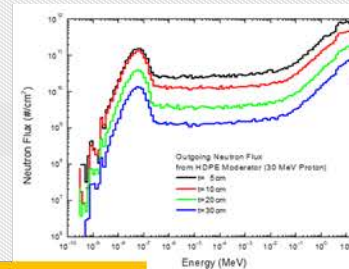
- ◆ 최종 목표: 10^{12} n/s 중성자 발생 수율(선속 $>10^5$ n/cm²*s), $10*10$ cm² Field of View, Frame 당 5분, >0.5 mm 분해능
- ◆ 기 구축된 정읍 30 MeV 사이클로트론 활용 TMRS 구축, 중성자영상화 시연



열수력 해석 기반
장수명 Be 타겟 제작

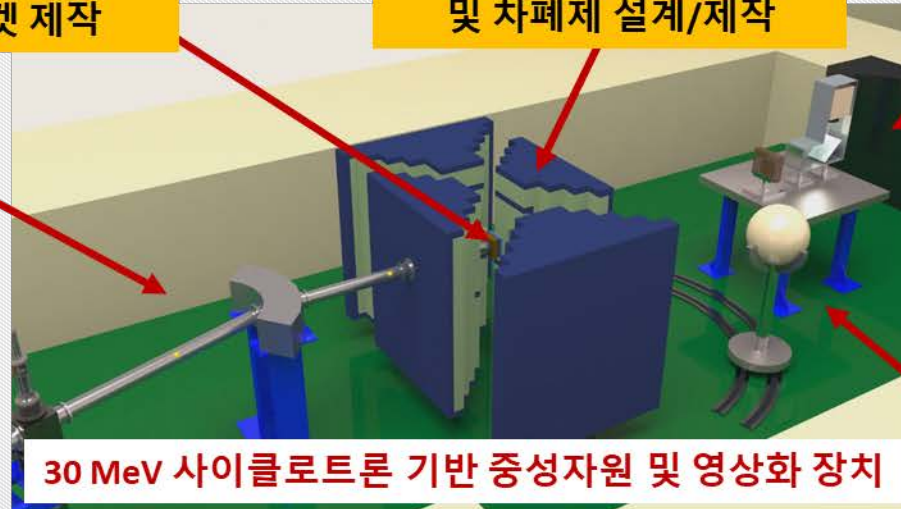


핵해석 기반 중성자 발생
및 차폐제 설계/제작

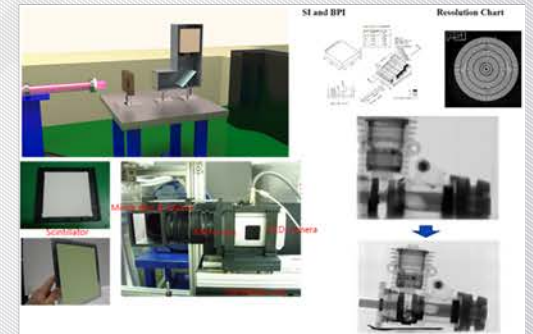


저선속 중성자 / x-선 영상화
시스템 개발 및 구축

30 MeV 양성자 빔 수송 및
조사 시스템 구축



30 MeV 사이클로트론 기반 중성자원 및 영상화 장치



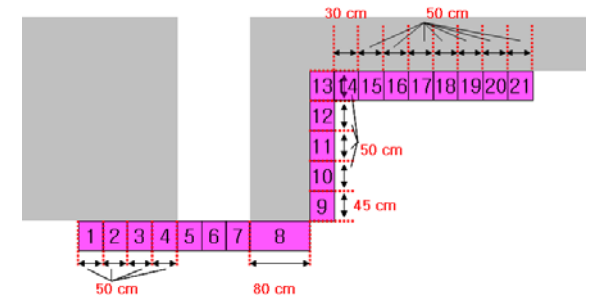
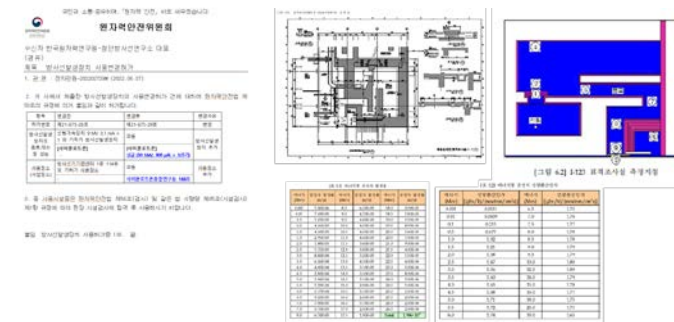
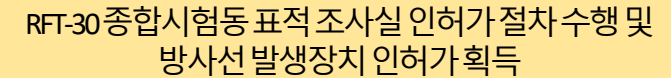
광대역 중성자 측정
시스템 개발

◆ 타겟 > moderator > TMRS 최적화

	D=30 mm, W=3 kW	D=50 mm, W=3 kW	D=50 mm, W=13 kW
Be temperature (max.) [C]	297	166	652
Channel temperature (max.) [C]	46	36	88
Heat flux [MW/m ²]	2.47	1.27	5.49

◆ 타겟 > moderator > TMRS 설계/제작 > 인허가

MCNP 기반 TMRS 설계 완료 @30 MeV/100uA-analysis model

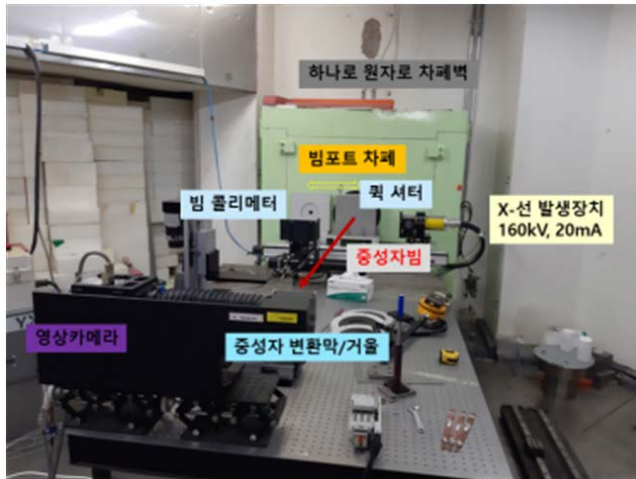


23 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동 사이클로트론 기반 중성자원 개발 현황

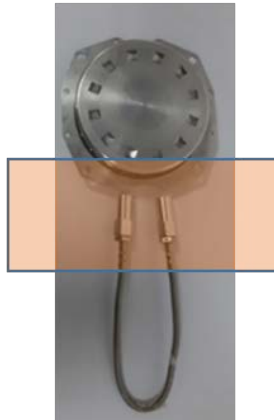
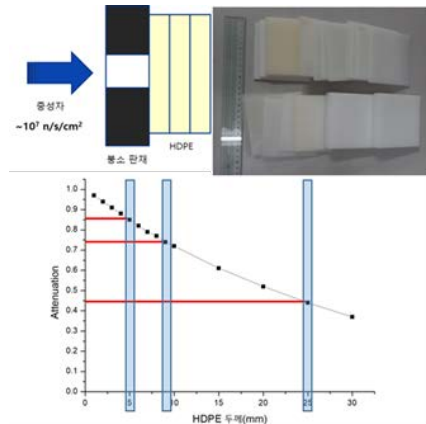
» 원자력융복합사업 ('20~'23): 하나로 중성자 영상 기술의 CANS 이용 현장화

◆ 타겟 > moderator > TMRS 설계/제작 > 인허가 > '23 과제 종료: 기 제작 저선량 중성자영상화 장치 이용한 최종 영상 획득

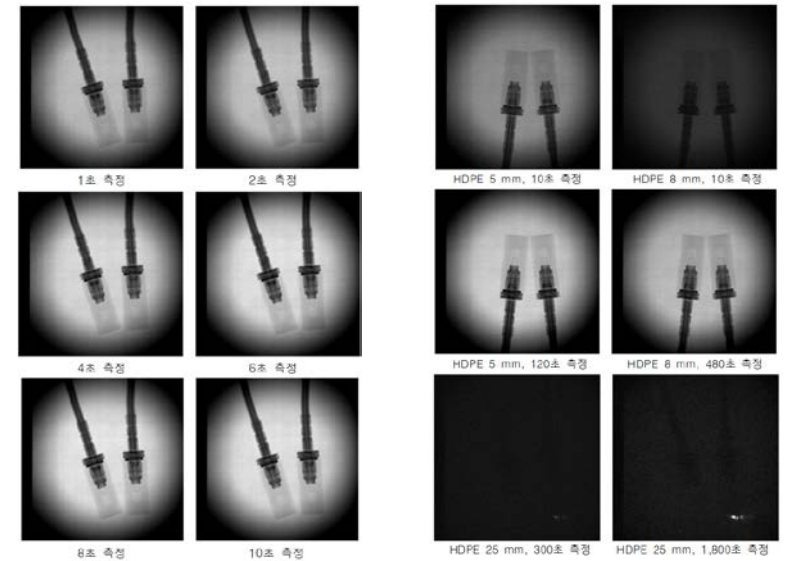
하나로 ENF 중성자영상 시설: 장치 재배치



저선량 중성자영상 확인을 위한 HDPE 준비/사전해석
영상대상 선정(오일필터-군용)



저선량 중성자영상 획득
(평가추가진행중)



CONTENTS



10 KCANS 구성 및 운영 현황 (국외 UCANS/IAEA 활동 포함)

'16부터 KCANS 결성 및 정례 워크숍 진행 중 (추계 원자력학회 기간 활용)
14개 기관/장비, 54명의 회원 : 국내외 활동과 주기적인 현황보고서 갱신
국외 UCANS, IAEA 활동 등 연계 강화 노력 중

20 핵물리응용연구부 CANS 연계 활동

21 부서 현황과 전략

핵융합 : 가열기술 (이온원 > DD선원/CANS) + 로공학 (중성자/재료)
KAHIF: 원자력/핵융합 연계 구축/고도화 -> 철이온 조사시험, 사용자 확대
30MeV CANS: 정읍 기구축 가속기 활용 영상화장치 구축

22 재료전용 중이온가속기(KAHIF) 현황

23 싸이클로트론 기반 중성자원 개발 현황

본 워크숍 내 문명국박사님 발표: 중성자 영상
6/19(금) 9A 세션 발표: KAHIF upgrade (이승현박사, 현 과책)
6/19(목)~20(금) 9B 포스터 세션: P09B02, P09B15 관련 발표 (이상빈/이동원)

30 요약 및 제언

30 요약 및 제언 CANS 관련 제언: 정보공유, 협력 활성화

» (국내) 지속적이고 긴밀한 협력 관계

- ◆ 최소 연 1회 이상의 워크숍 개최를 통한 정보 공유, 협력 플랫폼 유지
- ◆ 연/격년 1건 이상의 동향 보고서 발간을 통한 동향 정리
- ◆ 장치/기관간 기술적 협력 지원, 공지 등 활성화
- ◆ 공식적인 공식 출범이 안된 점은 아쉽지만, 이대로 시작하고 점차 틀을 보완하는 형태 제안 드림 (가을에 모일 수 있다면 모임 추진)

» (국외) 국내 현황의 국제적 공유, 국제 협력 도모

- ◆ UCANS, RANS 미팅 등 관련 정보 공유 및 참여 독려
- ◆ IAEA 비파쇄중성자원 관련 CRP 등 후속 추진시 적극 대응
- ◆ 일본 JCANS 및 중국 CCANS와의 양자/삼자간 교류 추진 등

» (기타) 회원/기관별 제안/건의 의견 적극 반영

감사합니다.



이동원 (dwlee@kaeri.re.kr)