

2026. 06. 12. [화]

우주 원소 기원 탐구를 위한 중이온가속기 고에너지 가속구간 구축

이진호

목 차

1. 과학적 필요성
2. 핵과학 연구 확장
3. 시설 구축
4. 맺음말



1. 과학적 필요성

우주에서 생성되는
원소의 기원은 무엇인가?

빠른 중성자 포획 반응은
어디에서 일어날까?

별의 진화, 별의 탄생과 폭발 등을
일으키는 핵 반응의 원리는
무엇인가?

중성자별 물질의 성질은 무엇
일까?

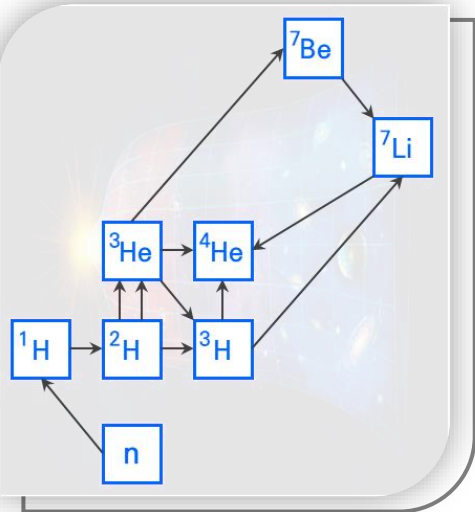
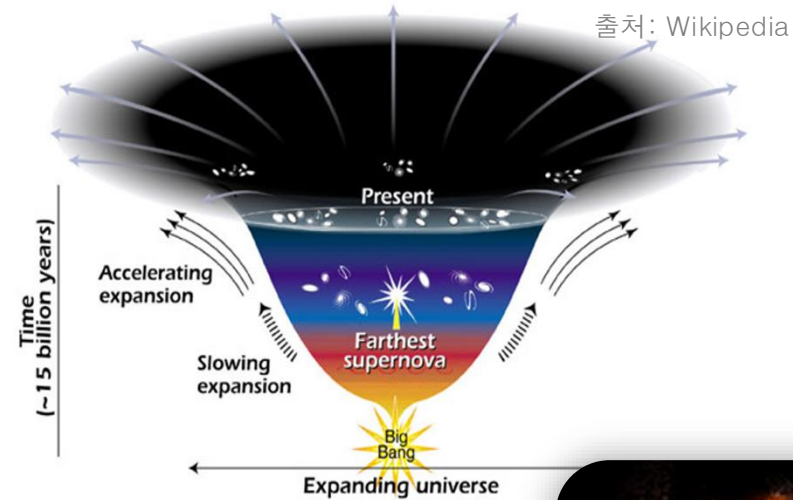


희귀동위원소가속기
RAON

핵은 어디까지 존재할까?
원자번호의 끝점은 어디이며
한 원소에 있어 중성자의 끝은
어디에서 멈추며 그 이유는 무엇일까?

양성자와 중성자의 비율이
극단적으로 다를 때
핵의 성질은 어떻게 변화해 가는가?

개별 핵자들이 만드는
집단적인 성질 (회전, 진동, 찌그러짐)
등의 원리는 무엇일까?



1. Big Bang Nucleosynthesis



2. Stellar Nucleosynthesis

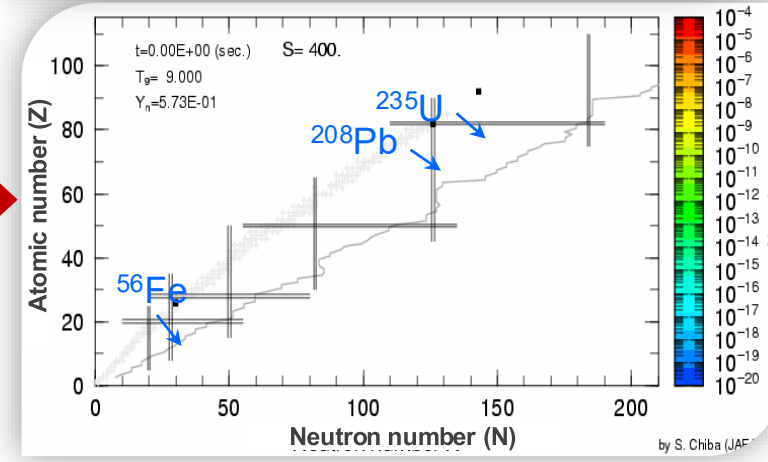
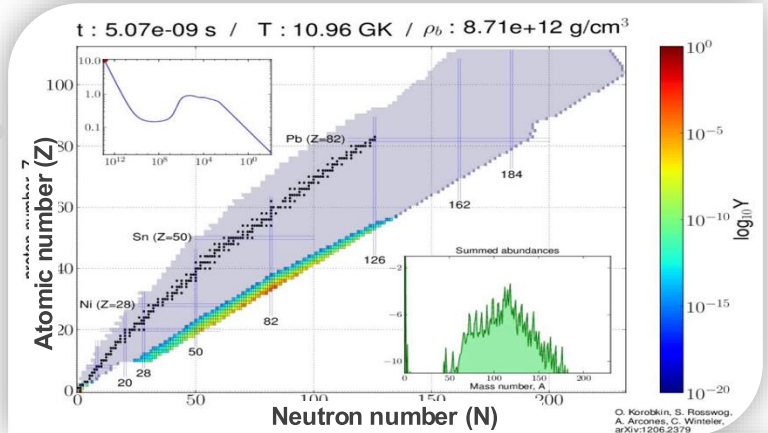


3. Supernova



4. Neutron Star Merger

1. 빅뱅 핵 합성: 수소(H), 헬륨(He), 리튬(Li) 까지
2. 별 내부: 수소(H) 에서 철(Fe) 까지 (s-process)
3. 초신성 폭발: 철보다 무거운 원소 (r-process)
4. 중성자별 충돌/중합: 철보다 무거운 원소 (r-process)

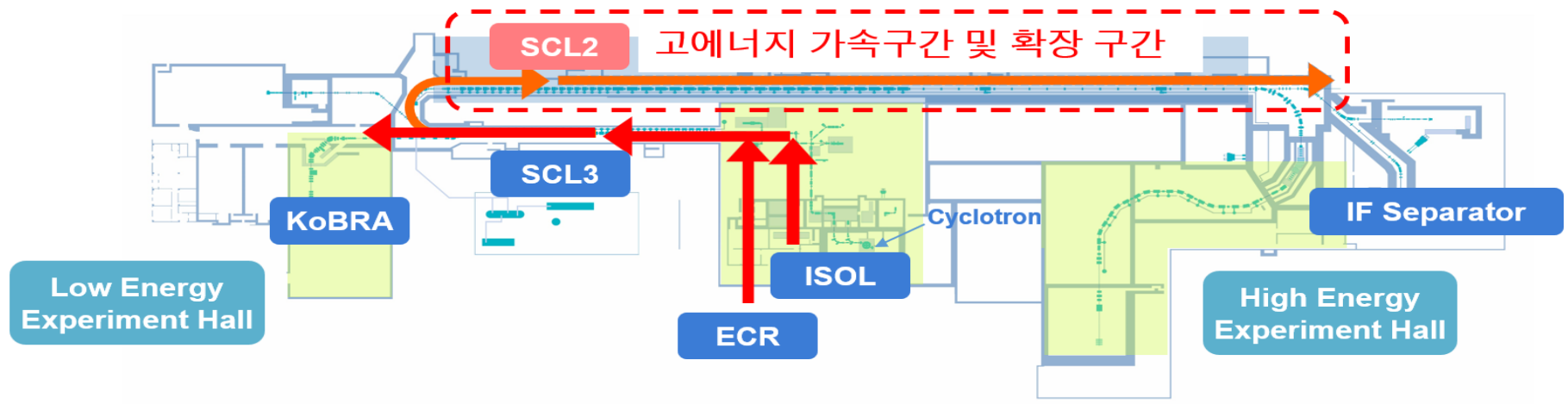


“극한 중성자 과잉 희귀동위원소는 무거운 r-process 원소 기원 규명의 핵심”



2. 핵과학 연구 확장

구분	KoBRA	ISOL	IF Separator
생성 · 가속 경로	ECR (SIB) → SCL3 → KoBRA production target	Cyclotron (p) → TIS (RIB) → SCL3	ECR (SIB) or ISOL (RIB) → SCL3 → SCL2 → IF (RIB)
생성 방식	Direct reactions & Multi Nucleon Transfer	p induced reactions and fission of U	Projectile Fragmentation (and Nuclear Fission)
빔 에너지 범위	< a few tens of MeV/u (18.5 MeV/u, U 기준)	> a few keV/u	< hundreds of MeV/u (200 MeV/u, U 기준)



- ISOL 방식 : 희귀동위원소의 높은 생산성과 우수한 빔 품질을 제공. 그러나 반감기가 짧은 희귀동위원소를 얻어낼 수 없음
- IF 방식을 통해,
 - 극한 상태의 중성자 과잉 희귀동위원소 생성 → r-process 경로 핵종 연구 → 원소의 기원 이해
 - 다양한 중성자 수의 희귀동위원소 생성 → 핵물질 상태방정식(EOS) 이해 → 중성자별 물질의 성질 규명
- ISOL과 IF의 결합으로 세계 최고 수준의 독보적인 희귀동위원소 연구체계 완성

RAON 가속기 및 실험장치 구축현황



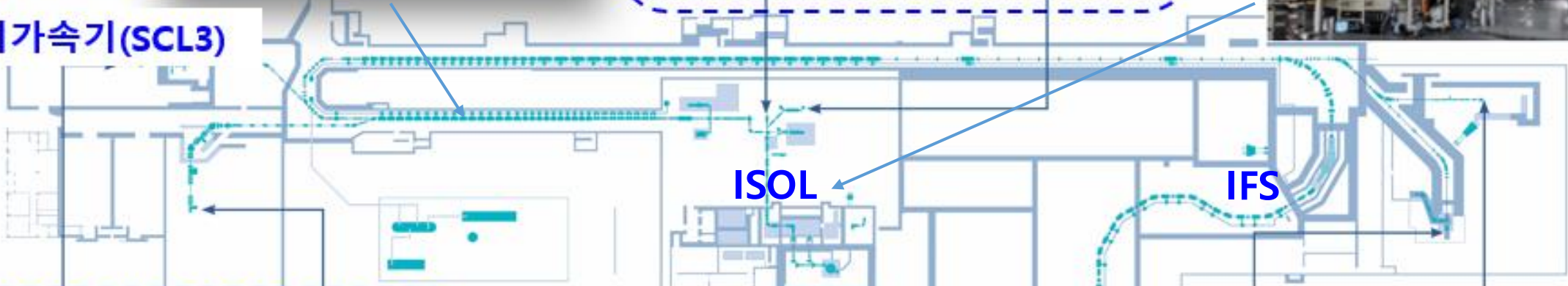
Very Low Energy > a few keV/u

MMS

CLS



저에너지가속기(SCL3)



Low Energy < a few tens of MeV/u

NDPS

KoBRA

High Energy < hundreds of MeV/u

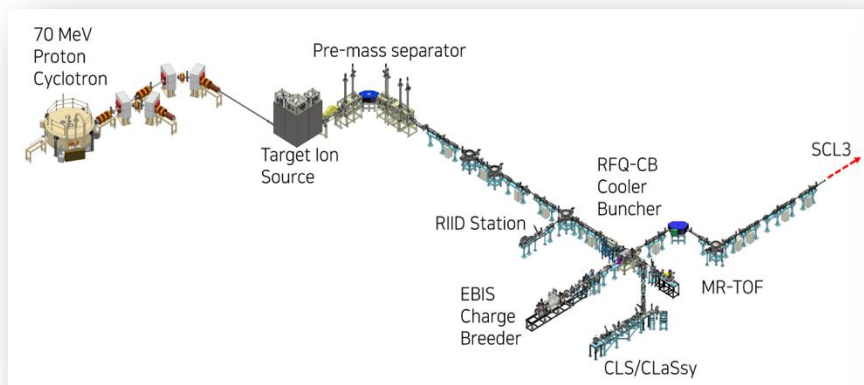
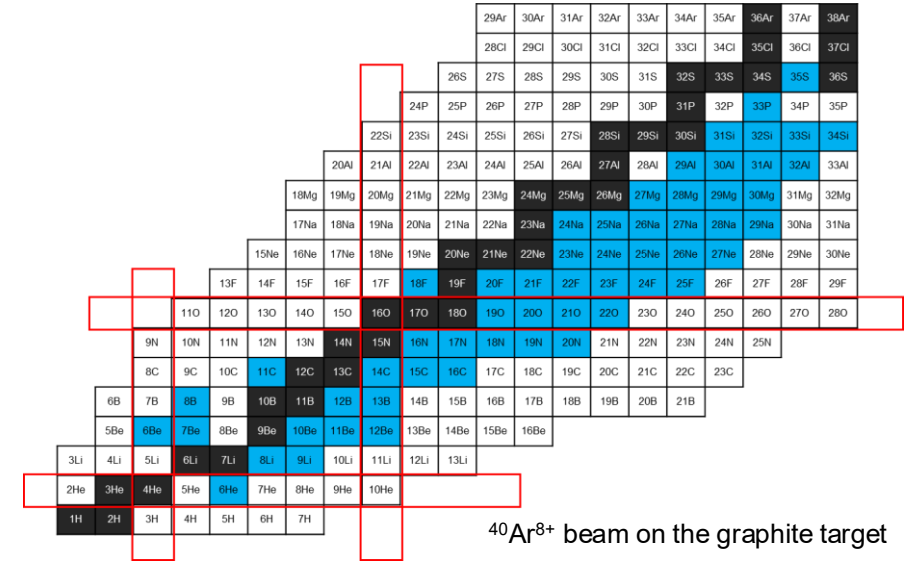
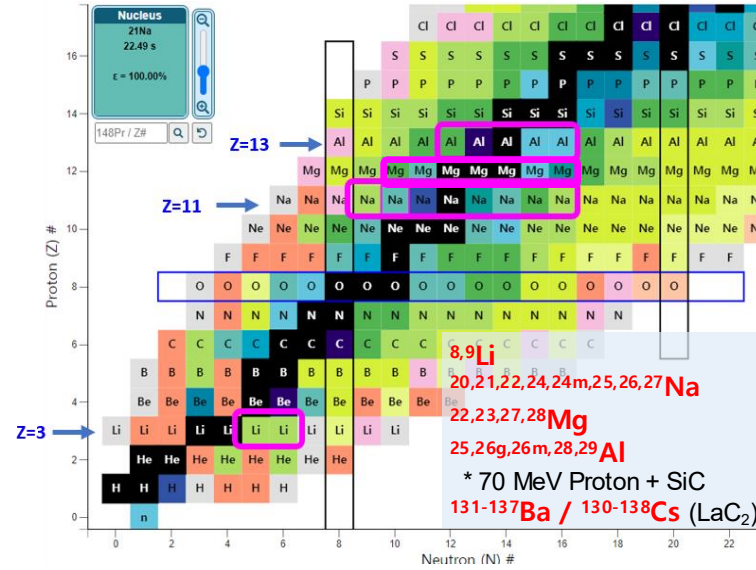
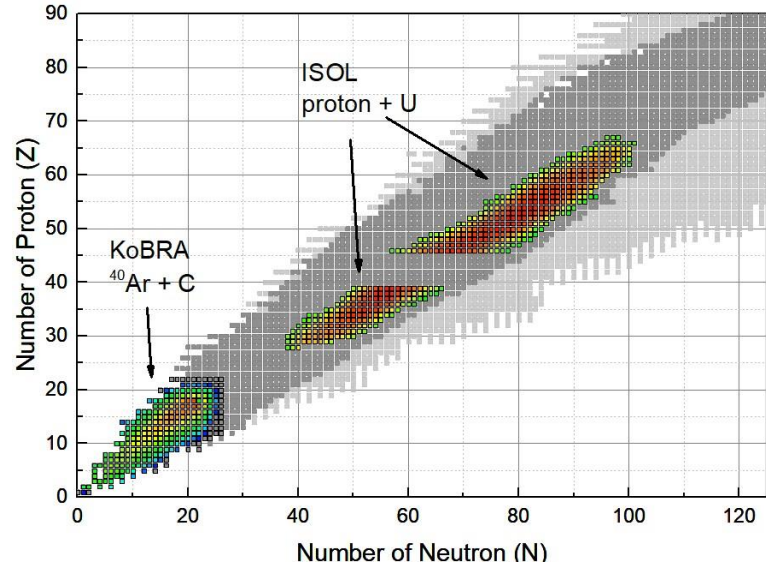
LAMPS

μSR

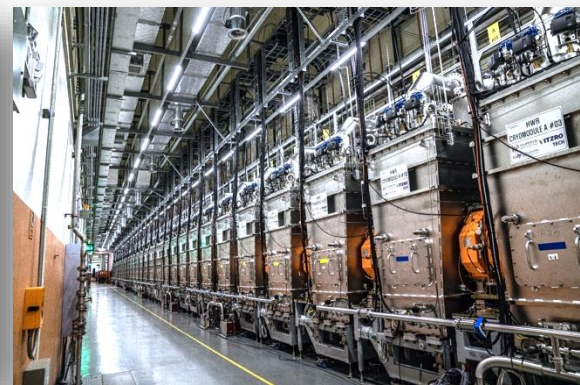
BIS

RAON 저에너지 희귀동위원소빔 개발 성과

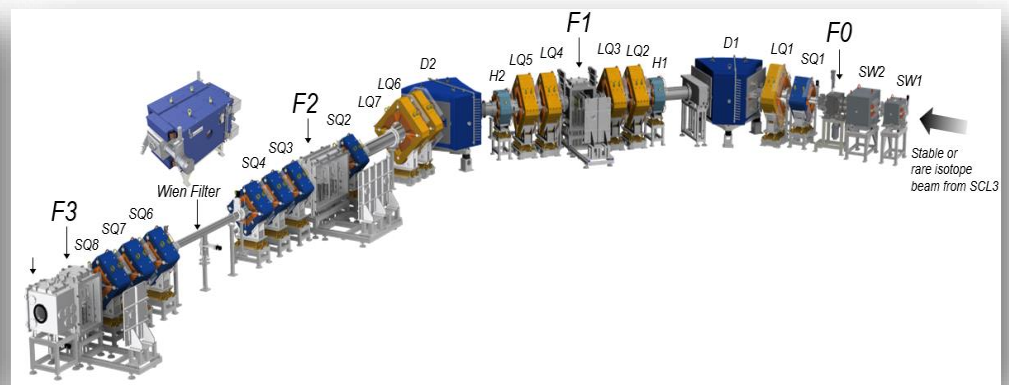
RAON 저에너지 희귀동위원소빔 생성, 2025, ISOL (L) / KoBRA (R)



ISOL
- Isotope Separation On-Line -



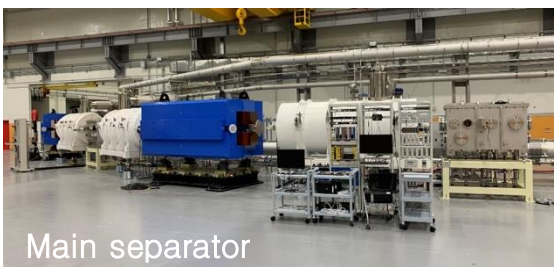
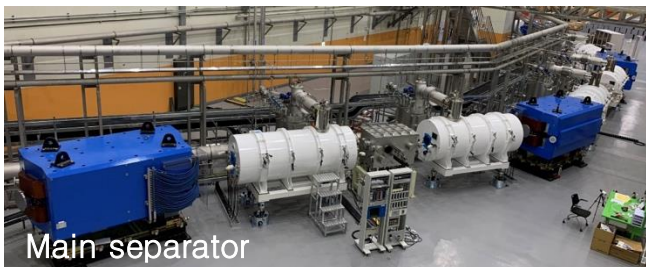
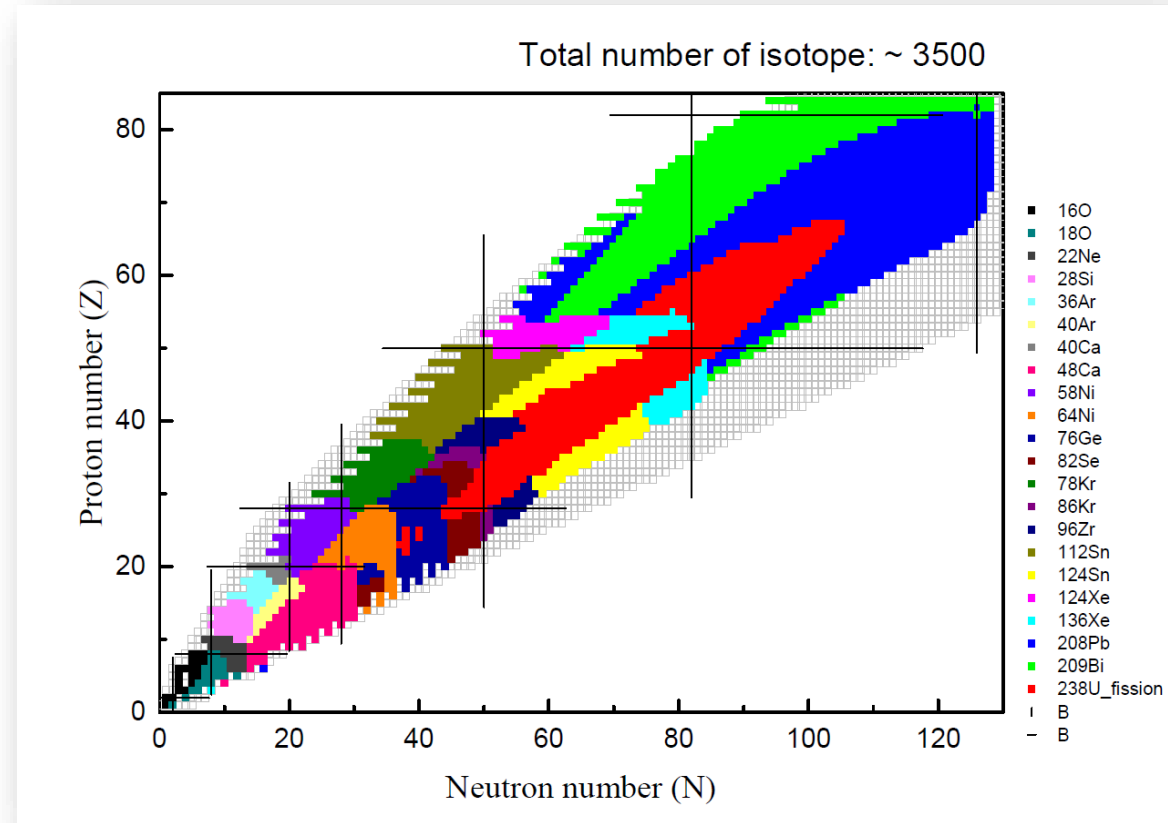
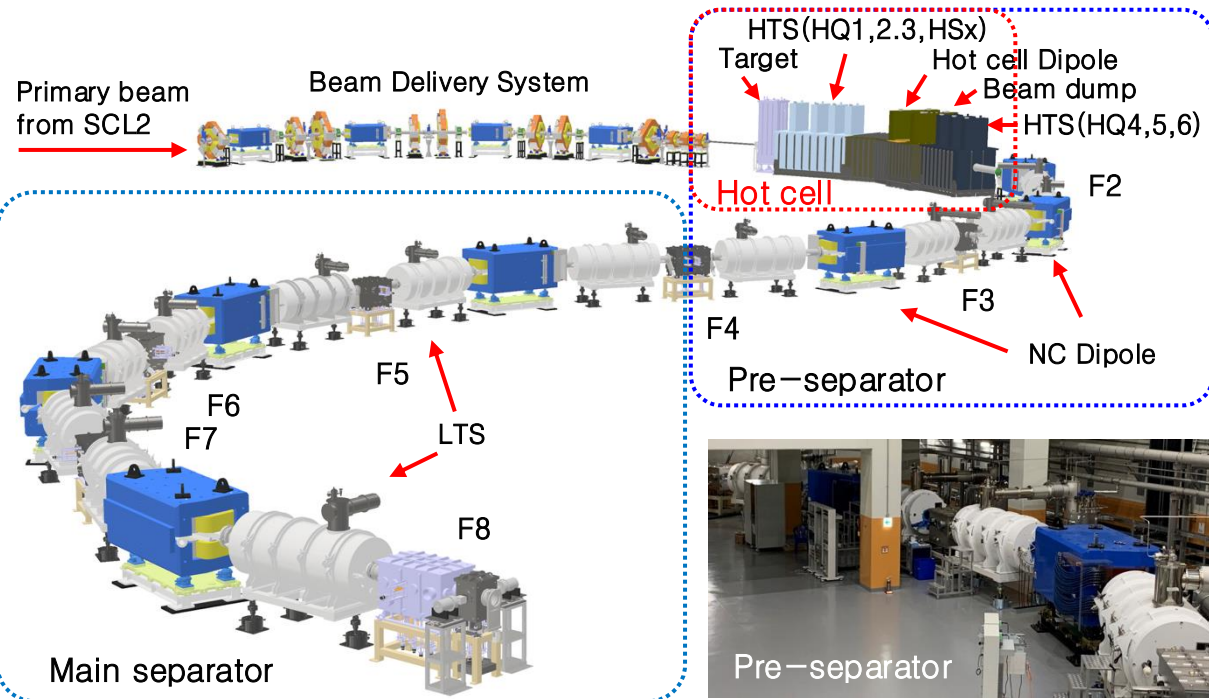
저에너지 가속구간(SCL3)
- Super Conducting Linac 3 -



KoBRA
- KOREA Broad acceptance Recoil spectrometer and Apparatus -

RAON 고에너지 빔을 이용한 중성자과잉 핵종 생성

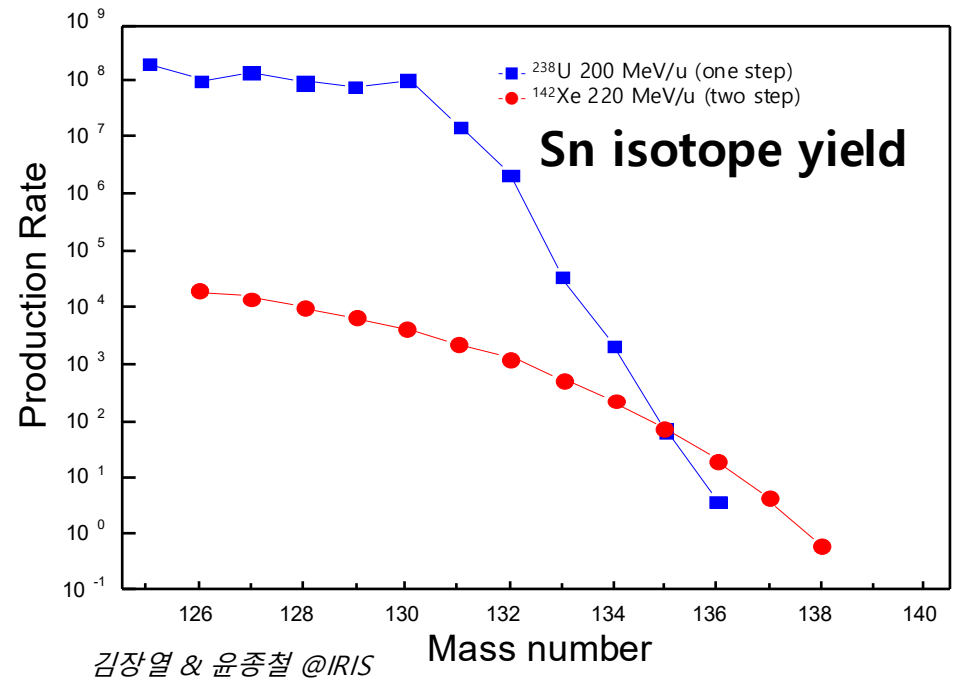
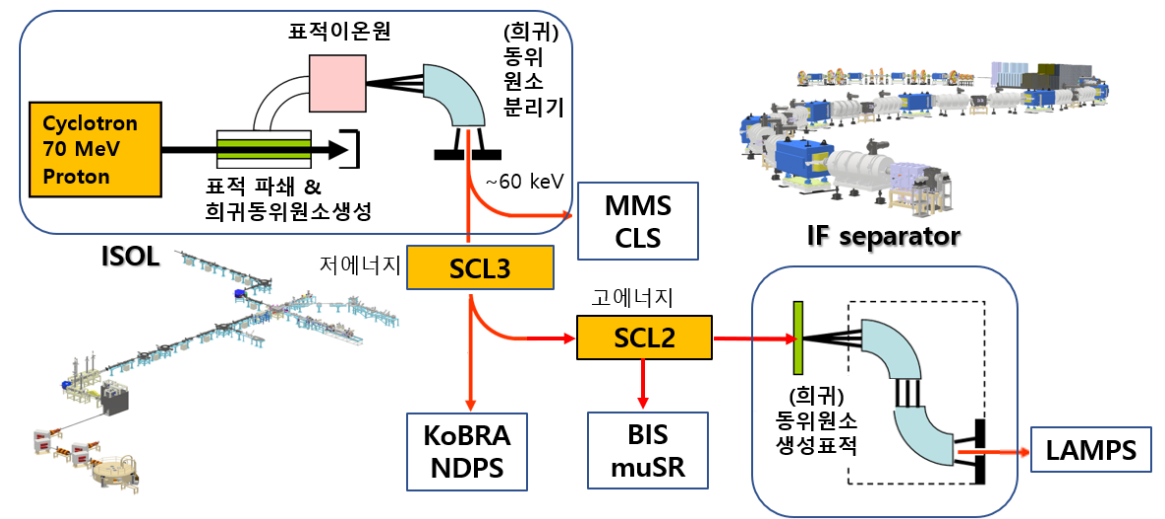
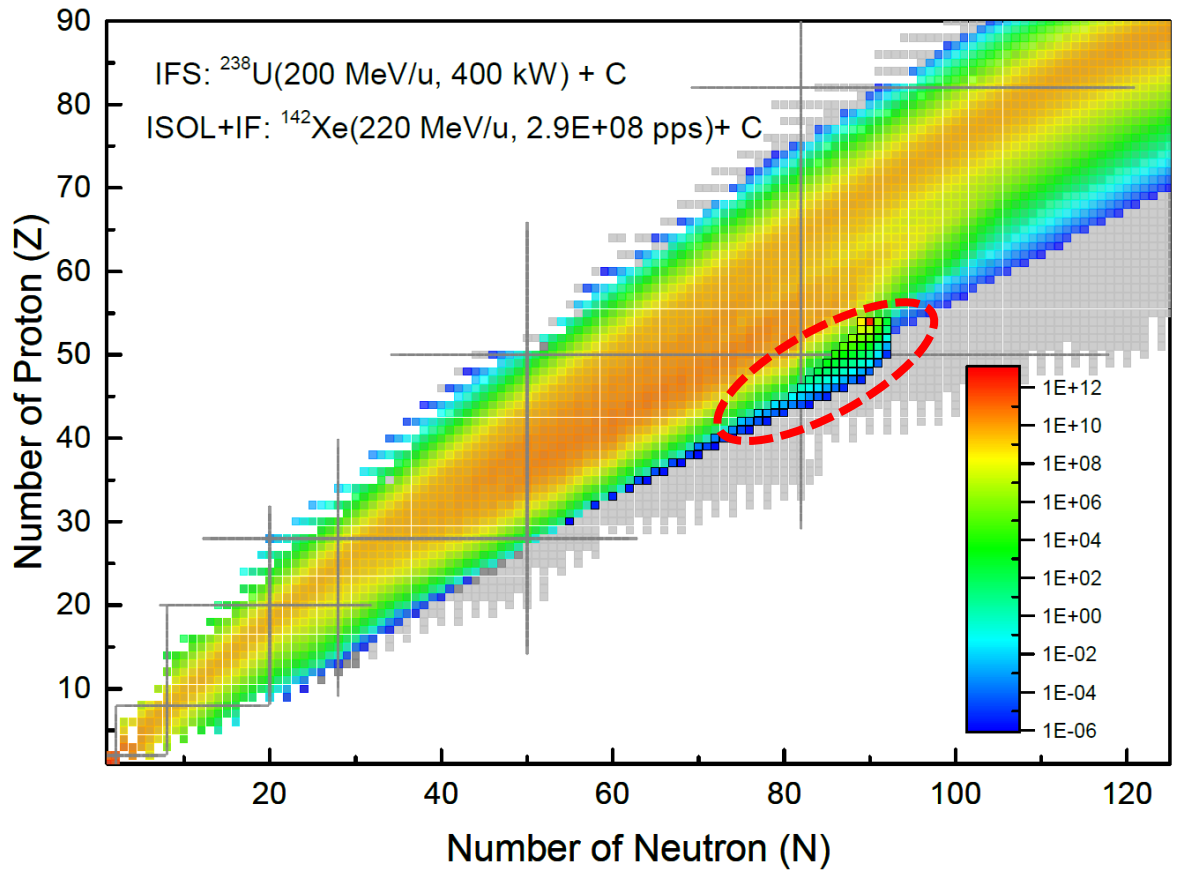
- Projectile Fragmentation : 고에너지 중이온이 표적 핵에 충돌하여 파편 생성
- Nuclear Fission : 고에너지 충돌을 통해 무거운 핵이 분열하여 소형 파편 생성



2단계 생성 방식: 극한영역의 중성자과잉 희귀동위원소

ISOL+IF 결합을 통한 2단계 생산 방식

- IF 방식 대비 높은 생성 수율 가능
- 극한 중성자 과잉 영역 접근성 향상
- 미발견 희귀동위원소 탐색 가능성 향상



SCL2 구축으로 열리는 고에너지 핵과학 연구

우주 원소의 기원 규명

- N=126 waiting-point 핵종 연구
- r-process 경로 핵종 연구
- β -붕괴 및 핵구조 특성 측정

IF + ZDS + HRS

중성자별 물질의 성질 규명

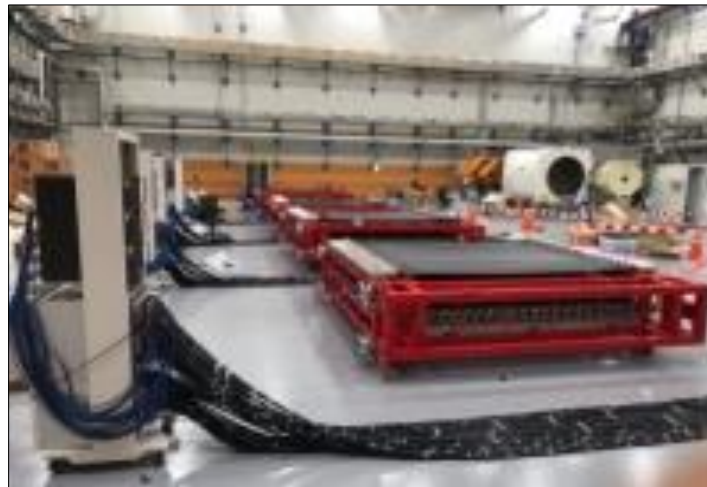
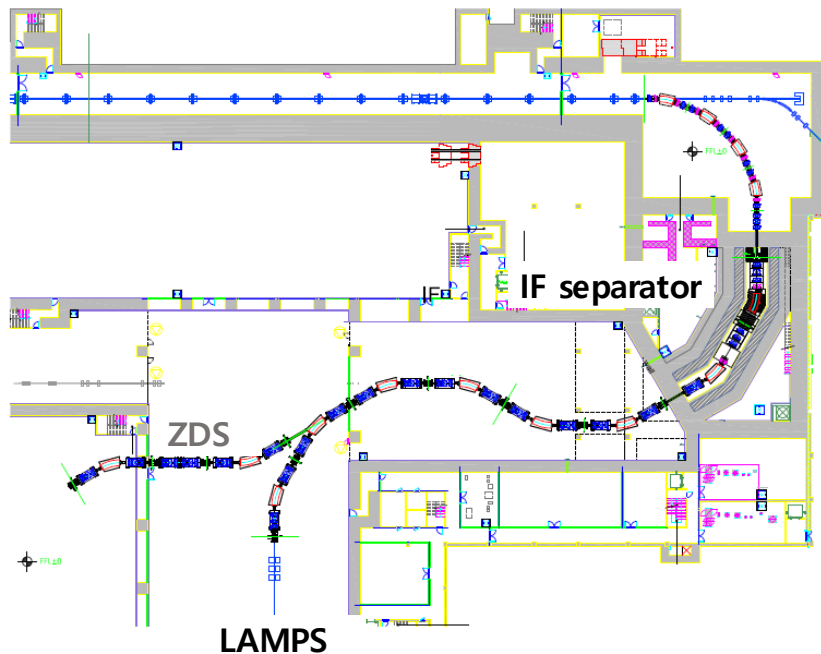
- 핵물질 상태방정식(EOS) 규명
- 대칭에너지(Symmetry Energy) 특성 연구
- 중성자 과잉 핵 충돌을 통한 고밀도 핵물질 특성 연구

IF + LAMPS

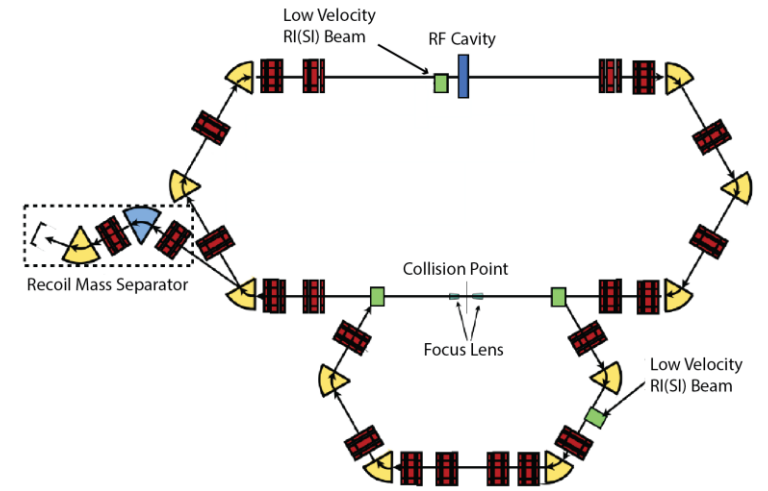
핵의 존재 한계

- 중성자 드립라인 부근 핵종 탐색
- 핵구조 변화 및 새로운 마법수 연구
- 초중핵(SHE)의 생성 및 안정성 연구

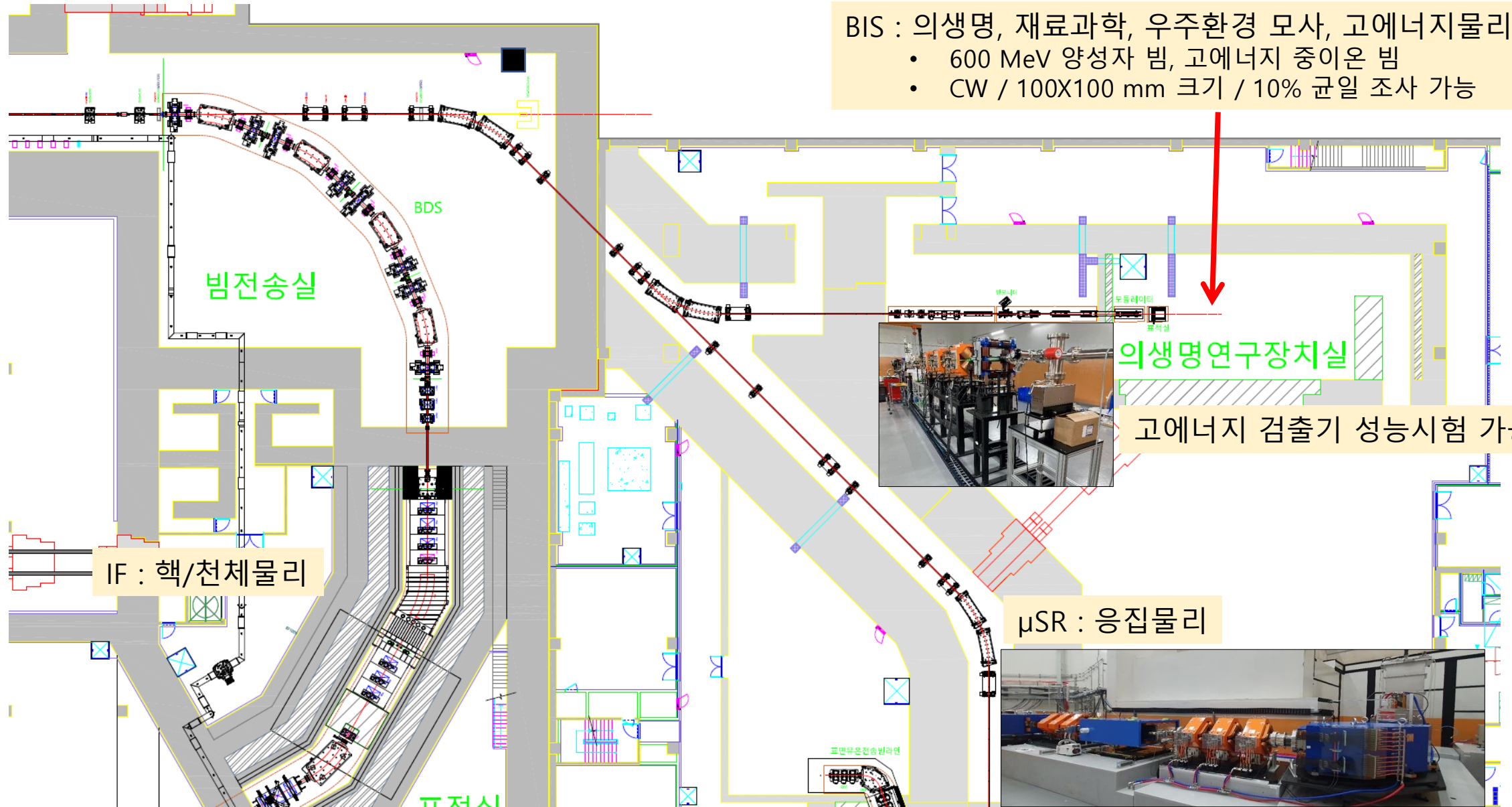
IF + ZDS + HRS
RI-RI Collider



LAMPS (Large Acceptance Multipurpose Spectrometer)



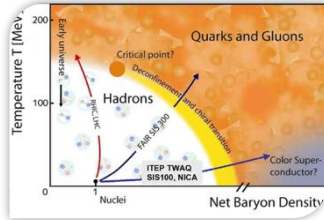
RI-RI collider



RAON Accelerator complex ISOL + In-Flight Fragmentation



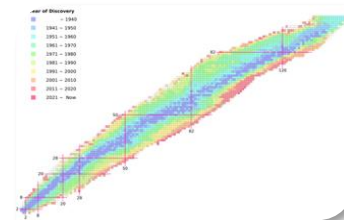
Nuclear Astrophysics



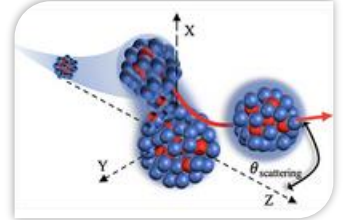
Nuclear Matter



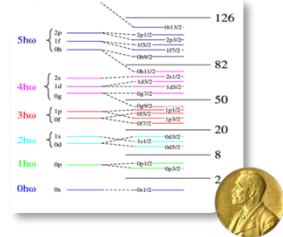
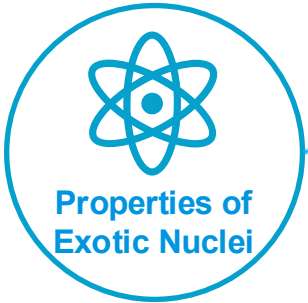
Super Heavy Element



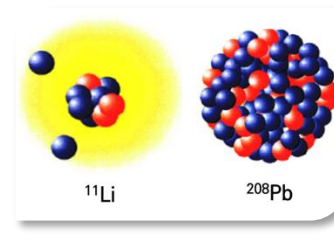
New Isotope / Dripline



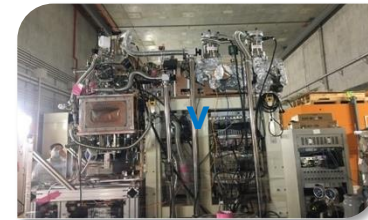
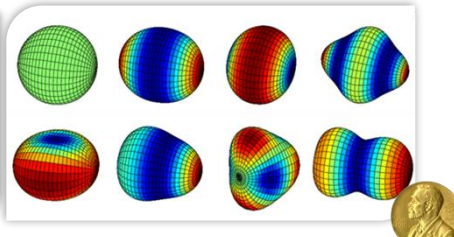
Nuclear Reaction



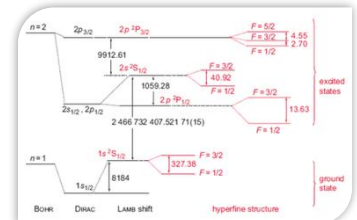
Magic Number



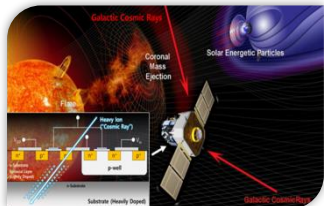
Nuclear Structure



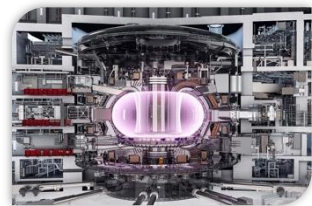
Mass Measurement



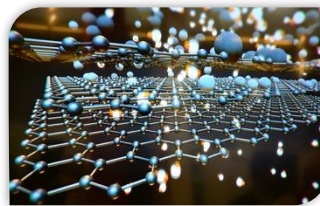
Hyperfine Structure



Aerospace



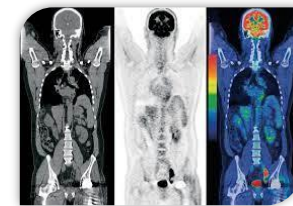
Neutron Science



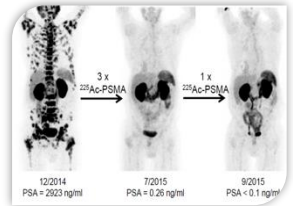
Material Science



Radiation Breeding



Cancer Diagnosis & Treatment





3. 시설 구축

고에너지 가속장치를 제외한 제반 시설이 구축 완료되어 있습니다.

- 방사선 인허가 (200 MeV/u 기준 차폐, 방사선 모니터링 시스템, 개인 안전 연동 시스템)
- 터널 및 고주파 갤러리 (400 MeV/u 확장 공간 보유)
- 극저온 플랜트 및 헬륨 분배 시스템 (200 MeV/u 기준)
- SSR1용 고주파 장치
- 빔라인 전자석 to IF, LAMPS, μ SR, BIS



IRIS는 국내 유일의 초전도 가속기 개발 인력 · 인프라 보유 기관

- 가속관 시험(VT) : 피트 3개
- 모듈 시험(HT) : 벙커 3개
- 표면 처리 : 화학연마, 고압수세, 열처리 시스템
- 극저온시스템 : 290 Liter/h 헬륨 액화기
- 청정 조립실 : Class 10 청정실
- 반도체급 초순수 제조시설

가속관 시험 시설



모듈 시험 시설



극저온 시스템



화학연마 시스템



진공 열처리로



고압수세 시스템



기본설계 가속관(SSR) 2종

특 성	SSR1	SSR2
β_0	0.32	0.51
f [MHz]	325	325
형태	풍선형	원통형
Va [MV]	>2.4	>4.1
동작 온도 [K]	2	2
빔 홀 ϕ [cm]	5	5
유효 길이 [m]	0.277	0.470
가속 전장 [MV/m]	>7.9	>8.7
Q_0	>5.0E9	>5.0E9
모듈 당 가속관 #	3	6
모듈 #	23	25
총 가속관 #	69	150

핵심 성능 지표

최종 에너지	우라늄 >200 MeV/u / 양성자 >600 MeV
최종 빔 파워	>400 kW
운전 모드	CW / 펄스

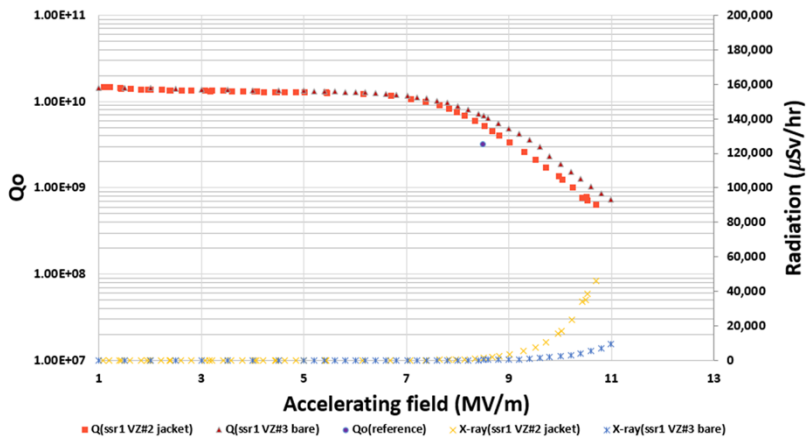
2027년까지

1. 핵심 성능 지표를 만족하면서
 2. 대량 생산 (~230개)에 적합한 설계 및 기술 개발이 필수
 - ❖ 참고 : 1단계 가속관 (QWR, HWR) 124개
- ⇒ 선행 R&D 사업을 통해 기술 확보 진행
 ※ 선행 R&D 사업 : 2027년까지 190억원 예산

SSR1



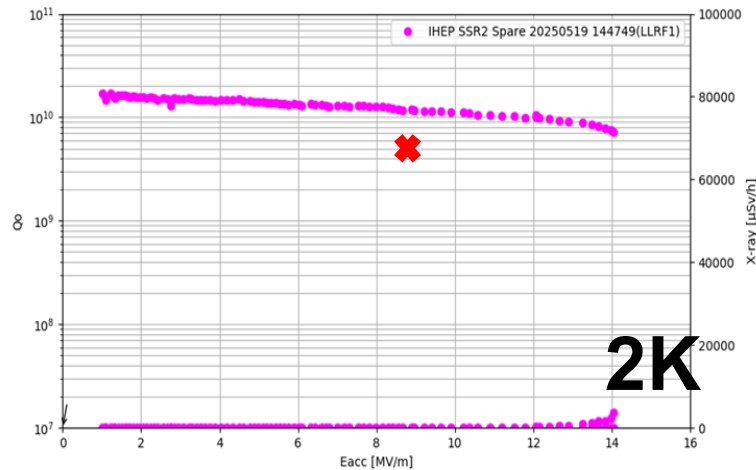
Single Spoke Resonator 1



SSR2



Single Spoke Resonator 2

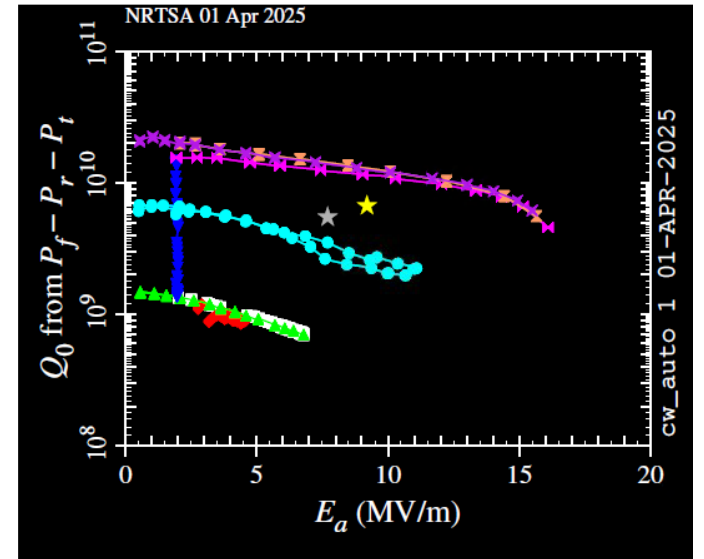


HWR(대안)

Half Wave Resonator

- 과학자문위원회의 강력한 권고
- FRIB과 협력 추진 중

EP를 적용한 $\beta=0.29$ HWR VT 결과 (FRIB)



- 공정 : 전자빔 용접 \Rightarrow 화학연마 \Rightarrow 고압수세 \Rightarrow 청정조립 \Rightarrow VT \Rightarrow CM 조립 \Rightarrow HT
- 선행R&D를 통해 각 공정의 최적화 진행 중
- 공정 기술 확보를 위해 해외 연구기관(FRIB, KEK, IHEP, SNS)과의 협력 및 자문 진행 중

2027년까지 선행R&D를 완료하여 고에너지 가속구간 구축 준비를 마치겠습니다.

2025
공학설계완료
SRF 공정개선

2026
SSR1 시제품 개발
SSR2 시작품 성능 재현

2027
High-beta HWR 개발
SSR2 시제품 개발

고에너지 가속구간 구축(안)

사업기간

사업 착수 후 총 6년

사업비

약 3천억원

- 대량생산을 위한 표면처리, 성능시험 및 설치 관련 기반시설 사전 준비
- 주요 재료 조기 확보 추진
- 전단부/후단부 동시 발주 (국내외 제작 설비 동시 활용)

구분	선행 준비	1차년도	2차년도	3차년도	4차년도	5차년도	6차년도	비고
사전준비	<ul style="list-style-type: none"> ● NFEC 장비심의 ● 입찰공고 준비 	[블록] 재료확보/ 제작설계 및 절차 등 준비						
제작		[블록] 전단부 착수 / 모듈조립						
		[블록] 후단부 착수 (전단부와 동시 제작) / 모듈조립						
시험				[블록] VT/HT 성능시험				
설치					[블록] 설치		[블록] 시운전	[블록] SCL3운전 병행

고에너지 RI빔 기반 핵물리 연구 확장

과학적 질문	연구 기회	구축 기반
▪ 무거운 원소는 어디서 만들어졌는가?	▪ 중성자 과잉 핵종 · 드립라인 탐색	▪ ISOL · 저에너지 가속구간 · IF 보유
▪ 핵은 어디까지 존재하는가?	▪ 핵구조 · 핵안정성 한계 연구	▪ 초전도 가속관 인력 · 인프라 보유
▪ 중성자별 물질은 어떤 성질을 갖는가?	▪ 핵물질 EOS · 대칭에너지 연구	▪ 2027년 선행 R&D 완료

ISOL + 저에너지 가속구간 + 고에너지 가속구간 + IF

우주 원소 기원과 극한 핵물질 탐구를 위한 고에너지 RI빔 연구 기반 확보



감사합니다.