다목적 소형 고속중성자 발생장치의 성능

Performance of a Multi-purpose Compact Fast Neutron Generator

장두희 [a*], 진정태 [a], 김태성 [a], 이동원 [a], 이석관 [b]
[a]한국원자력연구원 핵물리응용연구부
[b](주)중앙진공

2021년 10월 22일

*E-mail : doochang@kaeri.re.kr

CONTENTS

01 고속중성자 발생

02 고속중성자 응용분야

03 소형 고속중성자 발생장치

04 결 론

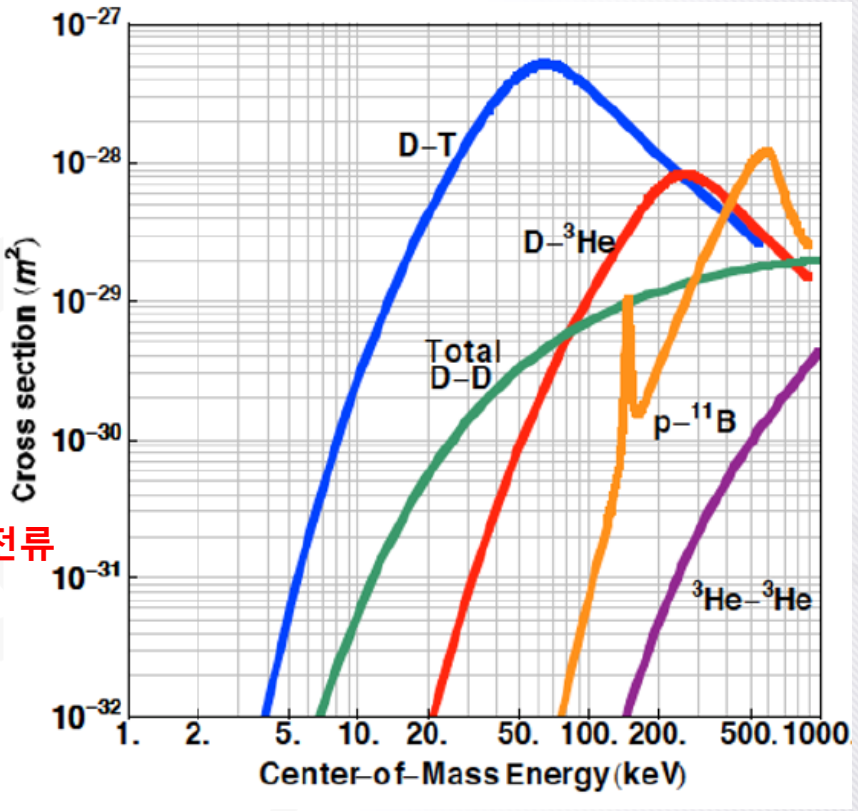
고속중성자 발생(1/3)

♦ 중성자는 핵융합 반응으로 발생
- D + D → ^{3}He + n (2.5 MeV)
- D + T → ^{4}He + n (14.1 MeV)

♦ 가속에너지와 빔전류가 클수록 높은 중성자 생성율(수율, Yield)
- F (total yield) = N σ ⌀

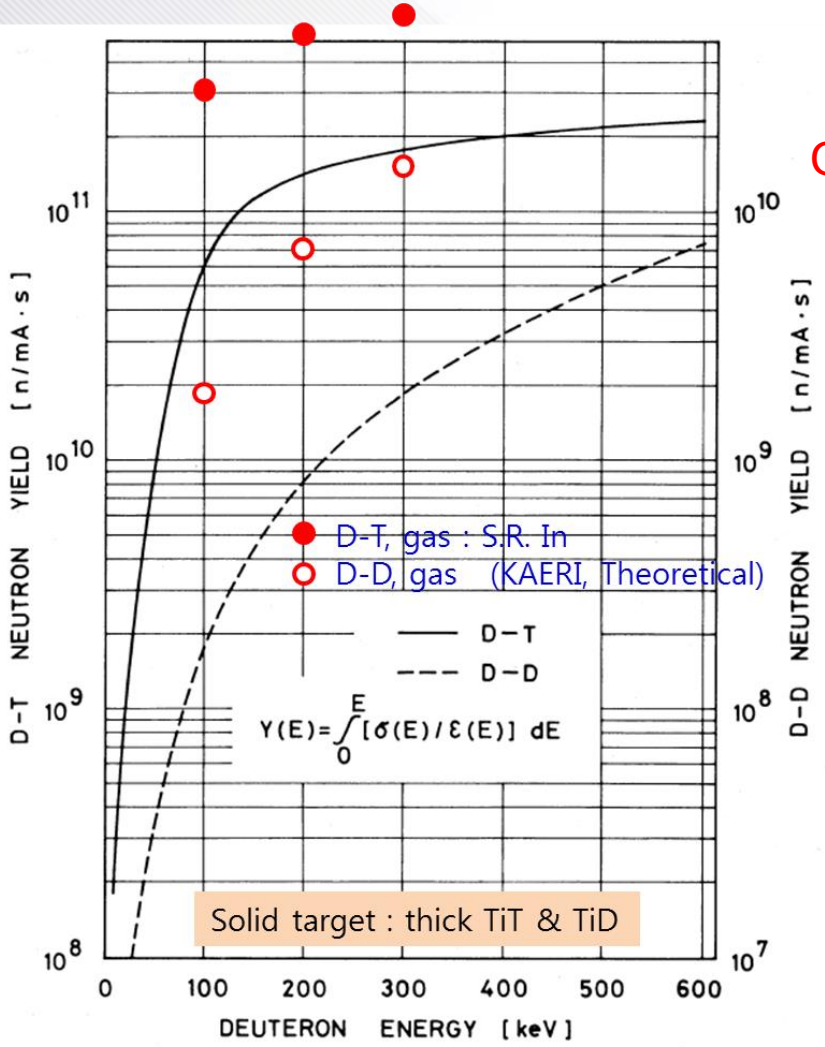
N : No. of target nuclei/cm^2
σ : cross-section [cm^2] ← 가속에너지
⌀ : Incident particle rate/sec ($\varnothing = 6.25\frac{I}{C} \times 10^{18}$) ← 빔전류
(I : beam current [A], C : charge of particle [C])

♦ D-T 반응이 보다 많은 중성자를 제공하지만, 삼중수소(T)가 필요
- 취급 안전성(어려움)이 존재



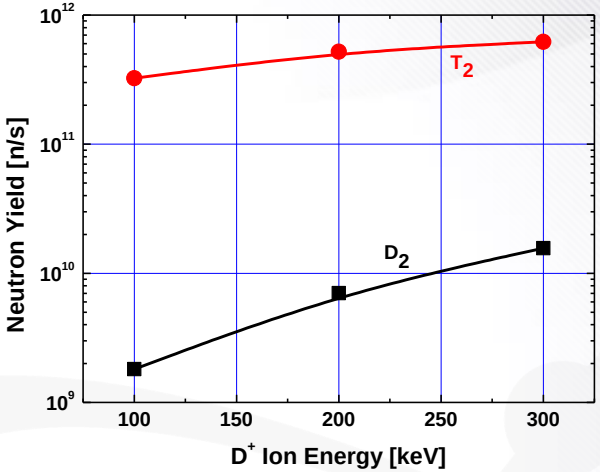
R. Radel, "Accelerator-Based Neutron Generator to Drive Sub-Critical Isotope Production Systems", PNL

고속중성자 발생(2/3)



DD/DT에 따른 중성자 생성률

Gas-target



1mA당 이온 에너지에 대한 중성자 생성률 (계산값)

Gas-target

Beam energy	Reaction	Yield (n/s)
300 keV/100 mA (30 kW)	D-D	1.6×10^{12}
	D-T	6.2×10^{13}
200 keV/50 mA (10 kW)	D-D	3.2×10^{11}
	D-T	2.4×10^{13}

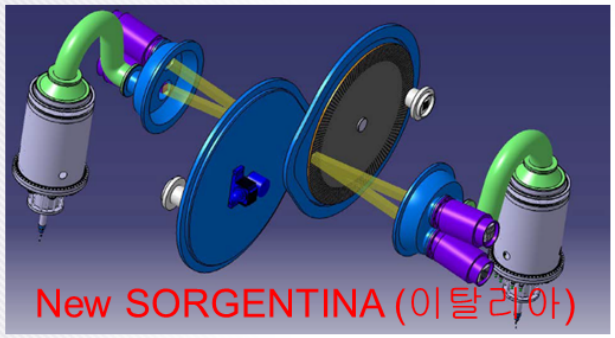
중성자 생성률 예측 (계산값)

IAEA, "Neutron Generators for Analytical Purposes", IAEA Radiation Technology Reports Series No.1 (2012)

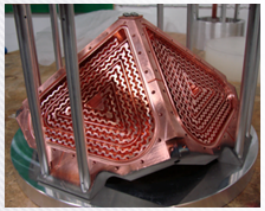
고속중성자 발생(3/3)

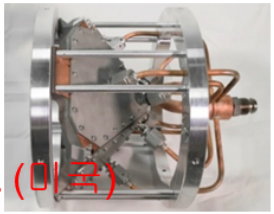
중성자 표적 특성

고체-표적



New SORGENTINA (이탈리아)

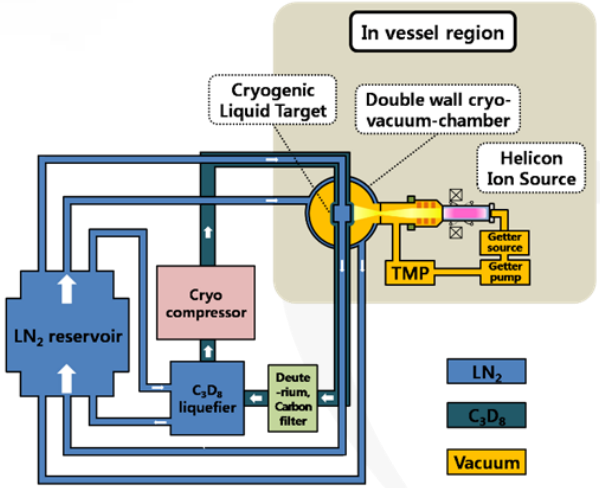




PNL (미국)

- T_iD, T_iT targets
- High heat flux
  (Cooling capability≤10MW/m²)
- Low neutron yield
  (~1/6 than Gas-target: 실험적)

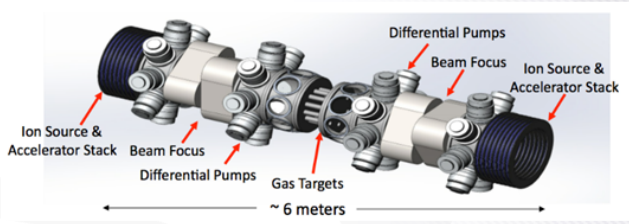
액체-표적

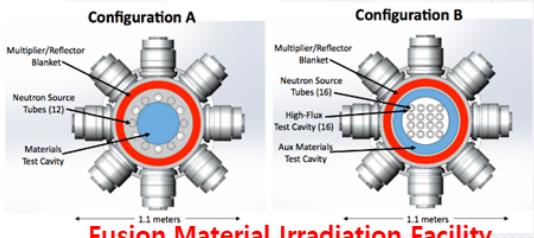


LANL-SNU neutron source

- Liquid C_3D_8, liquid C_4D_{10}
- Vaporization by beam power
- Pumping/cooling/liquefaction process
- Large liquid-nitrogen facility

기체-표적





Fusion Material Irradiation Facility
(구축비용: $27M for 4 years)

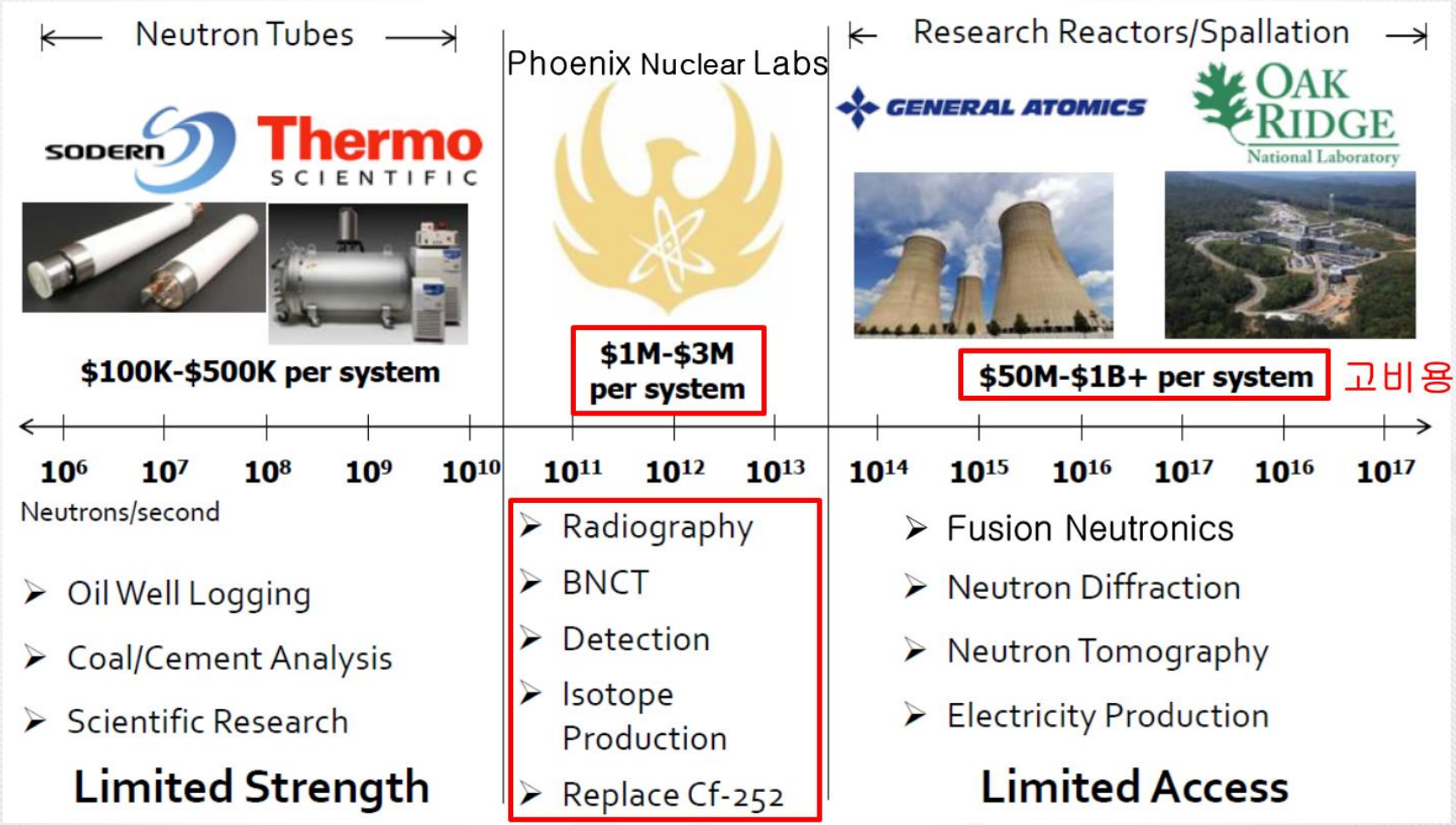
PNL (미국)

- High neutron yield
- Controllable heat flux
- Low target density
  (Low neutron flux)

Private Communication with Drs. 정승호 (KAERI) & 박재영 (PlasmaNano Corp., US)

02 고속중성자 응용분야(1/2)

» 중성자 생성율(수율)에 따른 이용분야



R. Radel, "Commercial applications of High-yield accelerator-based neutron generators", PNL

02 고속중성자 응용분야(2/2)

» 고속중성자 조사시험

- ♦ ^{252}Cf 대체
- ♦ 14 MeV 고속중성자에 의한 조사시험 데이터 부족 – 연구로(하나로), 고속로(BOR-60) 이용중
  - 핵융합로 구조재료 고속중성자 조사시험 필요

» 핵자료 생산

- ♦ 펄스(pulse) 운전 - SNS, Photo-neutron source, Quasi-monochromatic neutron source 등
- ♦ 연속(CW) 운전 – 14 MeV Frascati Neutron Generator(Italy), JAEA Fusion Neutron Source 등

» 동위원소 생산

- ♦ 의료 동위원소 Mo-99 생산 (미국 PNL 주도)

» 상업적인 이용

- ♦ 열중성자 방사선촬영(Radiography) : 영상화 시간을 수시간 이상에서 수분으로 단축 가능
- ♦ 산업용 방사선촬영 : Turbine blades, Batteries/Fuel Cells 등
- ♦ 폭발물 탐지 : IED(improvised explosive device, 즉발 장치) 탐지
- ♦ 핵물질 탐지 : 핵 밀거래 감시

R. Radel, "Commercial applications of High-yield accelerator-based neutron generators", PNL

03 소형 고속중성자 발생장치(1/6)

» 장치 개요

♦ 장치명 : 소형 고속중성자 발생장치 (Compact Fast Neutron Generator)

(i) 종류 : D^+-D^+ 중성자(2.45 MeV), Drive-in Ti-coated Cu-표적, RF 이온원-기반

(ii) 제작사 : LBNL (미국, 2005~2006년)

(iii) 개발자 : J. Reijonen & K. N. Leung

♦ 도입 부서 : KAERI / (구)원자력화학연구부

♦ 기본 성능

(i) RF 이온원 : 3 kW(13.56MHz), 100kV/10mA (D^+), Single-aperture 빔가속부

(ii) 중성자 수율(yield) : 10^8~10^9 n/s

- (선행)달성 수율(2009년) : 5.82 x 10^7 n/s (80 kV/3.7 mA at 8 mTorr)

♦ 도입 목적 : 폭발물 탐지 및 공항 수하물 검색
(즉발감마선 중성자 방사화분석법(PGNAA) 적용)

♦ (현재)운영 목표

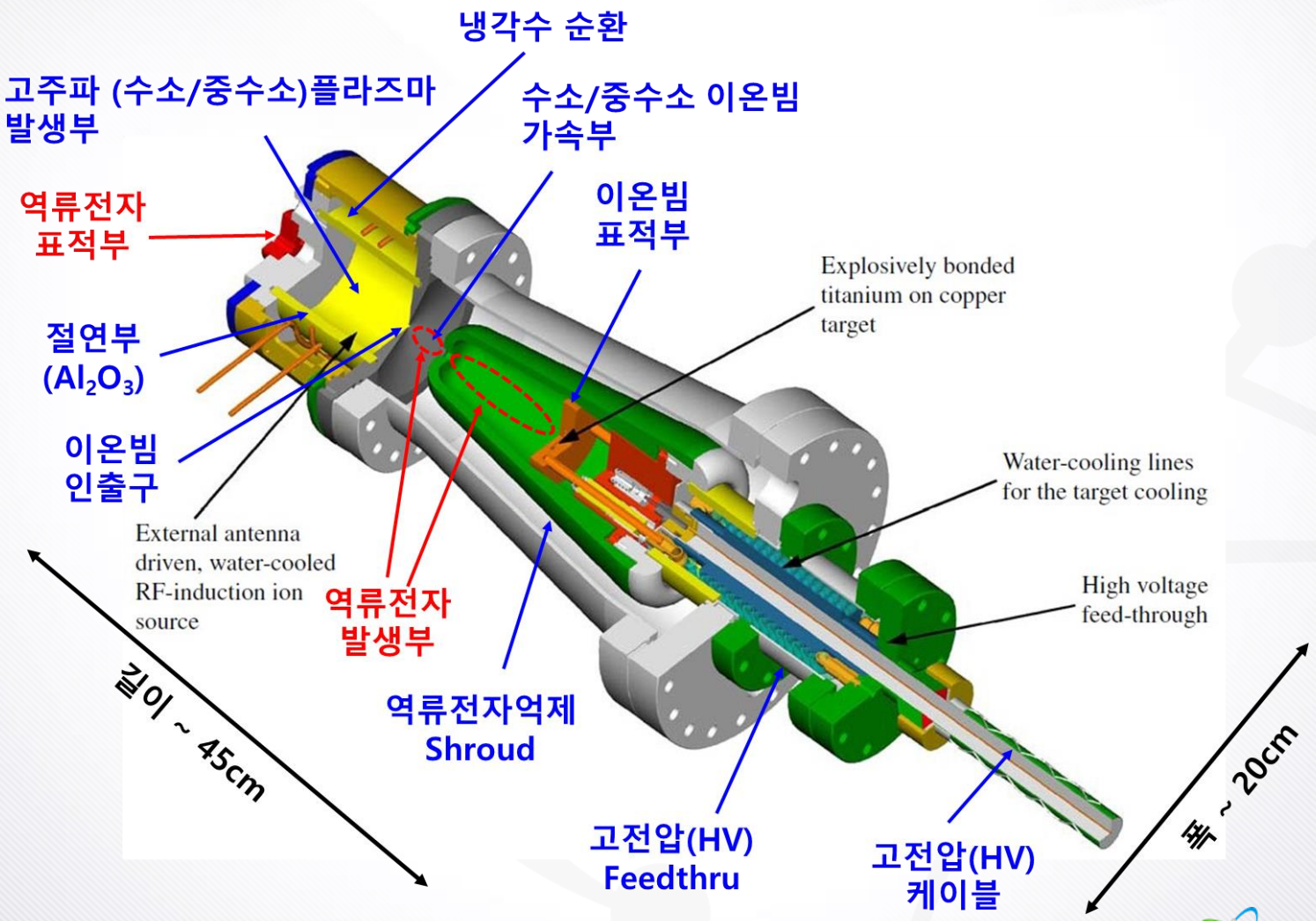
(i) 이온원 성능 개선과 빔출력(전압/전류) 향상을 통한 중성자 수율(yield) 증대

(ii) "고수율 고속중성자 발생장치 개발"을 위한 기반기술 확보

(iii) "기체/액체-표적 고속중성자 발생장치 개발"을 위한 기초시험

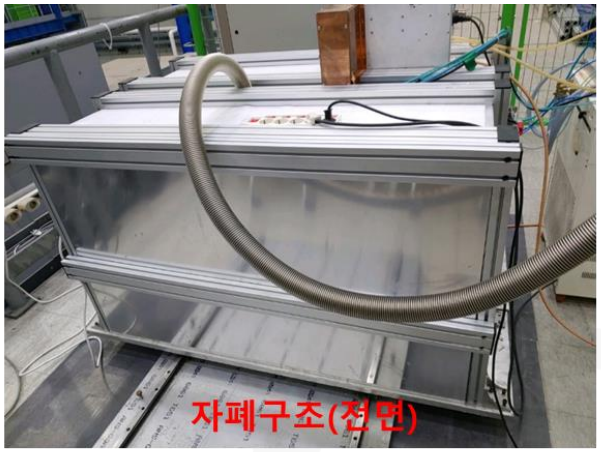
소형 고속중성자 발생장치(2/6)

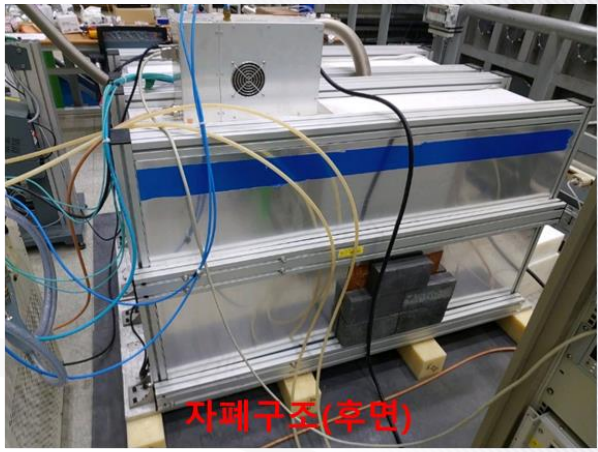
NG 본체 구조



03 소형 고속중성자 발생장치(3/6)

NG 장치 구조

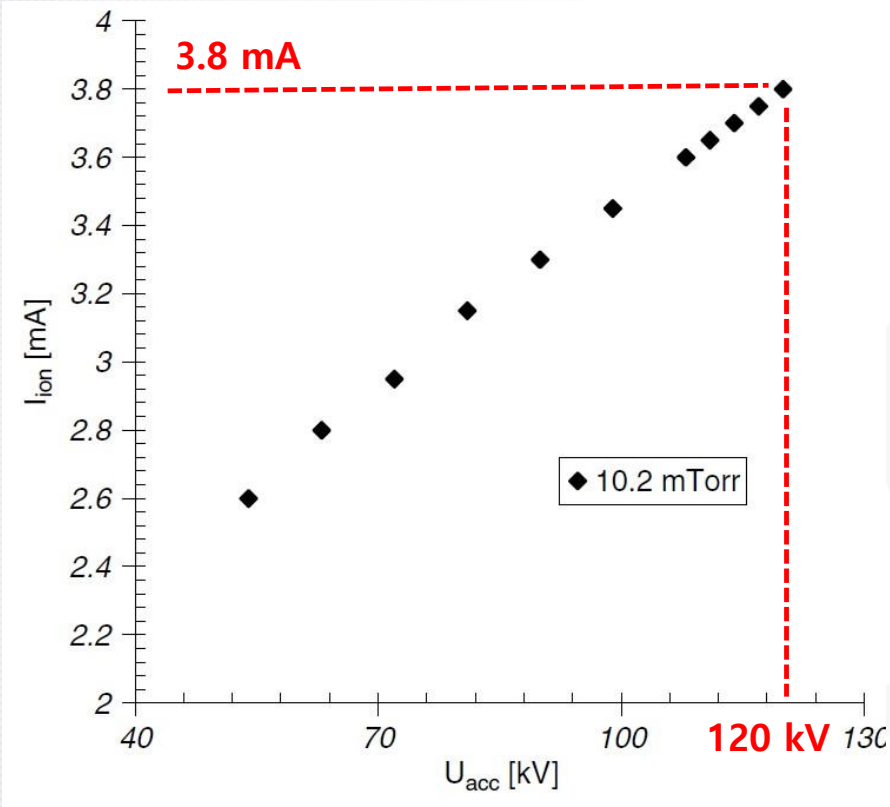


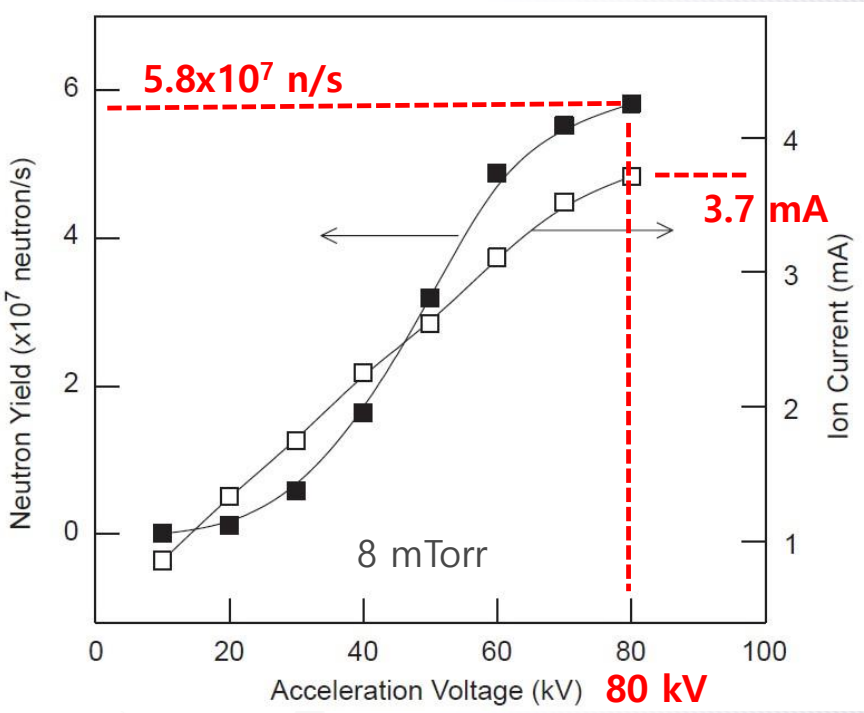


- 차폐체 구조: 외함 = 폴리에틸렌(30cm) + 보론(9%)/폴리에틸렌(0.7cm) + 납판(1.0cm)
  틈새 = 진흙 몰딩(Neutron/Clay Cat No.261, Thermo Reax) (보론 10% 함유)

03 소형 고속중성자 발생장치(4/6)

(선행) 성능시험 결과



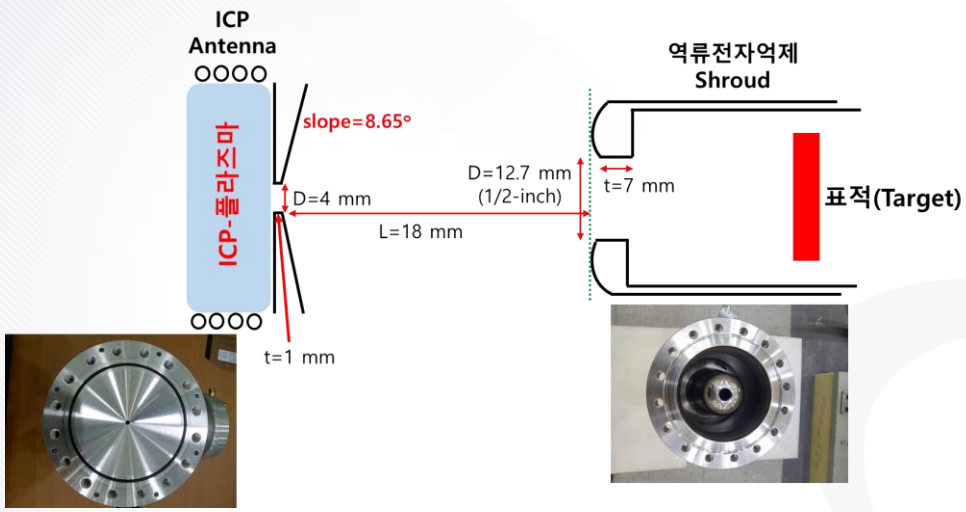


<LBNL의 수소 이온빔(H^+) 인출 결과(2007년) : 예상 D–D 중성자 수율 > 5x 10^8 n/s>

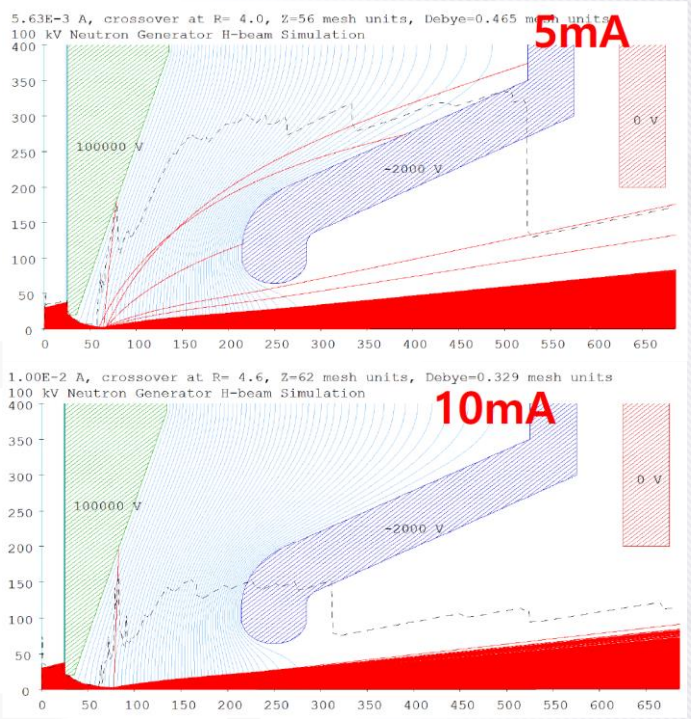
<KAERI((구)원자력화학연구부)의 중수소 이온빔(D^+) 인출 결과 및 측정된 D-D 중성자 수율(2009년)

03 소형 고속중성자 발생장치(5/6)

가속부 빔인출 전산모사(Simulation) 결과



<빔인출 가속부 구조(실측 결과)>

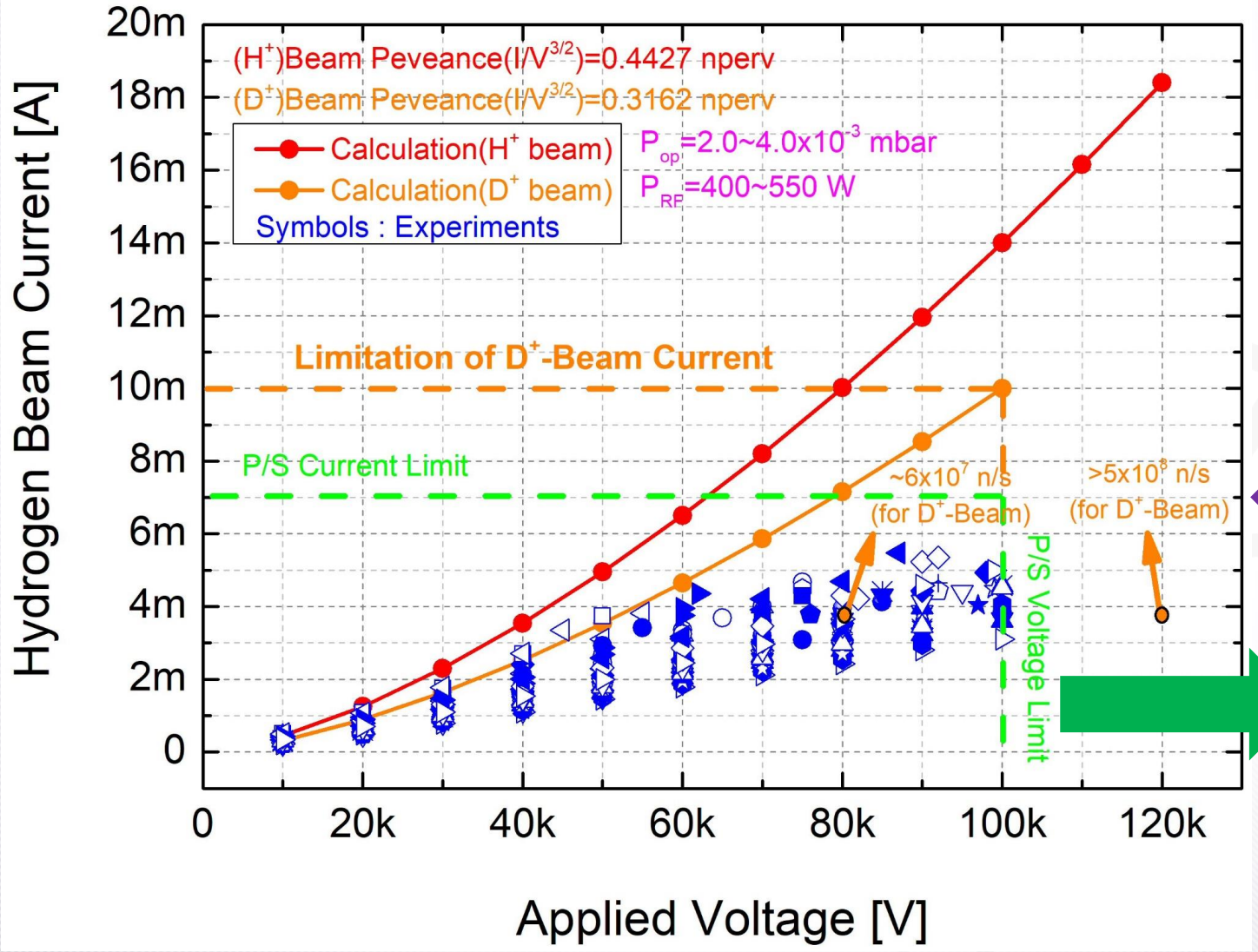


<수소 이온빔(H^+) 궤적 계산결과>

- ○ 100 kV/15 mA H^+-빔인출 가능 확인
- ○ 낮은 빔전류보다 높은 빔전류 운전에서 안정성이 향상될 가능성 있음
- ○ 매우 낮은 빔전류 또는 낮은 빔전류/높은 빔전압에서 장시간 운전하면, 역류전자의 영향으로 인출전극 손상 가능성 높음

소형 고속중성자 발생장치(6/6)

(현재) 빔인출 성능시험 결과



표적 냉각수 누설전류 : 0.1 mA (at 100 kV)

고전압 전원의 출력한계로 정격전류 빔인출에는 한계가 있음

04 결 론

- LBNL(미국)의 소형 고속중성자(D-D 핵반응) 발생장치 도입(2006년)
  - 주관 : KAERI (구)원자력화학연구부
- 장치 보완 수행
  - 가속부 인출구(Hole) 손상 수리
  - 표적(Target) 냉각관로 손상 수리
  - 누설 고주파(RF) 억제 (HV-전원 동작에 영향을 미침)
- 수소 이온빔(H^+) 인출 성능 확인
  - 최적 운전조건(기체 압력, RF 출력 등) 확인
  - 표적 냉각관로의 누설전류 최소화 방안 마련 (냉각수용 **이온교환수지** 사용)
    - 냉각수 저항이 70 MΩ/m(1.4 mA at 100 kV)에서 1 GΩ/m(0.1 mA at 100 kV)으로 증가
- 중수소(D_2) 방전(플라즈마 발생) 시험 수행
  - P_{RF} = 450~550 W (P_{op} = 2.0~3.0 x 10^{-3} mbar)
- 다목적(다용도) 소형 고속중성자 발생장치로 활용 예정
  - **고수율(> 10^{10} n/s) 고속중성자 발생장치 개발을 위한 기반기술 확보**

감사합니다!