

국내외 CANS 현황 : KCANS/UCANS/IAEA활동 중심으로..

소형중성자원 개발과 이용 (III)

주최: 방사선 이용 및 기기 연구부회, 양자공학 및 핵융합기술 연구부회 공동



한국원자력학회 2021 온라인 춘계학술발표회 워크숍

2021.05.12 (화상워크숍)

이 동 원 / 이 창 희

한국원자력연구원 핵물리응용연구부/중성자과학부

CONTENTS



10 KCANS 경과 및 국내 현황

20 국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

30 요약 및 제언

10 KCANS 경과 및 국내 현황

KCANS 경과 보고

- ◆ '16 제 1회 KCANS (경주 추계KNS): 발표 11건
 - ✓ '16.12.16 참여 의사 확인 메일 → '17.01.17 발기문 송부
- ◆ '19 제 2회 KCANS (일산 추계KNS): 발표 11건
 - ✓ '19.11.09 가입 요청 메일
- ◆ '21 제 3회 KCANS (온라인 추계KNS): 발표 9건 (1건 취소)
- ◆ 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 실험과 다양한 에너지 범위의 중성자 발생, 실험의 이용 계획에 대한 국내외 현황과 전망을 공유하고, 연구 개발자간 교류를 위한 소중한 첫 발을 내디뎠다고 생각합니다.

전통적으로 중성자 과학과 기술은 주로 고중성자속 연구를 원자로와 같은 대형연구시설을 기반으로 발전되었습니다. 최근에는 고에너지 대용량 양성자 가속기 기반 파쇄중성자원이 비약적으로 발전하고 있어서 새로운 패러다임이 열리고 있습니다. 최근, 국제적으로 가속기 기반 기술의 발전에 따라 소형 중성자 발생 장치가 다양하게 개발되고 있습니다. 이를 바탕으로 해외에서는 원자로 또는 대형가속기 시설과 같은 대형연구시설 기반의 중성자원과 함께 소형, 중형 중성자원 개발과 그 다양한 이용을 위해 UCANS (Int. Meeting of Union for Compact Accelerator-Driven Neutron Sources)를 설립하고, 관련 연구자들이 모여서 활발한 논의를 하고 있습니다. 기초과학 및 산업기술 측면에서 강력한 중성자 원은 지속적인 요구가 있을 것으로 기대되며, 주된 응용성 목표로 선진 각국의 노후한 연구로를 대체할 새로운 고중성자속 발생 대형 연구로 건설이 쉽지 않은 상황에서, 규모가 기존 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 중성자실험 (선형 양성자 가속기, 사이클로트론, 전자선가속기 등)이나 핵융합 중성자원 (DD/DT 실험) 기반이 갖추어지고 있고, 산업부 지원으로 중소 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, 중소형 중성자 실험 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 동참하고자 하는 분들의 아예 인력 사항을 메일로 연락이 되신다면 주시고(마감: 2017-02-25), 주변의 관련 연구자에게 소개를 부탁 드립니다. 장황적으로는 일일 수의 참여 희망자가 모이면 다가오는 원자력학계 춘계학술대회에서 간소한 모임을 가질 예정입니다. 많은 관심과 성원을 부탁드립니다. 감사합니다.

문의: 한국원자력연구원 이창희(leech@kaeri.re.kr), 이동원(dwlee@kaeri.re.kr), 성공대학교 채종서(jechai@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 방호 연구부회

일 정	내 용
13:00 ~ 13:25	정책과제 (현장 가동형 중성자레이저/가속기 시스템 기술개발 방안 연구) 결과 소개와 하나로 중성자원과 활용 이창희 (한국원자력연구원)
13:25 ~ 13:50	양성자 가속기연구센터의 중성자원 개발 현황 및 계획, 조용섭 (한국원자력연구원)
13:50 ~ 14:15	RAON 중성자 연구시설 구축 현황 및 계획, 김재현 (중이온가속기사업단)
14:15 ~ 14:40	이온원 기반 고에너지 중성자 발생장치 개발 현황 및 계획, 장두희 (한국원자력연구원)
14:40 ~ 15:05	다목적 이온빔 발생장치 개발 현황 및 계획, 원미숙 (한국기초과학지원연구원)
15:05 ~ 15:30	사이클로트론 기반 중성자 응용 연구 현황과 계획, 채종서 (성균관대학교)
15:30 ~ 15:50	휴 식
15:50 ~ 16:15	중성자 측정 표준과 중성자 표준장, 박현서 (한국표준과학연구원)
16:15 ~ 16:40	KSTAR 고속중성자의 산업적 활용 - 고속중성자 이미징, 이명석 (국가핵융합연구소)
16:40 ~ 17:05	암치료용 가속기 기반 붕소중성자포획 기술이 1시간 이내에 가능한 시스템 개발, 김동수 (다원시스)
17:05 ~ 17:30	고선속 중성자 선원발생 기술개발 현황 - 핵물질 분석, 이용덕 (한국원자력연구원)
17:30 ~ 17:55	KAERI neutron Time Of Flight (KAERI nTOF) 실험실 구축 현황 및 계획, 김유중 (한국원자력연구원)
17:55 ~ 18:00	폐 회

| 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 방사선 이용 및 기기 연구부회 양자공학 및 핵융합기술 연구부회

일 정	내 용
13:00 ~ 13:20	개회사, UCANS 현황 및 KCANS 구성 제안, 이동원, 이창희 (한국원자력연구원)
13:20 ~ 13:45	소형 DD 선형 개발 현황과 활용 계획, 정경재 (서울대)
13:45 ~ 14:10	다선량 고속중성자원 개발 현황 및 활용 계획, 김성호 (KAERI)
14:10 ~ 14:35	KBSI 가속기 기반 중성자원 시설 현황, 홍승우 (KAERI)
14:35 ~ 15:00	소형가속기 기반 광대역 중성자 발생 장치 개발 현황, 이용덕 (KAERI)
15:00 ~ 15:20	Coffee Break
15:20 ~ 15:45	KAERI nTOF 전자가속기 구축 현황, 이종연 (KAERI)
15:45 ~ 16:10	PAL 소형전자가속기를 이용한 중성자 연구시설의 운영성과 및 향후 전망, 이희석 (포항가속기연구소)
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	정전형 가속기 기반 붕소중성자포획치료(BNCT)용 중성자원, 민선홍 (원자력의학원)
17:50 ~ 18:15	Design of High Flux Accelerator Based Neutron Source, 방정배 (고려대학교)
18:15 ~ 18:20	마무리 / 이창희, 이동원

| 기타사항 - 등록비: 무료 (석식 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)

일 정	내 용
14:00 ~ 14:10	인사말 (연구부회장) 사회(이창희/이동원)
14:10 ~ 14:30	국내외 CANS 현황 - KCANS/UCANS/AEAS 활동 (이동원/이창희, 한국원자력연구원)
14:30 ~ 14:50	소형중성자 선원 개발과 응용 산업화 전망 (이동원/이창희, 한국원자력연구원)
14:50 ~ 15:05	30MeV 사이클로트론 기반 중성자 실험 시설 조성 및 기술 개발 현황 (정봉기, 한국원자력연구원)
15:05 ~ 15:20	KOMAC 100MeV 중성자빔 개발 계획 (민선홍, 원자력의학원)
15:20 ~ 15:35	A use of 70-MeV cyclotron facility of HSP for CANS study (김종현, 기초과학연구원)
15:35 ~ 15:50	PAL 전자가속기를 이용한 중성자원 개발 현황 (이희석, 포항가속기연구소)
15:50 ~ 16:05	A-BNCT 현황 (김동수, 다원시스)
16:05 ~ 16:20	KIRAMS R&D project for tandem accelerator based BNCT (홍봉환, 원자력의학원)
16:20 ~ 16:40	휴 식
16:40 ~ 17:10	BNCT 최신 동향 소개 (서효정, 다원메덱스)
17:10 ~ 17:40	반도체 가속 평가 최신 동향과 평가용 빔의 중요성 (정성수, QRT)
17:40 ~ 18:00	마무리: 이동원/이창희 (한국원자력연구원)

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

10 KCANS 경과 및 국내 현황

KCANS 경과 보고

◆ KCANS 운영/제안 시설의 구성

- ✓ 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

◆ 이외 여러 루트로 국내 수요나 계획 등을 반영할 예정

계획 개발 운영/활용기술

			2016	2019	2021 (추후 갱신)
선원/활용	KAERI 본원	DD	운영/개발		
	KAERI 본원	nTOF	계획	계획	
	KAERI 경주	100MeV 선형 양성자가속기	운영/계획	운영/계획	운영/계획
	KAERI 정읍	30MeV 사이클로트론		계획	개발
	IBS	중이온가속기	계획		계획
	KBSI 부산	중이온가속기	계획	계획(영상)	
	다원시스	BNCT	개발	개발	개발
	포항	전자선가속기		계획(영상/의료동위원소)	계획(영상/의료동위원소)
	KIRAMS	BNCT		개발	개발
	고려대(세종)	ECR 이온원		계획	
기타 선원 (Not CANS, but NS)	KAERI 본원	하나로	운영		
	핵융합연	KSTAR(DD)	운영		
	KAERI 본원	체적선원(핵융합)		계획	
가속기	성균관대	사이클로트론	기술		기술
활용/측정	표준연	측정기술	기술	기술	
	서울대	DD/측정		기술	
	QRT	반도체시험			기술
	KAERI 본원	분석	기술		

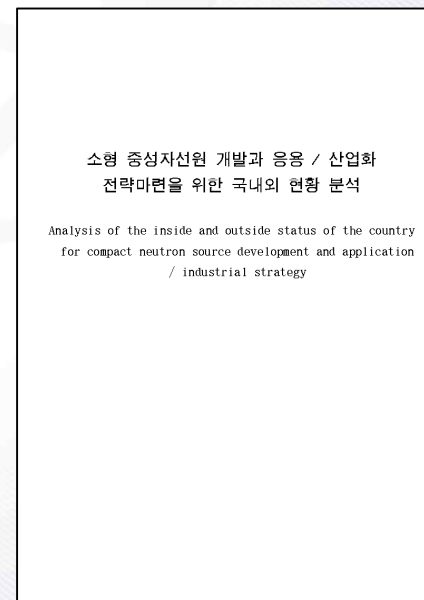
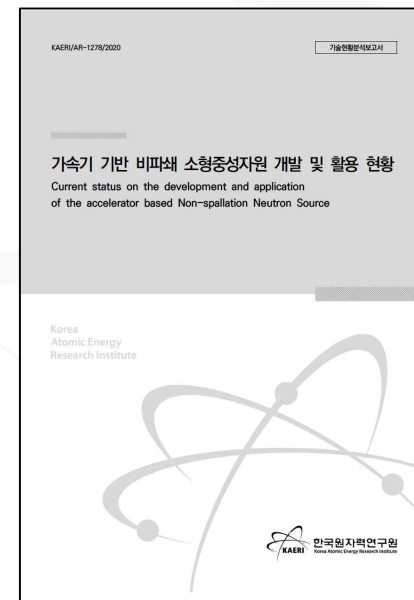
10 KCANS 경과 및 국내 현황

KCANS 경과 보고

» 국내외 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)
- ◆ 응용/산업화 전략 정책보고서 1건 (성균관대-채종서교수): 금일 발표 예정

→ 각 보고서에 대해 file 또는 hardcopy로 배포 가능, 희망하시는 분은 연락 요청드릴



CONTENTS



10 KCANS 경과 및 국내 현황

'16, '19 개최에 이어 '21 세번째 KCANS 워크숍 (발기문/구성 제안 등 공식화 노력)
현재까지는 자율적 워크숍 수준이나 14개 기관/장비, 54명의 참여의사 확인
현재 운영 중인 중성자선원은 2건, 개발 중인 선원은 3건으로 확인
수요 확인할 수 있는 계획 소개 시설은 6건

20 국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

30 요약 및 제언

20 UCANS 현황

국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

» 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

- ✓ 1차 Beijing (China) 2011
- ✓ 2차 Bloomington (U.S.A) 2012
- ✓ 3차 Bilbao (Spain) 2013
- ✓ 4차 Sapporo (Japan) 2014
- ✓ 5차 Legnaro (Italy) 2015
- ✓ 6차 Xi'an (China) 2016 – KAERI KOMAC
- ✓ 7차 Bariloche (Argentina) 2018 – KAERI 핵융합기술개발부
- ✓ 8차 Paris (France) 2019 – KAERI KOMAC
- ✓ 9차 Japan 예정 2020 – KCANS 자격으로 참석(이동원/이창희)

: 코로나 상황으로 pre-Web(화상) 형식으로 진행, 2021 다시 일본에서 개최 예정

UCANS-web 2020 Union for Compact Accelerator-driven Neutron Source Web Seminar 2020 http://UCANS-web.org/		
Local organizing committee	UCANS International Committee	Scientific committee of UCANS-web
	Yoshie Otake, RIKEN, Japan	
	Christiane Alba-Simionesco, CNRS, France	
	Carla Andreani, University of Rome Tor Vergata, Italy	
Yoshie Otake, RIKEN	David Baxter, Indiana University, USA	David Baxter, Indiana University, USA
Tomohiro Kobayashi, RIKEN	John Carpenter, Argonne Nat Lab, USA	Chang-Hee LEE, KAERI, Korea
Yutaka Yamagata, RIKEN	Javier Dawidowski, Centro Atomico Bariloche, CNEA, Argentina	Xuewu Wang, Tsinghua University, China
Hiroaki Kumada, Tsukuba (IBNCT)	Rolando Granada, Centro Atomico Bariloche, CNEA, Argentina	Satoshi Kolzumi, Ibaraki U. Japan
Satoshi Kolzumi, Ibaraki-U. (IMATERIA)	Thomas Gutberlet, Forschungszentrum Jülich GmbH, Germany	Koichi Kino, AIST, Japan
Koichi Kino, AIST (AISTANS)	Yoshiaki Kiyonagi, Nagoya University, Japan	Javier Dawidowski, Centro Atomico Bariloche, CNEA, Argentina
Atsushi Taketani, RIKEN	Ohnuma Masato, Hokkaido University, Japan	Thomas Gutberlet, Forschungszentrum Jülich, Germany
Masato Takamura, RIKEN	Pierfrancesco Mastinu, INFN, Italy	Ferenc Mezei, Mirrotron, Hungary
Katsuya Hirota, Nagoya University	Ferenc Mezei, Mirrotron, Hungary	Frederic Ott, CEA, France
Chang-Hee LEE, KAERI, Korea,	Hirohiko Shimizu, Nagoya University, Japan	
Xuewu Wang, Tsinghua University	Valery Shvetsov, Frank Lab of Neutron Physics, Russia	
Sheng Wang, Xi'an Jiaotong University	Fernando Sordo, ESS-Bilbao, Spain	
	Sheng Wang, Xi'an Jiaotong University, China	
	Xuewu Wang, Tsinghua University, China	
	Dong Won LEE, Korean Atomic energy Research Institute, Korea	
	Yutaka Yamagata, RIKEN, Japan	
	Prof. Lu Yuanrong, Peking University, China	

20 UCANS 현황

국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

» '20 UCANS pre-Web 주요 내용: 시차를 고려해 날짜별/대륙별 진행

- ◆ 초록집/발표자료는 공유되지 않음. 개인 회의록 기준으로 정리
- ◆ (1일차) 아시아 : 일본 RANS, 한국 현황, 중국 SANS 및 BNCT
 - ✓ 일본 RANS series는 medium source로서 비파괴 검사의 표준모델로서 개발 지향
 - ✓ RANS-III 버전을 거쳐, 노후 교각 검사용 RANS- μ 개발 및 검증 진행 중 (neutron salt meter) → 5/13 RANS meeting 예정
(<https://indico2.riken.jp/event/3717>)
 - ✓ 한국 현황은 이창희 박사 발표
 - ✓ 중국은 대형시설 3기 및 중소형시설 12기 소개, 중요 CANS 활동으로는 CPHS 13 MeV 선형가속기를 이용해 $5 \times 10^{13} \text{n/s}$ 발생

2021年度 理研シンポジウム (RANS シンポジウム)
「いよいよ見えてきた小型中性子源の現場利用と拓けてきたさらなる応用
-コンクリート反射イメージングから宇宙へ-」
日時 2021年 5月13日(木) 9:00-16:35
場所 WEB (ZOOM 参加登録者へ別途連絡)
シンポジウム HP 登録ページあり: <https://indico2.riken.jp/event/3717/>

プログラム	タイトル	講演者
9:00-9:05	シンポジウム開会の挨拶	理化学研究所先端工学研究センターセンター長 佐々木 亮
9:05-9:25	理研小型中性子源システム RANS プロジェクト 利用促進のための活用	理化学研究所中性子ビーム技術開発チームチームリーダー 佐藤 直也
9:25-9:35	もつくり環境における小型中性子源の利用 -金属加工への活用-	理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム 土田 隆太郎
9:35-9:55	シンポジウム 中性子小角散乱による産業利用 小型施設と 大規模施設との相関性	東北大学大学院工学研究科量子科学専攻 理化学研究所教授 小泉 啓
9:55-10:15	シンポジウム RANSにおける中性子位相イメージングのテスト 施設とこれからの展望	理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム 研究員 高野 幸希
10:15-10:25	最先端X線装置の放射線法に基づく中性子 CT 画像再構成	理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム 研究員 高野 幸希
10:25-10:35	休憩	
10:35-10:55	シンポジウム 観望者への水の透過解析における中性子イ メージングの活用	物質・材料研究機構高圧材料開発・情報 基盤部門量子材料基盤分子設計グループ グループリーダー 伊藤 昌雄
10:55-11:10	RANS の中性子源の関与(中性子利用)	理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム 研究員 土田 隆太郎
11:10-11:20	小型中性子源 RANS を用いた飛行時間法中性 子分光	理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム 研究員 岩本 ちひろ
11:20-11:30	太陽電池を利用した放射線計測デバイス開発	理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム 専任研究員 小林 知洋
11:30-11:50	シンポジウム 食料資源への宇宙放射線としての中性子線の影響	東京大学大学院医歯薬学総合研究科放射線学 教授 田中 真知子
11:50-12:00	RANS 施設状況と外部ユーザー実験の進め方紹介	理化学研究所中性子ビーム技術開発チーム 副チームリーダー 佐藤 直也
12:00-12:30	昼休み	
12:30-12:50	RANS RANS-III プレゼンテーション	

地域	기관	발표자	주제	주요 내용
(1일차) 아시아	RIKEN/일본	Y. Otake	RANS overview	- RANS > RANS II > RANS III > RANS μ - 중간 규모의 선원으로 비파괴검사 표준 모델 개발 지향
	KAERI/한국	C.-H. LEE D. W. LEE	KCANS 30 MeV cyc.	- 국내 중성자 선원 개발 현황 - 신규 30MeV 사이클로트론 기반 중성자원/영상화 기술 개발 소개
	CPHS/중국	X. Wang	gif-SANS	
	AIST/일본	K. Kino	AISTANS	
	CSNS/중국	T. LIANG	D-BNCT	- Linac 기반 BNCT, 500kW@target

20 UCANS 현황

국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

» '20 UCANS pre-Web 주요 내용: 시차를 고려해 날짜별/대륙별 진행

- ◆ (2일차) 유럽: 프랑스 SONATE 및 독일 HBS, EU CANS 모임 출범 등
 - ✓ 유럽 내 산재되어 있는 다양한 시설 및 신규 중소형 시설 소개
 - ✓ LENS/ELENA 출범
 - ✓ ESS Bilbao 30MeV NS 기획 착수
- (한국과의 협력 기대)

지역	기관	발표자	주제	주요 내용
(2일차) EU	LLB/프랑스	F. OTT	 SONATE	- 25MeV/100mA, 3kW@target
	Mirrortron/ 헝가리	F. MEZEI	 MIRROTRO N	- Linac, 2.5-5MeV/10-20mA: - $3 \times 10^{11} \sim 10^{12} \text{ n/s}$
	JCNS/ 독일	T. Buckel	 EU 중성자원 정책	- LENS: league of advanced EU neutron sources - ELENA: EU low energy accelerator-based neutron facilities association (HBS, SONATE, ARGITU, NEPIR, LvB)
	JCNS/ 독일	P. ZAKALEK	 HBS	- Linac, 70MeV/100mA 10^{15} n/s @Ta-target
	ESS Bilbao/ 스페인	F. SORDO	 ARGITU CANS project	- 31.5MeV/32mA, Be/V target, TMRS 초기 연구 진행 중
	LNL/ 이탈리아	P. MASTINU	 LNL LENOS project	- SEE test upto 100 MeV, Be/W(2:8) 회전형 고체표적
	JINR/ 러시아	V. SHVETSOV	 IREN JINR facility	- e-linac

20 UCANS 현황

국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

» '20 UCANS pre-Web 주요 내용: 시차를 고려해 날짜별/대륙별 진행

- ◆ (2일차) 유럽: 프랑스 SONATE 및 독일 HBS, EU CANS 모임 출범 등
 - ✓ 주요국의 연구로 기반 중성자 연구가 연구로 노화에 따른 폐쇄
→ 연구개발과 교육 연속성 확보를 위한 SONATE, HBS project 사항 소개
 - ✓ LENS (협의체) / ELENA (위원회) 출범이 주목됨

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

10 MEUR
(130억)



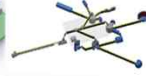
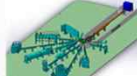
MIRA-TRON
THE WORLD OF NEUTRON



NOVA ERA



Prototype



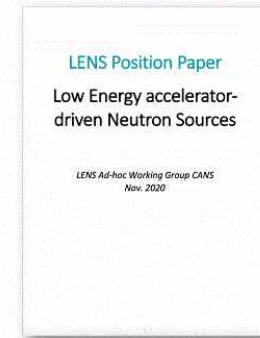
400 MEUR
(5200억)

Table 1. Accelerator parameters used in the HBS project.

	NOVA ERA	Large scale facility
Accelerator	Tandem	Linac
Particle type	Proton / Deuteron	Proton
Energy	10 MeV	70 MeV
Current	1 mA	100 mA
Frequencies	48 - 384 Hz	384, 96, 24 Hz
Duty cycle	4%	~ 4.3 %
Peak beam power	10 kW	7 MW
Average beam power	0.4 kW	~ 3 · 100 kW

League of advanced European Neutron Sources (LENS)

Ad-Hoc Group: Compact Neutron Sources (CNS)



- ✓ adopted by the LENS General Assembly November 2020
- ✓ CANS as important elements of the future European eco-system of neutron sources

but:

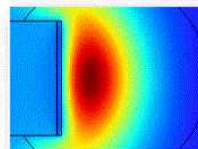
- no operating CANS in Europe
- several ongoing projects
→ need for organization!



European Low Energy accelerator-based Neutron facilities

Association (ELENA) <http://www.elena-neutron.eu/>

- created on September 10th 2020
- **Aim:** to promote cooperation in the field of neutron sources based on an accelerator and a stripping reaction to produce neutrons
- **Commitment of Members:** initiate collaborations, conferences, workshops and meetings in order to create an effective eco-system for research and applications in all areas of science and industry around these neutron sources.



ELENA
European Low-Energy Accelerator-based
Neutron Facilities Association




20 UCANS 현황

국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

» '20 UCANS pre-Web 주요 내용: 시차를

- ◆ (3일차) 북남미
- ◆ (4일차) 일본 BNCT 별도 발표
 - Tsukuba 등의 Linac기반 선원은 주목할 만함

지역	기관	발표자	주제	주요 내용
(3일차) 북/남미	ESS Bariloche/ 아르헨티나	J. I. M. Damian	 ESS 활용 소형중성자원 계획	- nuclear data 용
	ESS Bariloche/ 아르헨티나	J. R. Granada	 - 아르헨티나 연구 현황 소개 - ICNS, Neutron scattering 학회 등 소개	
	SOREQ/ 이스라엘	A. Kreisel	 SARAF facility	- 40MeV/5mA, 표적/동위원소 등은 2023년 예정
	Windsor 대학/캐나다	D. Marquardt	 NFRF	- NRU 연구로 폐쇄 (1957.11.3. ~ 2018.3.31.) - SANS, 영상/diffraction, BNCT 용으로 개발 계획 소개
	SNS/미국	E. Iverson	 SNS	- moderator update TS at SNS
(4일차) 일본	Tsukuba 대학/일본	H. Kumada	 I-BNCT	- 열중성자(0.5eV) > $3 \times 10^{12} \text{n/cm}^2/\text{hr}$ - 8MeV/5mA, Be 표적
	Nagoya 대학/일본	S. Yoshihashi	 - 2.8MeV/15mA + sealed Li target (Ti foil) + compact BSA - 6.6 MW/m ² -> scanned beam 사용	
	Hokkaido 대학/일본	Kamiyama	 HUNS2	- e--beam, fast/thermal/cold neutron, $5 \times 10^{12} \text{n/s}(3.2\text{kW})$
	RIKEN / 일본	Y. Wakabayashi	 RANS-μ	- 노후교량 시험 -> 시연은 Cf-252로 진행
	Ibaraki 대학/일본	S. Koizumi	 ib-SAS	- RANS 내 SANS 측정 장치, 교육용 SW 개발 병행

20 IAEA 비파쇄중성자원 자문/기술회의 개최

» '18.11.26-27 자문회의 개최

- ◆ 목적: 전문가 초빙을 통해 세계적 현황을 파악하고, 기술회의 개최 준비를 위해 자문회의 개최
 - ✓ EU 등 연구용원자로 폐로에 따른 자국 선원(national source)에 의한 연구개발, 교육, 훈련 중성자원 부재 예상
 - ✓ 연구용원자로 비보유국으로부터의 중성자원 수요 증가
 - ✓ IAEA는 기존 원자로를 대체할 수 있는 저선량 중성자원 개발 독려를 통해 선진국 및 개도국의 중성자원 수요 대비하려 함
- ◆ 주요 내용: 초빙 전문가 3인을 통한 현황, 기술회의 주요 세션 구성 등 논의
 - ✓ Frederick Ott : SONATE
 - ✓ Thomas Gutberlet : HBS & NOVA ERA
 - ✓ Dan Berkovits : SARAF
 - ✓ 이동원: DD 선원, 사이클로트론 기반 장치
 - ✓ Mayir Mamtimin (IAEA) : 전자선가속기 기반 신규 시설 소개

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



F1-CS-1704007

26-27 November 2018

A2275

Monday 26 November, 2018

09:00-09:30 Registration at Gate 1
 09:30-09:45 Announcements, Tour de Table, Approval of the Agenda
 09:45-10:00 Ian Swainson, Sotirios Charisopoulos: Aims of the Meeting, and Introduction to the Activities of the Physics Section
 10:00-10:45 SONATE, a CANS for a Neutron Scattering and Neutron Radiography user facility. Frederick Ott, LLB-Saclay, France
 10:45-11:15 Coffee
 11:15-12:00 40 MeV electron linac based photoneutron source development for isotope production and material science. Valeriia Starovoitova (IAEA) Mayir Mamtimin (Niowave, USA)
 12:00-13:30 Lunch
 13:30-14:15 The Jülich High-brilliance Neutron Source Project - Improving Access to Europe. Thomas Gutberlet (FZ-Julich, Germany)
 14:15-15:00 Status and Plan of the compact neutron sources development in Korea. Dong Won LEE (KAERI).
 15:00-15:30 Coffee
 15:30-17:00 Pros and cons of the methods of neutron generation for different applications. What are the challenges to developing these methods of neutron generation? What limits the fluxes, reliability? Do the challenges lie with the accelerators, the targets, the moderators?

IAEA non-spallation neutron source 자문회의 참석 출장보고서

2018년 11월 29일
핵융합기술개발부 이동원

I. 개 요

- 기 간 : 2018.11.26(월) ~ 27(화) (출장기간, 11/25~29)
- 방문지 : 오스트리아 빈 (IAEA A2275)

□ 참석자

- 핵융합기술개발부 이동원
- IAEA CRP "Development of Compact Steady-State Fusion Neutron Sources" 수행과 더불어 가속기 기반 (현재는 DD 핵융합 중성자원도 포함) 소형중성자원 기술자문에 참여하게 됨
- K-CANS 모임을 공동 주최하는 중성자과학연구센터 이창희박사와 공동 조사한 국내 현황을 발표

□ 목 적

- EU 등 연구용원자로 폐로 압박에 따른 교육, 중성자 관련 기술개발을 위한 중성자원 부재 예상
- 연구용원자로 비보유국으로부터의 중성자원 수요 증가
- IAEA는 기존 원자로를 대체할 수 있는 저선량의 중성자원 개발 독려를 통해 선진국 및 개도국의 중성자원 수요 대비하려 함
- 이를 위해 본 회의를 통해 아래의 사항을 파악하고, '19 기술회의 개최를 통해 중성자원 개발 계획의 구체화 추진 중
- 현재의 중요 가속기/핵융합 기반 중성자원의 기술 수준 파악
- 구현 가능성, 시기, 구현을 위해 필요한 업무, 중요 개발 국가 및 기관 파악

20 IAEA 비파쇄중성자원 자문/기술회의의 개최

» '19.11.4-7 기술회의의 개최

- ◆ 목적: '18 자문회의와 동일, 해당회의에서 결정된 세션/초빙논문을 중심으로 회의 진행
- ◆ 주요 내용: 23개의 talk (25명 내외 참석)
 - ✓ EU: HBS/Juelich-독일과 SONATE/LLB-프랑스 등 기존 중형 연구용원자로를 대체할 수 있는 수준의 가속기 기반 중성자원 개발로 연구개발 지속성과 교육·훈련 활용 강조
 - ✓ 한국/일본/중국은 별도의 CANS를 활용한 산업화 모색
 - 아시아 지역은 유럽과는 달리 여전히 연구로가 가동 중이며,
 - 일본과 중국은 오랜 가속기 관련 기술개발 경험을 갖고 있어 차별화 모색
 - ✓ 이스라엘, 아르헨티나 등은 가속기 기반 중성자원 연구 지속
 - ✓ 미국은 PNL을 중심으로 고선속 DD 발생기 등 가장 앞선 산업화 시도 지속
 - ✓ 최근의 우주/대기방사선 연구와 맞물려 일본/미국/한국의 활동 확인
 - ✓ BNCT에 많은 재원이 투자되고 있으며, 연구로를 활용하여 장기간 환자치료까지 한 경험을 가진 일본, 핀란드, 미국을 중심으로 가속기 기반 BNCT 가속화
 - 수년 내 일상의료 서비스 개시 예상
 - 일본은 ~40년에 걸친 연구개발과 축적으로 2020년 의료용 치료기술로 허가 획득
 - ✓ 회의 결과는 결과보고서 및 IAEA-TECDOC으로 발간

International Programme Advisory Committee

The International Programme Advisory Committee comprises the following members:

Thomas GUTBERLET	Germany
Dan BERKOVITS	Israel
Frederick OTT	France
Dong Won LEE	Republic of Korea
Mayir MAMTIMIN	United States of America



Report of the IAEA
Technical Meeting
for
"Non-spallation Accelerator-based Production of
Neutrons"

IAEA Headquarters
Vienna, Austria

04 Nov. to 07 Nov. 2019

Ref. No: EVT 1701936

IAEA non-spallation accelerator-based neutron source 기술회의 출장보고서

2019년 11월 11일

이동원/이창희/윤영국

핵융합기술개발부/중성자과학연구부/방사선이용연구부

I. 개 요

□ 기 간 : 2019.11.4(월) ~ 7(목) (출장기간, 11/2~8)

□ 방문지 : 오스트리아 빈 (IAEA HQ M4/M2)

□ 목 적

- 관련 기술 주제 선정 배경
 - EU 등 연구용원자로의 지속적인 폐로와 최근 프랑스는 물론 유럽의 핵심 연구용원자로인 Orphée/LLB, Saclay(2019.10월말 연구가동중지)와 BER-II/ATR, Berlin 등의 폐로 일정에 따른 교육과 훈련, 중성자생산 연구개발 및 관련 기술개발과 전문인력 유지를 위한 중성자원(national source) 수준의 중성자원을 달하) 부재 예상 => Neutron Hungry in EU!
 - 연구용원자로 비보유국으로부터의 중성자원 수요 증가
 - IAEA는 기존 연구용 원자로를 대체할 수 있는 저선량의 중성자원 개발 독려를 통해 선진국 및 개도국의 중성자원 수요에 대비하려 함
- 본 회의를 통해 아래의 사항을 파악하고, 각 국/기관별 중성자원 개발 계획의 구체적인 내용 파악 및 협력 방안 도출
 - 현재의 중요 가속기/핵융합 기반 중성자원의 기술 수준 파악
 - 구현 가능성, 시기, 구현을 위해 필요한 업무, 중요 개발 국가 및 기관 파악

□ 결 과 (주요 성과 및 결과는 회의록 참조)

- 참여 전문가별 중성자생산 목적의 장치 정보 및 전략 파악

DISCLAIMER
The material reproduced here has been prepared by the participating Member State(s). In principle, no liability can be held responsible for this content.

CONTENTS



10 KCANS 경과 및 국내 현황

'16, '19 개최에 이어 '21 세번째 KCANS 워크숍 (발기문/구성 제안 등 공식화 노력)
현재까지는 자율적 워크숍 수준이나 14개 기관/장비, 54명의 참여의사 확인
현재 운영 중인 중성자선원은 2건, 개발 중인 선원은 3건으로 확인
수요 확인할 수 있는 계획 소개 시설은 6건

20 국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

[UCANS 현황] UCANS web 개최 ('21)

- ✓ (1일차) 아시아: 일본 RANS, 한국 현황, 중국 SANS 및 BNCT
- ✓ (2일차) 유럽: 프랑스 SONATE 및 독일 HBS, EU CANS 모임 출범 등
- ✓ (3일차) 북남미
- ✓ (4일차) 일본 BNCT 별도 발표

[IAEA 비파쇄중성자원 자문/기술회의]

- ✓ UCANS와 상당부분 중첩, IAEA의 비원자로 방식 중성자원 관심에 주목 필요

30 요약 및 제언

30 요약 및 제언

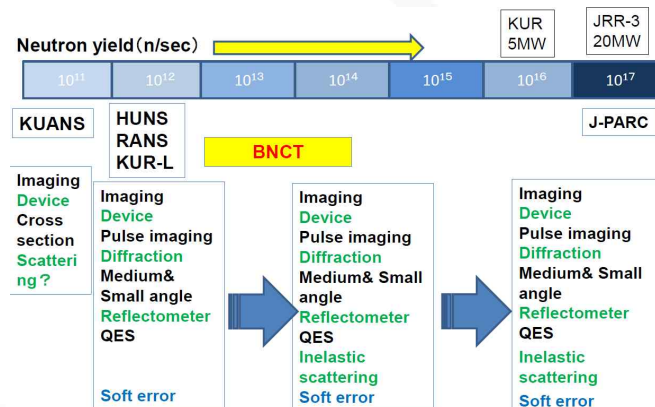
요약: 국내외 접근방식의 차이

» (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



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



30 요약 및 제언 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
- ◆ 정식적인 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 CCANS 와의 양자/삼자간 교류 추진 등

» (기타) 회원/기관별 제안/건의 의견 적극 반영

CONTENTS



10 KCANS 경과 및 국내 현황

‘16, ‘19 개최에 이어 ‘21 세번째 KCANS 워크숍 (발기문/구성제안 등 공식화 노력)
현재까지는 자율적 워크숍 수준이나 14개 기관/장비, 54명의 회원 확인
현재 운영 중인 중성자선원은 2건, 개발 중인 선원은 2건으로 확인
수요 확인할 수 있는 계획 소개 시설은 6건

20 국외 CANS 현황 (UCANS, IAEA 관련 회의)

[UCANS 현황] UCANS web 개최 (‘21)

- ✓ (1일차) 아시아: 일본 RANS, 한국 현황, 중국 SANS 및 BNCT
- ✓ (2일차) 유럽: 프랑스 SONATE 및 독일 HBS, EU CANS 모임 출범 등
- ✓ (3일차) 북남미
- ✓ (4일차) 일본 BNCT 별도 발표

[IAEA 비파쇄중성자원 자문/기술회의]

- ✓ UCANS와 상당부분 중첩, IAEA의 비원자로 방식 중성자원 관심에 주목 필요

30 요약 및 제언

지속적이고 긴밀한 국내 기관/장치/전문가간 협력 도모, 생산적인 결과물 포함
국외 협력 확대 추진 (정보공유와 협력체계 구축)
기타 다양한 의견 수렴해 구체적인 틀을 짜 나가길 희망

감사합니다.



이동원 (dwlee@kaeri.re.kr)