

# 정책과제 결과 소개와 하나로 중성자원과 활용

[2015년 정책과제; 현장 가동형 중성자래디오그래피  
시스템 기술개발 방안 연구]

2016.10.26

이창희@한국원자력연구원 하나로이용연구본부

김태주, 문명국, 김계령, 허민구, 양승대@한국원자력연구원,  
채종서@성균관대학교

- **현장 가동형 중성자 라디오그래피 시스템  
기술개발 방안 연구**

- 2014.12~2015.8~2015.11

- **연구 내용**

- 국내외 기술 역량 분석
- On-site NR 시스템 개발 전략 수립
- 국내외 기술 수요 분야와의 연구 개발 및 이용 전략 도출
- 개발 기술 및 장치의 활용도 제고

# 연구 내용 및 범위와 추진체계



# 연구 배경 및 필요성

- KAERI, ADD, ....; NI / BNCT
- 2013.3, RIKEN
  - RANS & '실용적' 수준의 중성자 영상 획득 가능성을 보임
- 2014.6.30, 한국원자력연구원, 서울대학교
  - 소형중성자원과 이용 워크숍 (Workshop on Compact Neutron Sources and their Applications)
  - 한국과 일본의 주요 관계자들을 초청하여 양국의 현황을 소개하고, 기술개발 방향과 해결해야 할 기술적 요소, 장애 등을 논의함
- 2014.12, 정책과제 착수
  - 국내 기술현황 상세 파악
  - 기술개발 방향 설정 등

**Workshop on compact neutron sources and their applications**

Date | June 30, 2014  
Location | Bldg. 129, Seoul National University

**Topics**

- ❖ Compact accelerator neutron sources in Japan
- ❖ RANS-RIKEN accelerator driven neutron source and its high expectation for industrial applications
- ❖ Future plan on KBSI accelerator: Neutron facility
- ❖ Development of Li target in Nagoya university
- ❖ Neutron focusing optics and cold neutron source development for compact neutron source
- ❖ Cyclotron design for neutron source
- ❖ Fast neutron detector developments for compact neutron source
- ❖ Neutron imaging activities at HANARO

**Invited Speakers**

- ❖ Prof. KIYANAGI Yoshiaki, Nagoya Univ.
- ❖ Dr. OTAKE Yoshie, RIKEN
- ❖ Dr. WON Mi Sook, KBSI
- ❖ Prof. TSUCHIDA Kazuki, Nagoya Univ.
- ❖ Dr. YAMAGATA Yutaka, RIKEN
- ❖ Prof. CHAI Jong Seo, Sungkyunkwan Univ.
- ❖ Dr. TAKETANI Atsushi, RIKEN
- ❖ Dr. MOON Myungkook, KAERI

**Hosted by**

- ❖ Center for Korean J-PARC Users

**Supported by**

- ❖ RIKEN
- ❖ Nagoya University
- ❖ KAERI
- ❖ Pusan National University
- ❖ Sungkyunkwan University
- ❖ KBSI

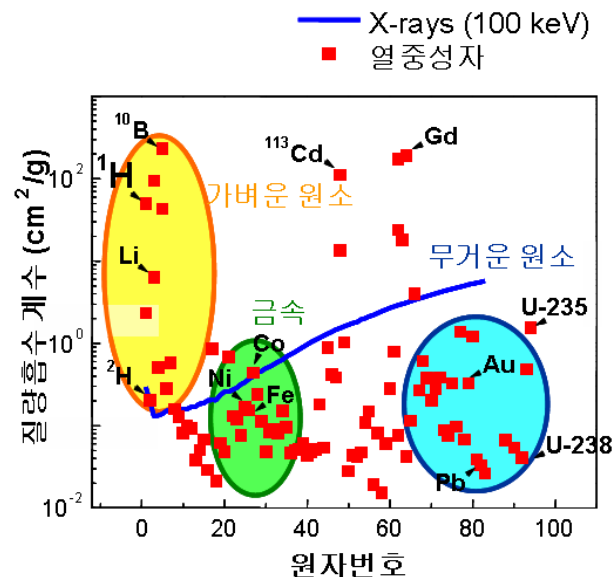
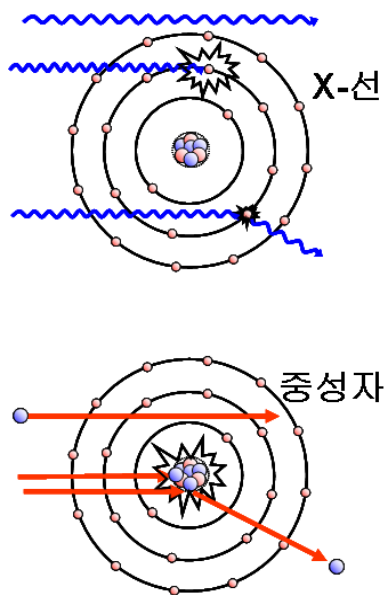
**Organizer Contacts**

- ❖ Dr. LEE Chang-Hee, KAERI (leech@kaeri.re.kr)
- ❖ Prof. LEE Seung Wook, Pusan National Univ. (seunglee@pusan.ac.kr)

**Logos:** J-PARC, RIKEN, KAERI, Pusan National University, KAERI, KBSI

# 연구 배경 및 필요성

- 중성자는 원자핵과 반응하고, 반응확률(즉, 산란단면적)은 원자핵 고유특성임
  - ✓ 낮은 원자번호(수소, 산소, 질소, 산소, 붕소 등) 물질(예, 물, 플라스틱, 나무)과 같은 가벼운 물질도 감쇄계수의 차이를 보여 식별 가능한 영상을 획득할 수 있으며, 동시에 높은 원자번호(예, 대부분의 금속 등) 물질에도 높은 투과도를 갖는 특성으로 복합물질, 혼합 물질을 구별 가능
  - ✓ X-선으로 보기 어려운 복합구조체 등을 선명하게 볼 수 있음 → 상보적 이용
- 연구용 원자로로는 이동이 불가능하며, 초기 투자비가 높고, 접근성이 상대적으로 낮음
- 기간산업체, 군, 방위사업체 등에서 현장에서 독립적으로 이용 가능한 중성자 영상시스템 및 소형 중성자원의 개발이 필요함.



X-선 및 중성자 투과 특성

## • 미팅

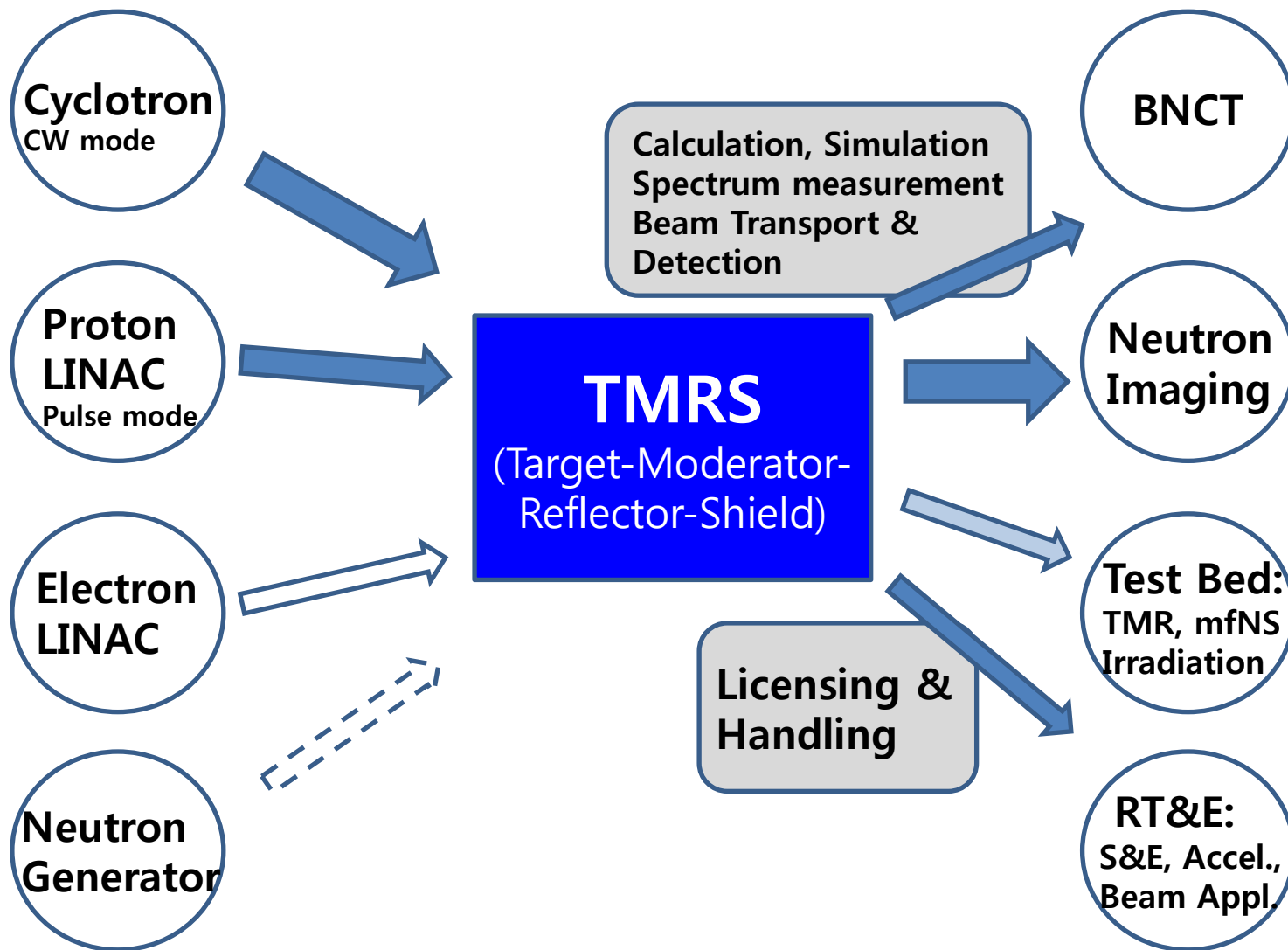
- 과제회의 7회, mini-workshop 3회
- 원자력학회 초청 강연 1회

## • 참여자

- 본원/하나로 연구로: 이창희, 문명국, 김태주
- 본원/핵연료 전자선가속기: 이용덕
- 본원/핵융합 중성자발생기: 오병훈
- 경주/양성자선형가속기: 김계령, 김한성
- 정읍/싸이클로트론 30 MeV : 양승대, 허민구
- 수원/싸이클로트론 9 MeV : 채종서, G. Mitra
- 부산/싸이클로트론 13 MeV : 박성균, 이승욱, 김정호
- 부산/KBSI 양성자 선형가속기: 이병섭, 원미숙
- 대전/KRISS 중성자발생기: 박현서 (w/ibs 김영덕)
- 서울/KCCH 싸이클로트론(50 MeV)-BNCT: 박승우
- 산업체: 박성한@(주)엔바이로코리아, 김이경@(주)라드팜
- 일본: Y.Kiyanagi@나고야대학, M.Furusaka@북해도대학, [Y.Otake@RIKEN](mailto:Y.Otake@RIKEN), etc...

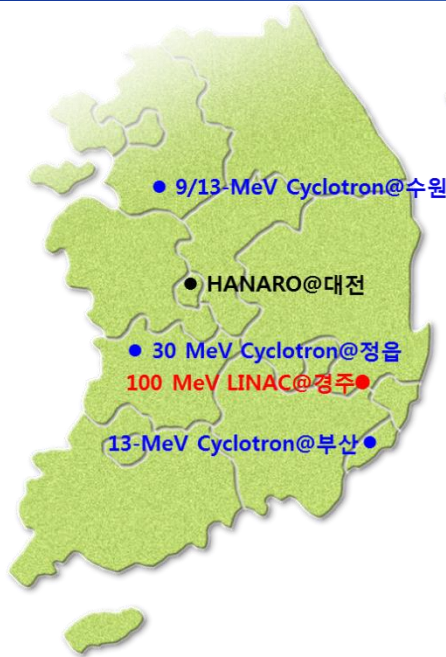
## • 해외 현장 시설과 활동 조사, 견학 및 자문

- RIKEN, KURRI/KU, Nagoya U, Hokkaido U, Minami Tohoku Hospital



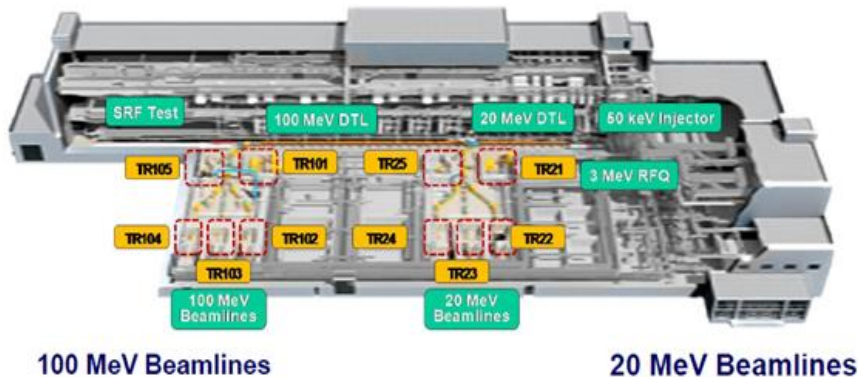


# 국내 현황



- 경주 양성자가속기연구센터는 100/20 MeV 대용량 양성자가속기 시설을 개발하여 2013년부터 운영 중
- 원자력의학원/성균관대학교에서는 의료용 사이클로트론 (1/13/30 MeV) 가속기 개발, 현장 적용
- 성균관대학교에서는 9 MeV급 소형 사이클로트론을 자체 개발함.
- 한국원자력연구원의 연구용 원자로인 하나로에서 중성자 영상 획득과 이용기술이 장기간 개발, 이용됨

➔ 핵심 요소기술이 통합되어 현장에서 사용 가능하도록 집약하는 기술개발과 실증, 운영 경험 축적, 인허가 등 필요함



경주 100 MeV 양성자가속기 개요

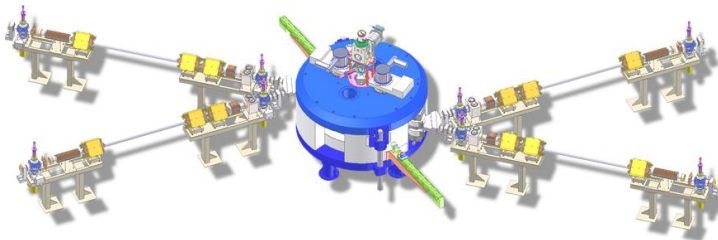
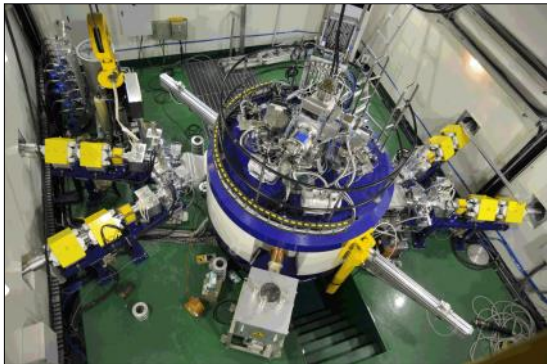


정읍방사선연구소 30 MeV Cyclotron



# 30MeV 싸이클로트론(정음)

## ■ 싸이클로트론 현황



- 2005 ~ 2008    싸이클로트론 개발 및 제작
- 2009.4        싸이클로트론 종합연구동 완공
- 2009         RFT-30 싸이클로트론 조립
- 2010 ~ 2013   시운전 및 정상화
- 2014 ~ 현재    RI 생산 연구 및 이용자지원 수행

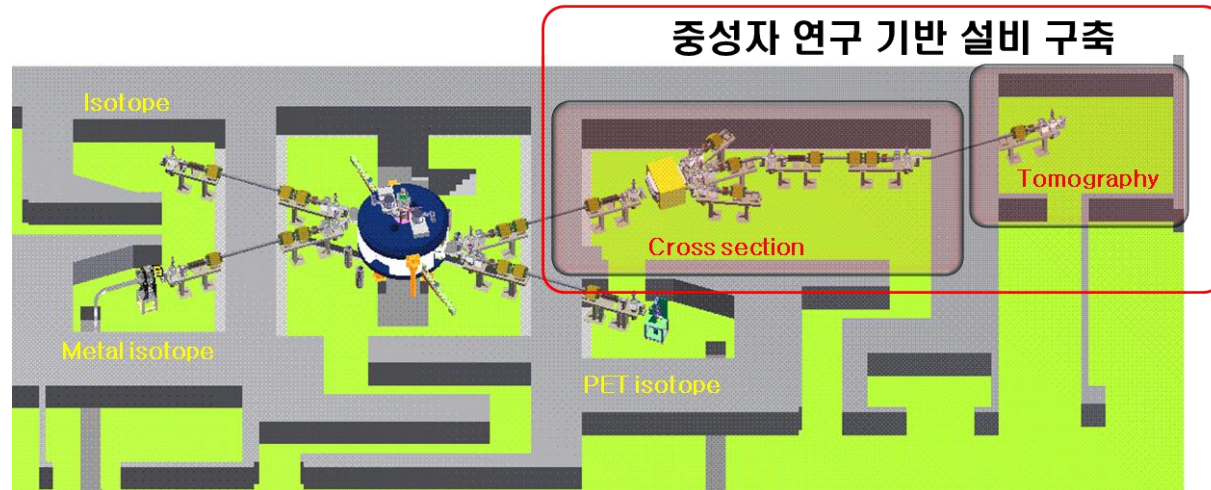
## ■ 싸이클로트론 운영 및 이용

싸이클로트론 가동현황	2 M/Y	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 2014년 : 32주(평균 주2회 2시간), 20주(냉각계통개선)</li> <li>• 2015년 : 34주(평균 주2회 2.6시간), 18주(부품 및 성능개선)</li> <li>• 2016년 : 34주(평균 주3회 3시간), 18주(성능개선)</li> </ul>
연구지원 현황 (2015년)	외부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 학 연 : 35건, 11개 기관</li> <li>• 중소기업지원 : 1개 기관</li> </ul>
	내부	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 방사선기술개발 3개 사업, 자체사업 2개 사업,</li> <li>• 이용부서 : 3개 부서</li> </ul>

# 30Mev 싸이클로트론(정음)

## ■ 싸이클로트론 활용 가능성

- 중성자 연구 기반 설비 구축을 위한 공간 확보
- 동위원소 생산용 대전류 표적 설계 기술 확보
- 빔라인 확장 및 설계를 위한 기초자료 확보
- 중성자영상(NR)과 BNCT 연구 가능 : beam-time 확보 용이



## ■ 중성자발생장치를 위한 필요사항

- p,n 핵반응 이후 생성 중성자의 조정을 위한 moderator 연구
- 중성자 발생 표적을 위한 빔라인 확충
- 표적의 원격교체 시스템 개발

# 성균관대학교 cyclotron 시설



9 MeV Cyclotron (SKKUCY-9)

General Specifications	
Accelerating Particle	$p$
Beam Energy	9 MeV
Beam Current	Max 100 $\mu$ A
RF Frequency	83.2 MHz
RF Power	10 kW
Ion Source	PIG internal source



13 MeV Cyclotron (TR-13)

General Specifications	
Accelerating Particle	$p, d$
Beam Energy	13 MeV ( $p$ ) 6.5 MeV ( $d$ )
Beam Current	Max. 150 $\mu$ A
RF Frequency	73.3 MHz
RF Power	15 kW
Ion Source	H- cusp



- \* TR13 이온원 빔 인출 확인 (BaF6 with colliding H-)
- \* Deuteron beam을 이용한 (d,n) 핵반응에 의한 중성자 발생 가능
- \* Multicusp 이온원 빔 전류 : 3 mA

- 중성자 차폐 시설 구축 필요
- Cyclotron upgrade (빔전류: 70 $\mu$ A -> 150 $\mu$ A)

# 부산대학교 cyclotron 시설



13 MeV Cyclotron (KIRAMS-13)

General Specifications	
Accelerating Particle	$p$
Beam Energy	13 MeV (p)
Beam Current	50 $\mu$ A
RF Frequency	77.3 MHz
RF Power	20 kW
Ion Source	PIG internal source

- 국내 기술로 제작된 최초의 SF (Sector Focused)형 의학용 방사성 동위원소 생산용 cyclotron
- 독립 건물로서 대면적 실험공간 등 시설 공간 환경 대단히 우수
- 사이클로트론 유지보수, 운영체계, 관리 요구
- 운영 및 연구개발, 교육훈련 체계 없음



# 100 MeV 양성자가속기 (경주)

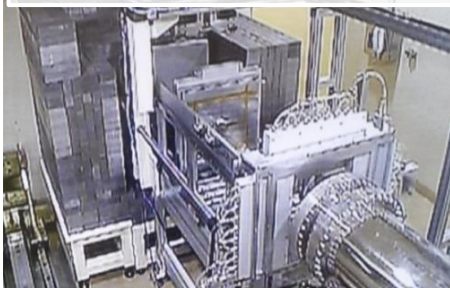
## ■ 양성자가속기 현황

- 2002 ~ 2012 양성자기반공학기술개발사업 수행
- 2012. 12. 100 MeV 양성자가속기 및 연구센터 완공
- 2013. 1. 양성자가속기연구센터 운영 착수
- 2013 상반기 KINS 시설검사 완료
- 2013. 7. 빔 이용 지원 착수

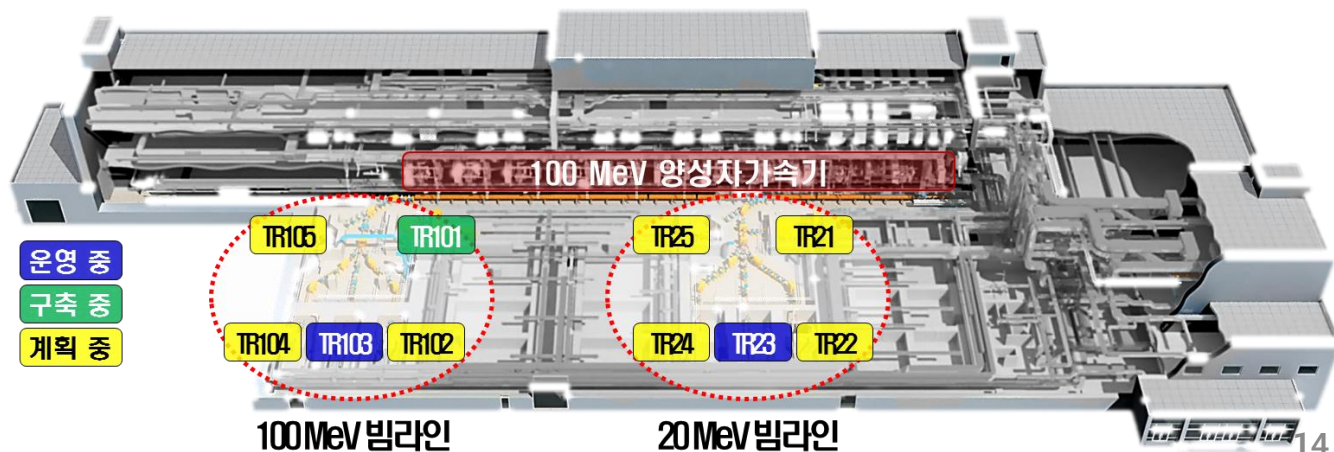
### ● 20 MeV 표적실 (TR23)



### ● 100 MeV 표적실 (TR103)



- 2개 빔라인 구축 운영 중, 1개 빔라인 (RI용) 구축 완료 (2015)
- 1개 빔라인/년 구축 예정



# 가속기 기반 중성자 표적

## ■ 시설에 따른 장단점 비교

~13 MeV 사이클로트론	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 소형 가속기 이용, 활용 연구에 적합</li> <li>• 저활용 국내 사이클로트론을 이용한 시설 구축도 가능</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• blistering 현상으로 표적 파열 발생 가능성이 높음</li> <li>• 박판 사용의 경우 표적의 기계적 강도 저하</li> </ul>
~ 30 MeV 사이클로트론	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 높은 에너지, 전류량 조사를 통한 중성자속 증가 가능</li> <li>• 국내 기술로 기 구축된 시설 공간 활용 가능</li> <li>• 양성자 인출 에너지 변경 용이</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 높은 표적 열발생으로 표적 파손 빈도</li> <li>• 표적 조사전류의 세기가 제한적</li> <li>• 표적 주변 방사화로 교체 작업을 가정한 설계 필요</li> </ul>
~100 MeV 양성자가속기	장점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 펄스 형태의 빔으로 양성자 빔 제어, 이용 다양성 → 펄스 중성자 선속과 스펙트럼 이용한 비행시간분광, 파장 선택 분광 등 다양한 이용 가능</li> <li>• 빔 사이즈 크기 변환 용이</li> </ul>
	단점	<ul style="list-style-type: none"> <li>• 장치 규모가 크고 운영 기술의 보편성이 아직 낮음</li> </ul>



# 가속기 기반 중성자 표적

## ■ 중성자 발생 표적의 문제점

### ▪ Blistering :

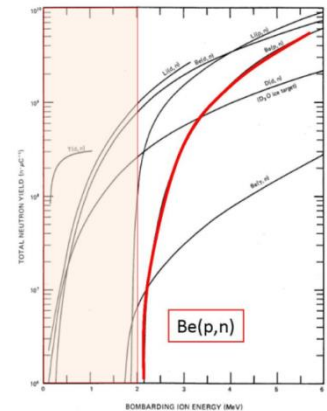
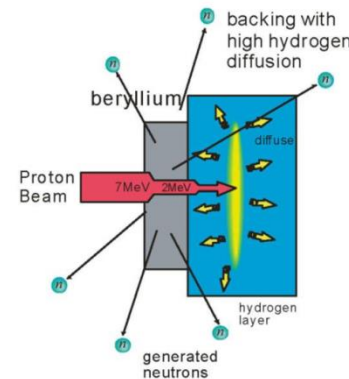
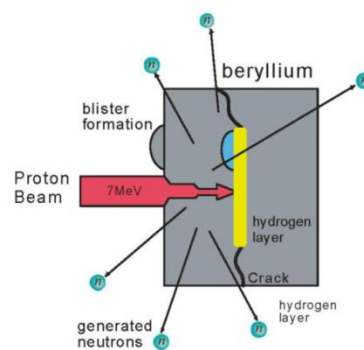
- Bragg peak 영역에 위치하는 수소이온에 의해 발생
- $\text{Be}(p,n)$  핵반응은 2 MeV 이상의 양성자에 이루어짐

### ▪ 냉각

- 고중성자 선속(flux)를 얻으려면 고전류량의 조사가 필요
- 전류량에 따라 단위면적 대비 열발생 (열밀도: heat density)이 높음
- 표적의 기하학적 형상 변화와 중성자 산란을 방지하면서 냉각효율을 높이는 것이 제한적임

### ▪ 중성자 발생표적의 방사화

- 양성자빔과 생성된 중성자에 의해 표적의 방사화가 이루어짐
- 발생 표적의 원격교체 시스템 개발과 방사성폐기물 감소를 위한 재질선택 필요



# 가속기 기반 중성자 표적

## ■ 중성자 발생 표적 대안

### ▪ Blistering 현상 방지

- 일본 : Bragg peak point 위치 변경
  - 저에너지 가속기를 사용하므로 Be 박판을 사용 : 기계적 강도 저하
  - 수소화수계수가 높은 금속을 base metal로 사용
- 대안
  - Be 후면에 냉각수를 위치 : Bragg peak 위치에 냉각수가 존재
  - 기저 표적 금속의 두께가 얇을 경우 재질을 변경하여도 사용수명에 영향은 낮음

### ▪ 냉각

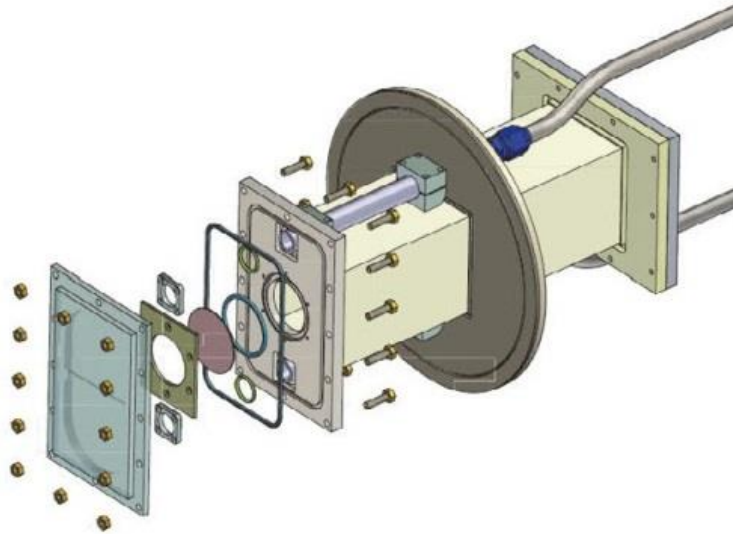
- 양성자 빔 크기에 따른 중성자영상의 품질 변화에 대한 해석(실험)이 필요
- 중성자 발생표적을 기울이는 정도에 따른 영상 품질 해석도 필요
- 이상의 해석으로 중성자발생표적의 효율적인 냉각 설계가 가능

### ▪ 중성자 발생표적의 방사화

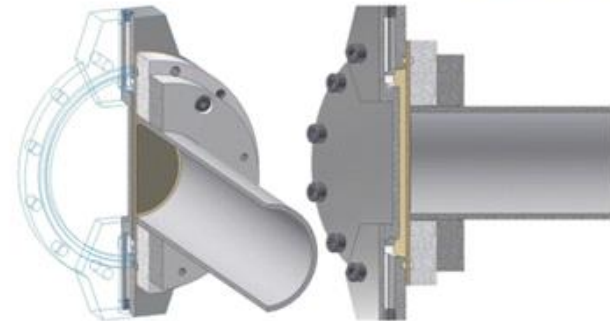
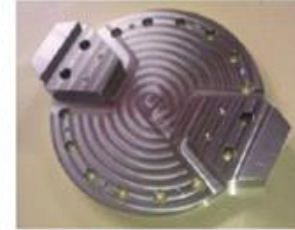
- 일본 : 수소화수계수가 높고 방사화 정도가 낮은 금속재질로 V(바나듐)을 선택
- 냉각수가 Be 뒤쪽에 위치하는 경우 표적의 방사화는 Be만 고려
- 다른 금속을 사용하는 경우 표적 교체를 자동화 함으로서 작업자 피폭저감
- 교체부분의 크기를 최소화 함으로서 폐기물 발생을 최소화

# 가속기 기반 중성자 표적

## ■ 중성자 발생 표적 대안



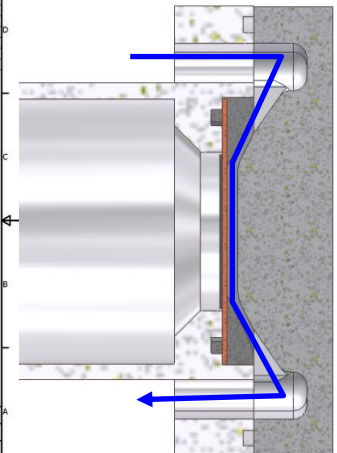
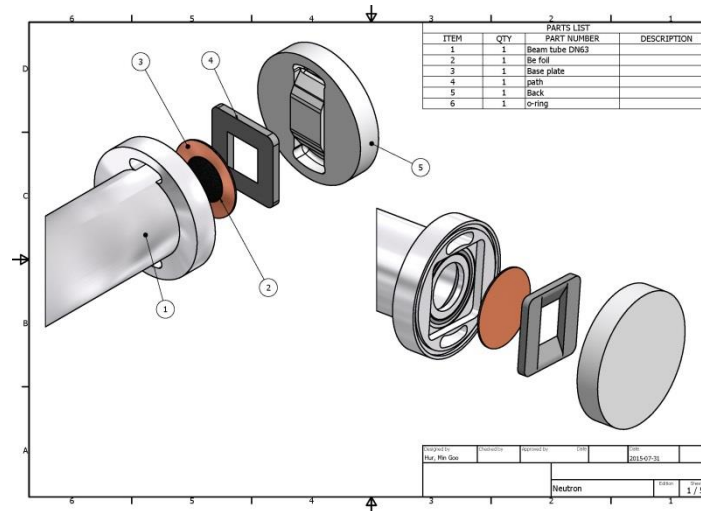
■ LENS 중성자 표적 (미국)



■ RANS 중성자 표적 (일본)

### ■ 대안 개략도

- 13MeV 이하 : Be-Cu-Water-PE
- 13MeV 이상 : Be-Water-PE
- 냉각유량 : >15 L/min
- 허용압력 : >10 kgf



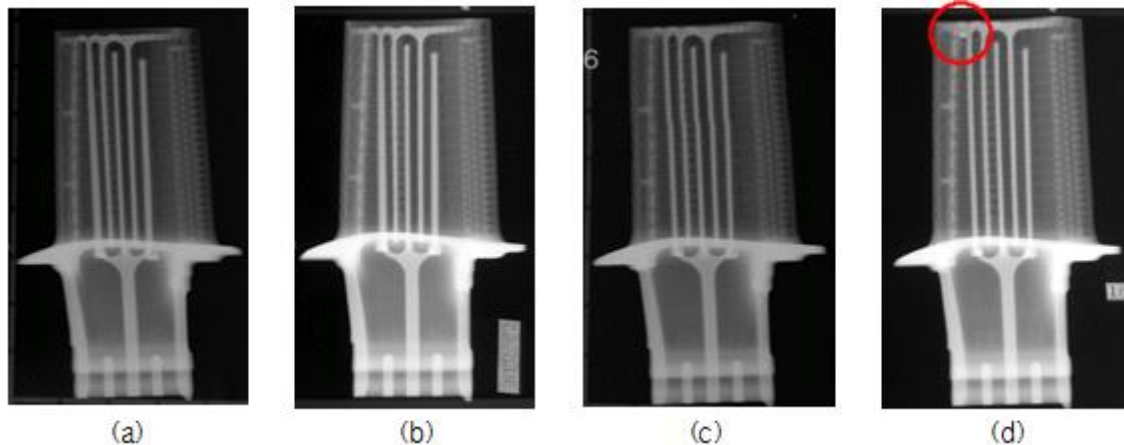
# 산업적 이용, 연계 네트워크

- 국방관리대학원
- 공군 군수사령부/항기소
- 한화테크윈(전 삼성테크윈), (주)한화종합연구소,
- ADD
- 현대중공업 미래기술연구소
- (주)라드팜, (주)엔바이로코리아
- (주)테크밸리, (주)비츠로테크
- 민군겸용기술개발 사업,...

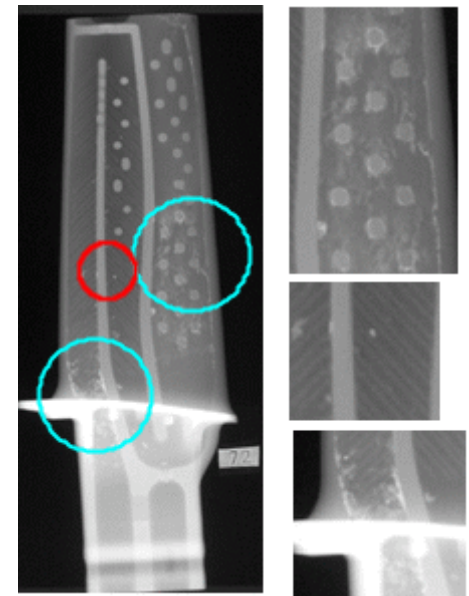
- *6/9/15 MeV 전자선가속기에 의한 X선영상*
- *X선/중성자선 복합영상화 시스템(hybrid imaging system)*

## • Defense applications

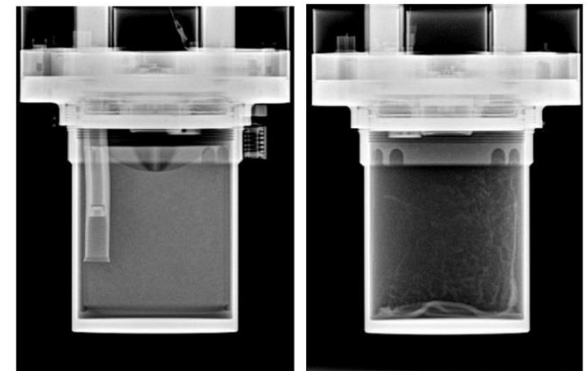
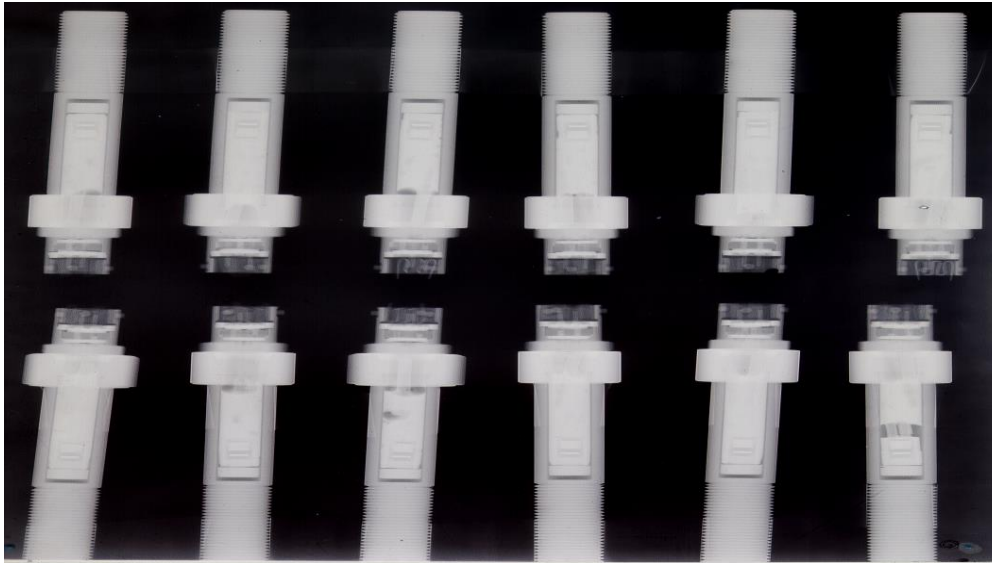
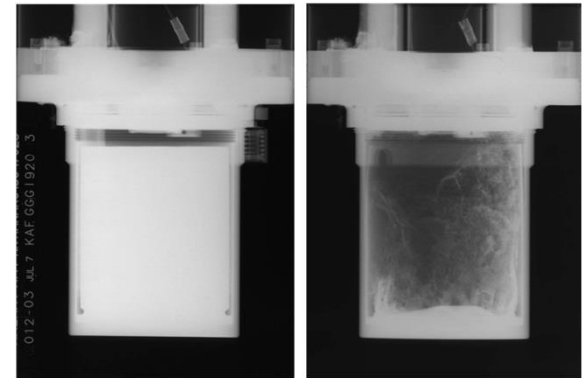
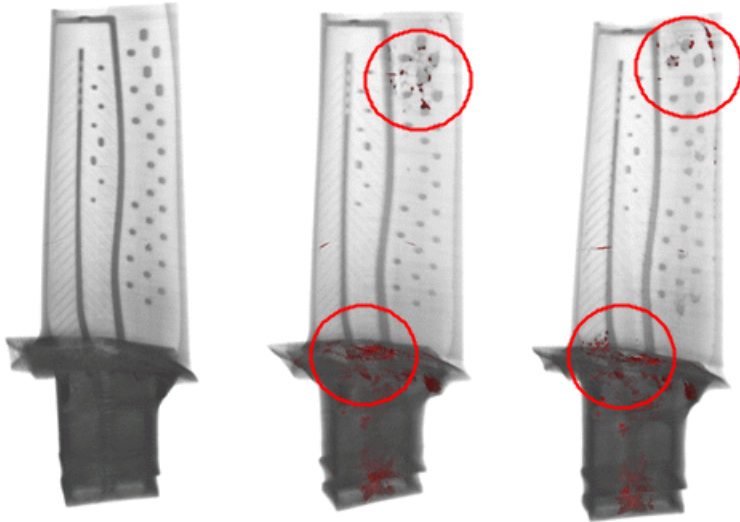
- 현무용화공품 코드 조립체 비파괴 검사
- 육군 보유 탄약 신관의 Fuse 결함 검사
- 전투기 엔진 turbine blade 사용 전/후 내부결함 검사
  - 중성자를 이용한 TB 이물질 탐지기법 연구, 항공기술연구소, 2009~2010
- AIM-9 유도탄 추진체 내부 구조 결함 검사
  - 유도탄 수명관리를 위한 신뢰성평가 기술연구, 항공기술연구소, 2012~13
- 인공위성(나로호) 부품 미세 결함 비파괴 검사



(a) New TB   (b) New TB, Gd-tagged   (c) Used TB   (d) Used TB, Gd-tagged



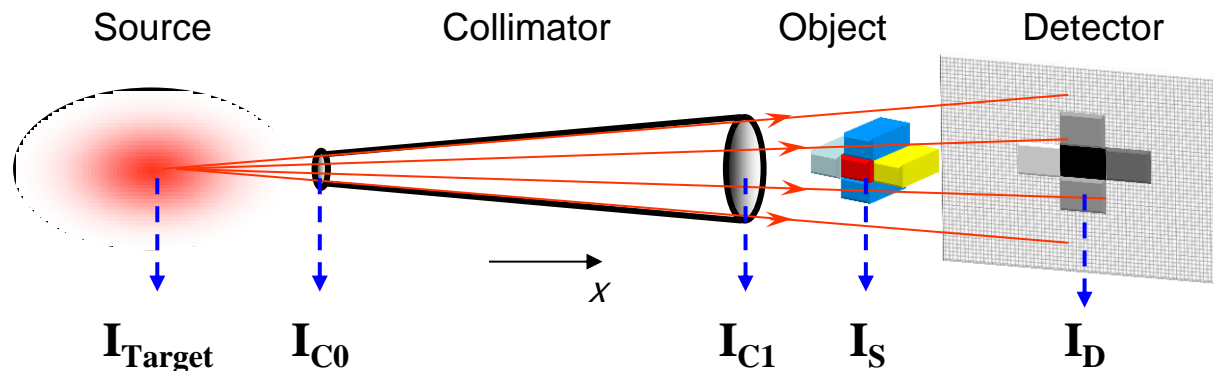
# 여러 가지 시험 예...





# 결론 및 제안(1) – 시설 사양

- 산업 현장의 실용적 중성자 영상에서 필요한 중성자 발생장치 사양
  - L/D~100 수준의 기하학적 구조에서
    - Port nose에서 시료(L)까지 5 m (500 cm)라면 표적 크기(D)는 ~5 cm
  - 시료 위치 실효 열중성자속 최소  $5.0 \times 10^5 \text{ n/sec/cm}^2$  (실제 시료를 지나 검출기로 가는 방향성 flux, 즉 brightness)를 얻어, ~100 sec 노출시간으로
  - 영상 분해능 ~0.1 mm(100  $\mu\text{m}$ ) 수준의 질적 영상을 얻으려면
  - 수평공 선단(port nose)에서  $5.0 \times 10^9 \text{ flux}$  (즉, brightness)를 생산해야 하고,
  - 열중성자 속을 얻기 위한 표적에서의 입자 수송은  $7 \sim 10 \text{ MeV} / 1 \text{ mA}$ 가 실용적인 냉각한계이며, 이를 충족시킬 TMR Assembly (Target-Moderator-Reflector-Shielding & ports) 설계, 제작, 평가에 의한 실증 필요



- 정책과제 착수 시점에 RIKEN은 RANS 기반으로 대규모 장기 프로젝트 착수
  - 정책과제 기간에 RANS에서 자체 실증 시험을 하지 못함
  - RIKEN RANS가 제공한 한정된 자료로 판단할 때
  - 가속기 구조나 출력은 용도에 따라 선택
    - 연속빔이 유리할 경우는 cyclotron
    - pulse 빔이 필요할 경우는 p-LINAC
    - 대학에서의 ER&T 수준에서는 저출력으로 유지보수가 쉬운 e-LIANC
  - RANS의 현 구조와 배치에서 On-Site 수준의 중성자 영상은 산업체에서 일상적 사용에는 아직은 일부 미흡!
    - 영상 분해능(resolution), 시간(turn-around time), FOV(field-of-view)
    - Pass/Fail, Feasibility, Testing and Verification → OK!
  - 그러나 수 년 안에 상용화 달성 가능성은 거의 확실함!

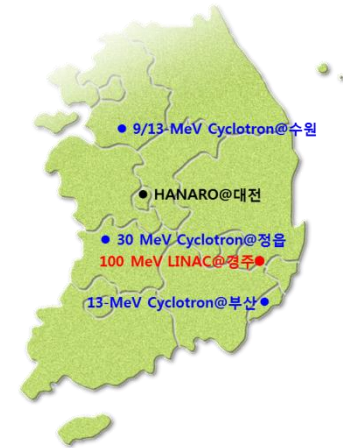
## 결론 및 제안(2) – 국내 역량과 문제점

- **가속기 → CANS를 위한 가속기 기술은 이미 성숙!**
  - Cyclotron: continuous mode, 30 MeV까지 국내 기술 확보, 13 MeV는 준상용화 수준
    - 고전류화, 안정화, 구조 유연성, 전체적인 성능 개선 필요
    - 정읍 첨단방사선연구소, 수원 성균관대학교, 부산대학교
  - LINAC: pulse mode, 100 MeV까지 국내 기술 확보
    - 가속기 부품, 시스템 안정화(자체 개발자의 범위를 넘어 제3사 사용수준)
    - 경주 양성자가속기연구센터
- **중성자 선원 집합체(TMRS: 표적-감속기-반사체-차폐)**
  - 계산 위주의 경험, 실제 시스템 구축과 실증 경험 극히 미흡
  - 집중적인 R&D와 시스템 구축과 인허가, 취급 경험 축적 필요
- **중성자 수송과 영상 획득, 이용**
  - ~30년 이상의 R&D, application 경험 축적(연구로 2호기, 하나로)
  - 2000년대 이후 최신 기술 축과 동시에 강한 산업적 이용 추진
- **KCANS 결성 필요**

# 결론 및 제안(3) – 연구개발과 산업적 이용을 함께!!

## • Joint R&D on TMRS assembly

- 대전, 경주, 정읍, 하나로, 성대, 한양대, 부산대,...
- 다양한 TMRS 집합체 설계, 구축, 특성평가, 실증
  - Wide dynamic range neutron spectrum measurement
  - Radioactivity, components replacement, licensing,...
- 방사선기반확충사업, 연구회융합연구사업(클러스터),...



## • 지역적 R&D/공동이용센터 구축

- 경주 양성자가속기연구센터 → p-LINAC based Compact NS
- 정읍 첨단방사선연구소 → 30 MeV cyclotron based CNS
- 성균관대(cyclotron)/부산대(lab) → 9/13 MeV cyclotron ER&T CNS
- .....

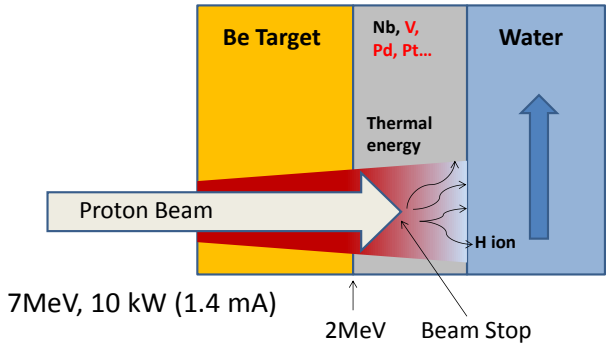
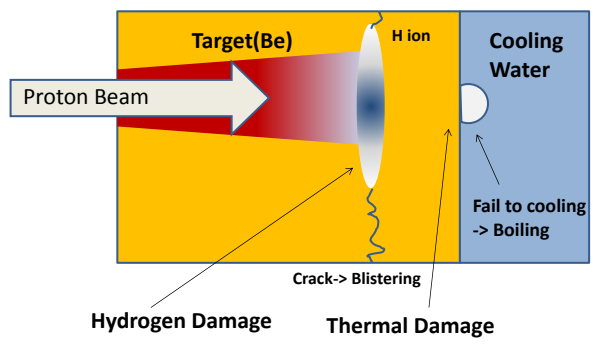
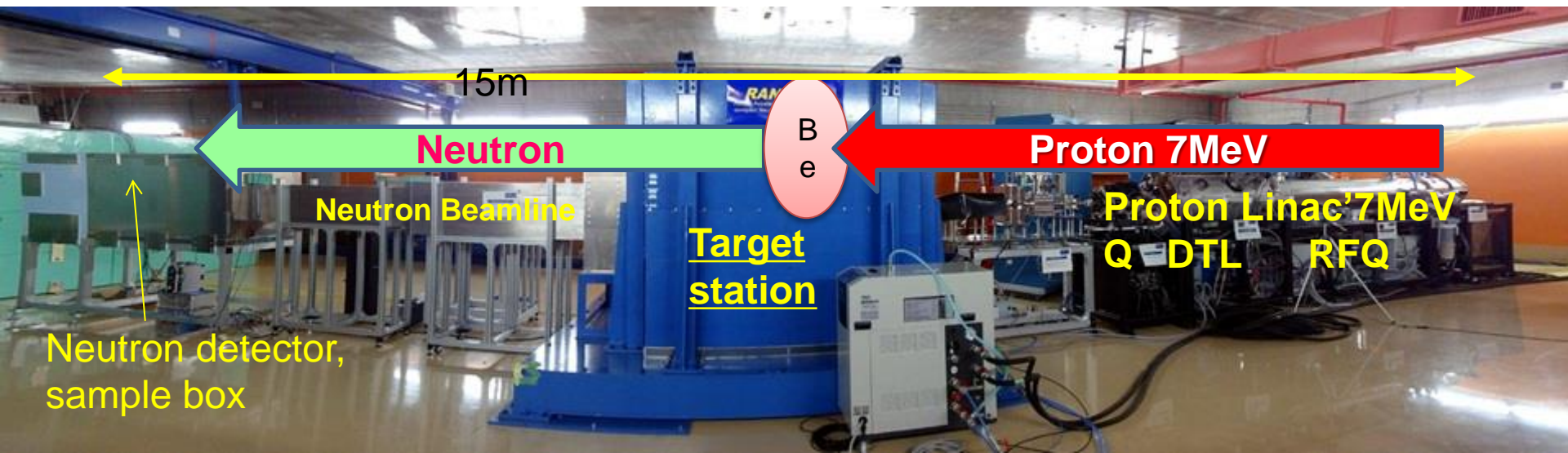
## • On-Site NR system 개발

- 방위산업 이용을 1차 목표 → 국방항공군수밸리, 대전탄약창

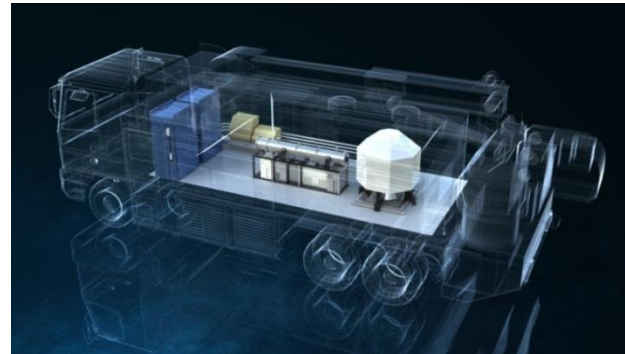
## • BNCT

- 30 MeV/1 mA cyclotron 기반 시스템
- 10 MeV 이하 p-LINAC 기반 시스템

소형중성자원의 실용화(직전 단계!) 구현



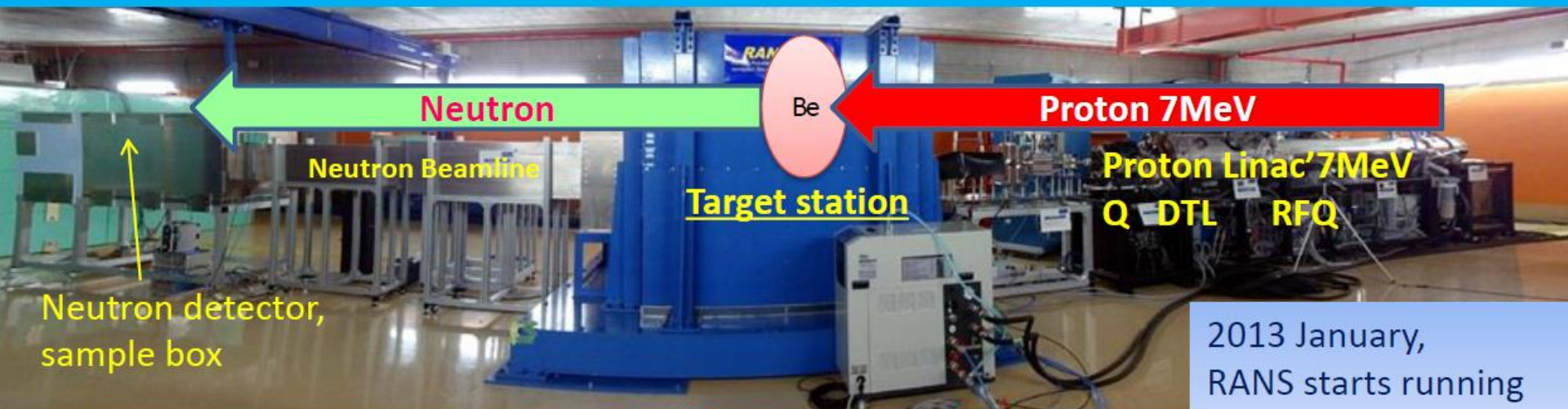
blistering 문제 해결



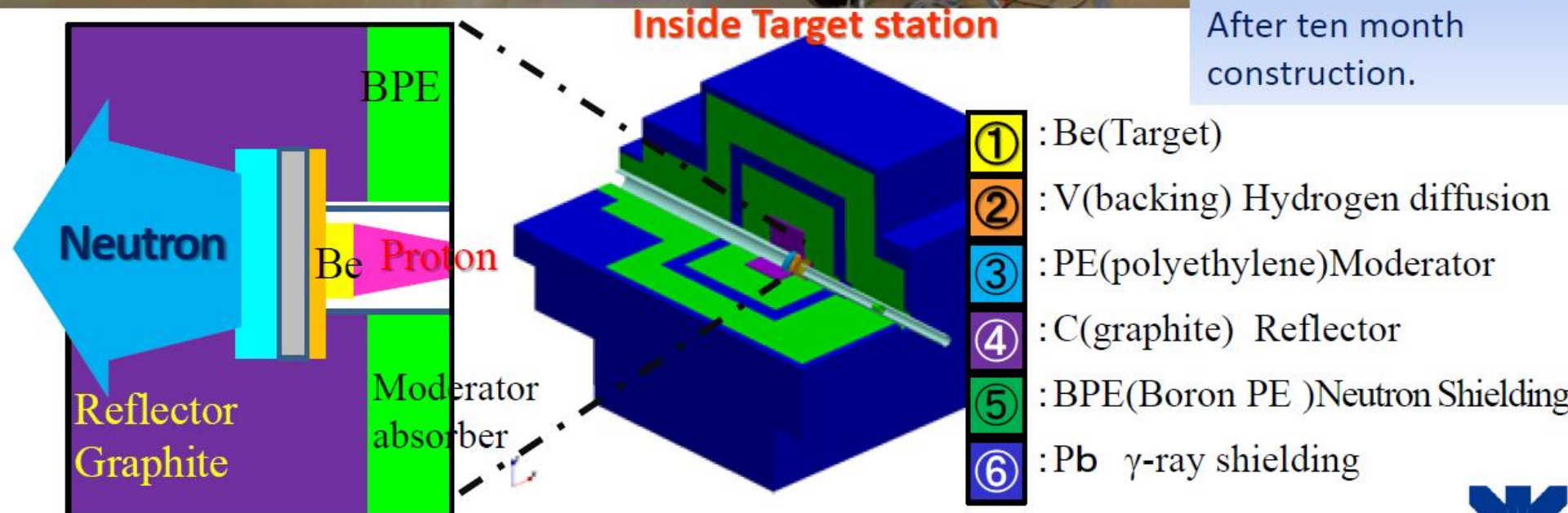
이동형 개발 중(10년 사업)



# RANS compact Neutron source for realization of practical use, and development of trans-portable instrument for infrastructure safety



2013 January,  
RANS starts running  
After ten month  
construction.

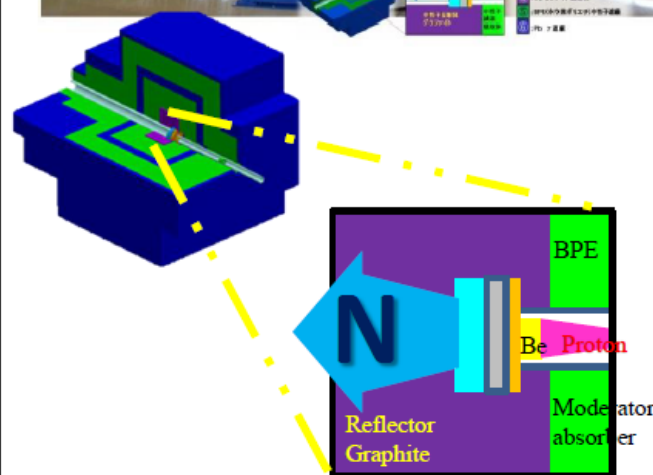
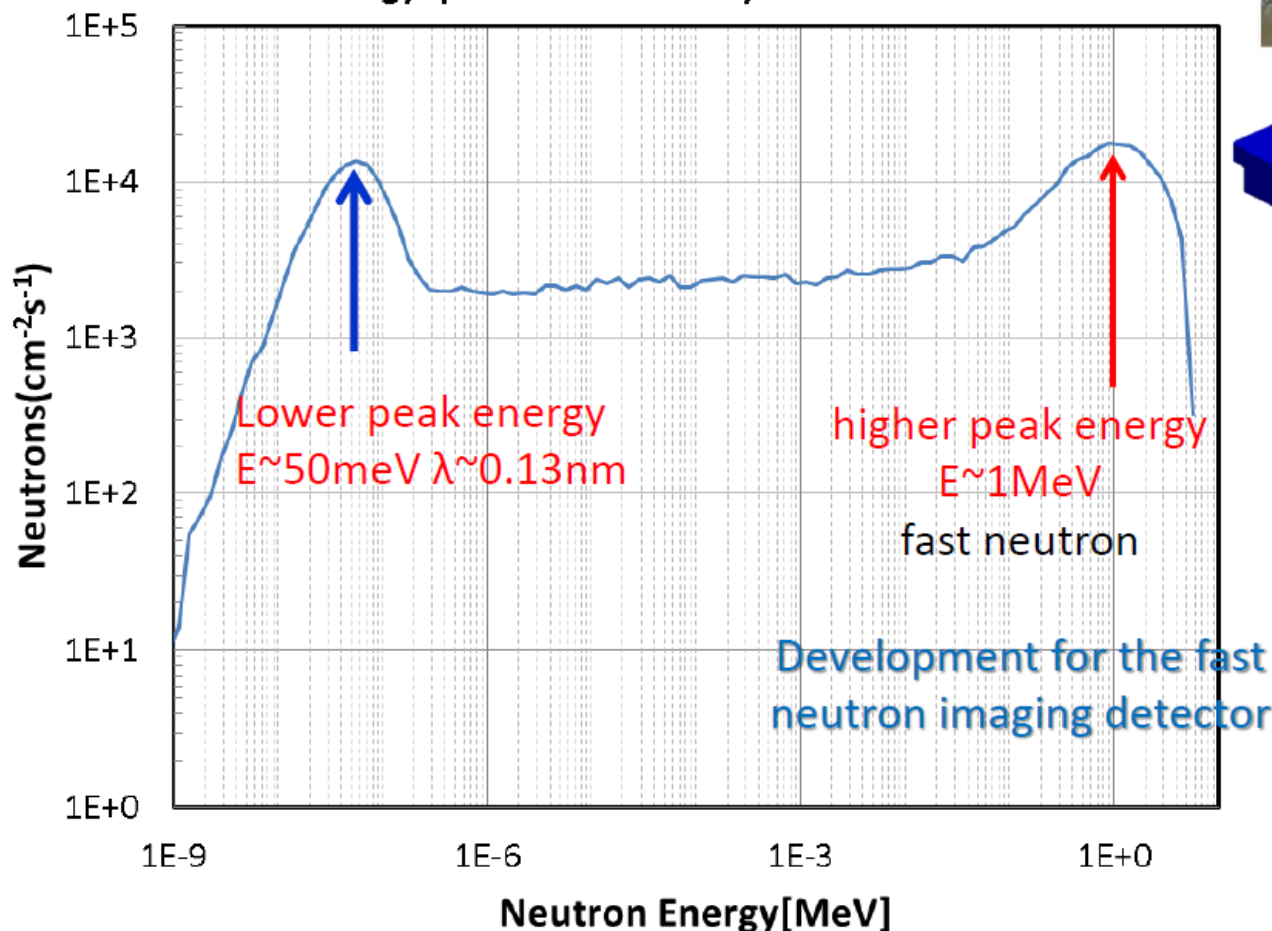




# RANS' neutron spectrum (PHITS simulation)

@ maximum averaged current 100μA

Neutron energy spectrum at 5m away from the moderator



- ① : Be(Target)
- ② : V(backing) Hydrogen diffusion
- ③ : PE(polyethylene)Moderator
- ④ : C(graphite) Reflector
- ⑤ : BPE(Boron PE )Neutron Shielding
- ⑥ : Pb  $\gamma$ -ray shielding

# RANS의 성과와 feasibility tests

## • 성공요인

- 일본내 북해도대학을 중심으로 40년 이상의 기초연구
- RIKEN 연구팀의 절박함 → 표적에서 돌파구 기술, 실용적 접근
  - 10억엔 이하의 비용/기획과 준비 2년, 기술개발 착수 2년 만에 기술 실증
- 다양한 배경의 연구진으로 그룹을 결성
- 처음부터 강한 산업적 이용을 지향하며 기초연구, 시설구축 추진

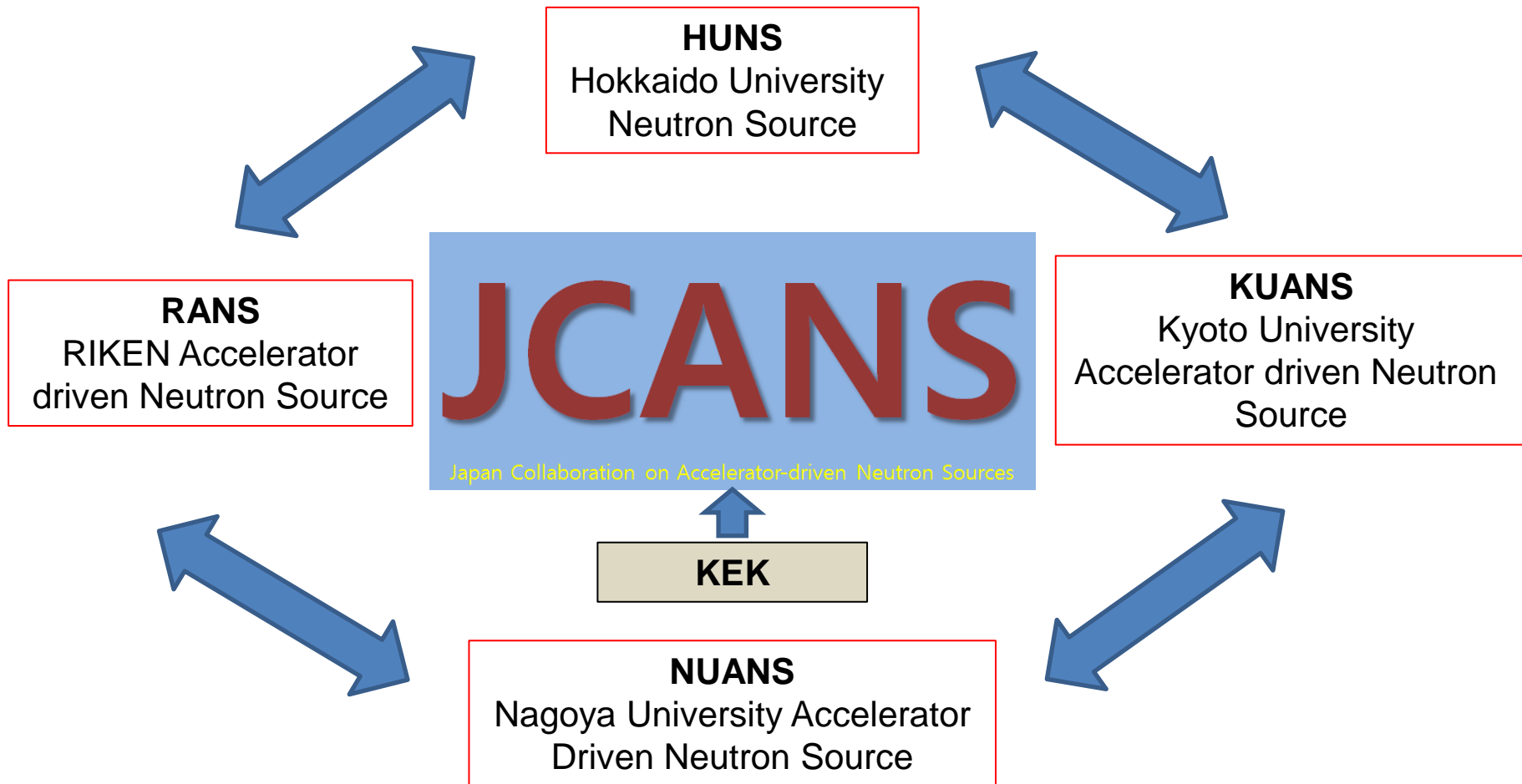
## • Feasibility tests

- 중성자 영상 ← 부식, 수분침투 가시화 ← KOBELCO, → ISIJ consortium
- 집합조직 측정 ← metallographic observation (← 소성변형)
- 중성자 회절 측정 ← under elongation, residual austenite

## • 추진 방향

- new RANS → 새건물, 새로운 설치(인허가 대기), 추가 인력 지원
- 2개 BL 증설: 일반 BL 1개, 소형 냉중성자원 설치
- 이동형 중성자 영상 시스템 개발 프로젝트 착수(10년)
  - Steel bridges : 2차대전 이후 70년대까지 경제개발 시대에 건설된 수많은 철강교의 노후화에 따른 건전성, 유지보수, 철거판단 등.. (미국 NIST)
  - Fast neutron imaging, diagnosis protocol, licensing
  - System development

## Network of Compact Neutron Sources in Japan



→ JCANS - 2014

- Maintain connectivity & momentum!
- Evolved to become closer link to spallation sources and to be medium powered neutron sources as a replacement for to-be-closed RR
- Wide range of development activity for various practical applications

*UCANS-V • May 12-15, 2015 • INFN, Padova, Italy*

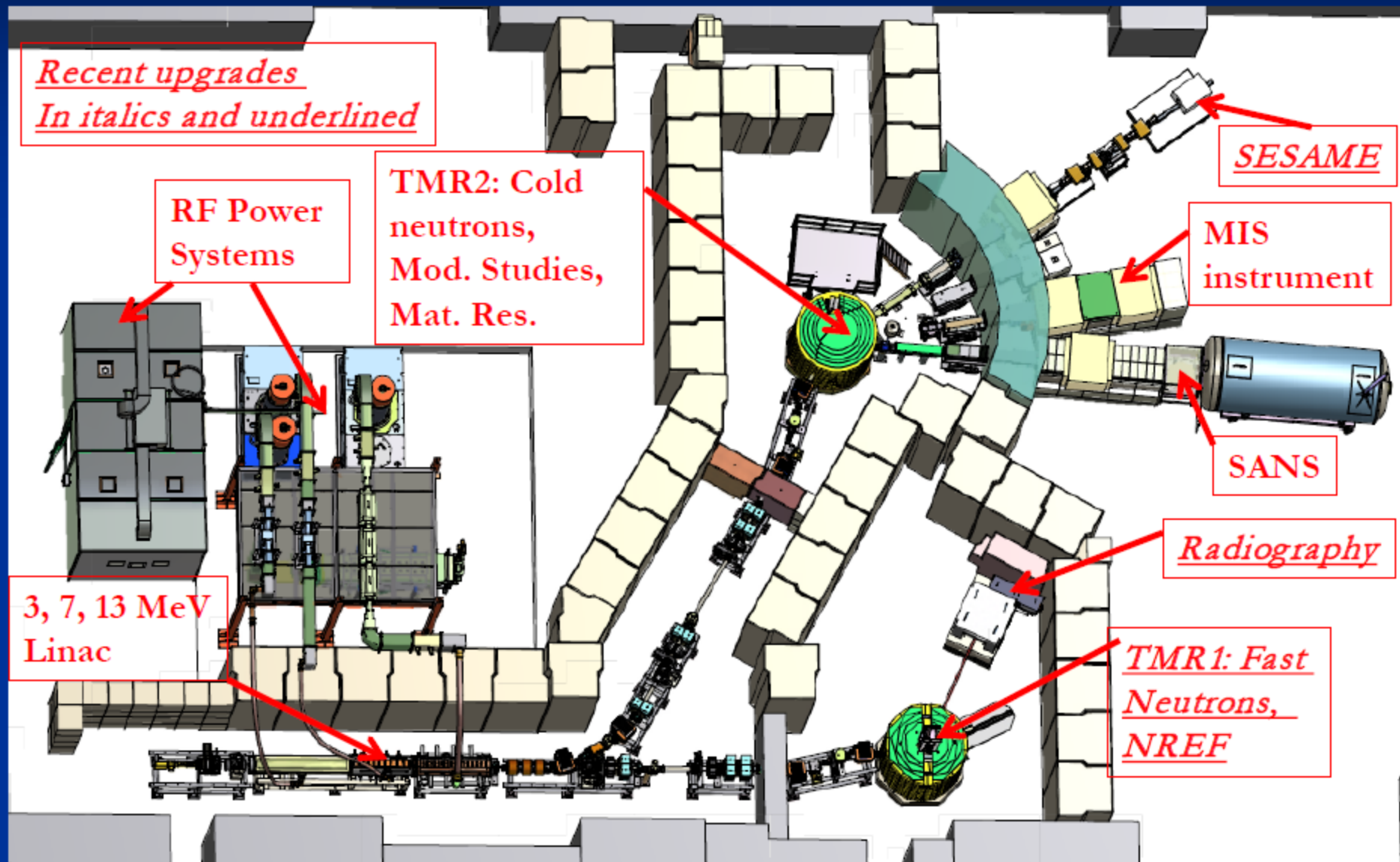
# Cross-disciplinary applications → *each requires tailored configuration*

Table 3. Preferred characteristics of CANS applications. The underlined items represent the preferred configurations.

Applications	Neutron-matter reactions	Accelerator systems	Neutronics & energies	Remarks
Interrogation of materials/structures	$(n, \gamma)$	PGNAA	P, CW	cold, thermal
		DGNAA	P, CW	cold, thermal
		NRCA	P, CW	epithermal
		FNAA	P, CW	fast
		APT	P (ns)	$D(T, \alpha)n$ , $E_n=14\text{MeV}$
Radiography & imaging	$(n, \gamma)$	+ PGNAA	P, CW	cold, thermal
		+ NRCA	P, CW	epithermal
		+ FNAA	P, CW	fast
		RITS	P	thermal
		polarization	P, CW	cold, polarized
Irradiation effects on electronics	Neutron-induced soft errors (SEU)	<u>P</u> , CW	fast, selective	High flux to speed up testing/certifying processes, matching test and environmental spectra
Neutron capture therapy	BNCT	P, CW	epithermal	Compact and suitable for operation in hospitals, good flux and clean beam, development of boron-bearing pharmaceuticals
Isotope production	${}^N\text{X}(n, \gamma)\text{X}^{N+1*}$	CW	selective	Compact, prevalently located near isotope processing and generation facilities
Nuclear data & cross section measurements	reaction & scattering	<u>P</u> , CW	all	Flexible and multi-purpose beamline and endstations
Nuclear astrophysics	n-capture, $\beta$ -decay, $(n, \gamma)$ decay rate, calorimetry	<u>P</u> , CW	fast	High-intensity beams needed for microgram samples
ADS science & technology	subcritical fission, transmutation	P	thermal to epithermal (?)	Intense beams & reliable operation

# LENS(*Low Energy Neutron Source*), Indiana University

*D. Baxter et al@CEEM, 2014, UCANS2015*





# LENS OPERATIONS

- Total funding for research ~ \$1-2M/yr (DOE, DOC, NSF, other)
- LENS Operations
  - Annual operating budget ~\$300K
  - ~3 staff members ~1/2 time, electricity, supplies, equipment
  - Lots of support from graduate students and academic staff
  - Ran for approximately:
    - ~ 2700 hours in 2012 (~75-90% reliability, RF trips and target issues)
    - ~1700 hours in 2013 (reliability limited mainly by target issues)
    - ~ 1300 hours in 2014
- In coming years we expect to:
  - Expand instrumentation development (spin manipulation, moderators, radiography with novel contrast, ...)
  - Expand use of TMR1 (radiography, radiation effects).
  - Increase connections to National facilities: Advanced Radiography, transfer of spin-manipulation technology, moderators ...

- **Technological**

- Instruments development
- T-M-R-S researches

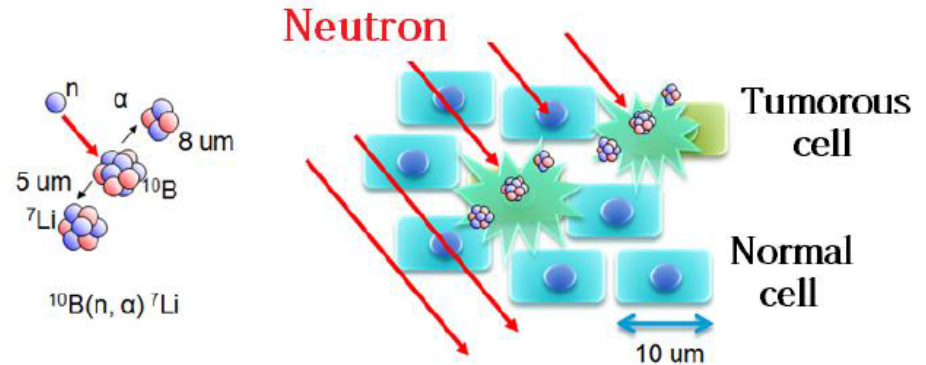
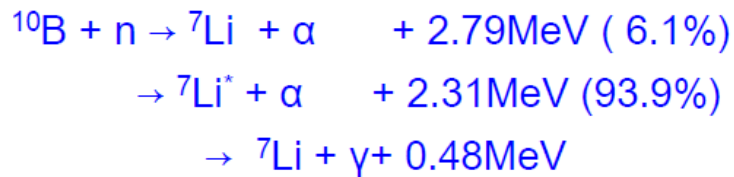
- **Education & Training**

- Neutron graduate education program (with U.Missouri, SNS) and lectures at summer/winter schools
- Joint WS on neutron education (SNS) and instruments development (NIST)

- **Programme**

- Joint research projects/proposals in areas such as  $^3\text{He}$  neutron polarizer development (NIST/SNS), instrument upgrades (LANL), and moderator development (SNS, LANL, ESS), looking at novel radiography (NIST/ORNL)...

# BNCT (Boron Neutron Capture Therapy) 원리



- Abbreviated to **BNCT**.
- A noninvasive therapeutic modality for treating locally invasive malignant tumors.
- Two step procedure: (1) injection with a tumor-localizing drug containing boron. (2) irradiation with thermal or epi-thermal neutrons.
- The above reactions are utilized. The ranges of the  $\alpha$  and Li-7 particles are approximately 8 and 5  $\mu\text{m}$ , respectively.

- 아이디어는 1940년대부터 논의되었으나 최초의 의료적 처치는 1951년 미국에서 시도, 70년대까지 많은 시도, 이후 일본에서 주도적이고 지속적 연구
- 2012년까지 BNCT는 연구로 기반 시설에서 → KURRI-BNCT(KUR-HWNIF) ← thermal neutron
  - 1974.5 최초 의료적 처치 시도 → 1990.2월부터 공식 BNCT 의료처치 시작
  - 1995.11월 61 환자 치료예/6년
  - 1995~6, HWNIF **remodeling!** → almost pure thermal to epi-thermal neutron
  - 1996.11 열중성자 BNCT처치 재시작, 1997 열-열외중성자 혼합 BNCT 처치
  - 2001 21 BNCT 환자 처치/~5년
  - 2001.12 최초의 구강암 환자 처치, 2002년 뇌종양 처치 확장
  - 2005 간암, 폐암 등의 BNCT 처치 가능성이 제시
  - 2006 KUR 정지, 193 환자 BNCT 처치
- 2009년 세계 최초의 가속기 기반 BNCT (C-BENS Cyclotron-Based Epi-thermal Neutron Source))가 KURRI에 설치되고, 2012년부터 시험적 의료적 처치 시작
  - SHI 30 MeV/1 mA Cyclotron을 KURRI에 제공하여 공동기술 개발 착수
  - 2010, BNCT 의료처치 재시작
  - 2014.9 235 환자 BNCT 처치 실적: 뇌종양, 피부암, 머리/목, 폐, 간, 유방암, 안구암, 다리,...
- 일본 내는 물론 세계적으로 다양한 그룹이 cyclotron, LINAC 이용하여 개발 시도 중 → SHI/KURRI/MTH 남동북병원에 전용, BNCT 의료상용시설 건설 중

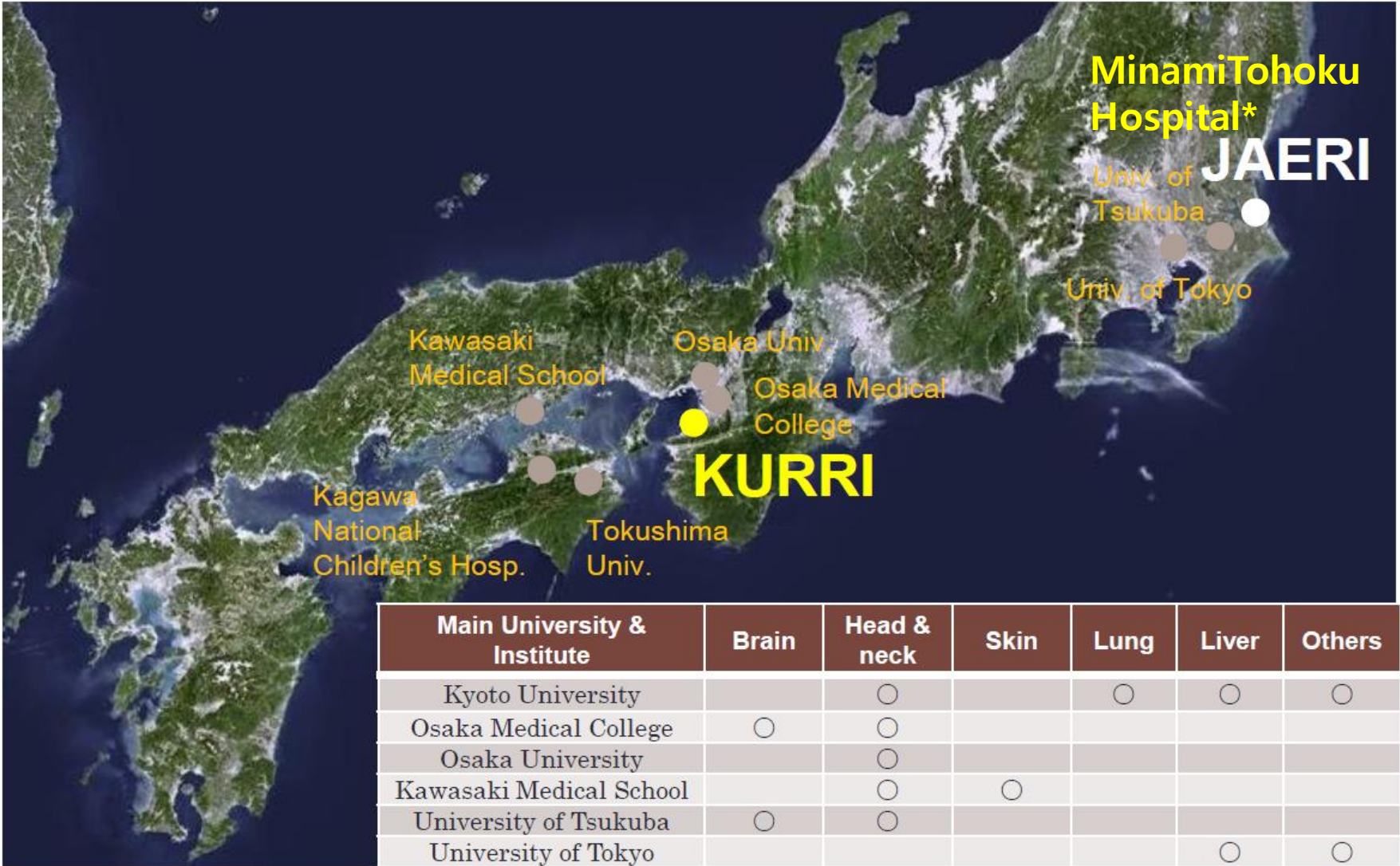
# Comparison between KUR-HWNIF and C-BENS

Facility	KUR-HWNIF	C-BENS
Facility type	Reactor-based	Accelerator-based
Neutron beam	Thermal - epi-thermal	Epi-thermal only
Purpose	Research and study	Clinical use only
BNCT-application	New challenge Wider application	For tumors with the sufficient experiments and achievements at KUR-HWNIF
Tumor type	Brain tumors Head & neck tumors Skin cancers Lung tumors Liver tumors Others	Recurrent brain tumors Recurrent head & neck tumors



- **Neutron energy spectrum; MeV to meV**
  - Multi-foil NAA methods → keV range difficult!
  - Bonner's ball methods, foils, ToF, He-3 counter
- **Primary gamma ray**
  - TLD/glass detector: TLD of BeO enclosed in Quartz glass capsule
- **Neutron & Gamma ray dose rates**
  - Thermal ( $< 0.5$  eV), epi-thermal (0.5 eV-10 keV), fast neutron ( $> 10$  keV) & gamma rays 'separately' measured
  - Ionization chambers ; wall materials, thickness and gases are changed vs neutron energy spectrum and n-gamma mixing ratio → multi-ionization chamber system (MICS)
  - Dose distribution in a phantom: TLD & foils NAA
- **Beam monitoring**
  - Beam port side by MICS
  - Patient surface side by Au, Mn foild NAA → on-line system by SOF(scintillation optical fiber) detector
- **B-10 concentration monitoring**
  - PGNAA on patient blood sample → average B-10 concentration
  - PGNAA-SECT system under study
  - gamma-ray telescope system

# BNCT network in Japan





# The *High Brilliance* Neutron Source Project

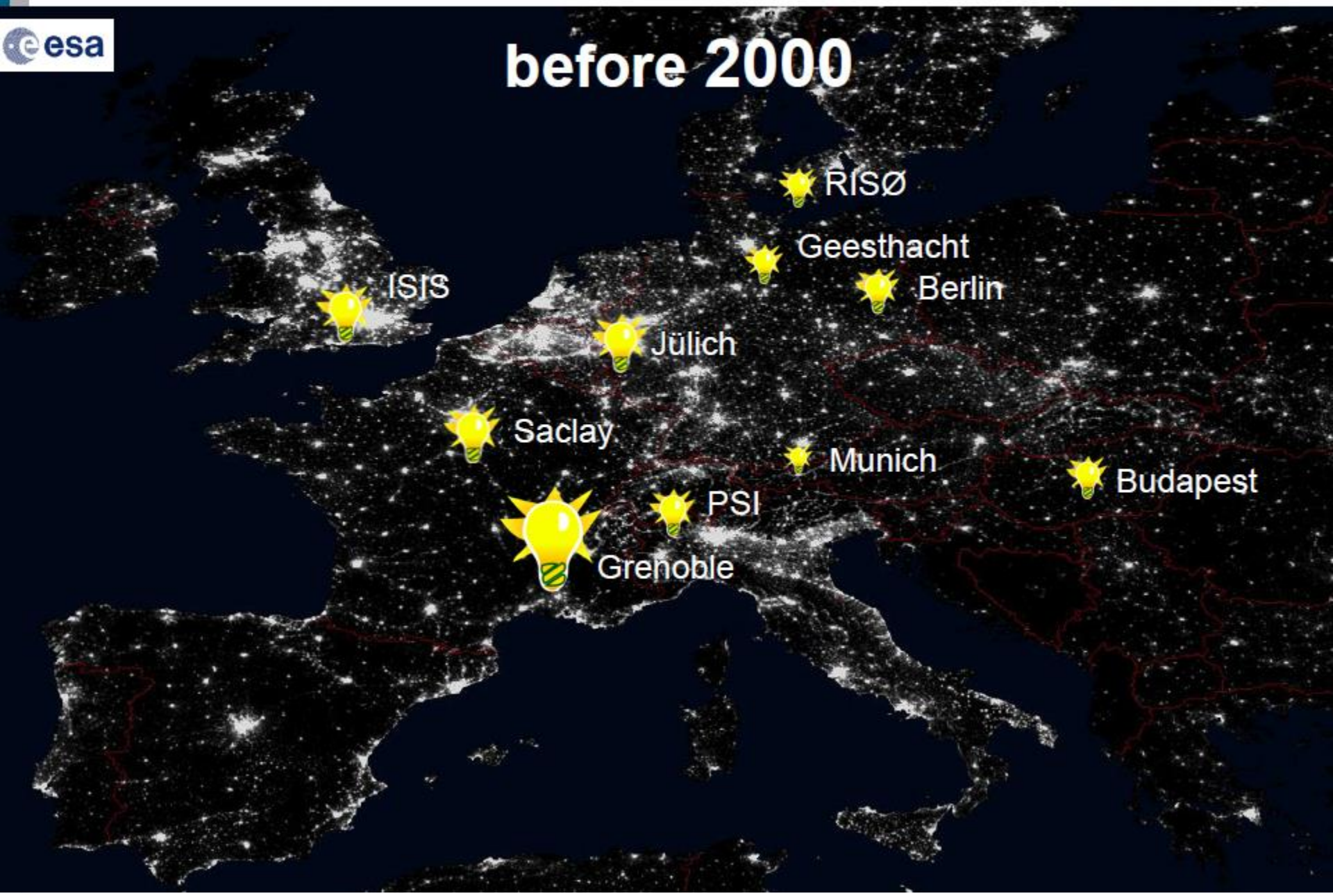
Thomas Brückel

Jülich Centre for Neutron Science, Forschungszentrum Jülich  
& Heinz Maier-Leibnitz Zentrum, Garching

*The HBS Workshop, 27-28. October 2015, Unkel*



## before 2000





after 2030



ISIS



ESS



MLZ



SINQ



# Network of Sources!

Strength of research with neutrons in Europe based on a **network of sources** with different capabilities and profile:

- **high flux** sources for the most flux hungry experiments
- **medium flux** sources for
  - proof-of-principle experiments
  - specialized instruments and experiments
  - method development
  - sheer capacity
  - user education
  - user recruitment (!)
- **low flux** sources for user recruitment, training, methods, ...  
see e.g. JCANS network

**ESS:** gain factors of two to three orders of magnitude

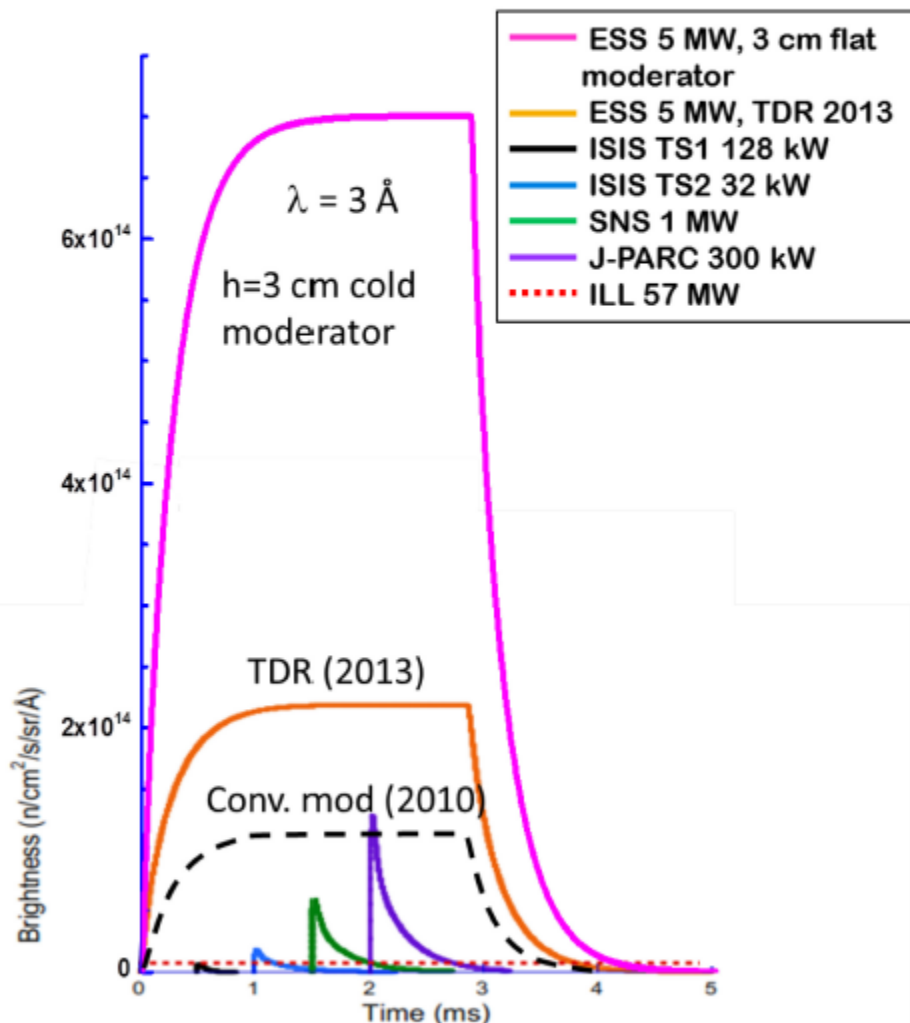
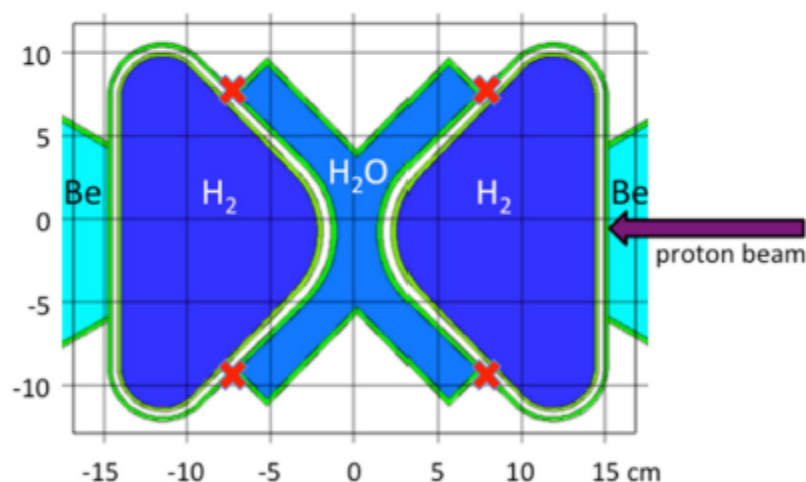
⇒ **not more of the same, but entirely new type of experiments**

**ESS risks to be a flop, if its not supported by a network of smaller sources**

## Moderator Materials and Geometry

### New ESS moderators 2015

cold: 20 K para- $\text{H}_2$   
 thermal: RT water  
 height: 3cm above target  
 6cm below target



Mezei, F., et al. (2014).

"Low dimensional neutron moderators for enhanced source brightness."

Journal of Neutron Research **17**(2): 101-105.

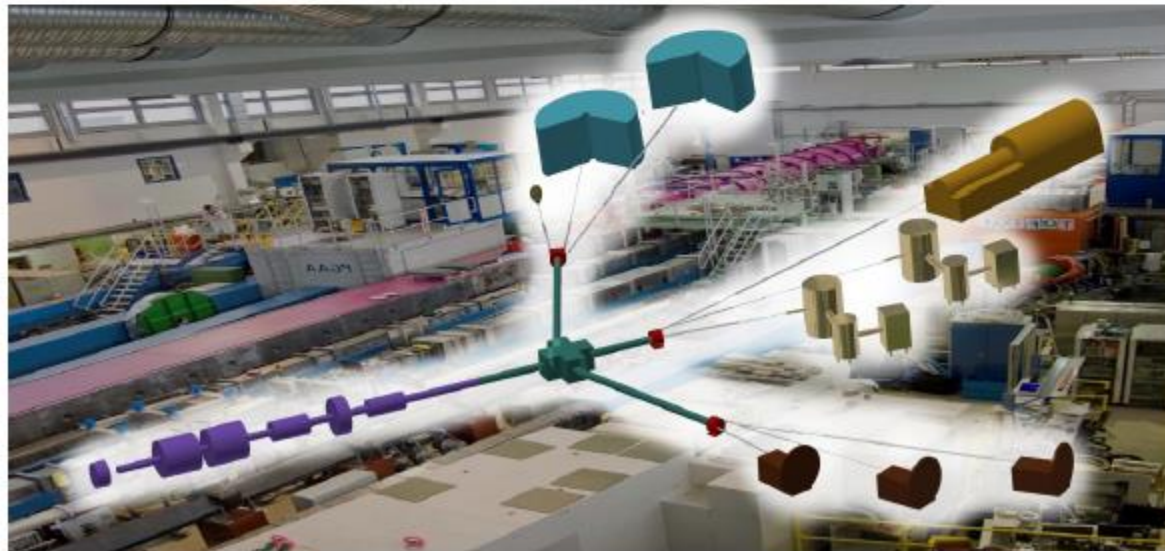
# How to Design a **H**igh **B**rilliance Neutron **S**ource?

## High Brilliance Neutron Source

- **Accelerator driven** neutron source
- Optimized for neutron scattering on **small samples**
- **Reasonable costs** (<< ESS facility)

## Integrated optimization of

- Accelerator
- Target
- Moderator
- Beam extraction & - transport
- Time structure
- Instrumentation





# Nuclear Reactions Producing Neutrons

Nuclear Process	Example	Neutron Yield	Heat Release [MeV/n]
D-T in solid target	400 keV D on T in Ti	$4 \times 10^{-5}$ n/d	10 000
Deuteron stripping	40 MeV D on liquid Li	$7 \times 10^{-2}$ n/d	3500
Nuclear photo effect from e-bremsstrahlung	100 MeV $e^-$ on $^{238}\text{U}$	$5 \times 10^{-2}$ n/ $e^-$	2000
$^9\text{Be}(d,n)^{10}\text{Be}$	15 MeV D on Be	<del>1 n/d</del> 1.5E-2 n/d	1000
$^9\text{Be}(p,n;p,pn)$	11 MeV p on Be	$5 \times 10^{-3}$ n/p	2000
Nuclear fission	Fission of $^{235}\text{U}$ by thermal neutrons	1n/fission	180
Spallation	800 MeV p on $^{238}\text{U}$ or Pb	27 n/p or 17 n/p	55 or 30

neutron gener.

HUNS (Hokkaido)

LENS  
The Low Energy Neutron Source

MLZ  
Heinz Maier-Leibnitz Zentrum

ess  
EUROPEAN SPALLATION SOURCE

Comparison of production efficiency of fast neutrons  
U+e: preliminary results, target geometry not optimized concerning photon absorption

see talk by  
Jan Ph. Dabrock !

${}^9\text{Be}(d, n)$

good efficiency,  
engineering o.k.

${}^7\text{Li}(p, n){}^7\text{Be}$

Efficiency too low,  
engineering difficult

$M(e^-, \gamma)$

- Bremsstrahlung

$M(\gamma, n)$

- nuclear photoeffect

interesting candidate

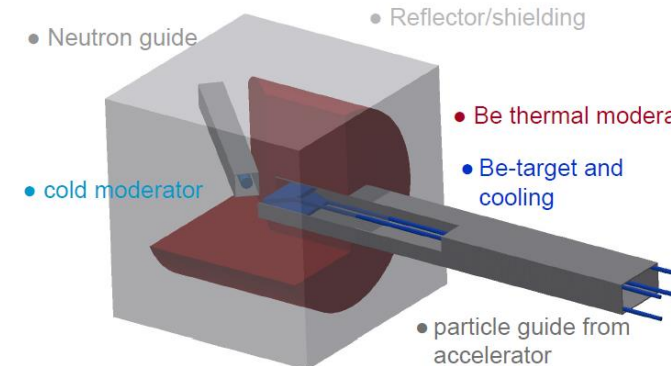
ion	E [MeV]	n/nps_ion	n/s/mA	n/s/kW
Be+p	5	0.015%	9.49E+11	1.899E+11
Be+p	10	0.110%	6.86E+12	6.856E+11
Be+p	25	0.638%	3.98E+13	1.593E+12
Be+d	5	0.063%	3.94E+12	7.887E+11
Be+d	10	0.265%	1.65E+13	1.653E+12
Be+d	25	1.608%	1.00E+14	4.015E+12
Be+d	50	5.724%	3.57E+14	7.145E+12
Be+d	100	20.522%	1.28E+15	1.281E+13
Li+p	2	0.002%	1.02E+11	5.107E+10
Li+p	5	0.050%	3.15E+12	6.299E+11
Li+p	10	0.164%	1.02E+13	1.025E+12
Li+p	25	0.471%	2.94E+13	1.176E+12
U+e	20	0.396%	2.47E+13	1.236E+12
U+e	50	2.520%	1.57E+14	3.146E+12
U+e	100	5.695%	3.55E+14	3.555E+12
U+e	150	8.710%	5.44E+14	3.624E+12



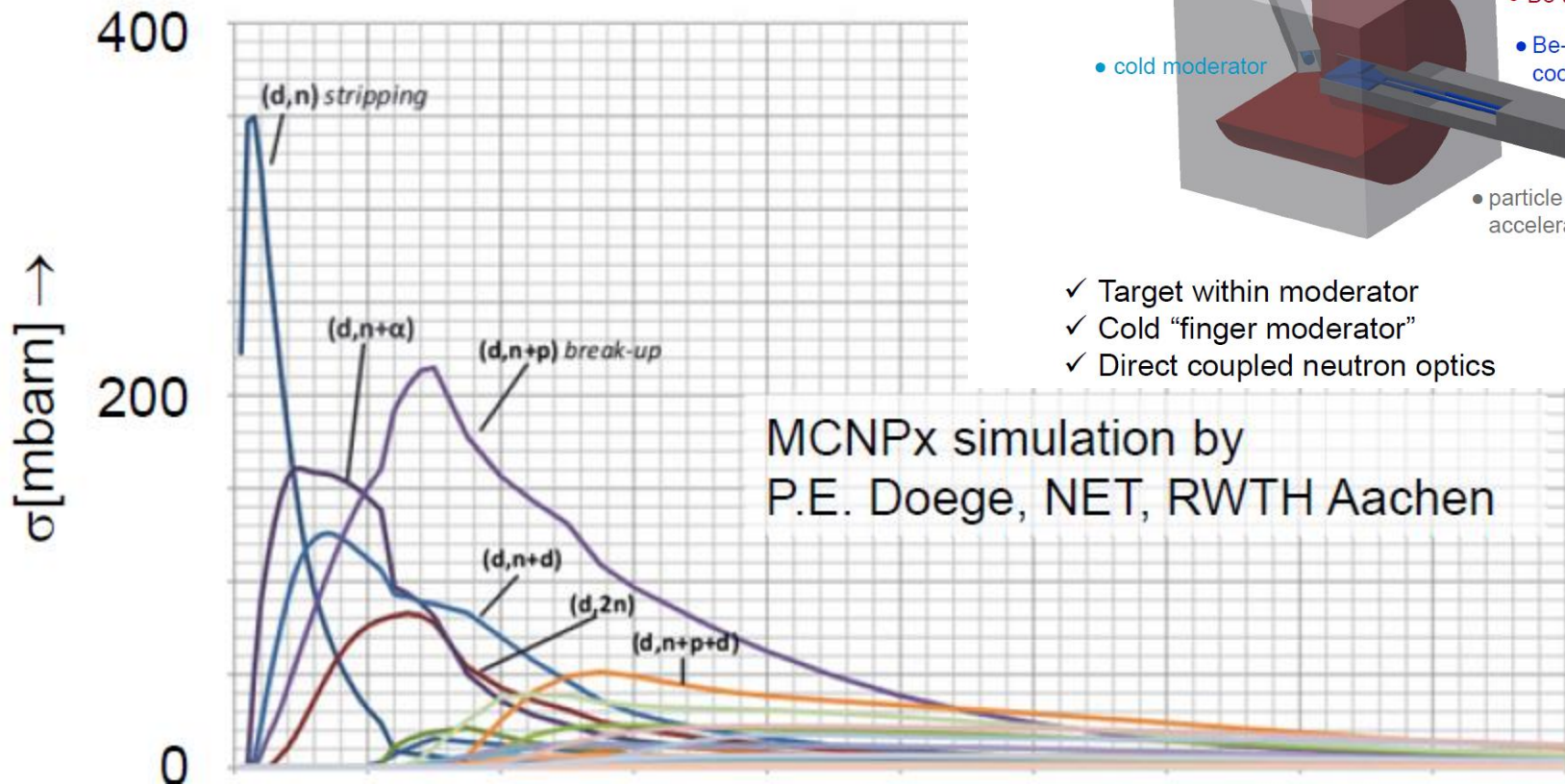
Our first choice:  $^9\text{Be}(d,n)$  nuclear reaction

- + ca. 25 MeV energy  $\rightarrow$  thin shielding, little radiation damage
- + directed neutron emission
- + short stopping length
- less efficient than spallation

## Efficient Coupling of Target to Moderator



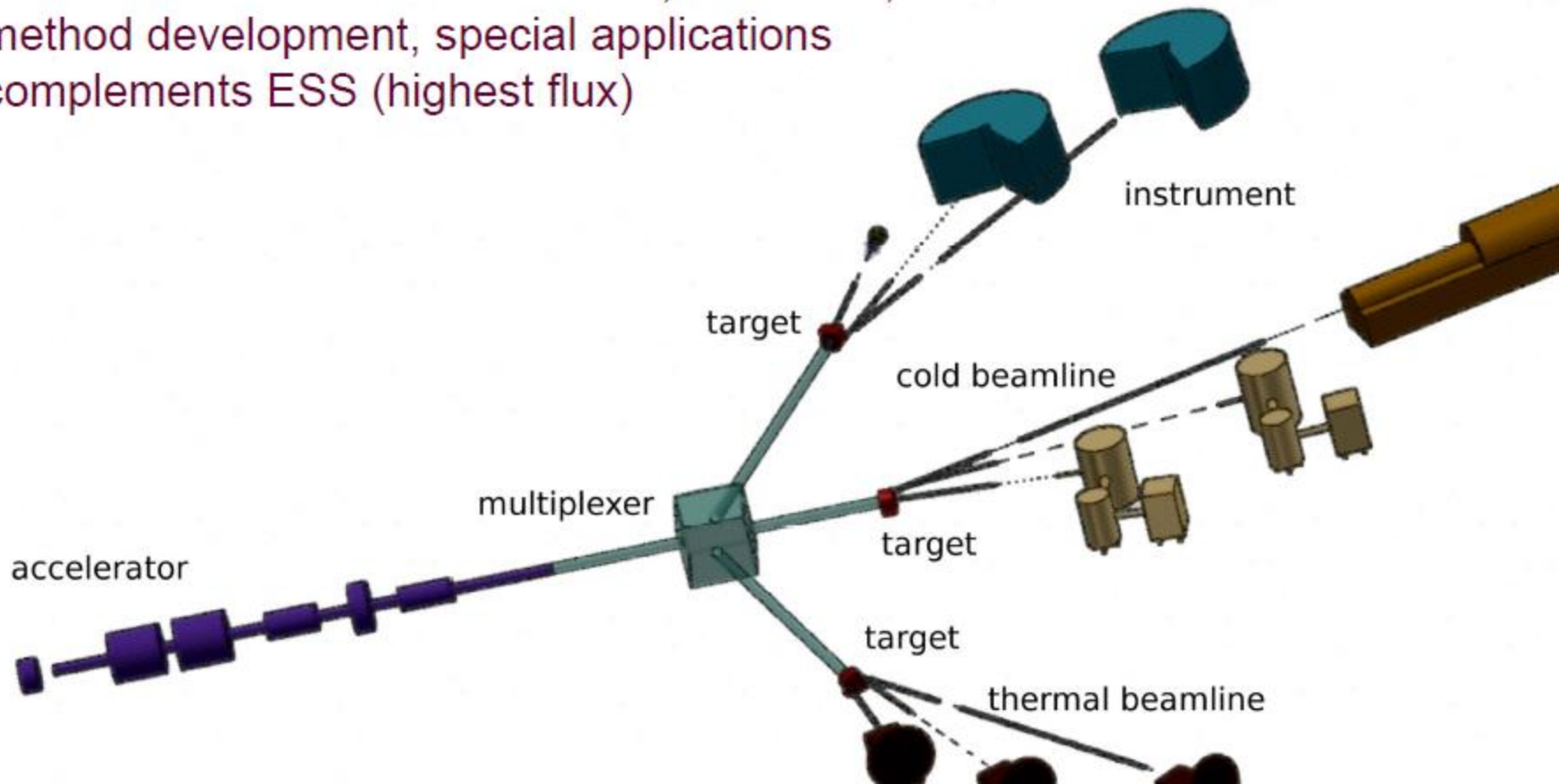
- ✓ Target within moderator
- ✓ Cold “finger moderator”
- ✓ Direct coupled neutron optics



- **Projectile and Target**
- **Accelerator**
- **Moderator and Reflector**
- **Beam Extraction**
- **Beam transport**
- **Instrumentation**
- **Experiments!,....**

# Possible Facility Layout

- innovative approach for a novel type of neutron facility
- dedicated target stations with pulse structures adapted to specific instruments
- possible approach for a new network of smaller to medium sized sources in Europe
- low nuclear inventory and relatively low cost
- addresses needs in user demand, education, method development, special applications
- complements ESS (highest flux)





after 2030



ESS

ISIS

Jülich

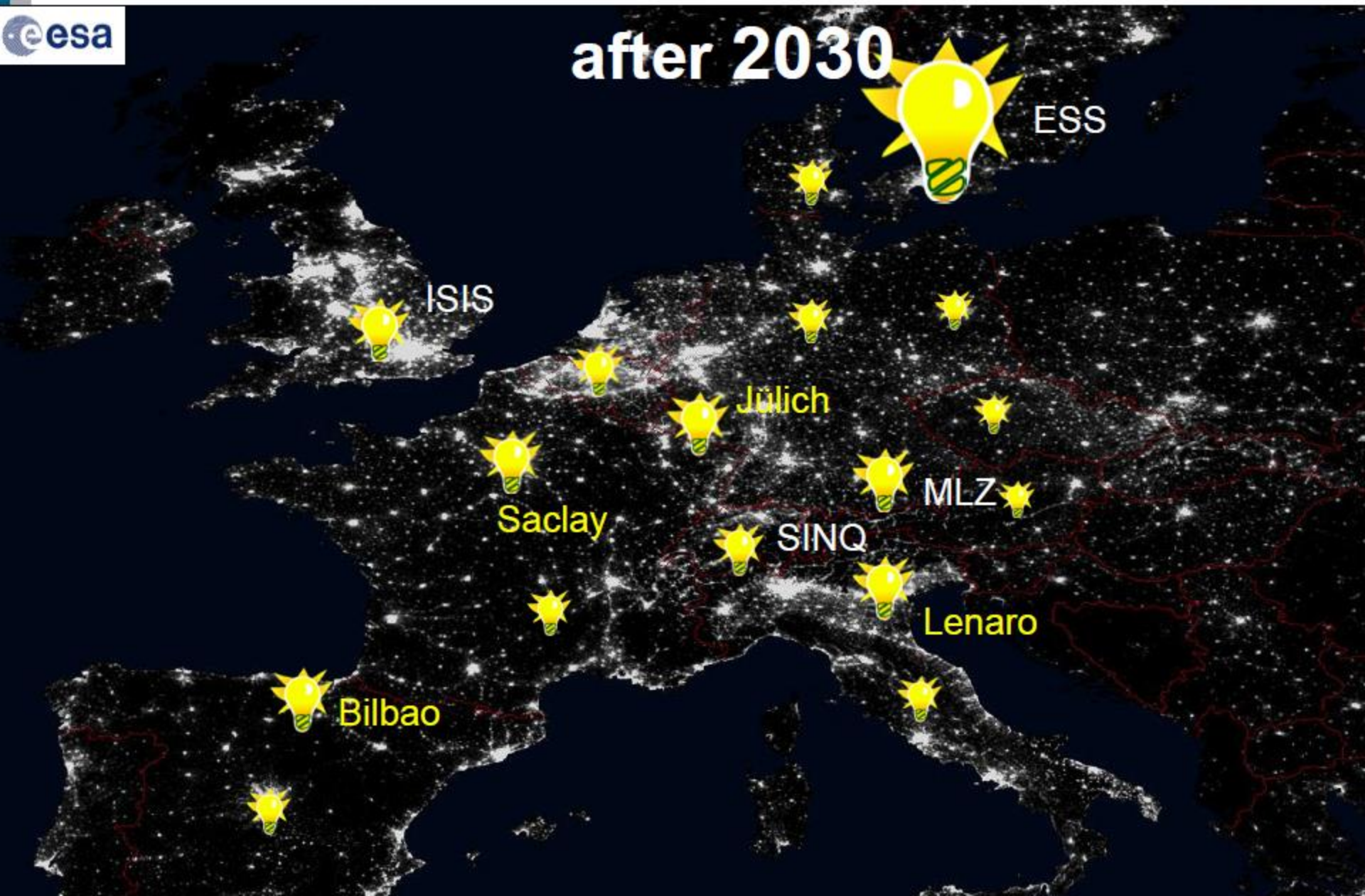
Saclay

MLZ

SINQ

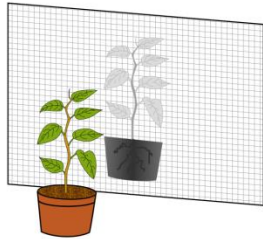
Lenaro

Bilbao

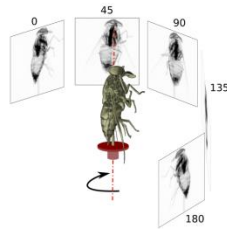


# 중성자 영상 기법의 종류

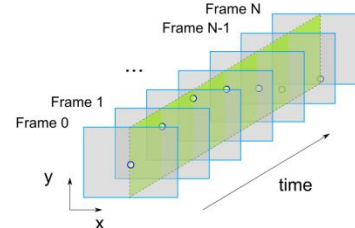
## Standard techniques



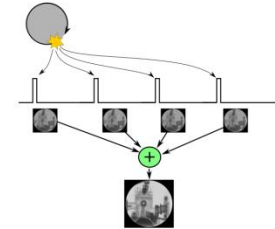
Radiography



Computed tomography

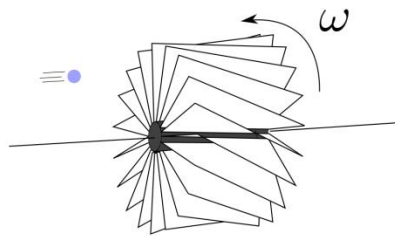


Time-series imaging

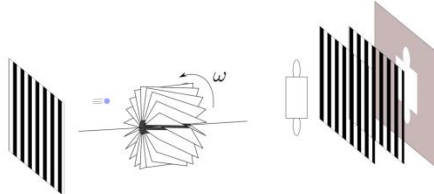


Stroboscopic imaging

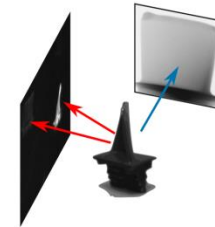
## Advanced techniques



Energy selective imaging

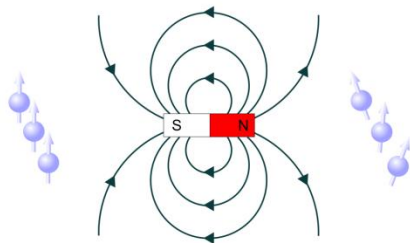


Neutron grating interferometry



Diffraction imaging

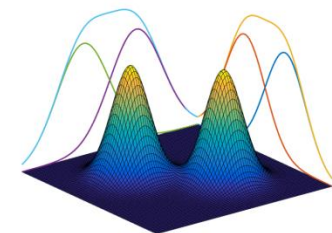
## Under development



Imaging with polarized neutrons



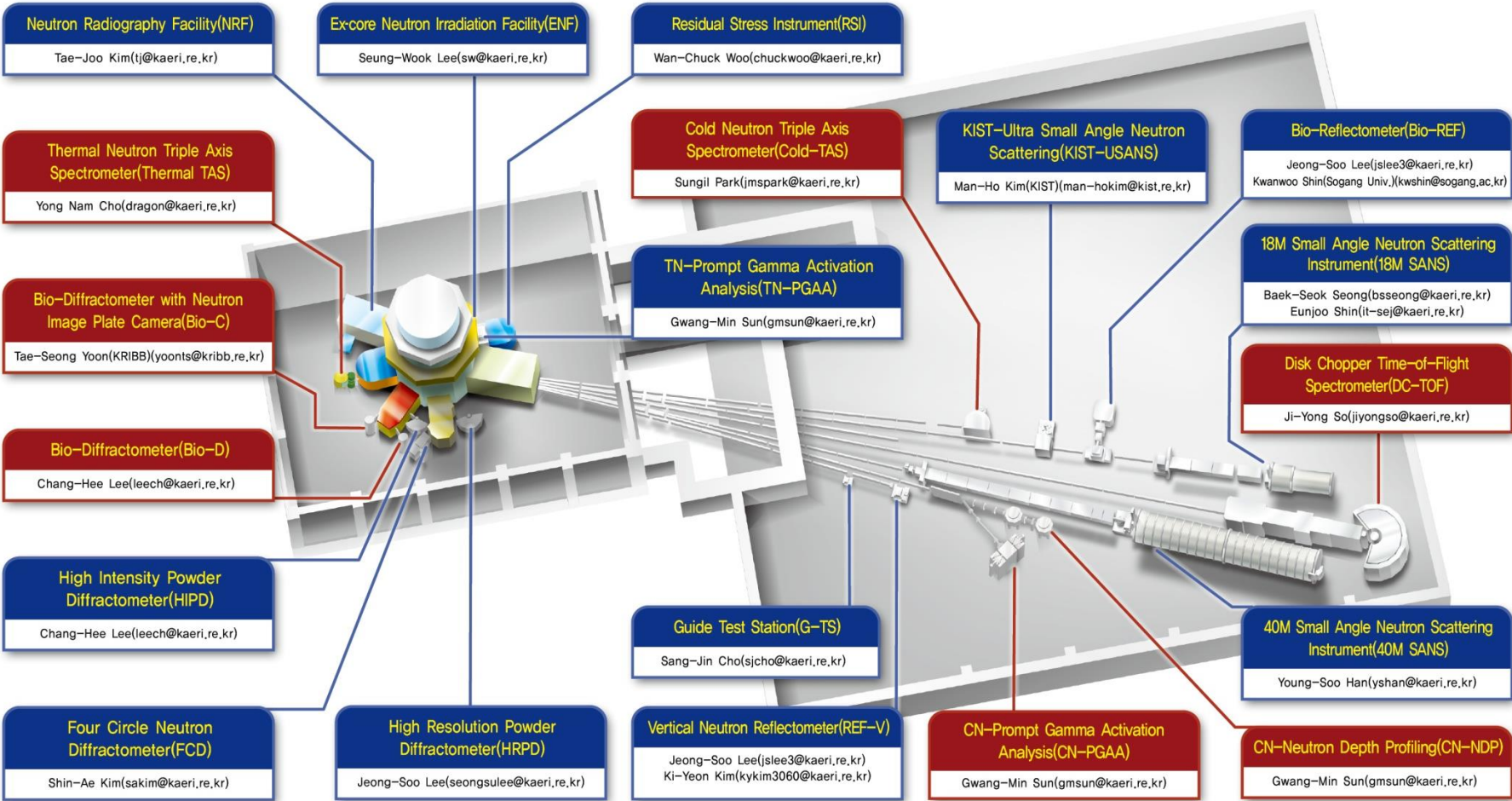
High resolution imaging



Multimodal imaging & fusion



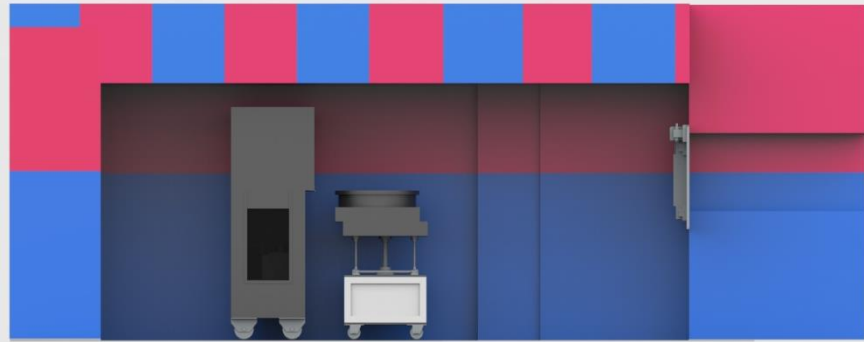
# 하나로 중성자 장치 현황



Installed, Commissioning or Operating

In Design or Constructing

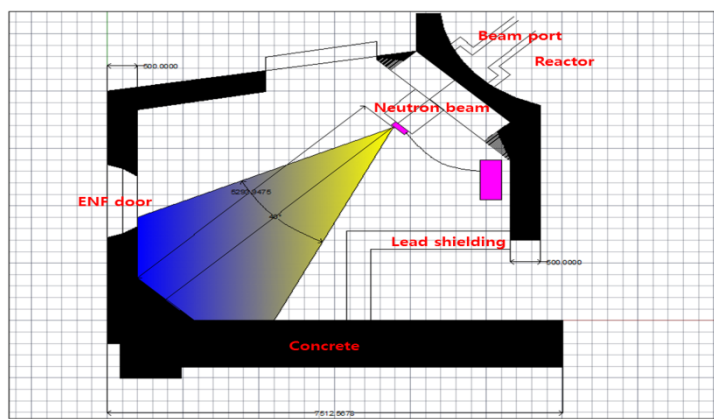
## Neutron Radiography Facility(NRF)



### Applications

- ✓ Ordinary Non-Destructive Test
- ✓ PEM Fuel Cell Research with Hyundai-Motor
- ✓ Li-Ion Battery
- ✓ Visualization of Two-phase Flow in Heat Exchanger

## Ex-core Neutron irradiation Facility(ENF)



### Applications

- ✓ Neutron Irradiation Test
- ✓ Autoradiography for Boron Distribution
- ✓ Phase Contrast Imaging
- ✓ Dark Field Imaging (Neutron Decoherence Imaging)
- ✓ High Resolution Neutron Imaging
- ✓ Neutron Detector Development Test Station
- ✓ Energy Selective Imaging(Future)
- ✓ Polarized Neutron Imaging (Future)
- ✓ X-ray & Neutron Hybrid Imaging

# Neutron Radiography Facility Spec.

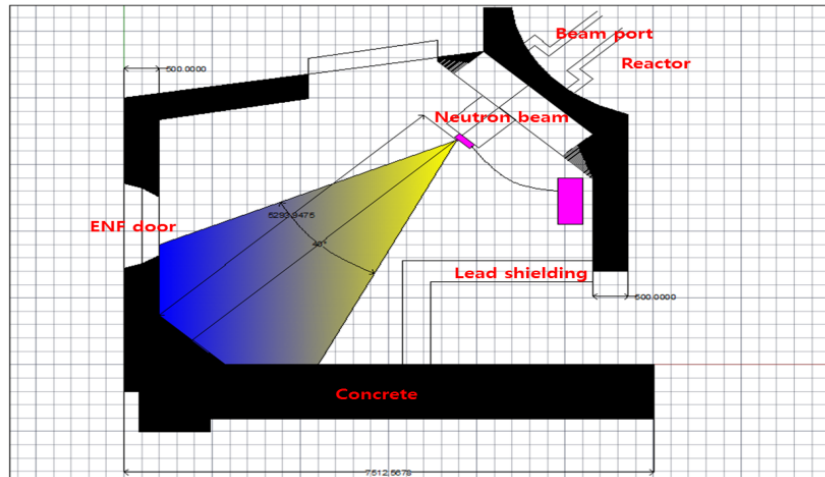


## Applications

- ✓ Ordinary Non-Destructive Test
- ✓ PEM Fuel Cell Research with Hyundai-Motor
- ✓ Li-Ion Battery
- ✓ Visualization of Two-phase Flow in Heat Exchanger

	Property	Remark
Thermal neutron flux (Max)	$2.0 \times 10^7 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	
L/D ratio	267	
Beam Size	350 x 450 mm <sup>2</sup>	
Inner space	2.7m(length)x2.0m(height)x1.8m(width)	
Imaging detector	Lens-coupled CCD camera (High Resolution: Andor, Princeton, Vers-Array, High Speed: Red Lake)	Image size: 5cm x 5cm ~ 10cm x 10cm Image resolution: 50μm ~ 150μm
	Film Method	

# Ex-core Neutron irradiation Facility Spec.



## Applications

- Neutron Irradiation Test
- Autoradiography for Boron Distribution
- Phase Contrast Imaging
- Dark Field Imaging (Neutron Decoherence Imaging)
- High Resolution Neutron Imaging
- Neutron Detector Development Test Station
- Energy Selective Imaging(Future)
- Polarized Neutron Imaging (Future)
- X-ray & Neutron Hybrid Imaging

Property		Remark
Filter	Si(D20cm, L40cm), Bi(D10cm, L15cm)	
Thermal neutron flux (Max)	$1.49 \times 10^9 \text{ n/cm}^2 \cdot \text{s}$	
Inner space	5.5m(length)x3.5m(height)x4m(width)	
Imaging detector	Lens-coupled CCD camera (Andor DW936N-BV)	Image size: 5cm x 5cm ~ 10cm x 10cm Image resolution: 50 $\mu\text{m}$ ~ 150 $\mu\text{m}$
	Fiber optic-coupled CCD camera (Prinston)	Image size: 3cm x 3cm (Max.) Image resolution: 30 $\mu\text{m}$ ~ 50 $\mu\text{m}$
Option	Be filter	Below 4.0 $\text{\AA}$
	Double crystal monochromator	2.0 $\text{\AA}$ ~ 6 $\text{\AA}$
	Aperture for high resolution	D: 0.5cm ~ 2cm, High resolution neutron imaging
	Silicon gratings	Grating based neutron imaging
	Neutron polarizer	Polarized Neutron Imaging



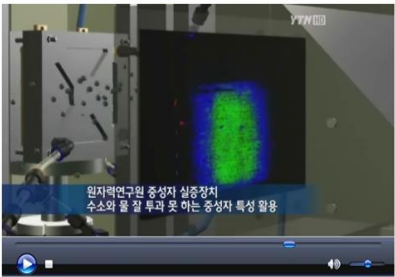
## First Mass Production of Fuel Cell

東亞日報 2013년 03월 15일 금요일 A22면 종합 26.2 x 26.6 cm  
현대 수소차 숨은 공신은 원자로 '하나로'



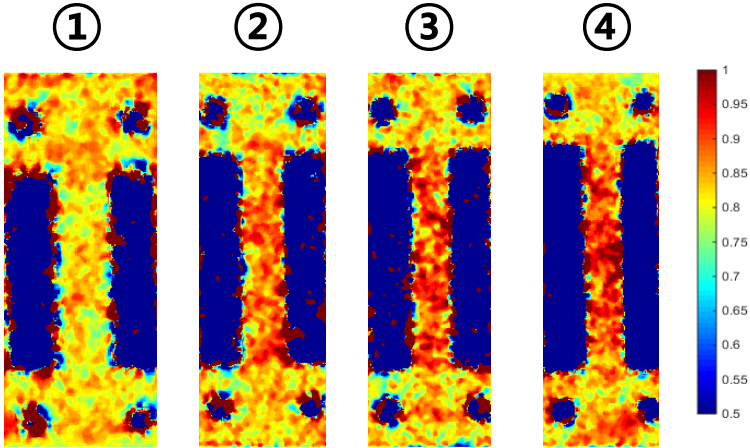
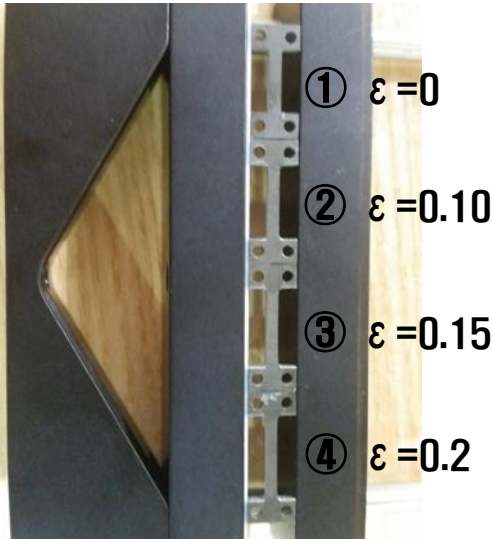
KBS

대덕 '하나로' 수소연료자동차 기술 주도!



YTN

## Energy Selective Neutron Imaging

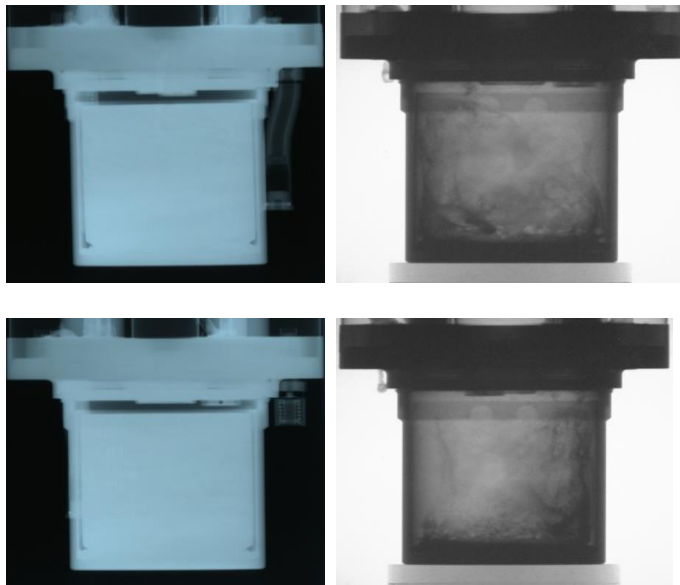
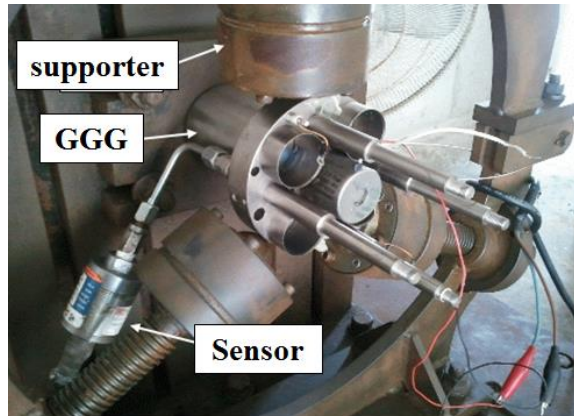


(FCC → BCC Phase Changing)



# 국가 방위에 기여하는 중성자 영상

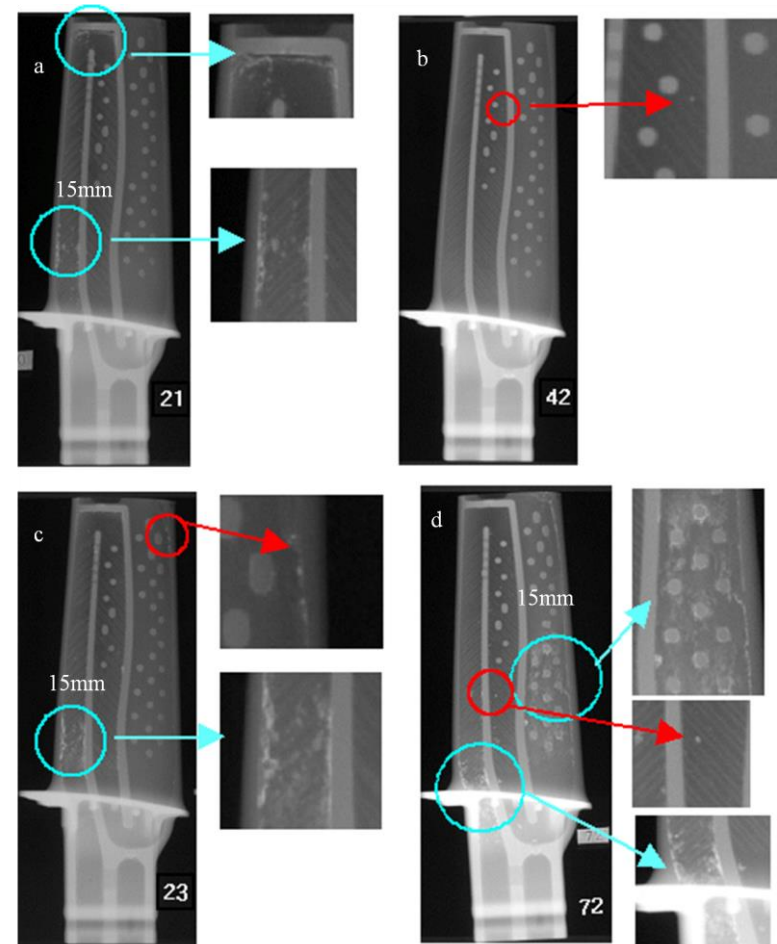
## Gas Grain Generator Combustion ( A part of AIM-9 Missile)



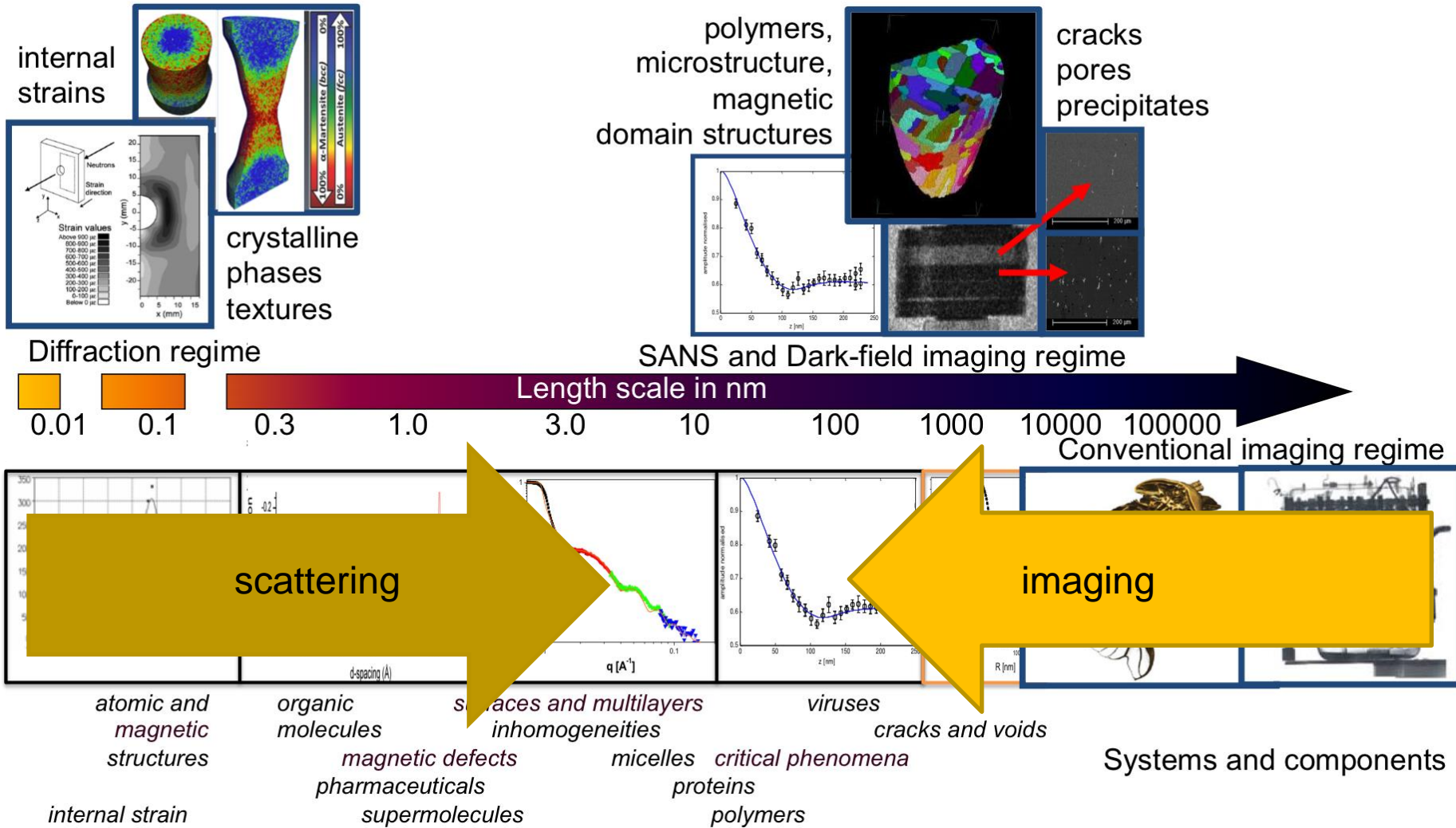
Before (film)

After(digital)

## Used Turbine Blade NDT

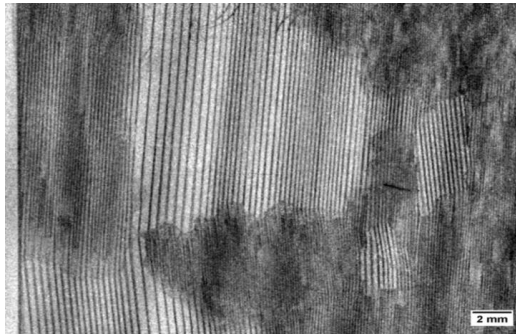


# 최근 중성자 영상 기법의 연구 방향



# 하나로에서의 중성자 영상의 연구 방향

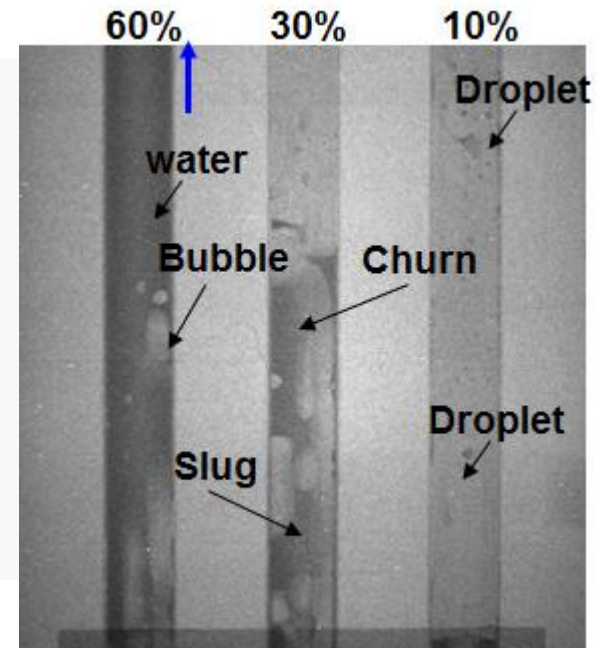
1. 영상-산란 융합한 미시-거시적 분석 기술 개발
  - 고분해능 중성자 영상 + 에너지 선택 + 다크 필드 중성자 영상 기법
2. 국내 산업 경쟁력 향상에 기여하는 중성자 영상
  - 문화재 보존, 국방 경쟁력, 2상 유동 분석 및 성능 향상



다크 필드 영상을 활용한  
철강 재료내의 자력 분포



중성자 영상을 활용한  
복장 유물 연구



중성자 영상을 활용한  
관내 2상 유동 연구

- **중성자 선원과 그 이용!**

- Research Reactor
- Spallation Neutron Source
- Accelerator-based Neutron Source
- Various sources...
- Education & Training, Technology, Instruments & Methods Development, TMRS assembly research,...
- NDT by NI, BNCT, Irradiation Testing,...

- **연구개발 네트워크를 결성 ➔ KCANS?**

- 개별 연구자, 그룹, 랩, 기관을 넘어....
- 부족한 연구자원의 공유 & 자발적이고 느슨한 연계
- 협력과 경쟁

**Anytime!  
Anywhere!**

....

**Neutron is good  
for many purposes**