

X-band 전자가속기 개발 현황

- I. 방사선 기기 및 이용 Workshop -

2022.10.19.

이승현, 이상빈, 진정태,
하동협, 최효정, Mitra Ghergherechi, 채종서

한국원자력연구원, 성균관대학교

Outline

- ① 연구개발 과제 개요
- ② 연구개발 배경 : 왜 암치료기인가?
- ③ 연구개발 목표 : Dual-head Gantry with X-band LINAC for RT Total Solution
- ④ X-band LINAC 연구 수행 내용
- ⑤ 선원 성능 실험
- ⑥ 맺 음

연구개발 과제 개요

자동병변 추적기반 듀얼 빔 방사선 암 치료 통합 솔루션 개발

[주관: 성균관대학교, 참여기업: 2개, 참여기관: 3개]

주관기관 1개

참여기업 2개

참여기관 3개



연구 기간

총 연구 예산

성균관대학교

로봇앤디자인, 쓰리디산업영상

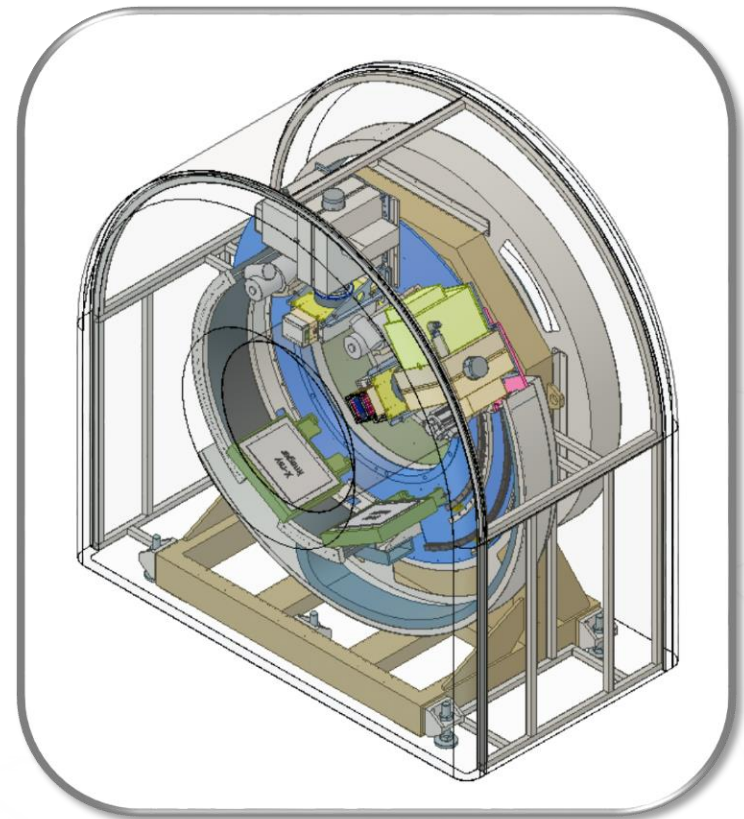
충북대학교병원, 한국원자력연구원, 한국원자력의학원

2020년 7월 1일 ~ 2025년 12월 31일 (6년)

106억 1천8백2십만 원
(민간 부담금 : 7억 1천8백2십만 원)

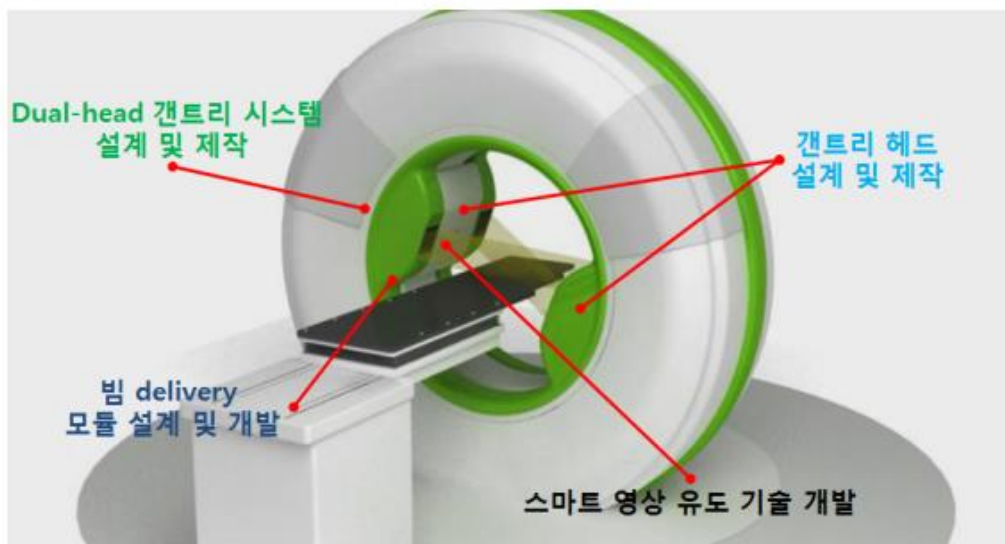
- 참여인원 : 과제책임자 채종서 외 31명 (10.75 M/Y)
- 연구개발의 최종 목표

세계 최초 다중 헤드 기반 고에너지 X-선 암치료기 개발/검증 및 국내 최초 임상실험 후 제품 상용화 수행



➤ 연구과제 History

치료시간 30% 단축을 위한 자동 병변 추적 기술 기반
악성 종양 치료용 500 cGy 급 dual-head 갠트리 방사선 치료 시스템 개발



- (1) 연구수행 기간 : 12.12.01. ~ 18.02.28.
- (2) 연구 예산 : 86.75 억원 (민간부담금 포함)
- (3) 과제 관리기관 : 과기정통부 (IITP)
- (4) 총괄/참여기관 : 성균관대 외 9개
- (5) 최종목표
듀얼 헤드 기반 암 치료기 시제품 개발
및 자체/공인인증 성능평가 수행 (TRL 6단계)

자동 병변 추적 기술 기반 듀얼 빔 방사선 암 치료 통합 솔루션 개발



- GMP 허가를 위한 듀얼 빔 방사선 암치료기 제작 및 상용화 구축
 - 암 치료용 6MV X-band 선형가속기 제작
 - 듀얼빔 방사선 치료 갠트리 시스템 제작
- AI 기반 RTP (방사선치료계획)
- CT 영상통합 OIS (치료기의 정보전달시스템) 구축 및 상용화
- IRB 승인 및 의료기기 인허가 획득
- 전임상 및 임상시험 완료
- 방사선 치료기 사업화 추진

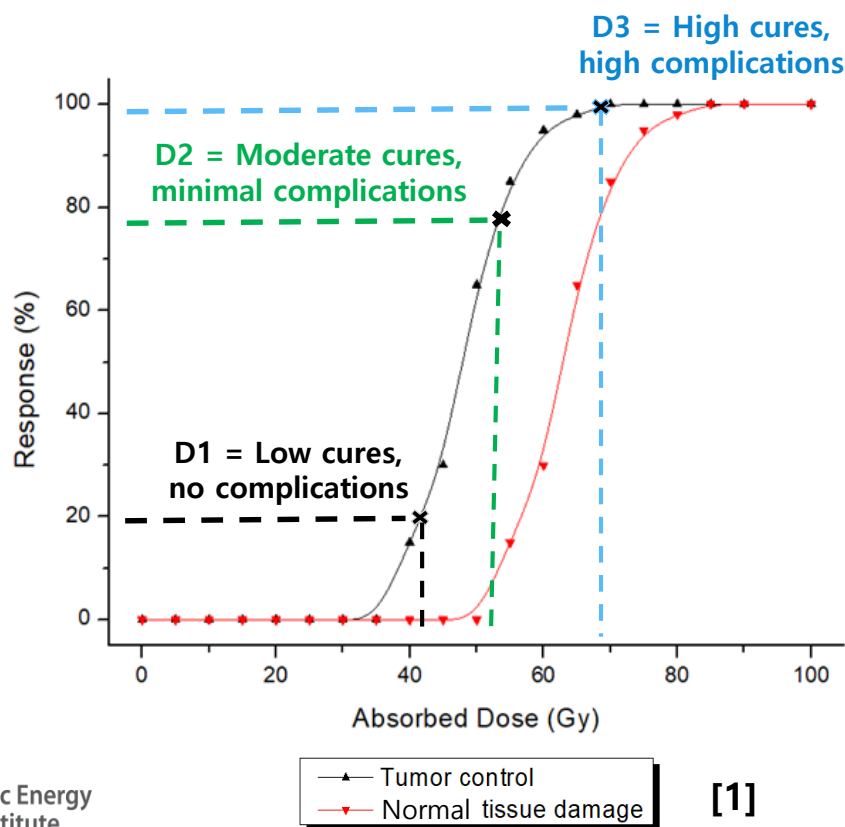
- (1) 연구수행 기간 : 20.09.01. ~ 25.12.31.
- (2) 연구 예산 : 106.18 억원 (민간부담금 포함)
- (3) 과제 관리기관 : 범부처사업단 (KMDF)
- (4) 총괄/참여기관 : 성균관대 외 5개
- (5) 최종목표
GMP 인증 기반 암 치료기 시제품 개발
및 IRB 전임상/임상평가 완료 (TRL 8단계)

➤ 연구과제 차별성 / 도전성

과제명	치료시간 30% 단축을 위한 자동 병변 추적 기술 기반 악성 종양 치료용 500 cGy 급 dual-head 갠트리 방사선 치료 시스템 개발	자동 병변 추적 기술 기반 듀얼 빔 방사선 암 치료 통합 솔루션 개발	차별성/도전성
개요	 <p>Dual-head 갠트리 시스템 설계 및 제작 갠트리 헤드 설계 및 제작 빔 delivery 모듈 설계 및 개발 스마트 영상 유도 기술 개발</p>	 <ul style="list-style-type: none"> ● GMP 허가를 위한 듀얼 빔 방사선 암치료기 제작 및 상용화 구축 ● 암 치료용 6MV X-band 선형가속기 제작 ● 듀얼빔 방사선 치료 갠트리 시스템 제작 ● AI 기반 RTP (방사선치료계획) ● CT 영상통합 OIS (치료기의 정보전달시스템) 구축 및 상용화 ● IRB 승인 및 의료기기 인허가 획득 ● 전임상 및 임상시험 완료 ● 방사선 치료기 사업화 추진 	<p>국내 자체기술을 이용, LINAC 제작 공정 기반 국내 최초 암 치료기 개발 및 기술 자립성/가격경쟁력 확보</p>
용도	치료시간 30% 단축용 세계 최초 듀얼 헤드 기반 암 치료기 개발		
LINAC	국내 최초 초소형 X-band, Dual	고선량 X-band, Dual	60 (70) mAp 출력 향상
갠트리	Double-Plate	Single-Plate	설계 단순화, 회전반경 향상
X-ray 영상	Cone-beam CT (CBCT)	High-Resolution CBCT OIS 소프트웨어 개발	정밀 진단 기술
MLC	O	O	자체 특허 보유 기술 활용
선량 발생	6 MeV 기준 5 Gy/min	6 MeV 기준 > 6 (8) Gy /min	SBRT용 고선량 발생
갠트리 위치정밀도	2 mm	1 mm	정밀도 향상
Static Beam Guide Accuracy	1 mm	0.9 mm	영상 해상도 향상
RTP 유무	없음	진단/치료 병합 RTP	치료장비 인증/임상시험/산업화

연구개발 배경 : 왜 암치료기인가?

- 방사선치료 (Radiation Therapy)는 종양 병변에 치료유효량 (Therapeutic ratio) 이상의 방사선을 정확하게 조사하여 암세포의 증식을 억제하거나 파괴하는 치료방법을 의미함
- 체외방사선치료 (External Beam Radiotherapy, EBRT)는 가장 대표적인 방사선 치료방법으로, 전 세계 암 치료 장비의 81% 이상을 차지하며 그 비율은 점차 증가하고 있음



[1]

14292

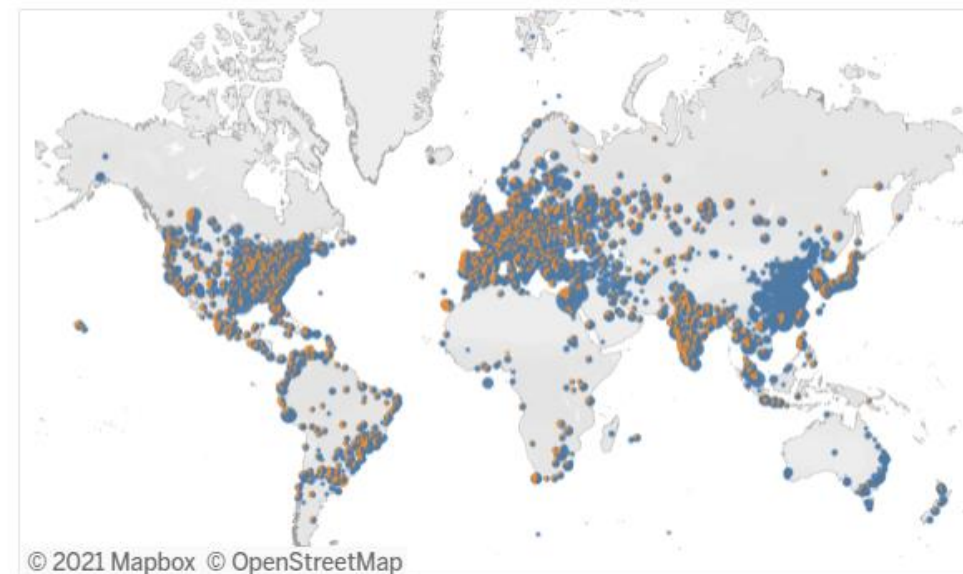
MV Therapy

105

Light Ion Therapy

3321

Brachytherapy

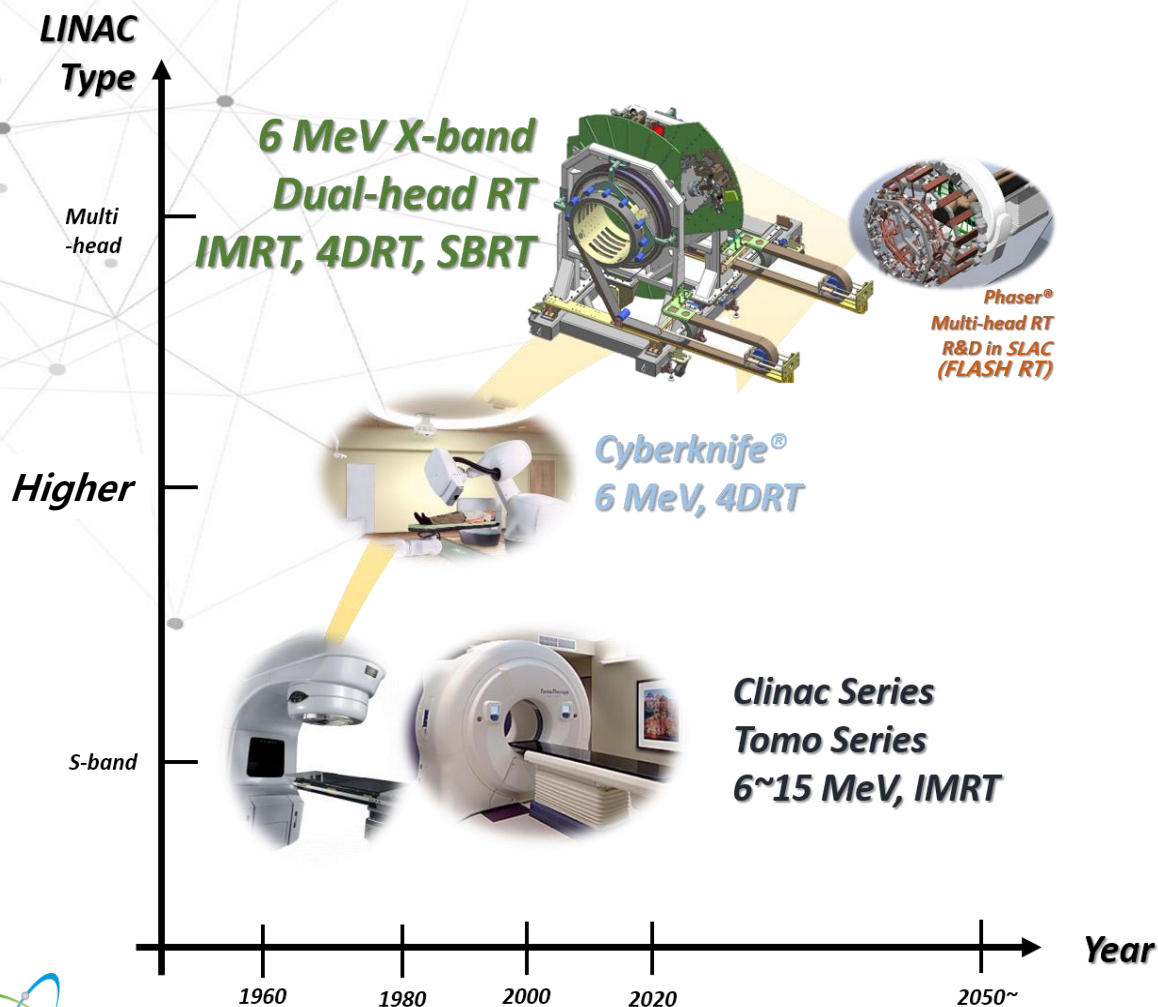


[2]

[1] KEIT PD issue Report, “방사선 치료기기 기술동향 및 산업현황”, 2017.

[2] IAEA Directory of Radiotherapy Centres, <https://dirac.iaea.org>

- 더 높은 가속 효율 및 소형화된 방사선 치료기 시스템 개발을 위하여, 전 세계적으로 보다 높은 공진주파수를 이용한 방사선치료기 시스템 개발이 활발히 이루어지고 있음 [3][4]
- 국내에서는 한국원자력연구원이 성균관대학교 포함 컨소시엄을 구성하여 범부처전주기 의료기기개발 연구과제를 통해 임상시험 및 상용화 연구를 수행하고 있음 [5-7]

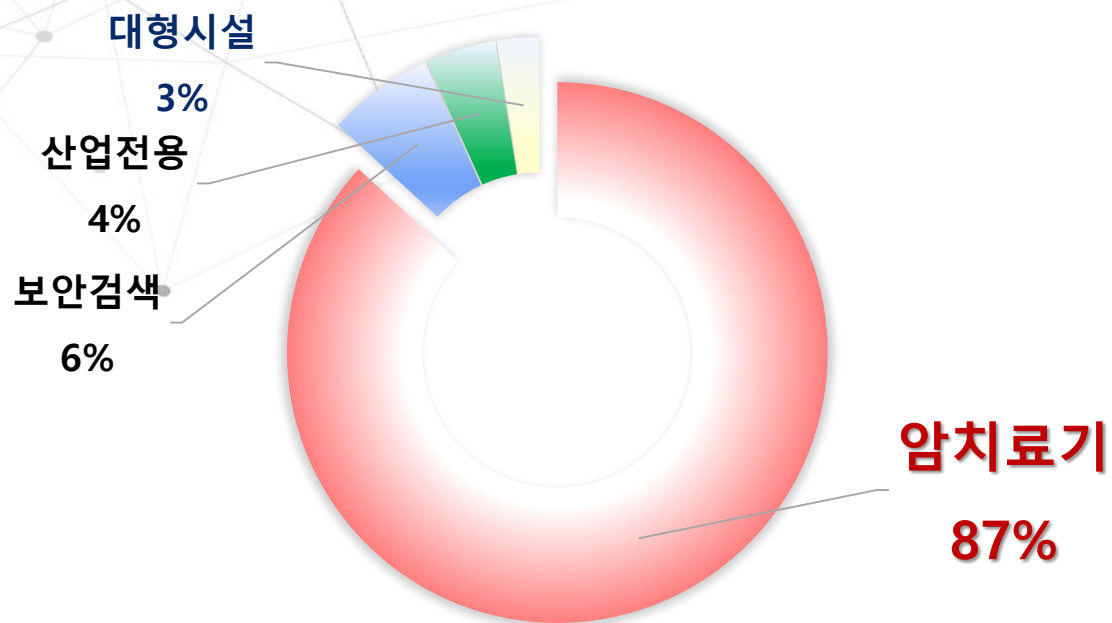


개발국가	개발기관	목적	주파수 대역	상용화 상태
한국	성균관대학교, 한국원자력연구원	방사선 치료(RT)	9.3 GHz	시작품, 임상 (전임상)
	한국원자력의학원	방사선 치료(RT)	C-band	시작품, 임상
	한국전기연구원	방사선 치료(RT)	9.3 GH	시작품
미국	ACCURAY® CyberKnife®	방사선 치료(RT)	9.3 GHz	상용화
	RadiaBeam	방사선 치료(RT)	9.3 GHz	시작품
유럽	CERN	기초과학, 방사선치료(RT)	11.4 GHz	시작품
중국	칭화대학교	방사선치료(RT), 비파괴검사(NDT)	9.3 GHz	설계중

➤ 국내 방사선치료기 시장 분석

● 국내 선형가속기 발생장치 설치 현황

- ① MV급 암치료기 : 205대 [8]
- ② 보안검색 용도 (항만) : 약 15대 이상
- ③ 산업전용 (기계구조 점검 등) : < 10대
- ④ 연구/산업용 대형시설 : ~6대



● 미래 수요 현황 파악

- ❖ 국내 설치된 암 치료기는 전량 수입되고 있으며, 국내 기술에 기반한 장비 개발을 꾸준히 진행하고 있으나, 상용화된 제품은 없음
- ❖ 해당 장비들 중 핵심 부품인 고주파가속관 모듈의 교체주기는 약 15년이며, 곧 Super-cycle이 도래할 것으로 예상되고 있음
- ❖ 더불어 1) 설치되는 장비가 증가하고, 2) 성능개선 요구 등이 증가함에 따라 보다 높은 성능과 다양한 치료방법을 제공하는 신규장비 수요 역시 계속 증가할 것으로 예상함 ('09 : 107대/72기관 [9] -> '19 : 205대/91기관)

➤ 세계 방사선치료기 시장 분석 (from Varian)

WORLDWIDE CANCER BURDEN



24.6M

new cancer cases
per year by 2030



\$2T

global economic burden
in 2010

50-60%

of patients with cancer need RT



56%

of cancers diagnosed in
high income countries



10%

of patients have
access to RT in low
income countries



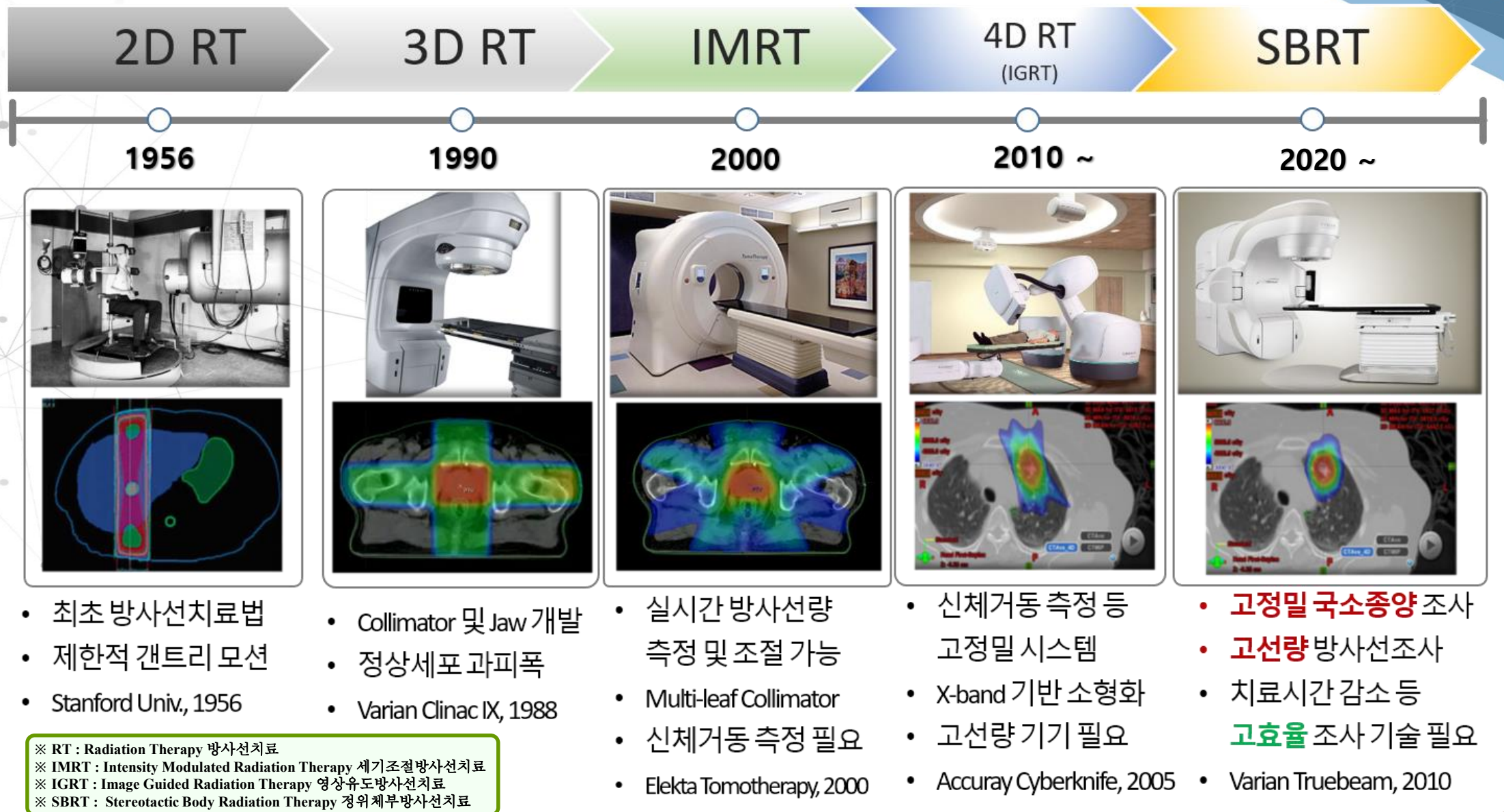
20,000+

Linacs needed by 2035, with greatest
need in low and mid-income countries

Expanding global access to radiotherapy. Lancet Oncol. Vol 16, Sept.2015
VARIAN CONFIDENTIAL – INTERNAL USE ONLY

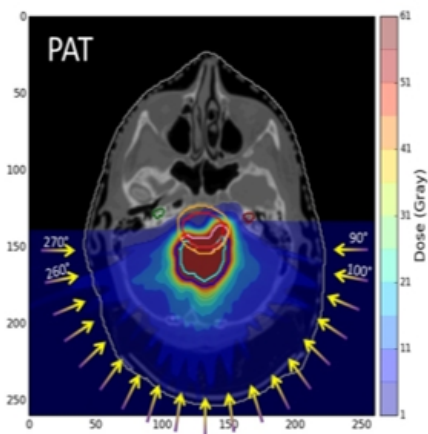
varian

➤ 연구 기술 개발 단계

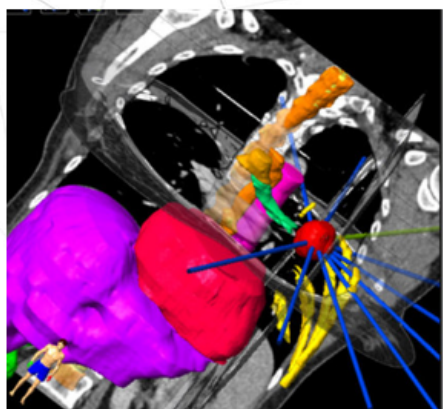


※ RT : Radiation Therapy 방사선치료
 ※ IMRT : Intensity Modulated Radiation Therapy 세기조절방사선치료
 ※ IGRT : Image Guided Radiation Therapy 영상유도방사선치료
 ※ SBRT : Stereotactic Body Radiation Therapy 정위체부방사선치료

➤ 국내 및 해외 방사선 치료 기법 동향



Arc Therapy



SBRT 치료

	Image Guided Radiotherapy	Intensity Modulated Radiotherapy	Stereotactic Therapy	Low Dose Rate Brachytherapy	High Dose Rate Brachytherapy
2017	1,842.0	1,482.9	1,101.4	463.4	275.7
2019	2,553.9	1,990.7	1,546.2	546.3	443.3
증가율	38.6 %	34.2 %	40.4 %	17.9 %	60.8 %

[10] Ref: M&M Radiotherapy Market Report

	2014 년	2016 년	2018 년	2019 년
총 치료건수	4042	4027	4494	4456
SBRT 치료건수	283	443	764	1025
SBRT 치료비율	7 %	11 %	17 %	23 %

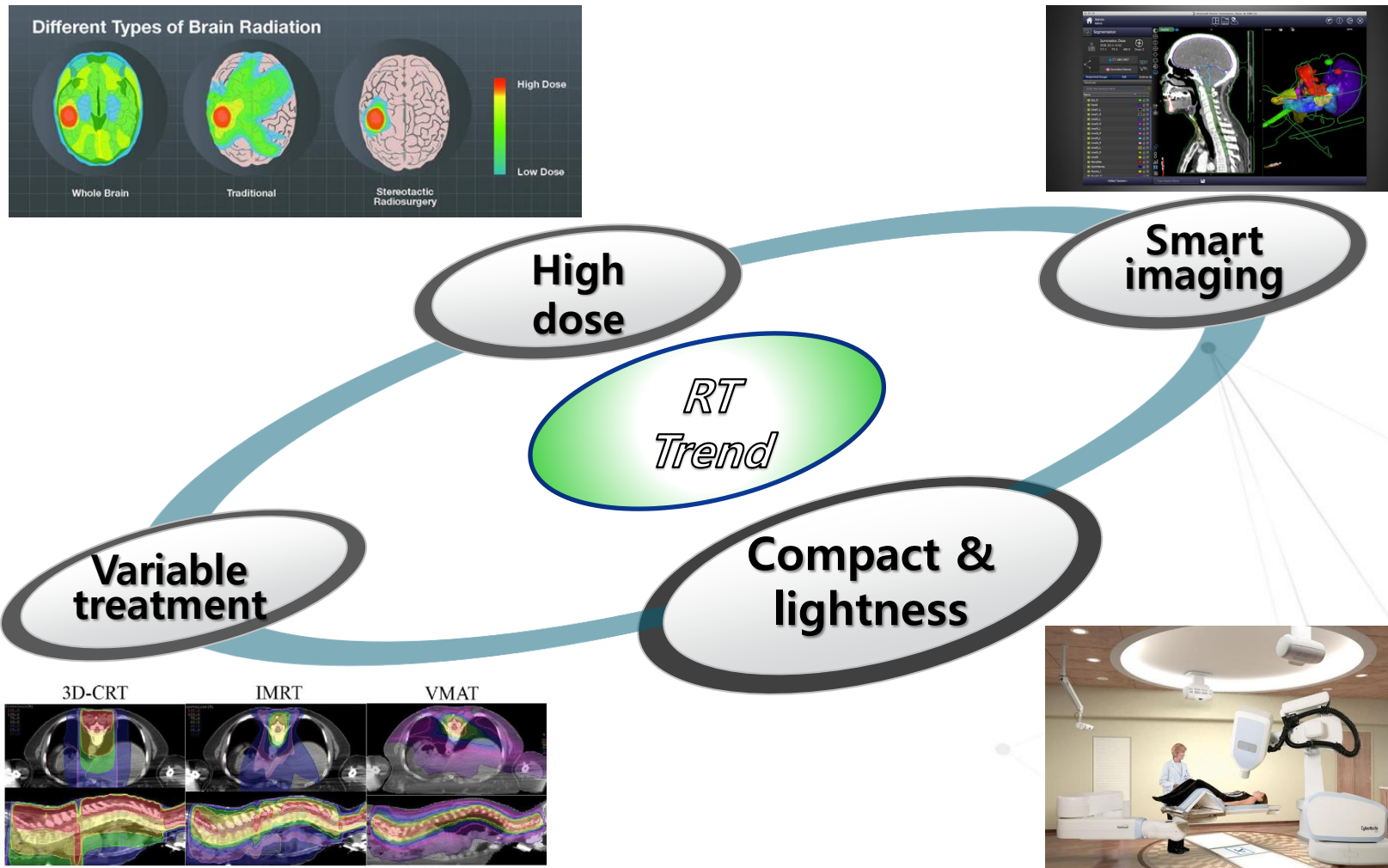
[11]Ref: 삼성서울병원 보고서

삼성서울병원 SBRT 치료 비율 (2014: 7 % → 2019: **23 %**)

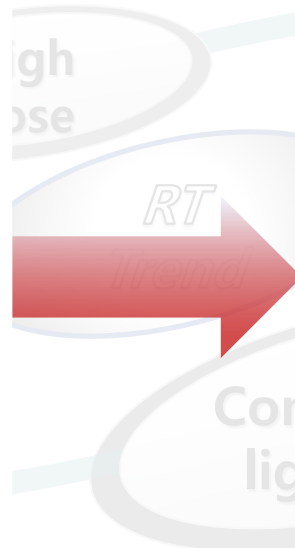
2017년 이후 모든 방사선 치료기에서 VMAT 기법 이용

※ VMAT : Volumetric Modulated Arc Therapy 입체 세기조절 회전 방사선 치료

연구개발 목표 : 어떻게 개발할 것인가?



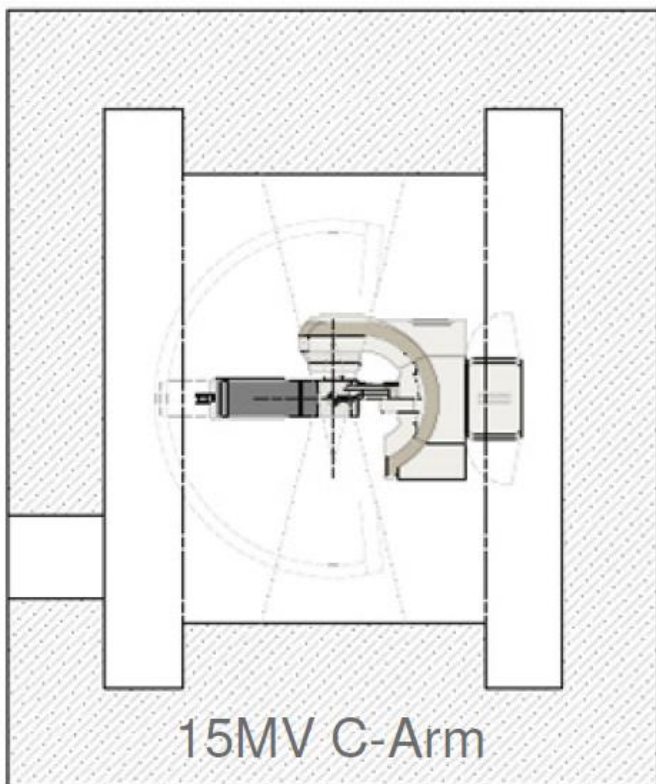
연구개발 목표 : 무엇을 개발할 것인가?



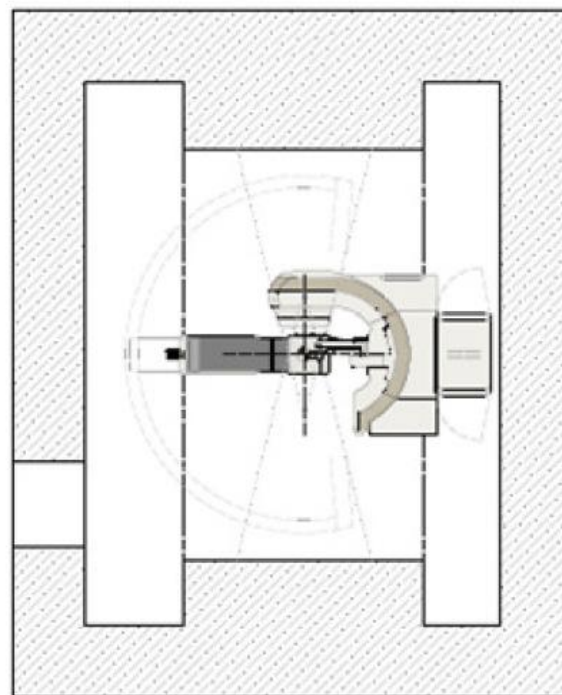
➤ 필수조건 1. 작은 크기

HALCYON TREATMENT ROOM REQUIREMENTS

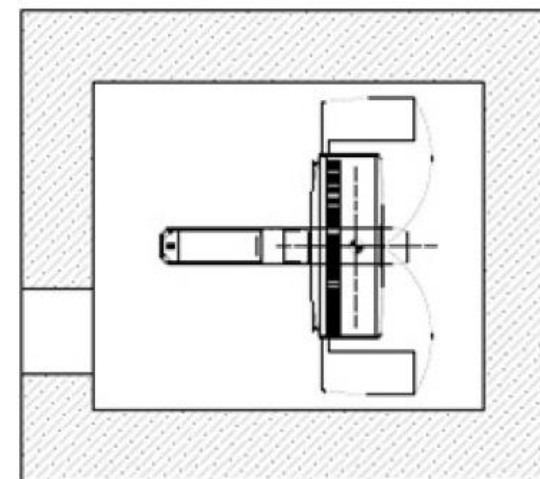
Reduced Footprint Compared to C-Arm Linear Accelerators



15MV C-Arm



6MV C-Arm



HALCYON

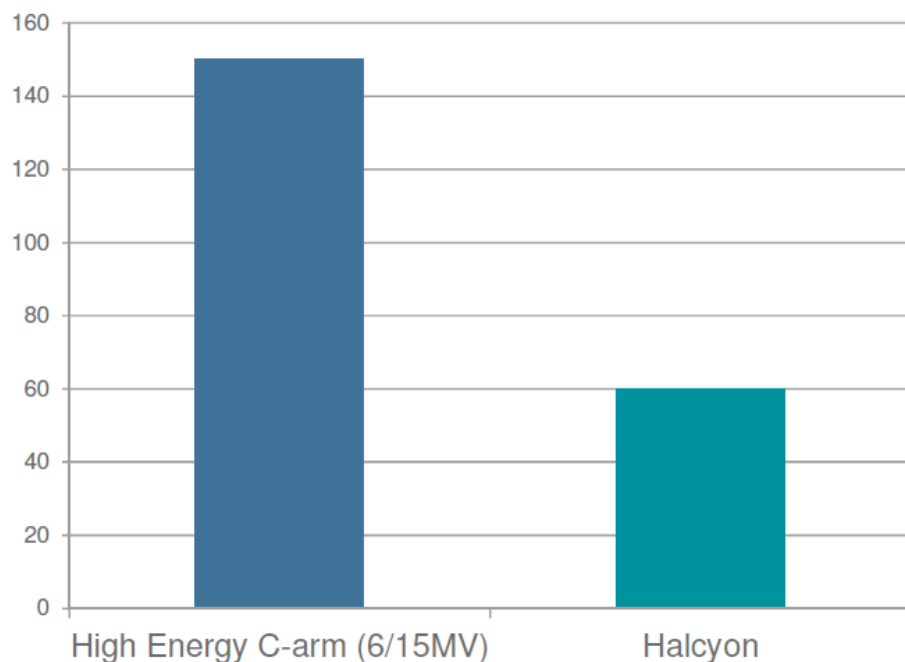
➤ 필수조건 1. 작은 크기

HALCYON TREATMENT ROOM REQUIREMENTS

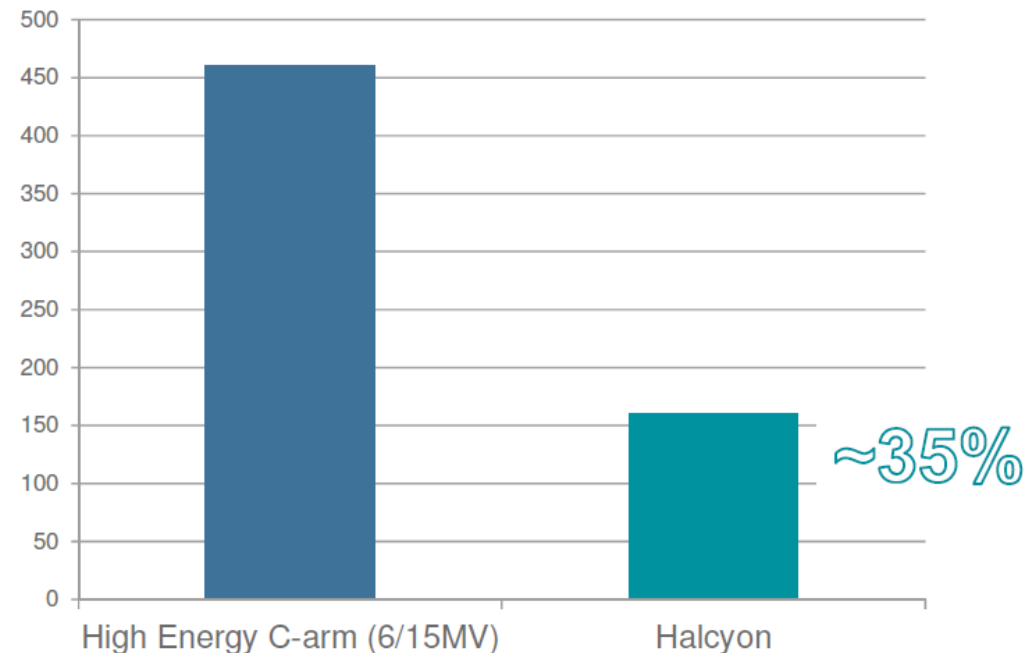
Reduced Construction Costs – Typical Values Compared to C-Arm



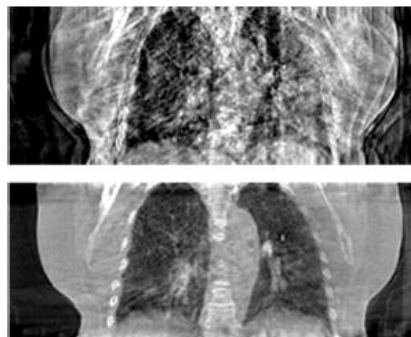
Minimum bunker size (m²)



Amount of concrete (m³)



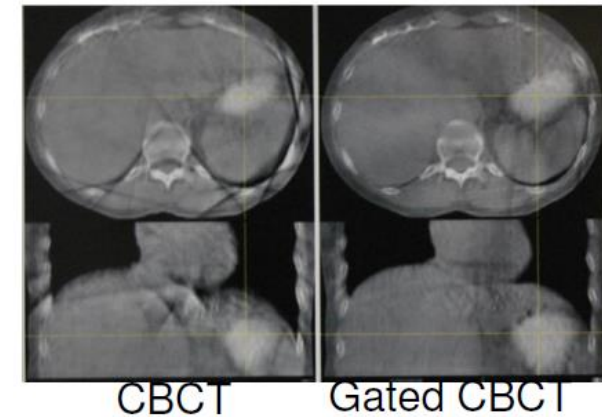
➤ 필수조건 2. 스마트한 영상 & 치료계획 수립



VARIAN CONFIDENTIAL – INTERNAL USE ONLY



*Available in TrueBeam 2.7

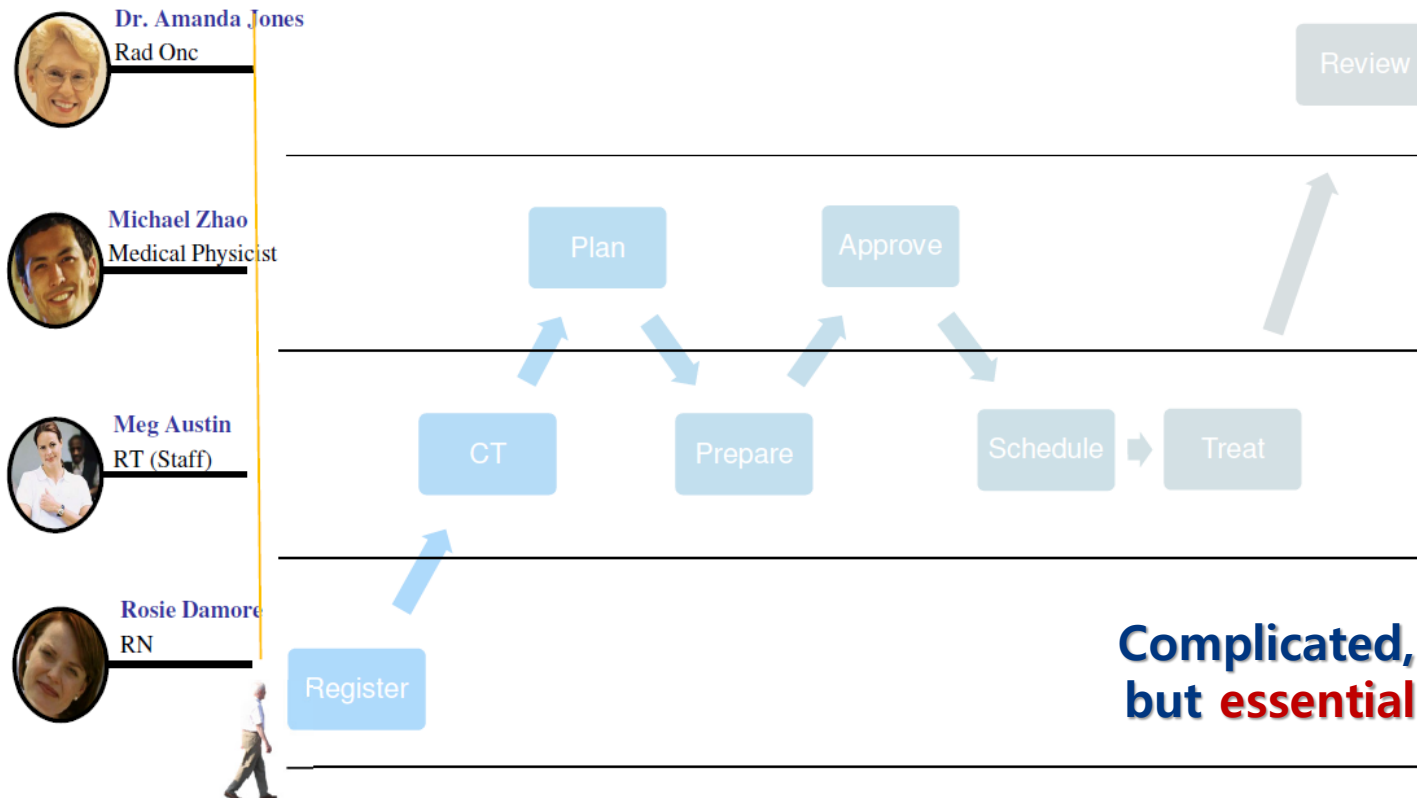


varian

Works in progress: not available for sale, subject to change.

➤ 필수조건 2. 스마트한 영상 & 치료계획 수립

Basic Oncology Workflow



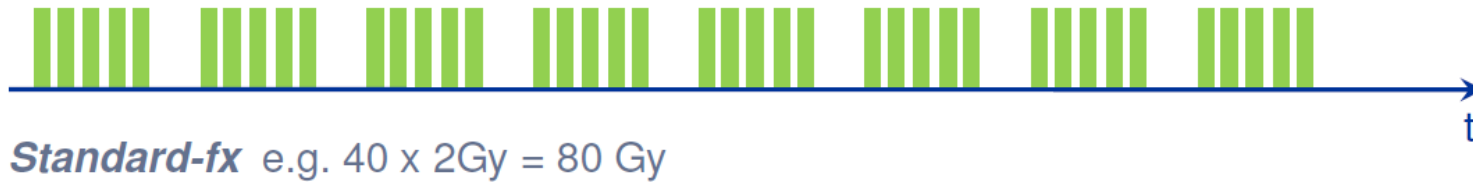
VARIAN CONFIDENTIAL – INTERNAL USE ONLY

varian

➤ 필수조건 3. 고선량 방사선 치료 & 치료 정확성 향상

Hypofractionation, FFF beam, radiosurgery

1. Interfractional!



2. Inter- and Intrafractional!

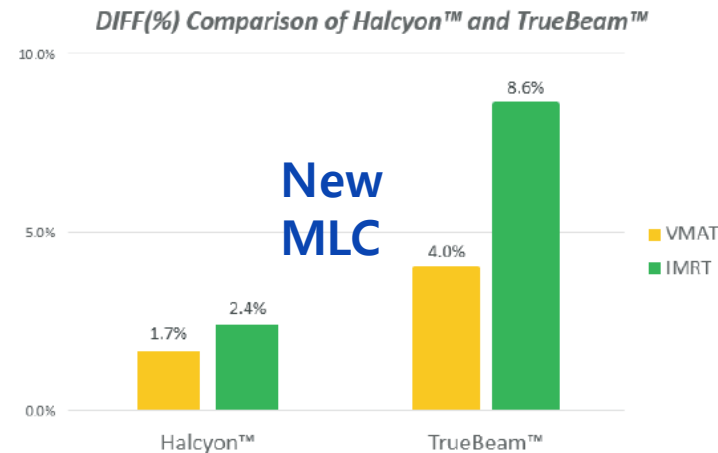


Fig. 8. Comparison of Measurement and TPS Calculation Difference Mean Absolute Error rates in Each Machine

[10] Halcyon™ 선형가속기 6MV-FFF 에너지의 표재 선량에 대한 고찰: Phantom Study, 최성훈 외, 대한방사선치료학회지 Vol.32, 2020.

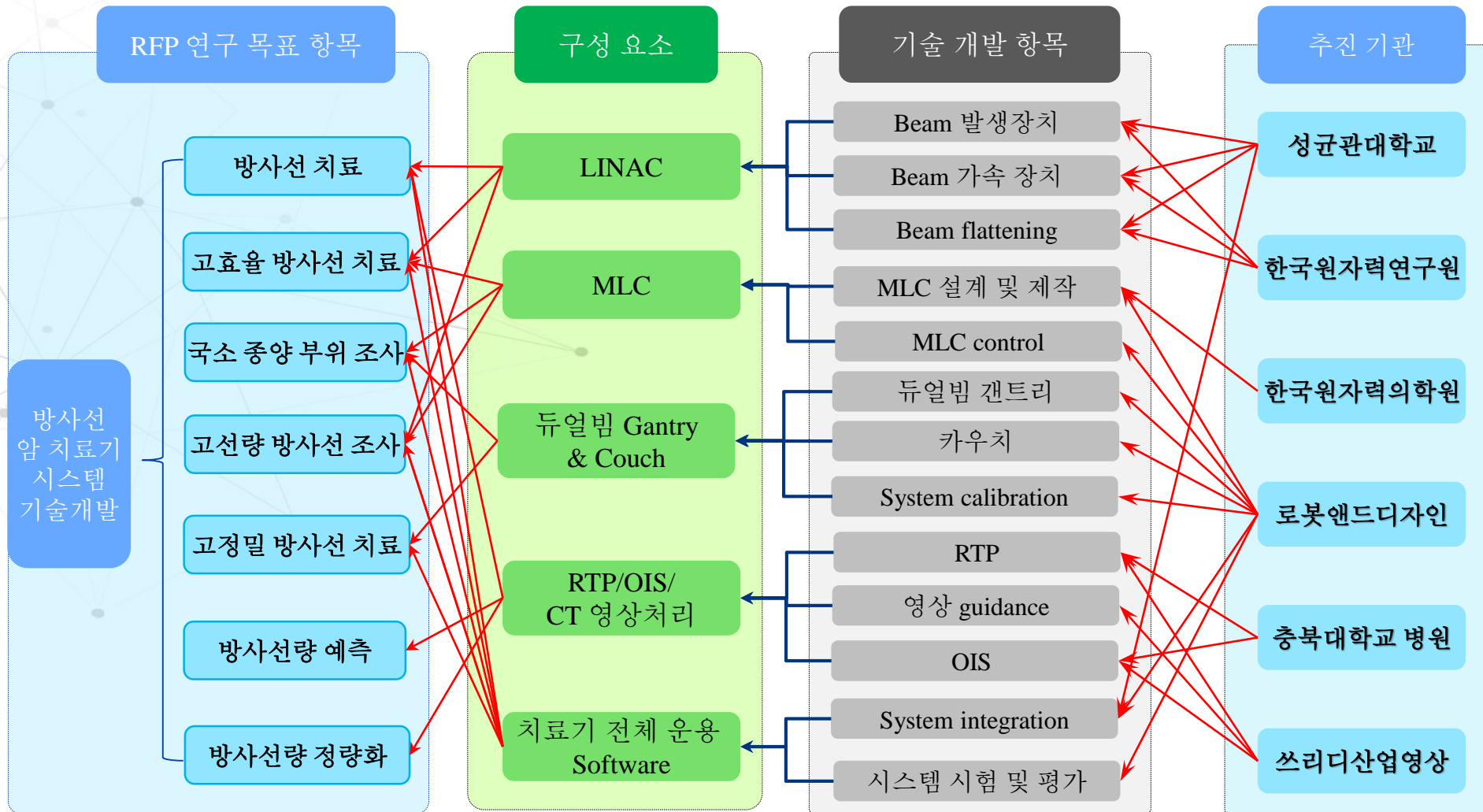
VARIAN CONFIDENTIAL – INTERNAL USE ONLY

varian

최종 목표 : Dual-head Gantry with X-band LINAC for RT Total Solution

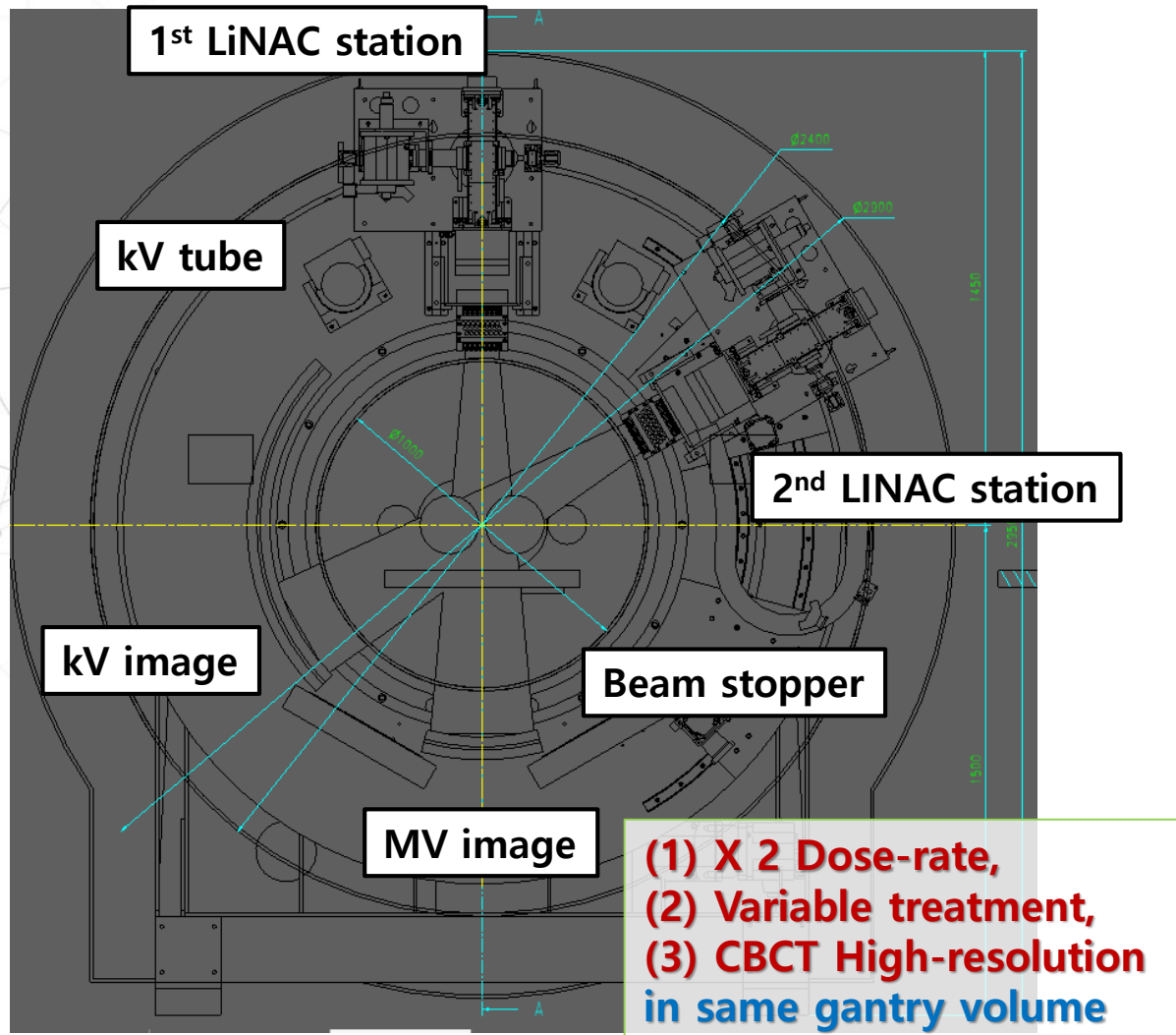


➤ 세부 연구방법 및 추진전략

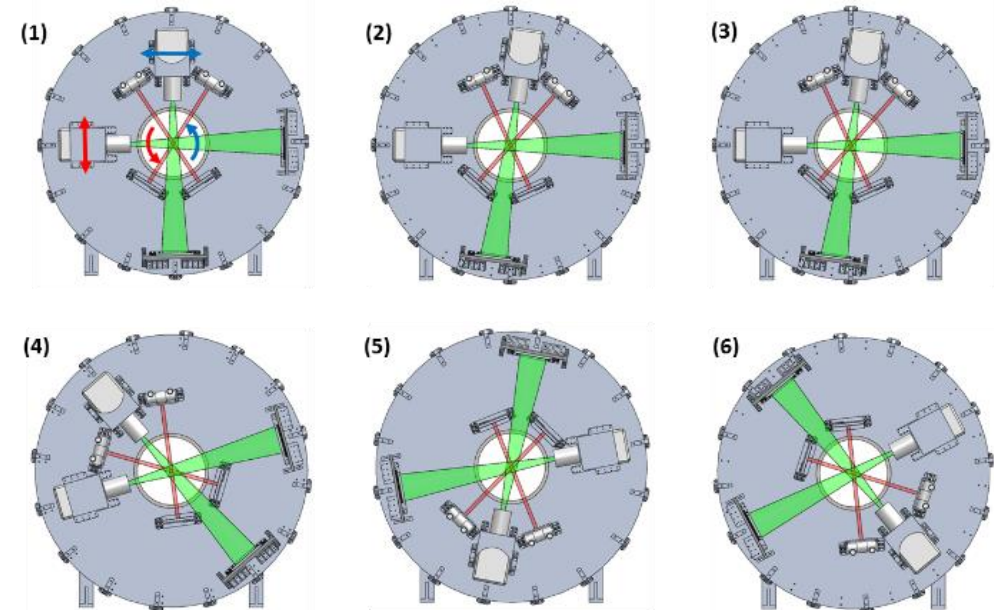
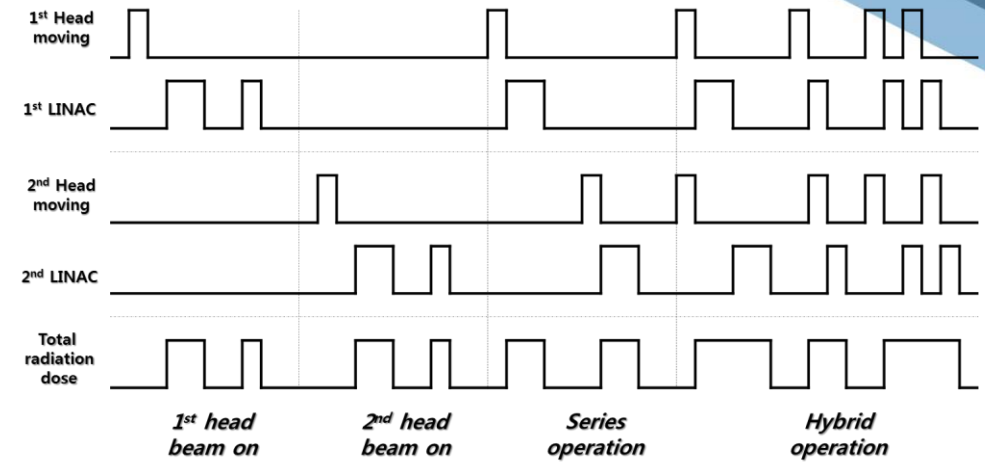


- 1) 고효율 & 고선량
 - 치료시간 50% 단축
- 2) 고정밀
 - 치료오차 5 mm 이내
- 3) 과피폭 제한
 - MLC 자체 개발
- 4) 국소 종양 부위
 - CBCT OIS 적용
 - RTP 개발
 - SBRT 치료기법

➤ 미래 치료장비로서의 가능성 : Multi-modality RT

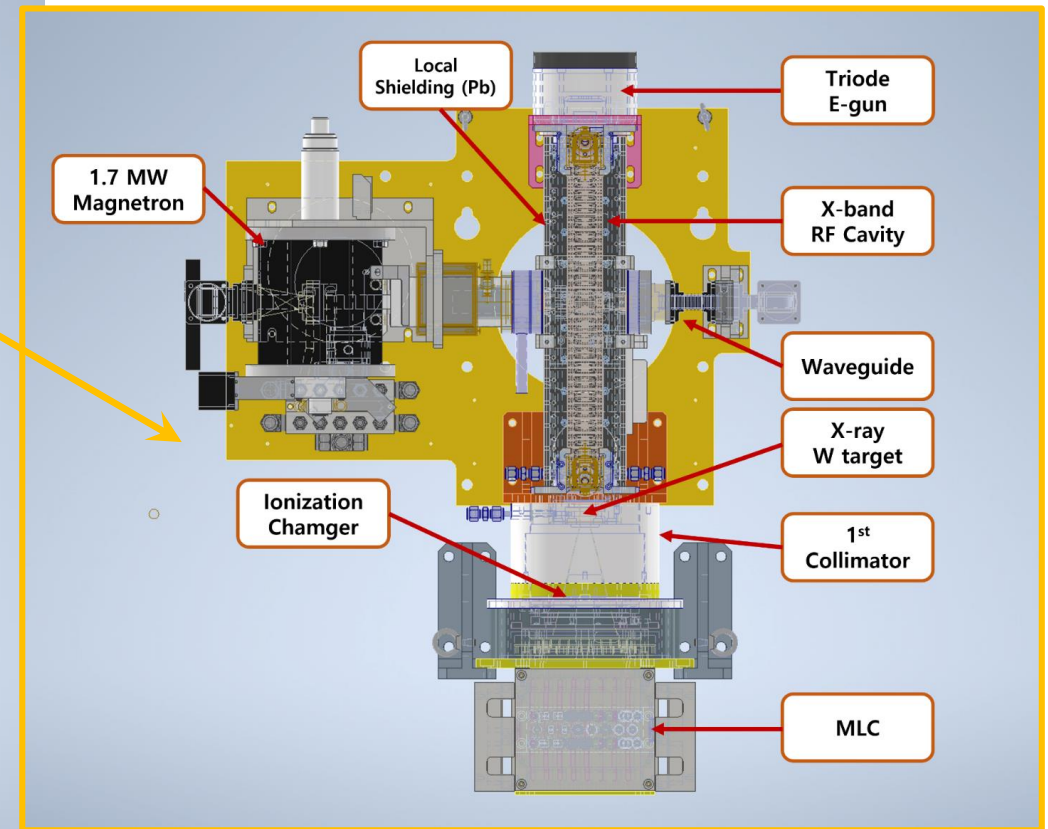
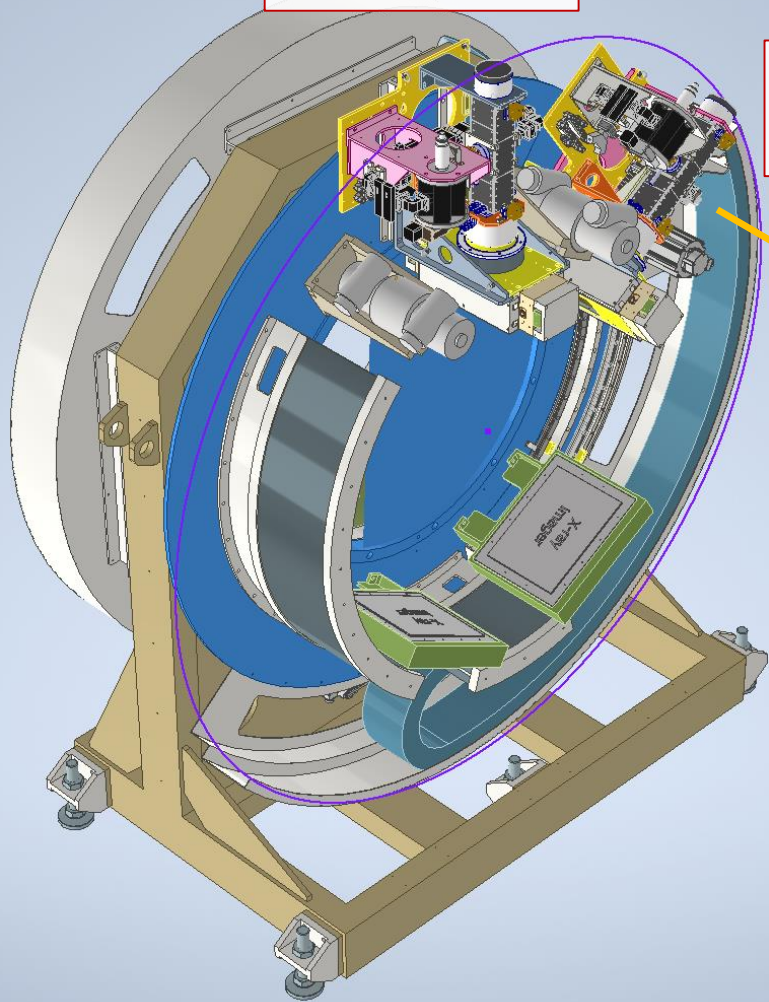


3D-modeling of dual-head gantry structure



Master-head
(1st LINAC)

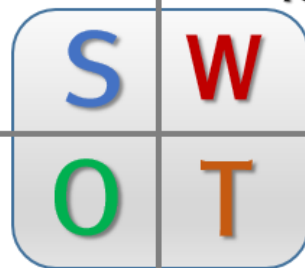
Slave-head
(2nd LINAC)



➤ 연구 목표 달성 위한 SWOT 분석

- 듀얼 빔 기반 고효율 방사선 치료
: 기존 40분 → **최대 20분 감소**
- 고선량 방사선 치료 가능 (SBRT)
: **최대 1000 cGy/min** 이상 달성
- 최적의 SBRT 등 고선량 활용 미래
지향적 치료기

- 신규 방사선치료기 시장 개척
: Tomotherapy, PET-CT 사례 등
원천기술 기반 혁신기술 선도
- 미래 방사선치료기 시장 트렌드
: 고정밀, 고선량, 고효율, 국소종양
X-band 기반 **다중 헤드 암 치료기**



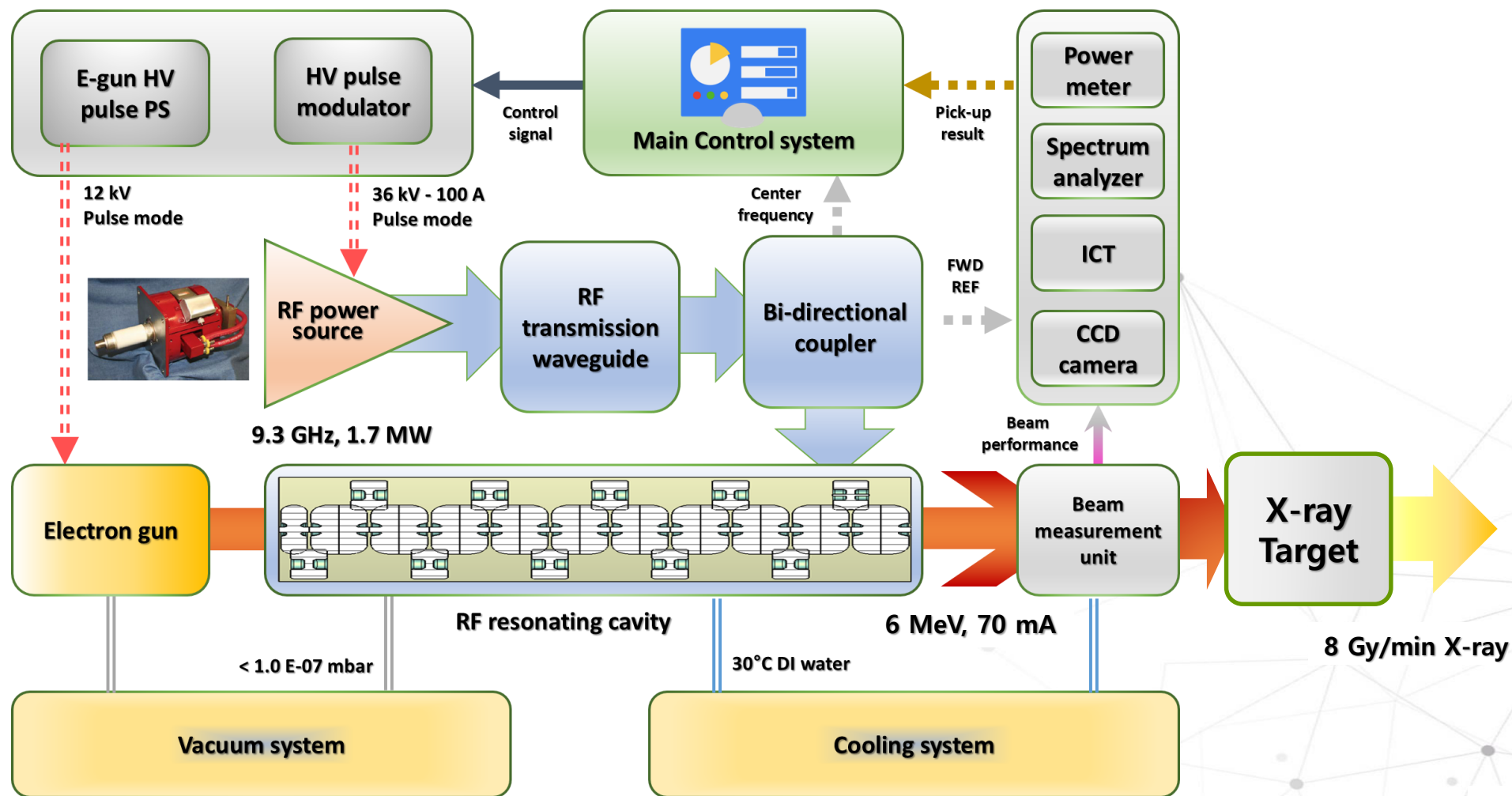
- 2개 선형가속기로 인한 비용 증가
: **국내 최초 순수 국산 기술**
X-band RF Cavity 제작으로 비용 절감으로 극복
- 갠트리 제작 복잡성 증가
: 국내 최고 로봇 설계 제작 경험기반으로 최적의
이중 헤드 갠트리 설계 및 제작 가능

- 기존 Varian 과 Elekta사의 10년이상 시장
양분에 의한 강한 저항
- 듀얼 빔 방사선 치료에 대한 장점 인식 부족

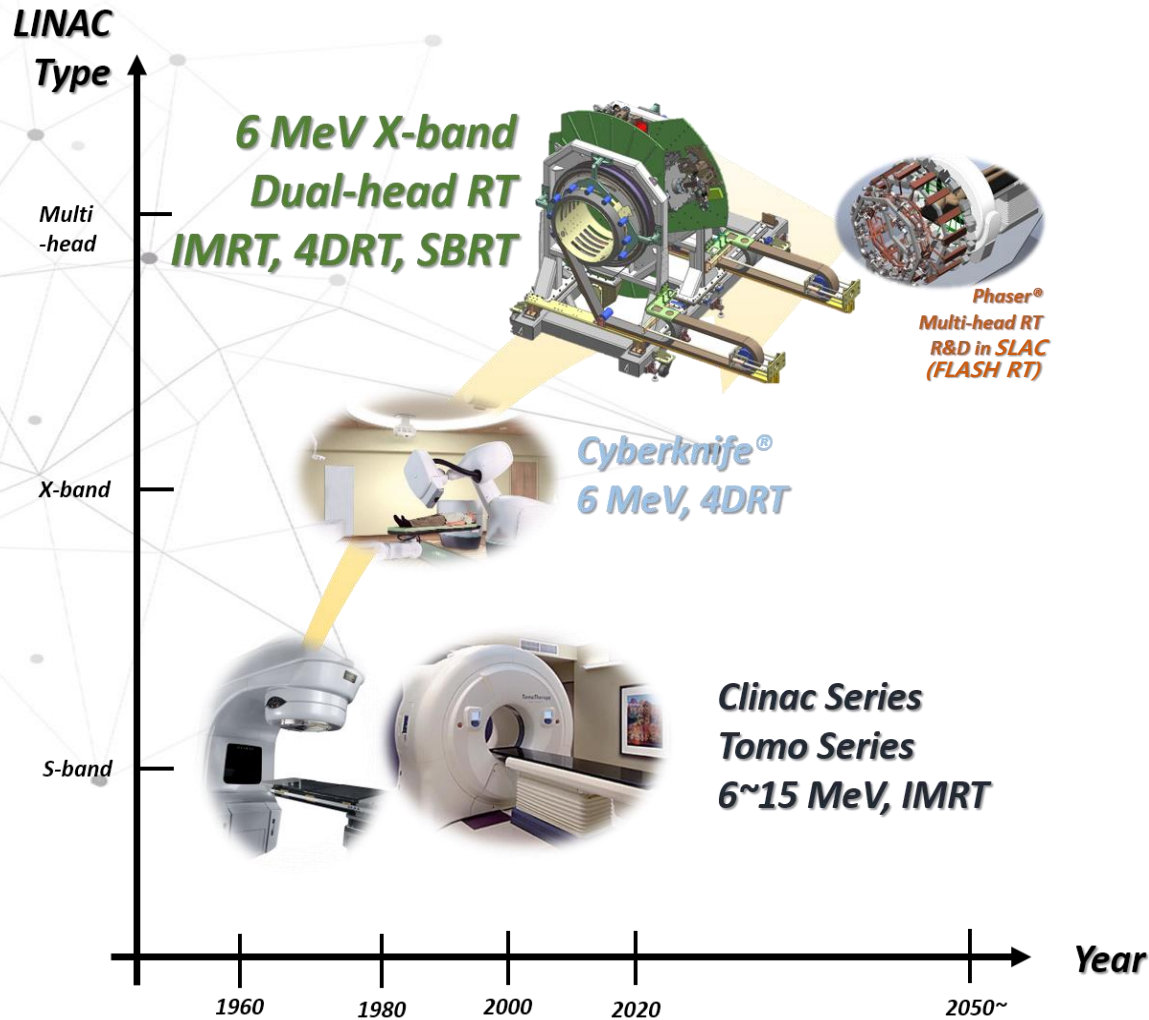
: 세계 최초의 듀얼 빔에 의한 방사선
치료방법의 국내 및 해외 보급 확대로 극복

X-band LINAC 연구 수행 내용

➤ X-band LINAC 구성도



➤ Why ? 1. X-band RF System



- **Conventional electron LINAC**
: 2.856 GHz S-band (Electa, Varian)
- **New generation electron LINAC**
: 5.0 GHz C-band (VERO, KIRAMS)
9.3 GHz X-band (CERN, SLAC, KAERI, KERI)
- **Electron beam energy**
: 6 MeV to 15 MeV for **High-dose irradiation**

주파수 (GHz)	IEEE 기준	파장 (cm)	장점
1.3	L-band	23.077	안정적
2.856	S-band	10.504	보편적, 안정적
5.712	C-band	5.252	소형
9.3	X-band	3.226	초소형

➤ Why ? 1. X-band RF System

	<i>Parameter</i>	<i>Frequency dependence</i>	<i>Effects</i>
Advantages	Wavelength	f_0	Compactness
	Effective shunt impedance per unit length ZT^2	$f_0^{1/2}$	Acceleration efficiency
	Maximum electric field strength E_{max} (Kilpatrick Criterion)	$f_0^{1/2}$	Electric arching durability
	Efficiency of acceleration per unit stored energy r/Q	f_0	High-dose rate
Limitations	Beam loading fluctuation	$f_0^{-1/2}$	
	RF loss factor (Q-factor)	$f_0^{-1/2}$	RF transmit efficiency
	Power dissipation P	$f_0^{-1/2}$	

Solution

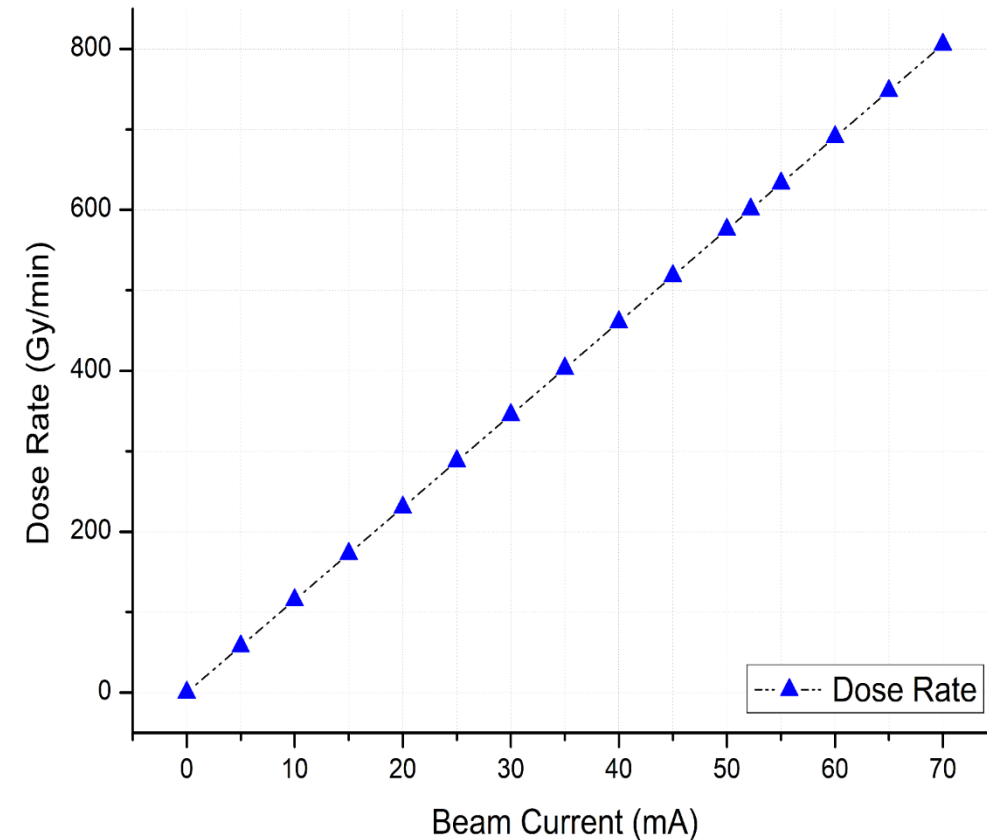
- 1) Coupling-coefficient optimization -> **RF cavity coupler design**
- 2) Resonating frequency stabilization -> **RF power output control**

➤ Why? 2. E-beam energy : 6 MeV vs Higher

$$J_x = \eta \cdot D \cdot I_{peak} \cdot E^n$$

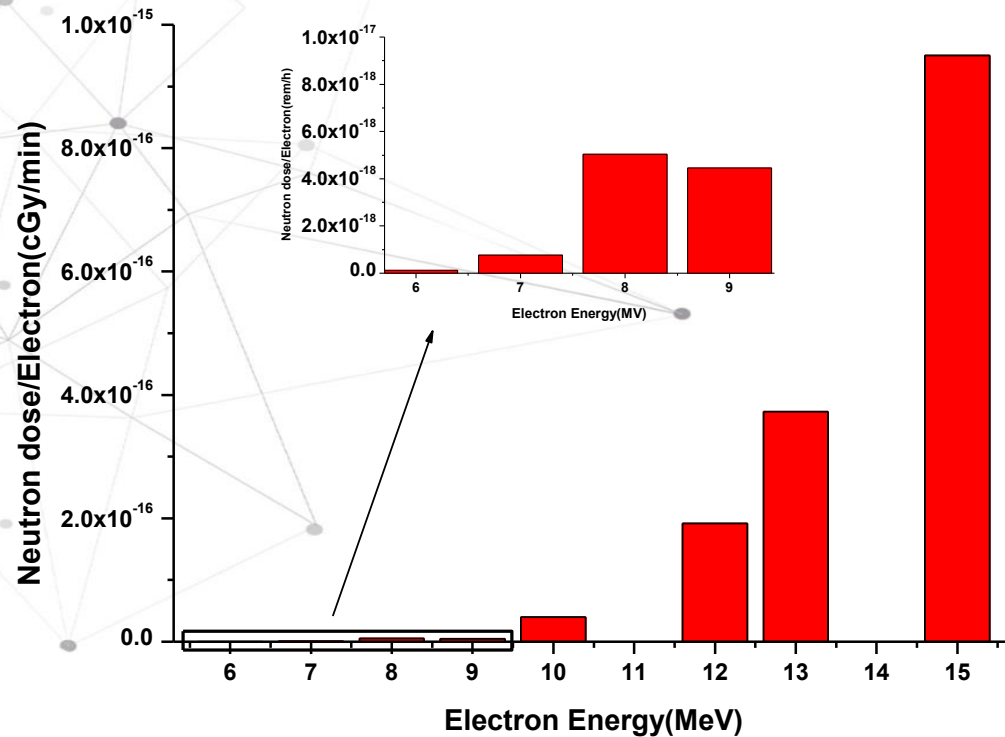
- **E (Electron energy, MeV) : 6 MeV**
- **I_{peak} (Peak current, μA) : Variable Parameter**
- η (Conversion efficiency of electron to photon)
: 1 mm W target, 0.0912
- D (Duty-factor) : 0.001
- n (Beam energy conversion constant)
: 3 MeV : 3, 6 MeV : 2.7, 9 MeV : 2.6
- J_x (Dose rate, cGy/min @ 1m)

Beam Current (mA)	Dose rate (cGy/min)
10.0	115.08
20.0	230.16
30.0	345.24
40.0	460.32
50.0	575.40
52.2	600.72
60.0	690.48
70.0	805.56

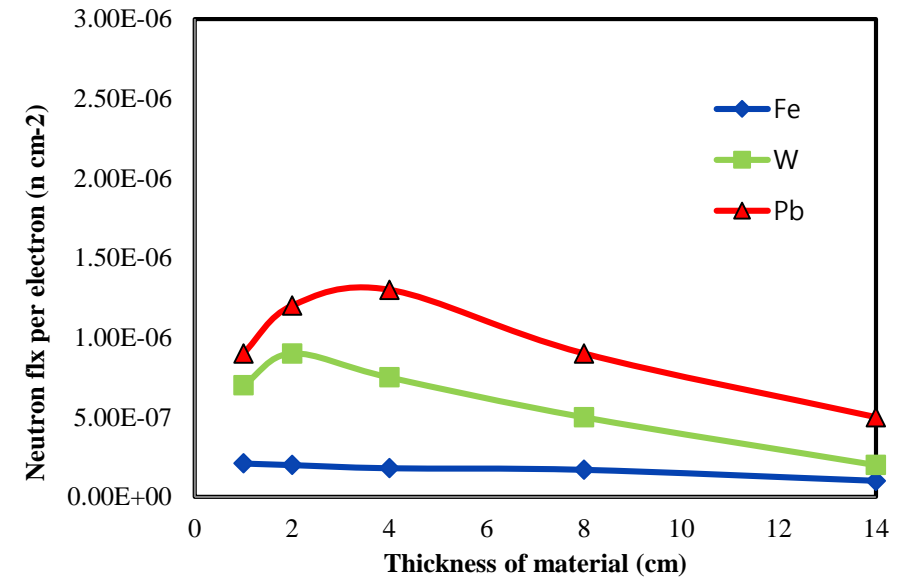


➤ Why? 2. E-beam energy : 6 MeV vs Higher

SID = 1 m (표적 두께 2 mm, 반경 30 mm)



15 MeV 전자빔은 6 MeV 전자빔에 비해
중성자 발생 Dose는 대략 **10⁴ 배** 차이를 보임



타겟 매질별 중성자 발생 정도

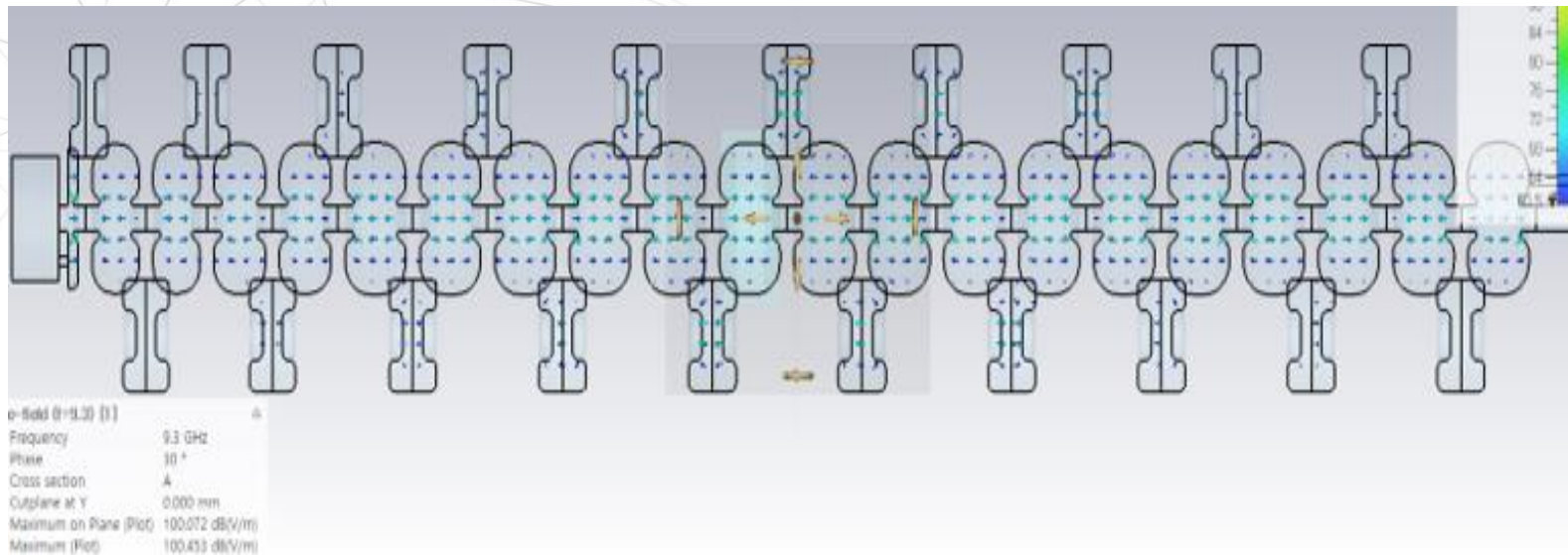
- 1) 텅스텐 : 6.19 MeV
- 2) 납 : 6.74 MeV
- 3) 구리 : 9.91 MeV
- 4) 철 : 7.56 MeV

◆ I. High-dose X-band RF Cavity 설계 및 제작

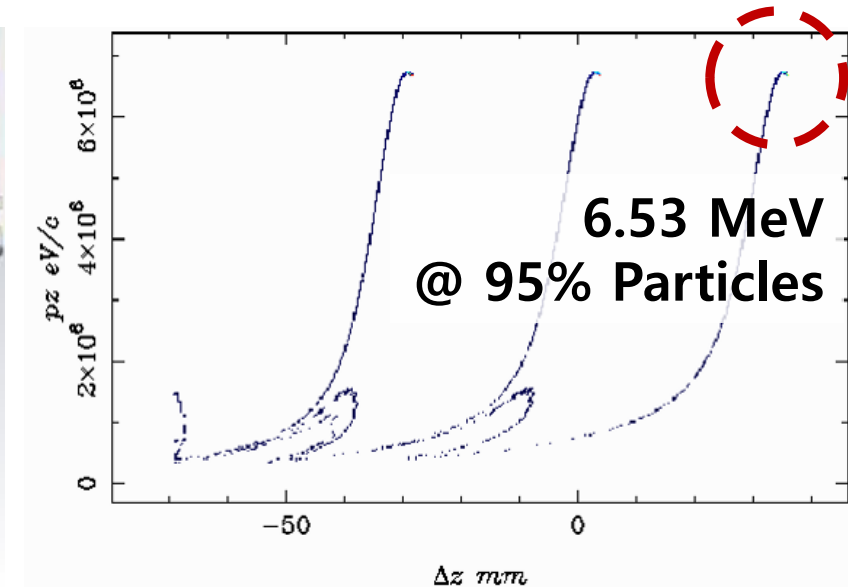
- 기존 가속관 대비 (6 MeV급, 6 Gy/min @ 800 mm) 보다 높은 고선량 치료 X-선 발생이 가능한 High-dose X-band RF Cavity (8 Gy/min @ 800 mm) 물리 및 공학설계 수행 완료
- High-dose X-band RF Cavity 설계 성능비교표

Parameters	Ver. 0 (듀얼헤드 갠트리)	Ver. 1 (40 cm)	Ver. 2 (High-Dose)	Unit
공진주파수	9.3 ± 0.00.			GHz
최대 인가 RF Power	1.5 (Duty 0.0018)	1.7 (Duty 0.001)		MW
Number of cells	16.5	20.5	22.5	1 cell 기준
전자빔 가속에너지	6	6.25	7.11	MeV
목표 X-선 선량	6		8	Gy/min @ 800 mm
빔 전류 (Peak)	30	50	60	mA
빔 사이즈	~ 2	~ 2	< 1.8	mm
E. Shunt Impe.	~ 90	93	~ 95	MΩ/m
Coupling beta (β)	1.2	1.223	1.317	-

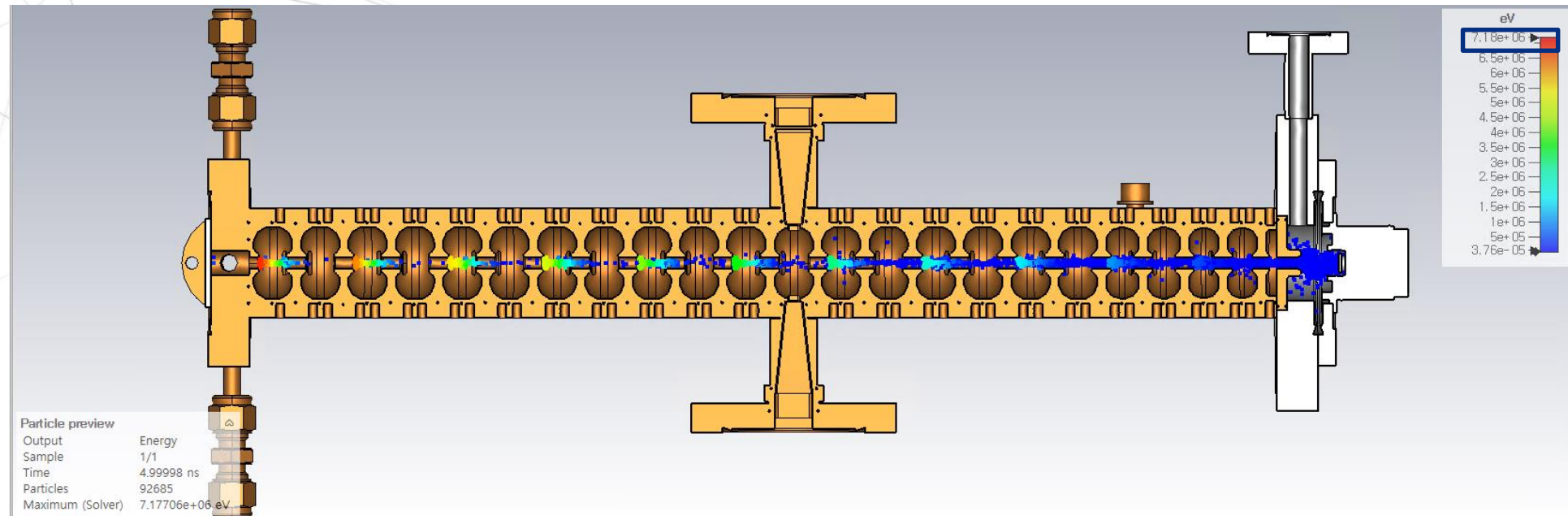
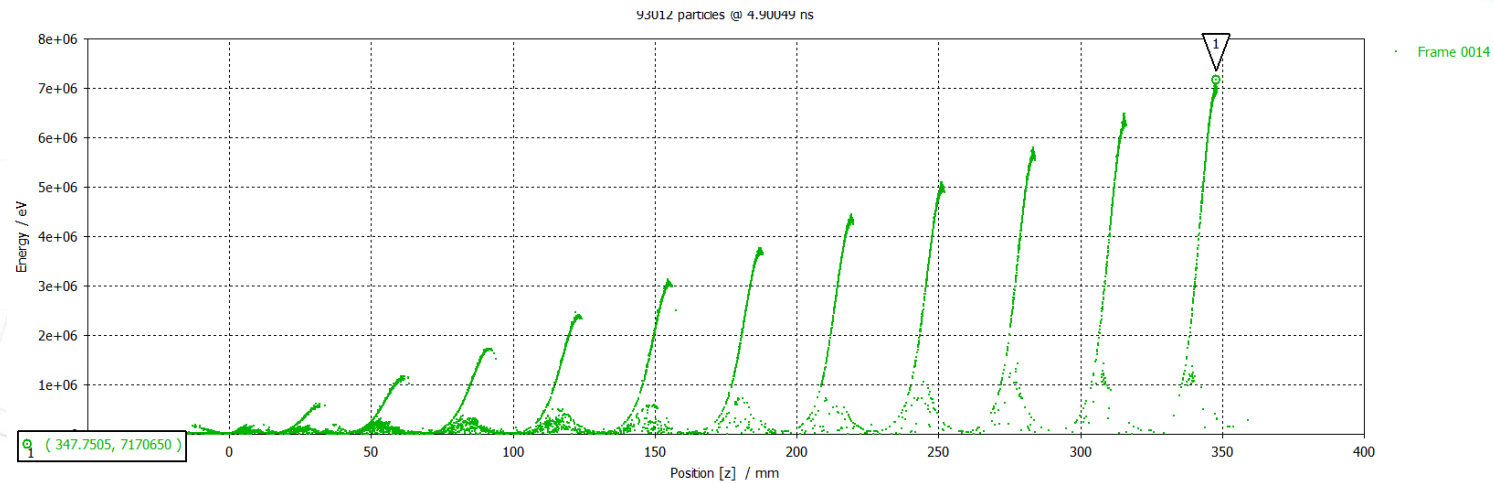
- 고주파가속관의 정밀 설계를 수행하기 위하여 2D 및 3D 전자기장 공간해석 설계를 수행한 다음, 전자빔 내 전자들 사이의 공간전하력 (Space Charge Force)을 고려한 빔 동력학 전산모사를 수행하였음
- 고주파가속관 설계 최적화를 수행하기 위하여
 - 1) 전자기장 공간해석을 통해 공진주파수에서 빔 진행 방향에 대한 전기장 데이터를 도출함
 - 2) 전자기장 데이터를 바탕으로 빔 동력학 시뮬레이션에 적용하여 빔 가속결과를 분석함



Electric field 분포 해석 (CST MWS)

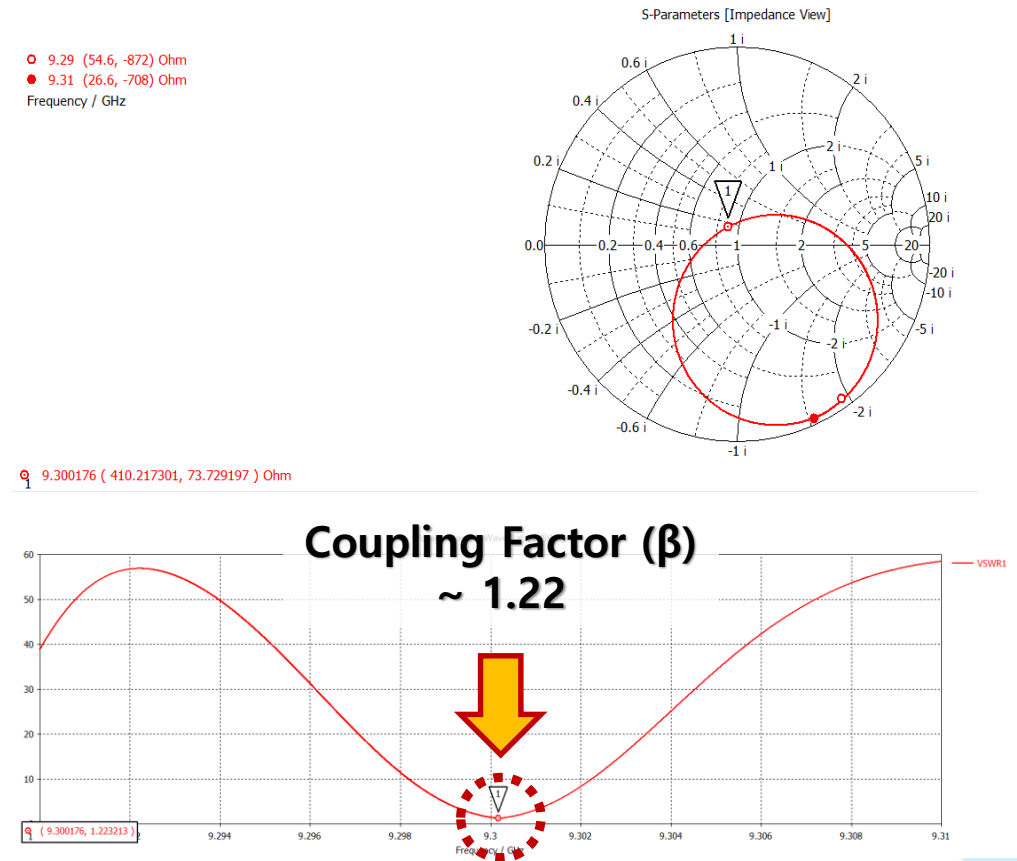
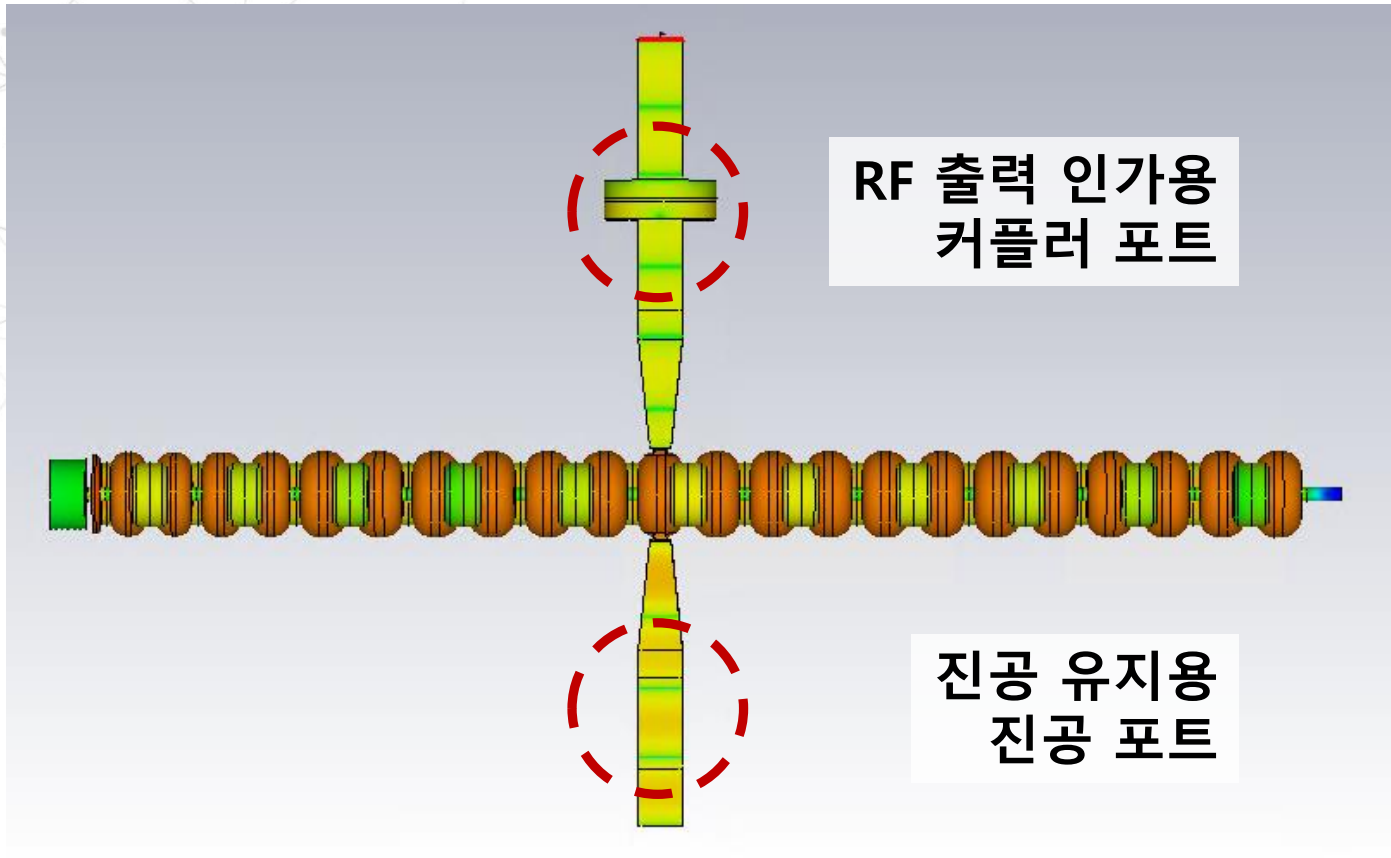


빔 동력학 해석 (Astra)



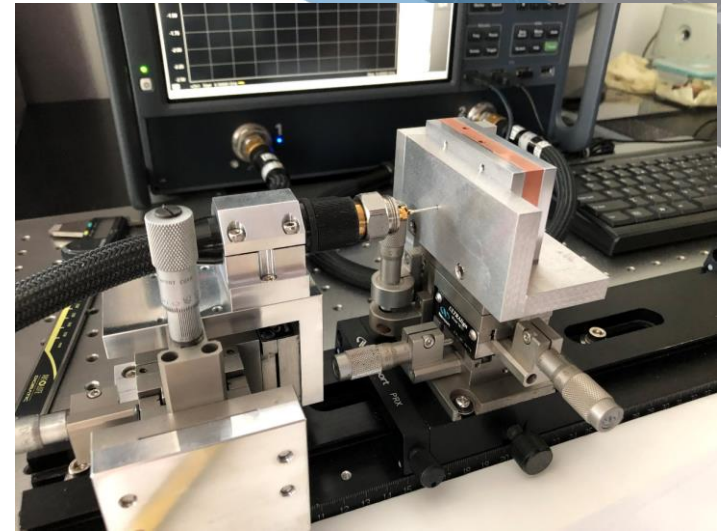
7 MeV 가속 확인 (Maximum 7.11 MeV @ CST Particle Studio)

- 본 연구에서는 커플러 셀의 입력 커플러와 대칭하도록 진공 펌프창 (Vacuum Window)을 배치함으로써, 전기장의 대칭 구조에 의한 **커플링 계수 최적화 설계**를 진행하였음
- 국내 기술 기반 최초 시작품 제작을 진행하고, 고온 메탈 브레이징으로 접합 후 튜닝 및 측정을 수행하여 공진주파수 9.304 GHz (SWR 1.22) 로 제작 완료하였음

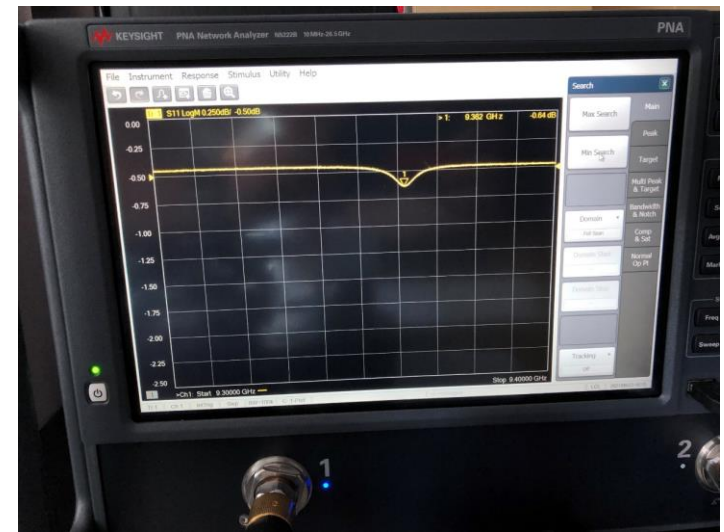




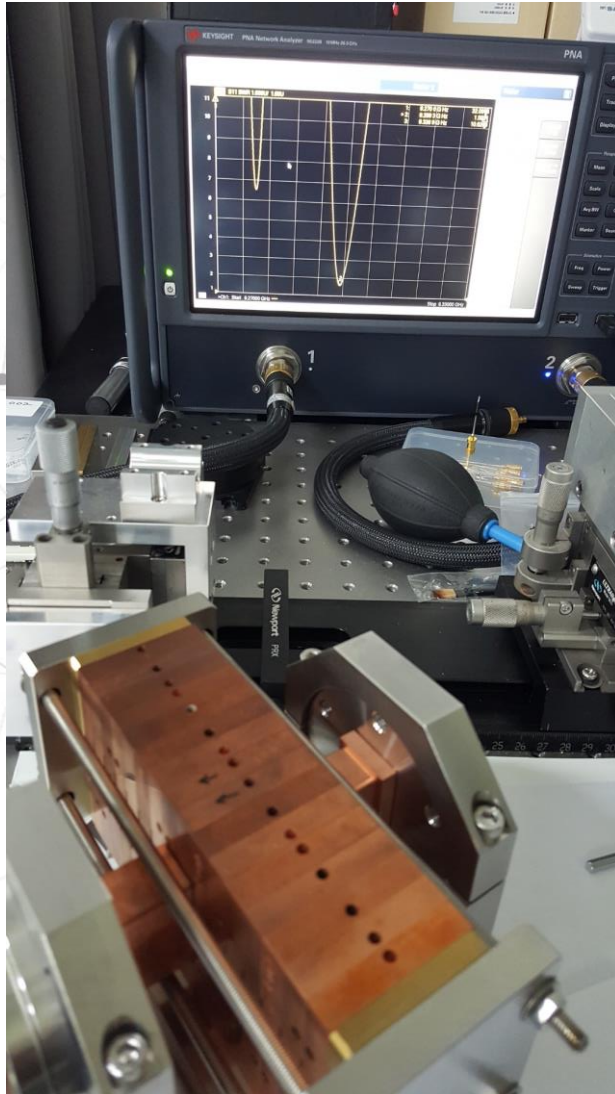
(a) 황삭 (오차 ~ 1 μm) 가공진행 중인 RF Cavity cells (21.06.)



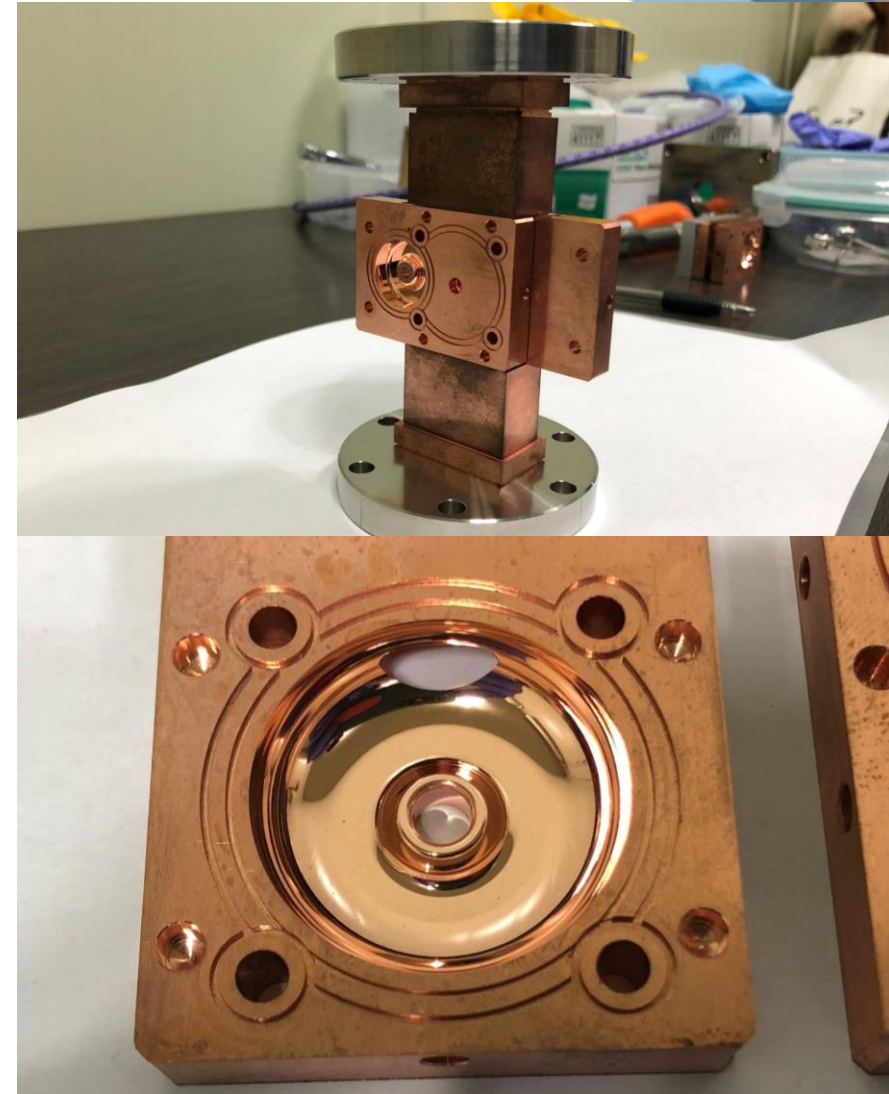
(b) VNA 이용 공진주파수 측정



(c) 가속셀 공진주파수 Data 분석



(d) 커플러 셀 정밀 측정 환경 구성
: Coupling coefficient 튜닝 및 최적화 (21.10.)



(e) 커플러 셀 브레이징 완료
(다이아몬드 튜닝, 표면오차 ~ 1 nm) 진행 (21.11.)

표면조도 ~ 100 nm급

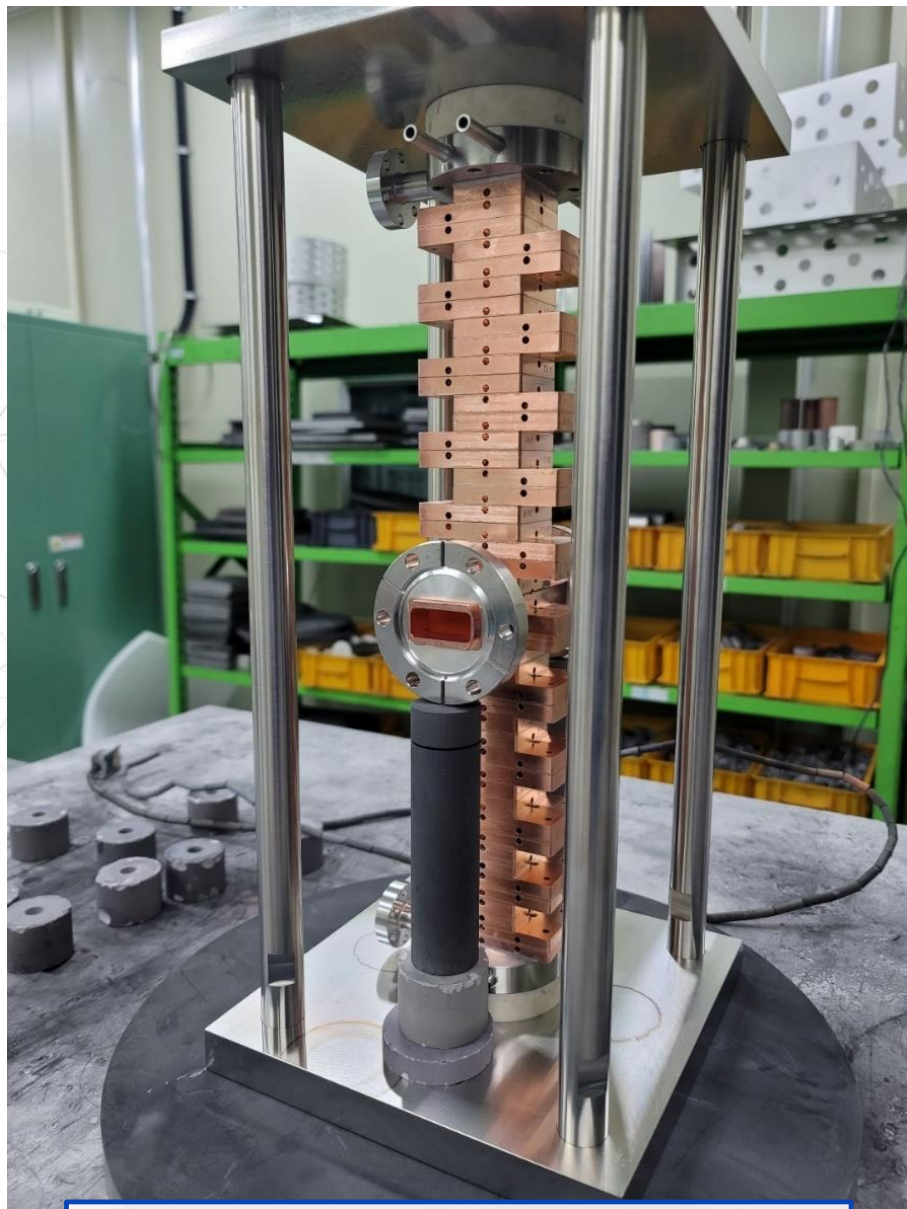
(f) 2015년 Ver.0 RF cavity 공정수준

곡면조도 ~ 10 μ m급

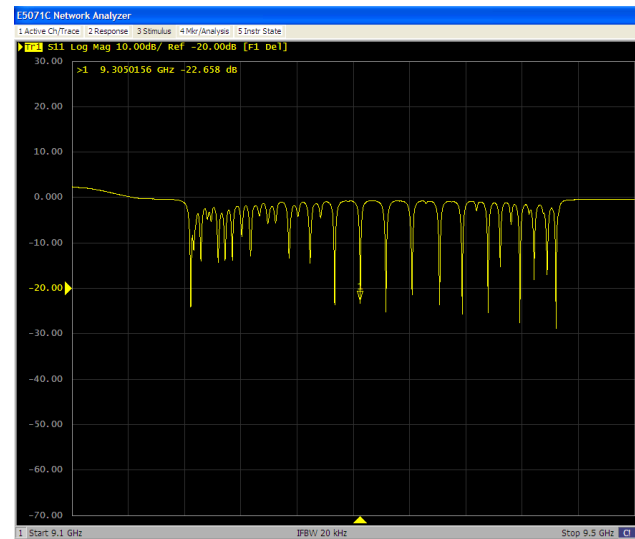
표면조도 ~ 5 nm급

(g) 2021년 Ver.2 RF cavity 공정수준

곡면조도 ~ 50 nm급



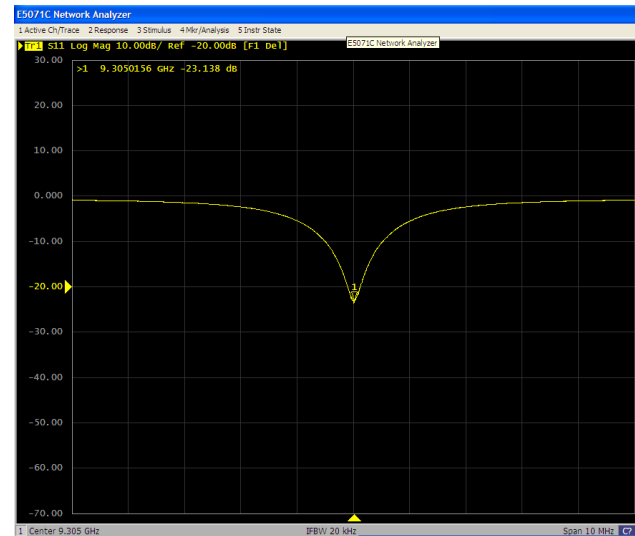
**Manufacturing of
X-band RF Cavity Structure**



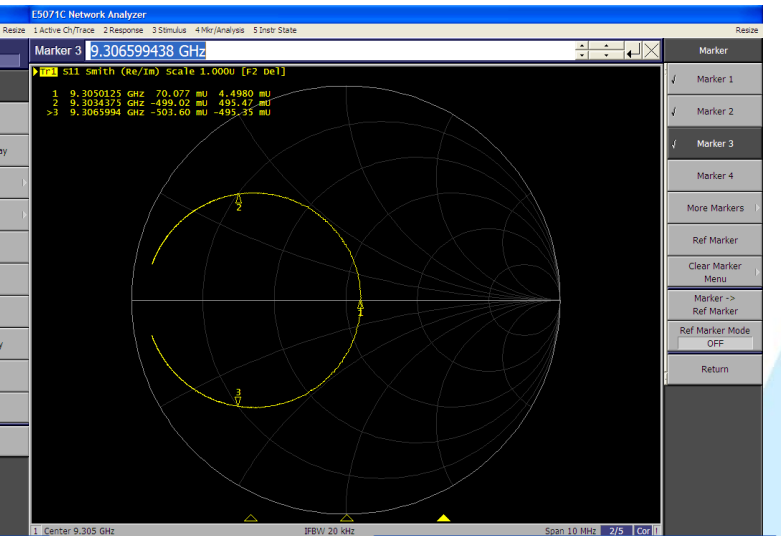
**X-band LINAC Resonating mode
(9.305 GHz @ $\pi/2$ mode)**



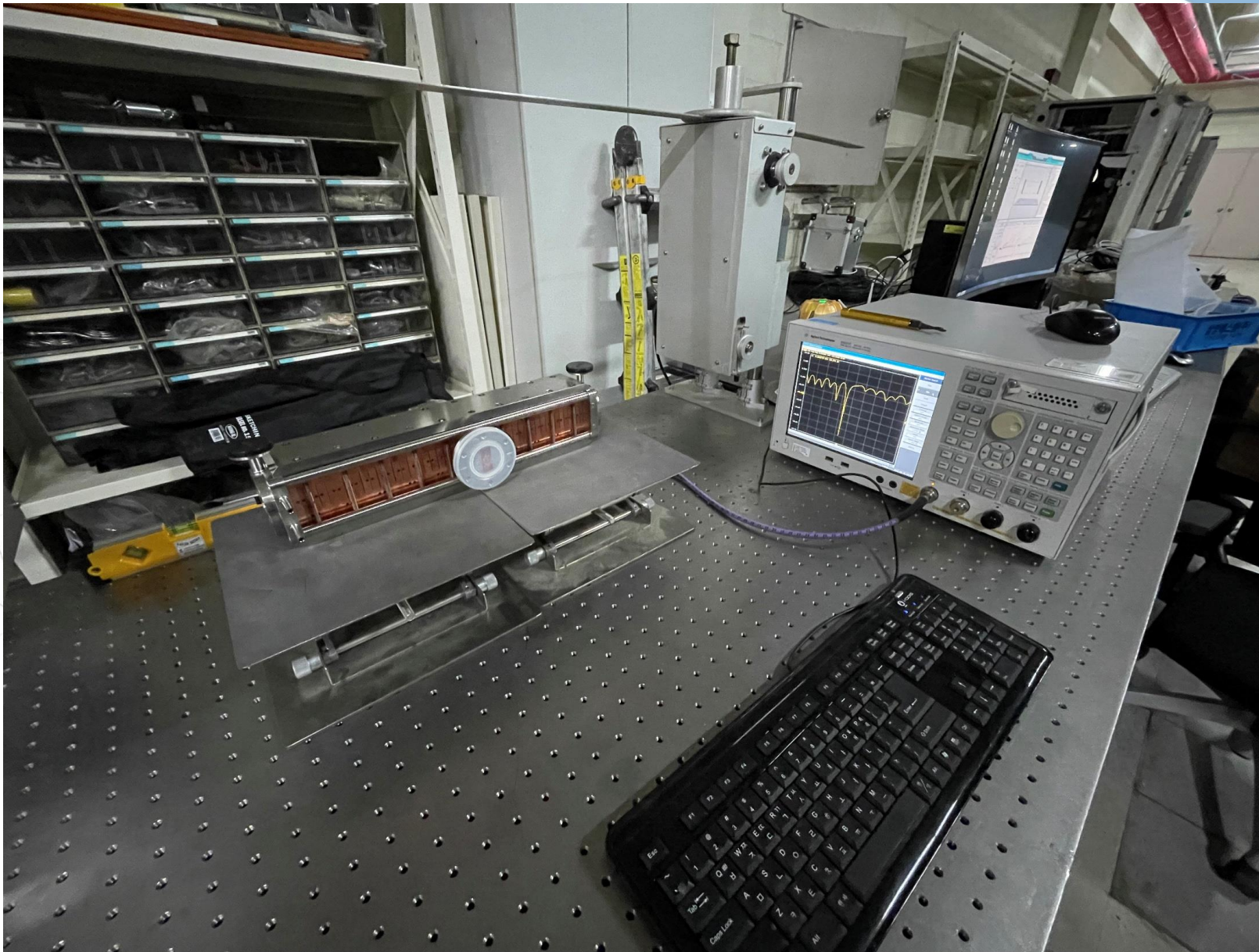
SWR 1.1512 @ 9.305 GHz



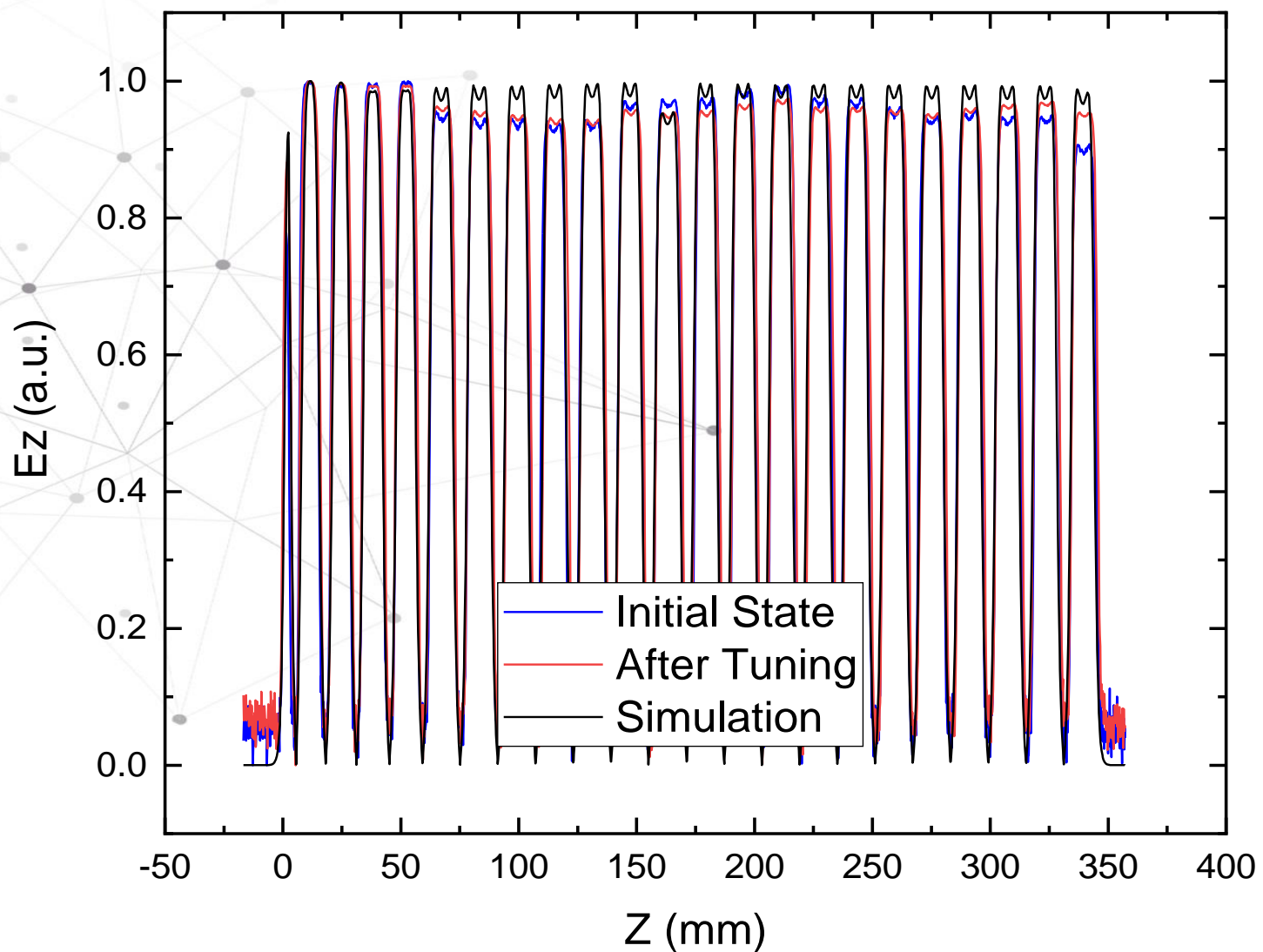
9.305 GHz @ $\pi/2$ mode



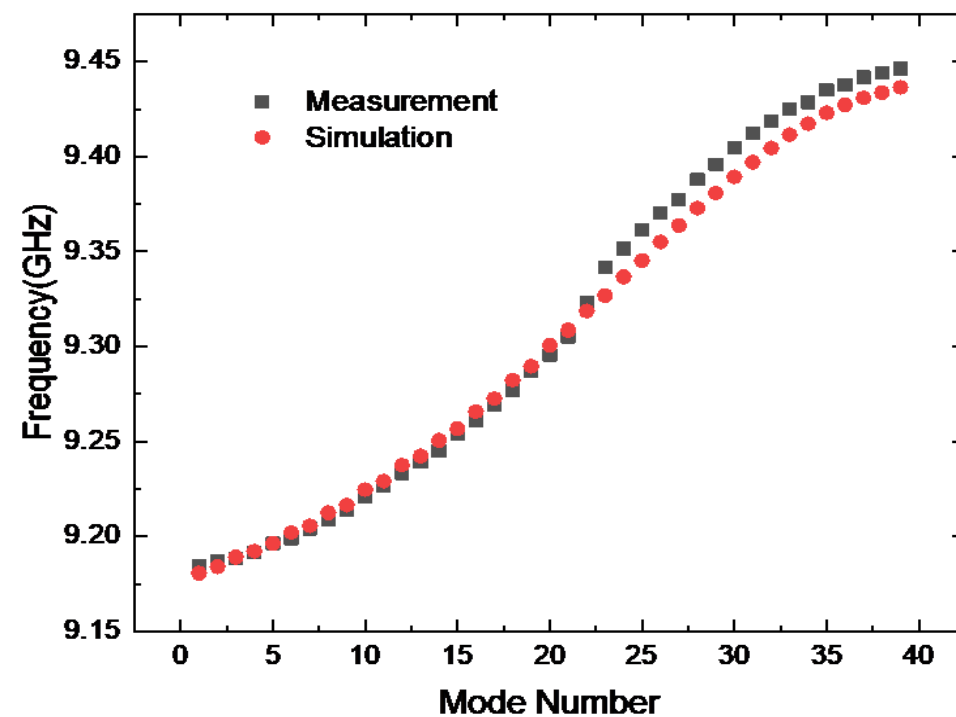
Over-coupled RF Cavity



Bead-pull test-bech in KAERI



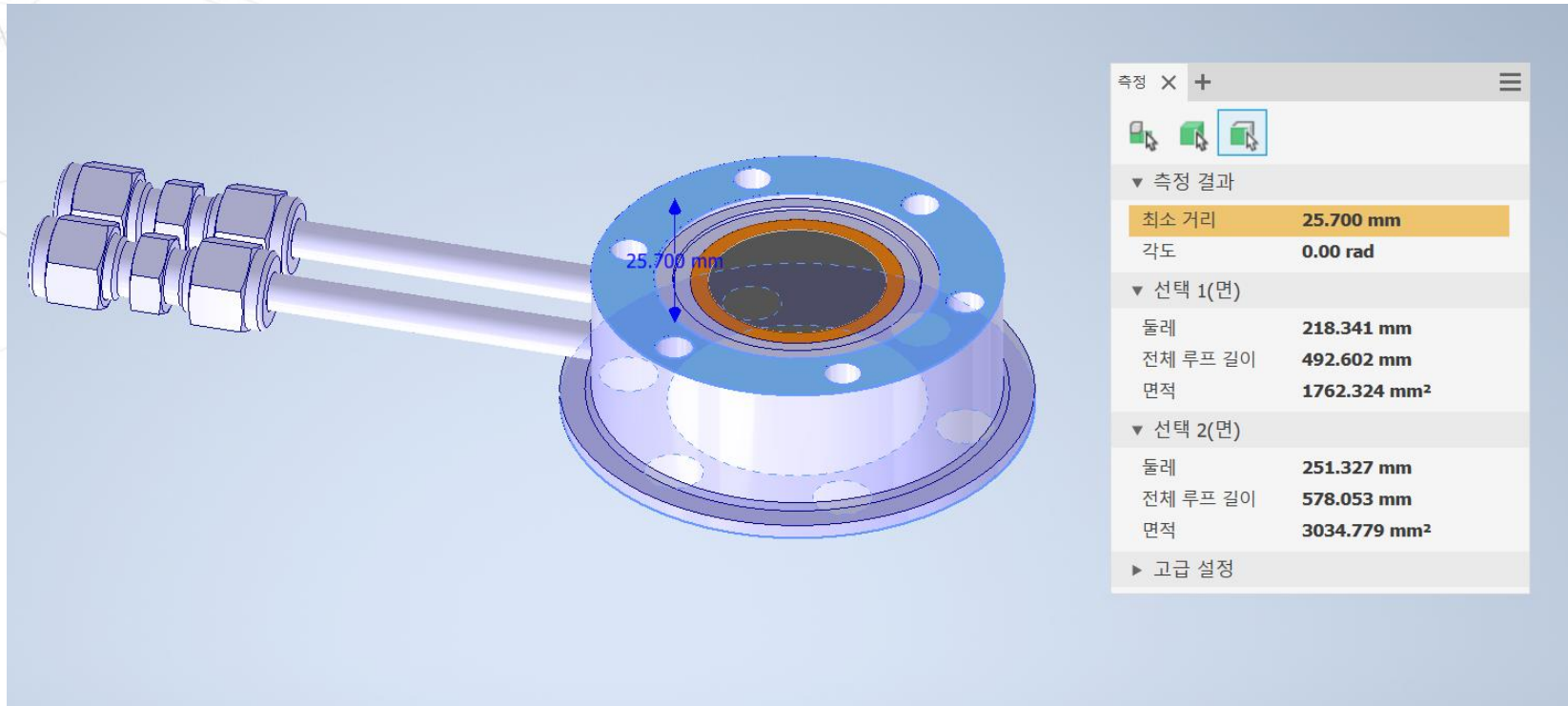
Result of Bead-pull test : < 3% flatness



Mode Separation : $\pi/2$ – 9.305 GHz

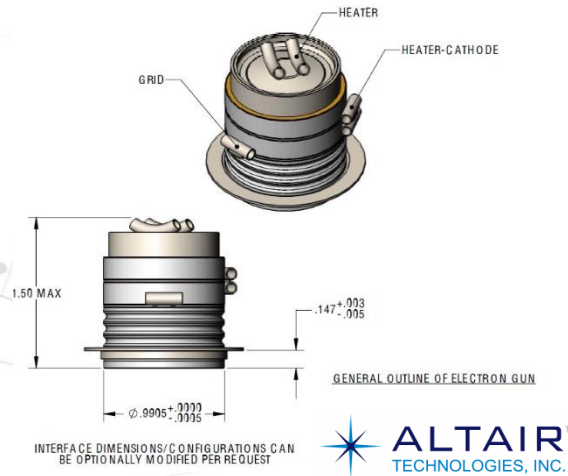
◆ II. X-band 가속기용 전자총, W 타겟 제작 및 브레이징

- 가속관에서 발생하는 X-선 dose를 높이기 위하여 기존보다 개선된 텅스텐 타겟 설계 작업을 완료, 제작 입고 수행하였음
 - 1) 기존 대비 W 두께 2 mm -> 1 mm로 변경 (Dose rate 상승)
 - 2) 얇아진 W 냉각을 위한 냉각라인 및 구리 구조체 형상 변경 (냉각능력 상승)
 - 3) W 타겟 뒤 Electron collimation 위한 공간 늘림
 - 4) 총 두께를 줄임으로써 compactness 향상 (길이 25.7 mm)



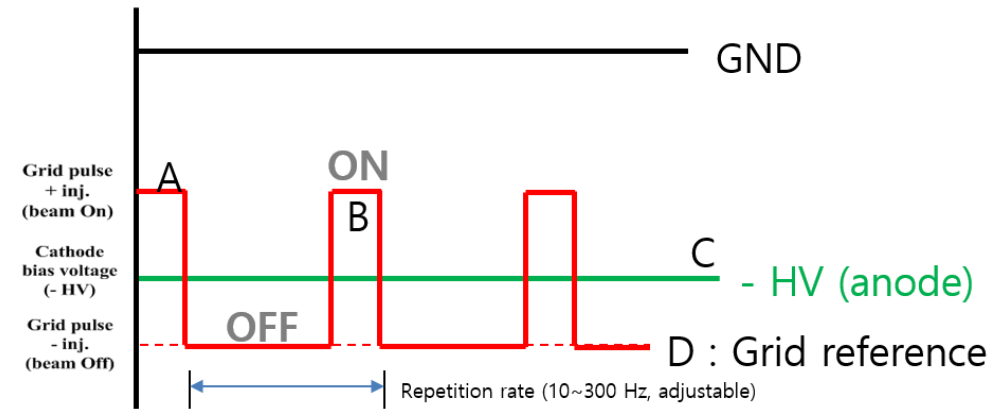
High-dose 발생용 W 타겟 공학설계 완료

➤ 전자빔 발생용 Triode Electron Gun (E-gun) 선정 사양



	NOMINAL	RANGE
Perveance	0.9 μ pervs	.01 to >1.4 μ pervs
Cutoff	$E_k/E_c \geq 110$	-55V to -65V @ 12 kV
E_k	-12kV	up to -18kV
Grid Drive	1.2A Ik	+50V to +70V typical
Heater	Voltage: 5.0V (recommended MAX)	Current: 2.0A MAX
Cathode	Dispenser Type	
Coating	M-Type: 80% Os, 20% W	
Mix	5:3:2 with a molecular weight of 67.3%, BaO, 14.8% CaO, 17.9% Al ₂ O ₃	
Optional Mix	3:1:1, 4:1:1, 6:1:2	
Beam Shape	Call for Beam Characteristics	
Leakage	Cathode to Ground: <100uA at 21 kV	

Parameters	Triode E-gun	Diode E-gun
(Relative) Size	Smaller	Bigger
Current density	Low	High
Grid existence	O	X
Precise current change	O	X
Normalized emittance (de-focusing)	Low	High
Price	High	Low

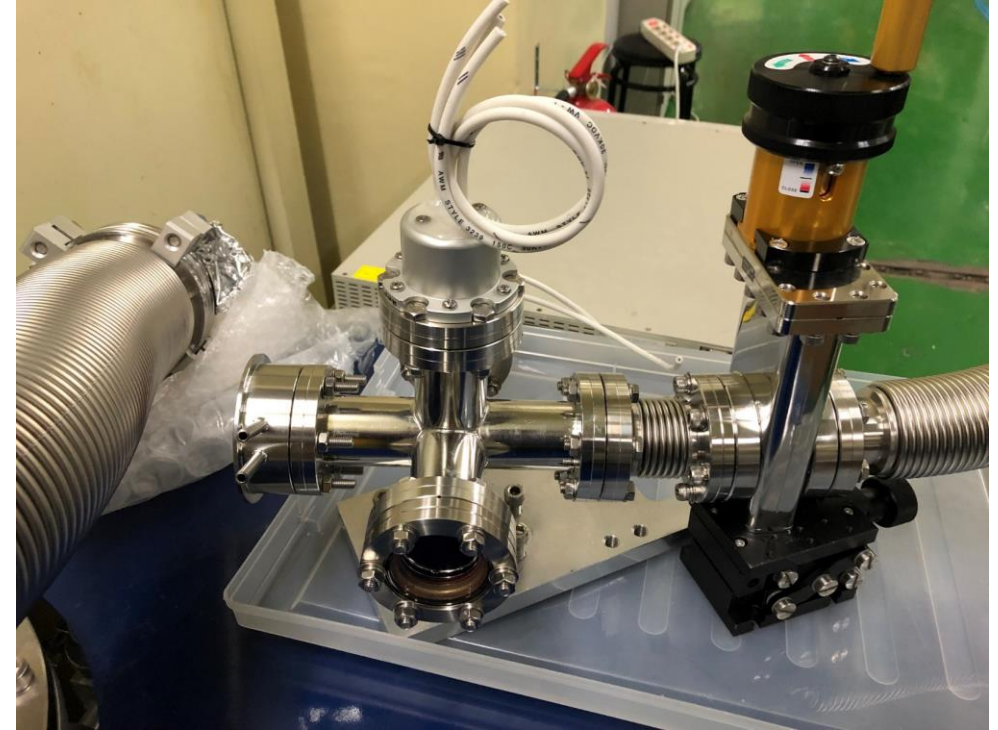


- Typical triode E-gun operation
 - Anode HV : - 12 kV DC
 - Repetition rate : ~ 400 Hz
 - Pulse width : 0 ~ 20 us

- 전자총 구매 및 W 타겟 제작 입고 완료
- 커미셔닝 완료 (Heater 및 고전압 인가) (21.10.22)



Altair Triode E-gun (A102791) 실험 진행



High-dose 발생용 W 타겟 진공 및 히팅 수행

◆ III. High-power RF System

➤ High-power RF Source

$$P_{diss} = \frac{V_{gain}^2}{R_{sh}} = \omega U \left(\frac{1}{Q_{ext}} + \frac{1}{Q_{unloaded}} \right)$$

(MW)

$$V_{gain} = \frac{2\sqrt{\beta_0}}{1+\beta_0} \cdot \sqrt{P_{rf} \cdot r_{sh} \cdot l} \cdot \cos(\omega t + \theta)$$

(MeV)

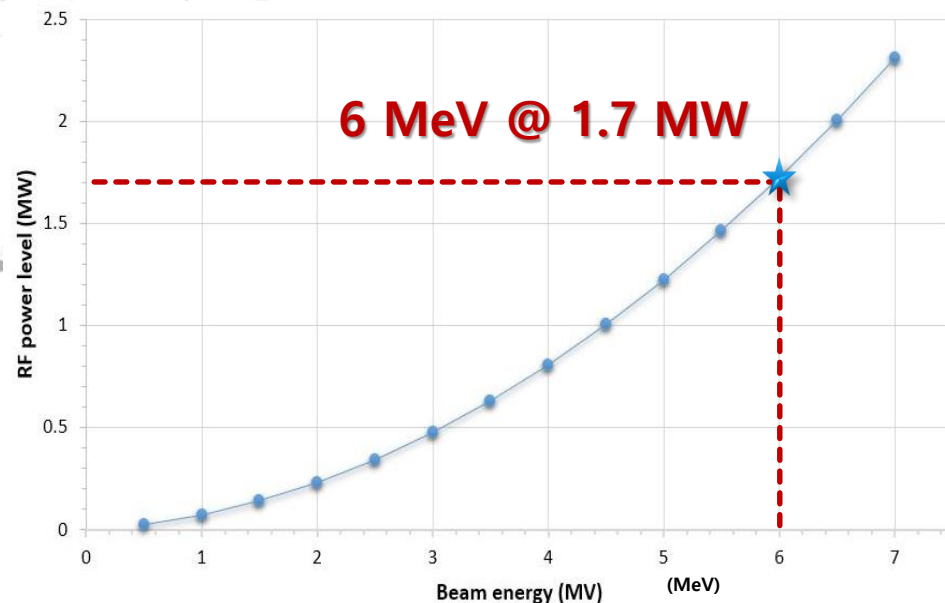
$$P_{beam} = V_{gain} \cdot I_{beam}$$


(kW) (MeV) (mA)

$$P_{total} = P_{diss} + P_{ref} + P_{beam}$$


(MW)

- ✓ Effective length of RF cavity (l) : 367.65 mm
- ✓ Effective shunt impedance per unit length (r_{sh}) : 95.7 MΩ/m
- ✓ Coupling coefficient (β) : 1.312
- ✓ Beam energy (V_{gain}) / current (I_{beam}) : 6 MeV / 70 mA peak
- ✓ Return loss ($\propto P_{ref}$) : < 150 kW (10% of P_{total})






L3 6170



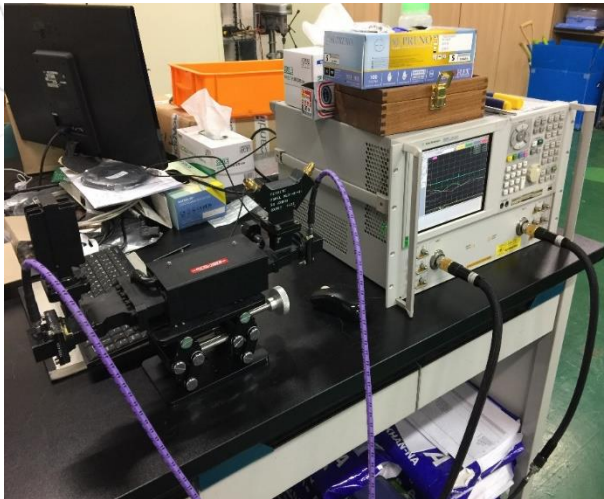
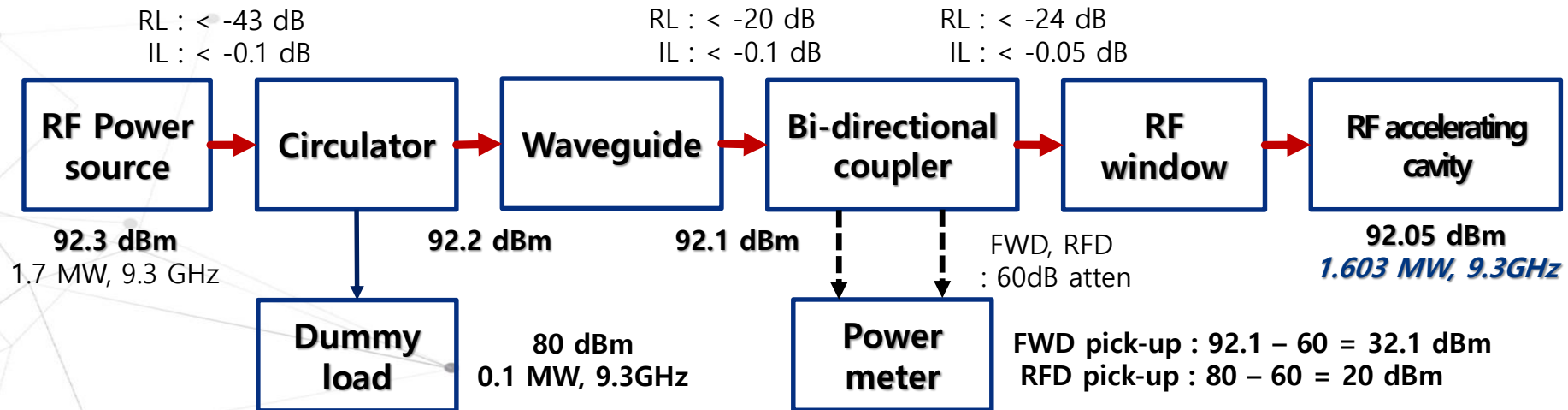
VMX3100HP



M1 Mk4

Parameter	L3 6170	CPI VMX3100HP	Parameter	ScandiNOVA M1 Mk4
Frequency	9300 ± 25 MHz	9300 ± 30 MHz	Pulse power output (peak / avg)	4 MW / 8 kW
Peak pulse power	1.7 MW	1.5 ~ 1.65 MW	Top flatness	< 1%
Average power	1.36 kW	2.7 kW	Pulse rising time	< 10 ns
Duty factor	0.0008	0.0018	Max duty factor	0.002
Peak anode voltage (kV)	34 ~ 38 kV	34 ~ 37 kV	Output peak voltage	0 ~ 40 kV
Peak anode current (A)	88 A	90 A	Output peak current	0 ~ 100 A

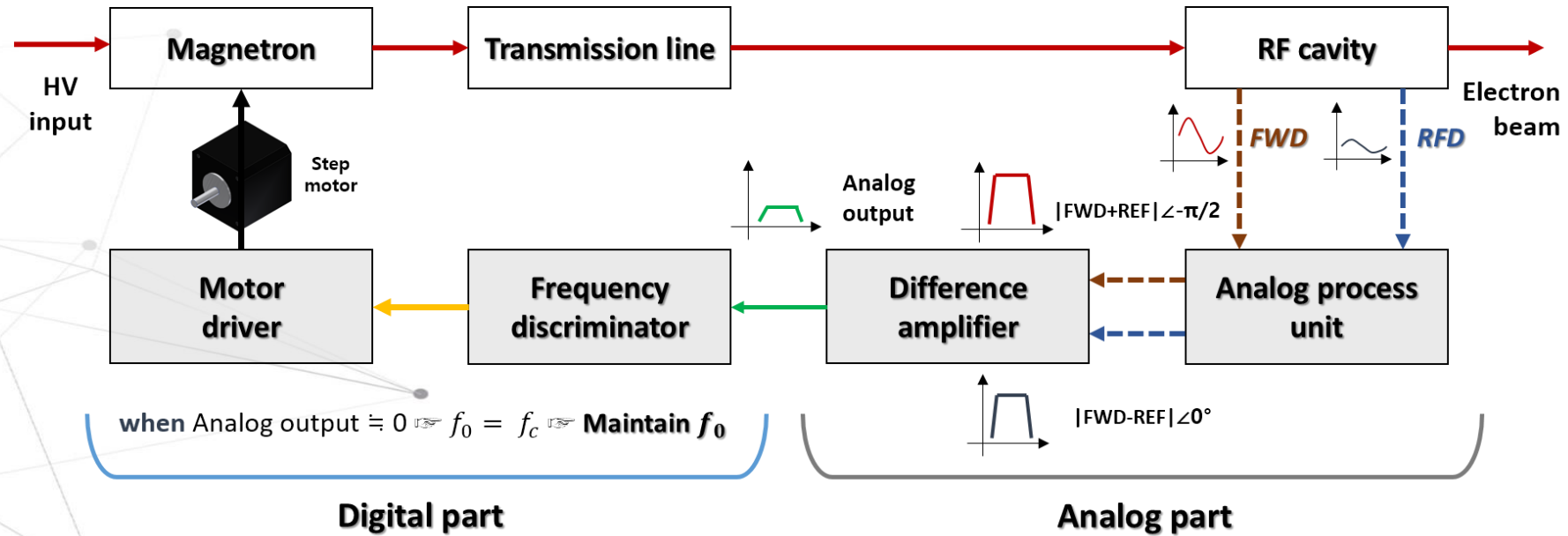
➤ Waveguide Transmission Line (WR-112 기준)



Component measurement using Network analyzer

Assembled RF transmission line	Value
Center freq. (GHz)	9.2979
Δf_{3dB} (MHz)	± 29
S_{11} , RL (dB)	-21.27
S_{21} , IL (dB)	-0.248
P.D (degree)	119.67
VSWR (:1)	1.188

➤ Magnetron Frequency Controller (MFC)

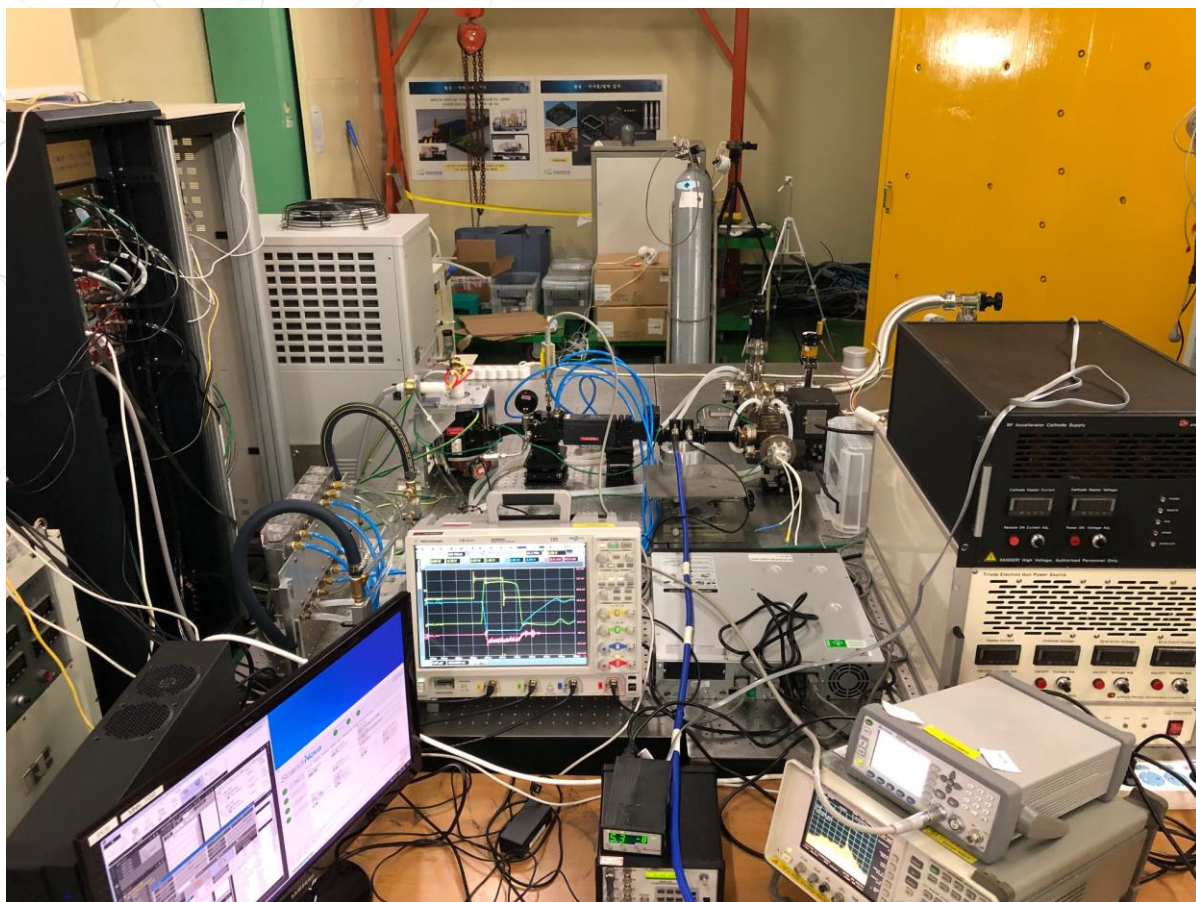


Characteristics of RF control system

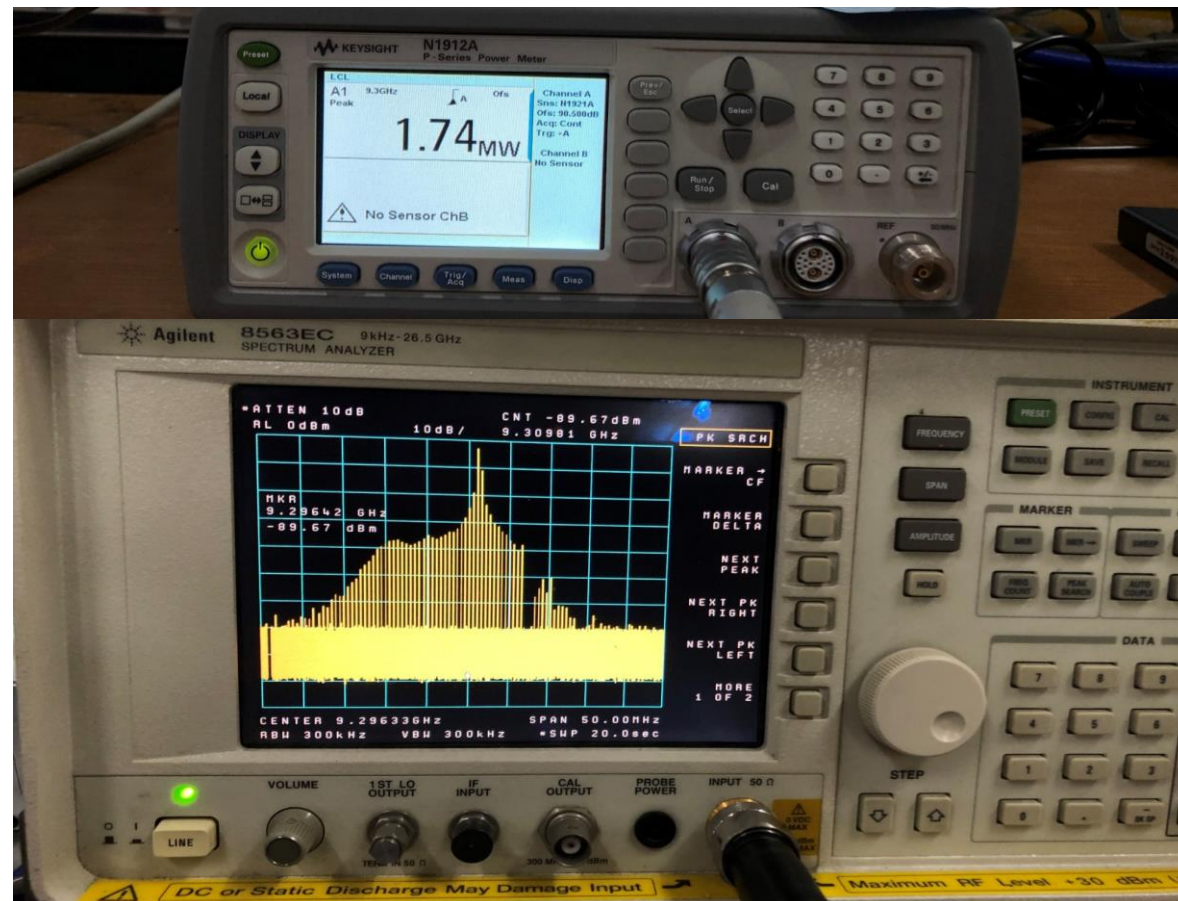
Characteristic	Implementation	Latency	Data acquisition	Algorithm	Scalability	Distortion
Analog	Intuitive	Short	Amplitude / Phase	Linear / Time variant	Limited	High
Digital	Complicated	Longer	I/Q sampling / Digital down converting	Sophisticated	High	Small

◆ IV. RF & Beam Commissioning Test-bench 구성

- 마그네토크론, 도파관, 모듈레이터 등 구성하여 RF 출력 실험 수행 완료
- 모듈레이터 38 kV, 90 A 구동 시, 9.297 GHz 1.74 MW 출력 발생 확인 (21.10.22 완료)



X-band RF Test-bench 시스템 구성 완료



9.313 GHz 1.74 MW RF 출력 수행 (21.11)

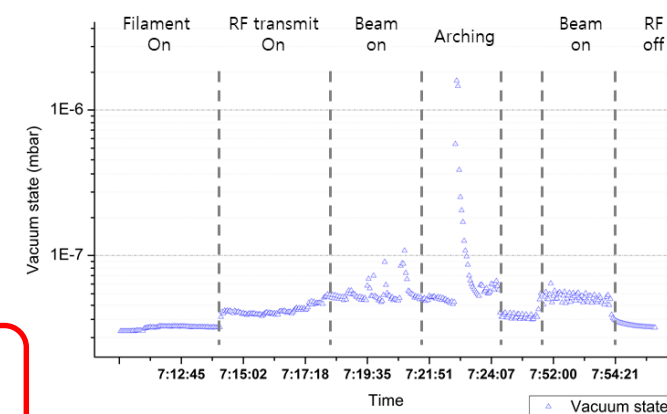
RF commissioning [2022.06.07. ~ 2022.07.01]

System implementation	Vacuum system configuration	Cooling system configuration	Magnetron filament heating	RF pulse power transmission
<ul style="list-style-type: none"> RF system installation - RF cavity, magnetron, modulator, and waveguide. Wire connection -electronics (380V) Ground check 	<ul style="list-style-type: none"> Pump installation - Rotary pump, TMP, ion pump ($<1.0\text{E-}8$ mbar) 2 days for high vacuum state Leakage test - He detector 	<ul style="list-style-type: none"> Cooling line installation - RF cavity, Magnetron, modulator, circulator, dummy-load with chiller Flow meter connection - Each component flow rate check 	<ul style="list-style-type: none"> Magnetron filament heating - Voltage, current, and resistor check First heating time during 12 hours Warm-up time: 1 hour 	<ul style="list-style-type: none"> Trigger timing check Increase HV pulse gradually - vacuum state check Full -power transmission with low reflection power

Beam commissioning [2022.07.04. ~ ongoing]

System implementation	Vacuum system configuration	RF cavity heating	E-gun filament heating	Beam acceleration
<ul style="list-style-type: none"> LINAC installation - E-gun, RF system, target, measurement unit, collimator. Wire connection -electronics (380V) Ground check 	<ul style="list-style-type: none"> Pump installation - Rotary pump, TMP, ion pump ($<1.0\text{E-}8$ mbar) 3 days for high vacuum state Leakage test - He detector 	<ul style="list-style-type: none"> Bake out - RF cavity, RF window, target, measurement system. Heating process - Up to 200°C during 36 hours. Cool down 12 hours. 	<ul style="list-style-type: none"> E-gun filament heating - Voltage, current, and resistor check First heating time during 24 hours Warm-up time: 1 hour 	<ul style="list-style-type: none"> Trigger timing check Increase HV pulse gradually - vacuum state check Beam acceleration check with CCD cam

현 상황



선원 성능 실험

- 전자총, 고주파 가속관, 타겟, 진공 시스템, RF 시스템, 냉각 시스템, 제어 시스템으로 구성이 되는 X-band LINAC을 종합엔지니어링동 001호에 설치하여 빔 인출 최적화 조건 도출의 빔 실험과 엑스선 발생 실험을 통해 LINAC의 성능 검증 시험을 진행하였음

Magnetron filament 전압 인가

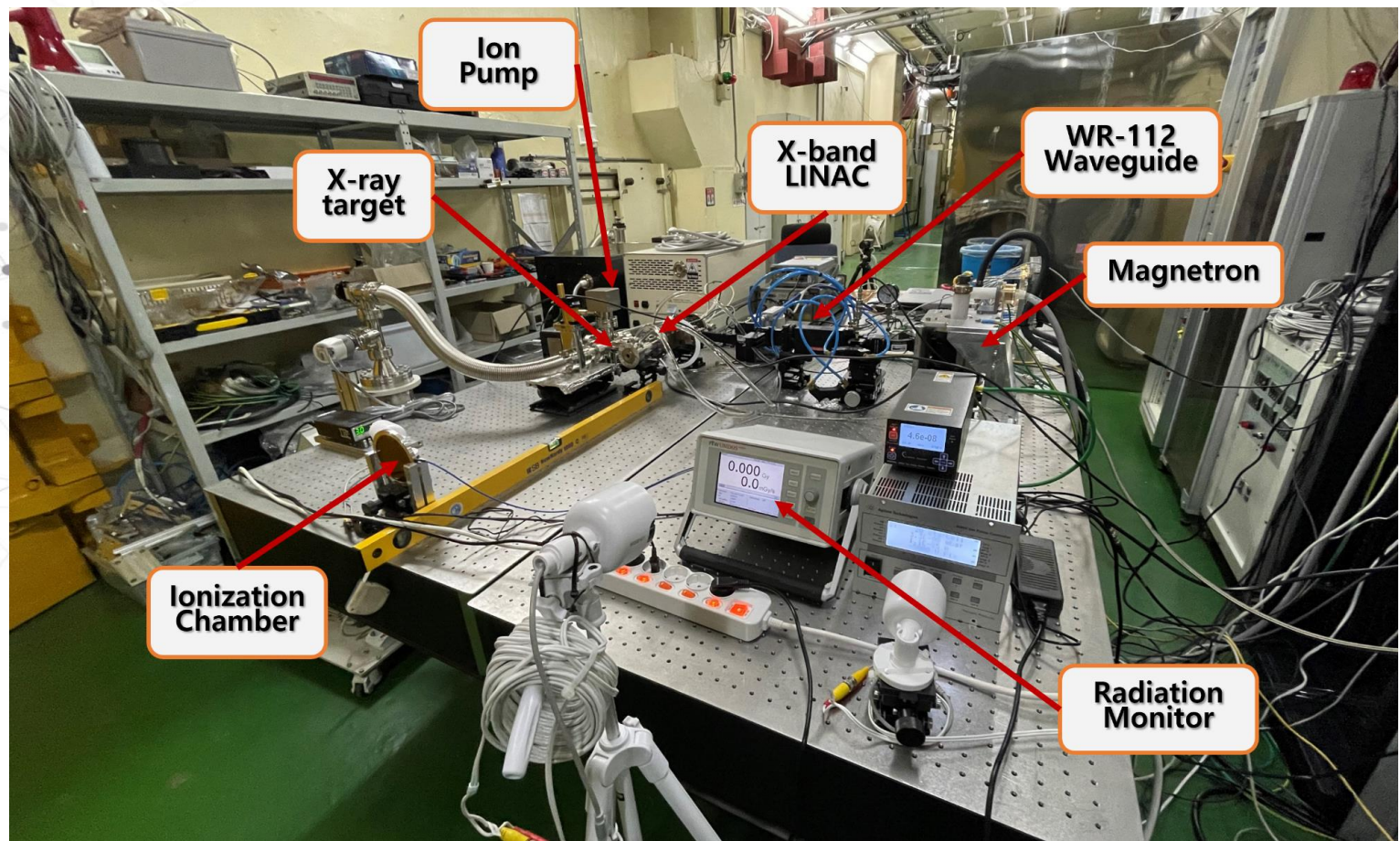
전자총 filament, grid 전압 인가

Magnetron RF 인가 (1.7 MW / 0.0008 duty)

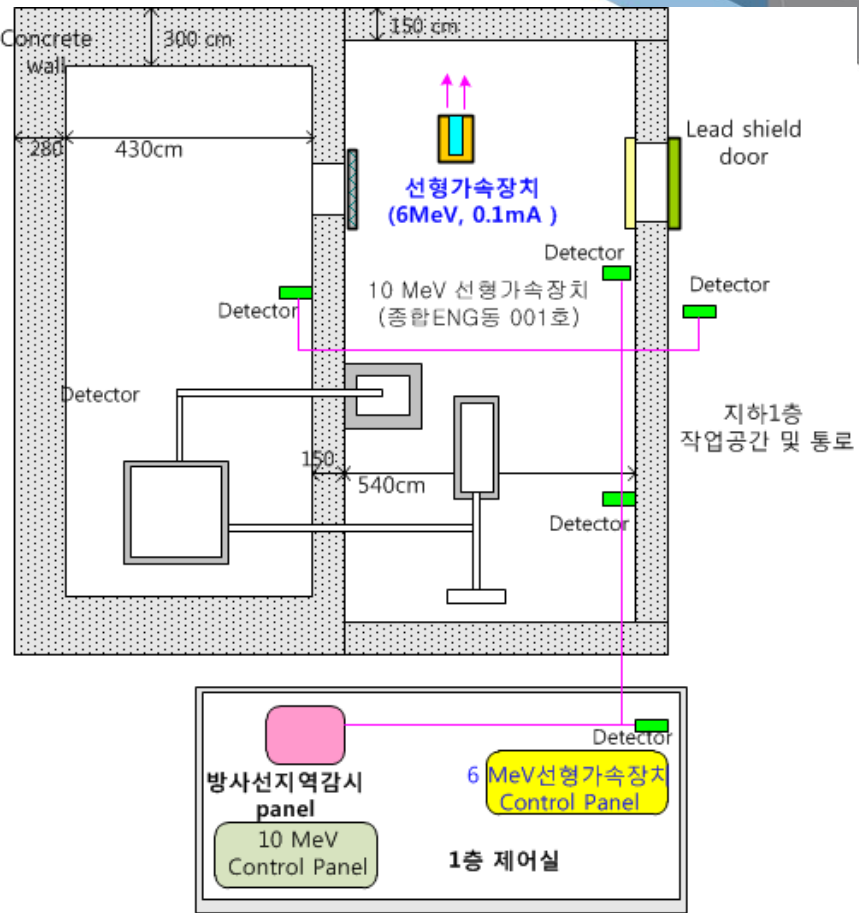
전자총 전자 방출 및 magnetron tuning

빔 조사 (6 MeV, 0.1 mA)

선원 성능 시험 절차



Beam/X-ray irradiation Test-bench
in KAERI (22.09.)



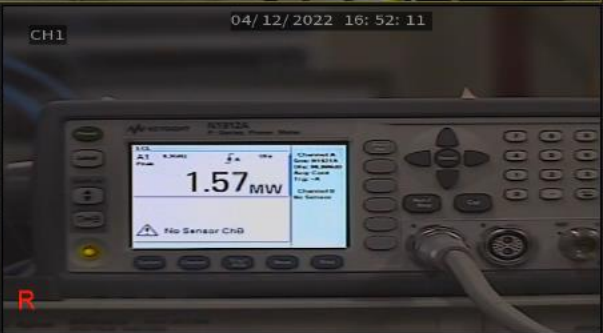
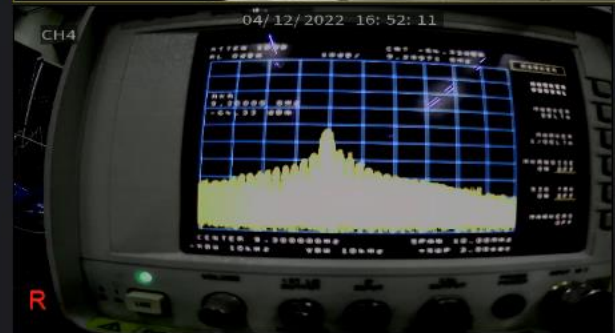
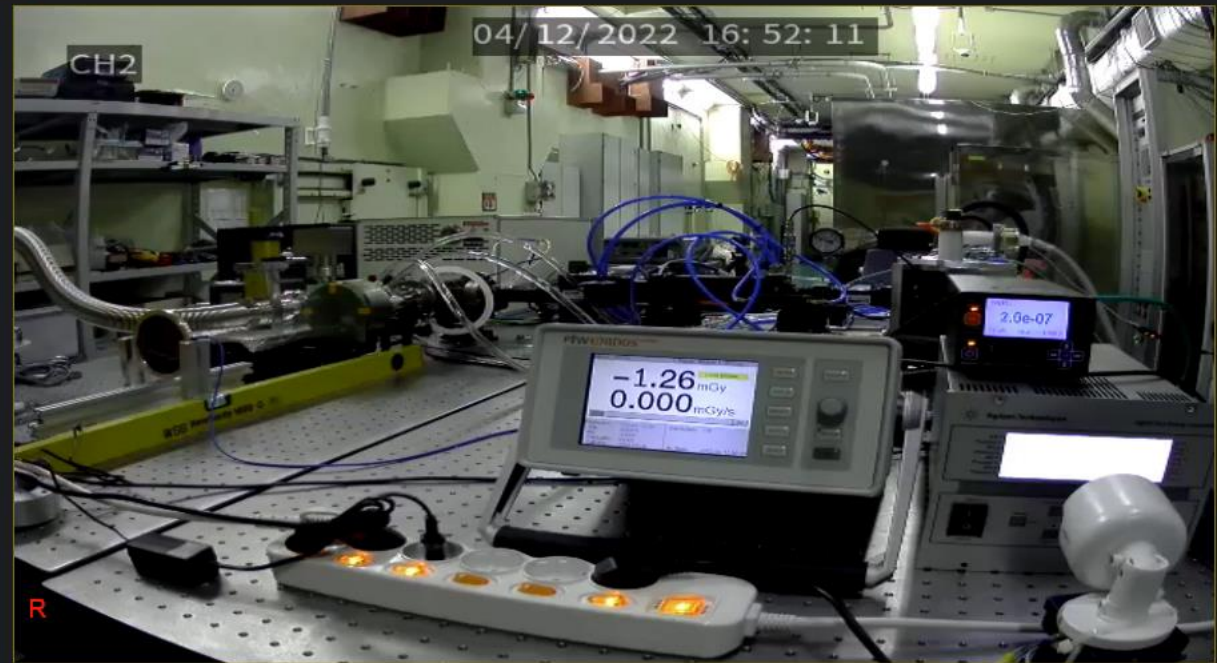
Interlock diagram
for Radiation Safety System

Wisenet

Live Playback Remote Setting Local Settings ⓘ ⏻

Channel List

- CH01 ▶ 📷 📷
- CH02 ▶ 📷 📷
- CH03 ▶ 📷 📷
- CH04 ▶ 📷 📷
- CH05 ▶ 📷 📷
- CH06 ▶ 📷 📷
- CH07 ▶ 📷 📷
- CH08 ▶ 📷 📷



Color

Hue 110

Bright 108

Contrast 136

Saturation 106

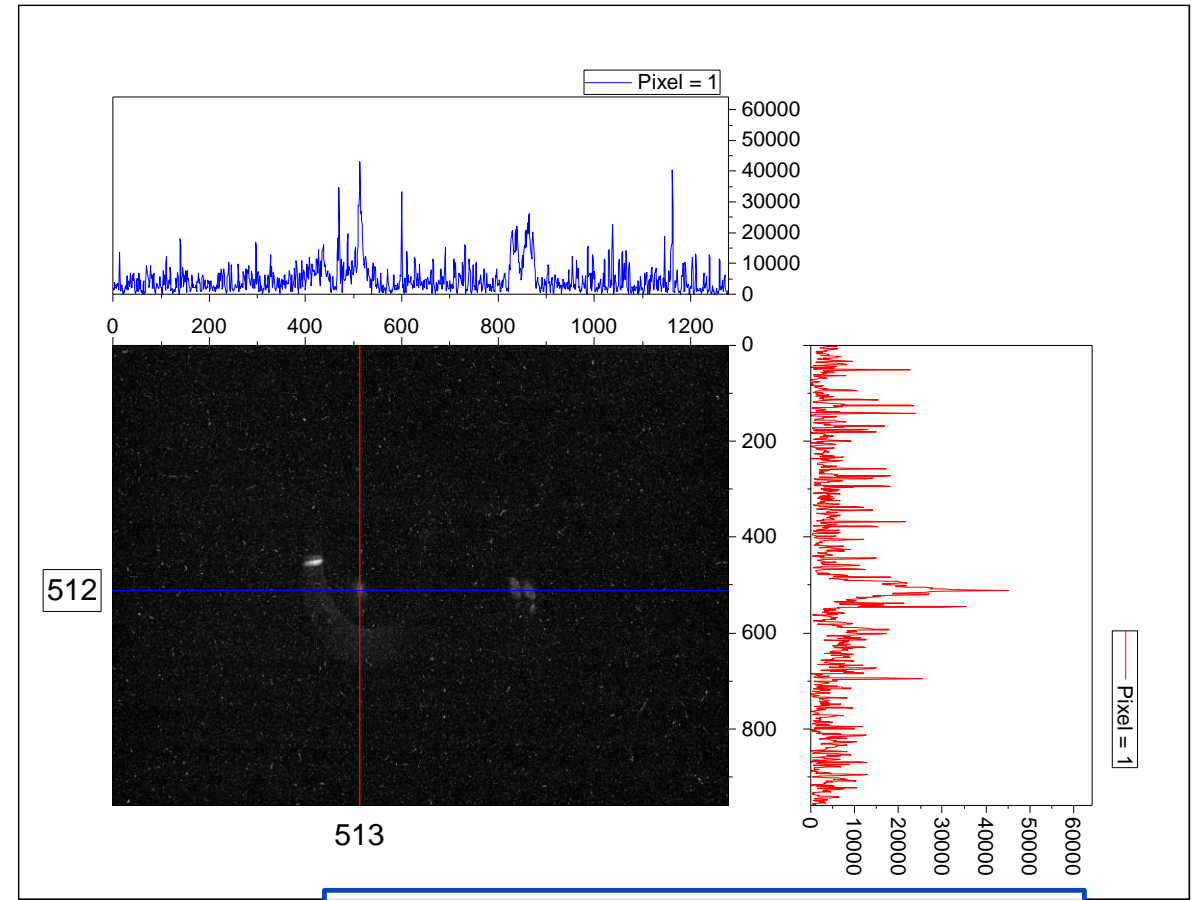
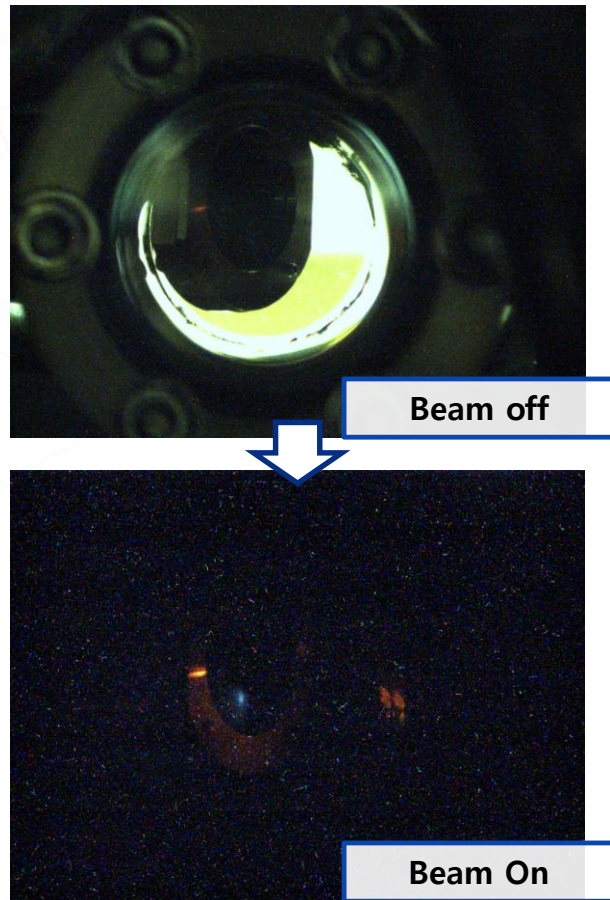
Default

Refresh



➤ 전자빔 발생 확인

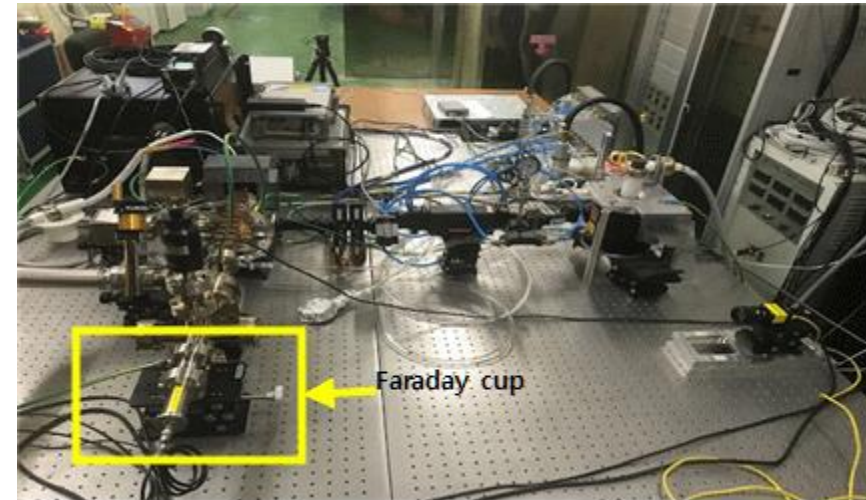
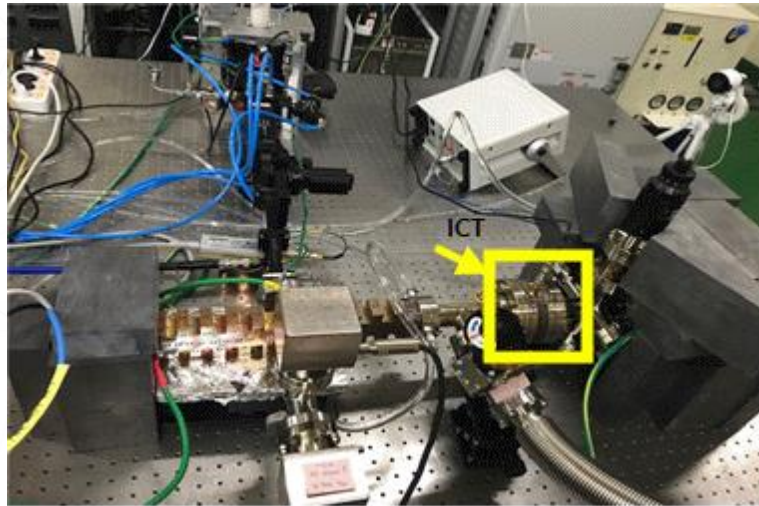
- 전자총에서 발생한 전자빔을 X-band 가속관을 이용하여 전자빔 가속 실험을 수행하였음
- 가속관과 타겟 사이, 전자빔 사이즈 측정장치 (OTR 스크린 및 액추에이터)를 설치하여 빔 사이즈를 측정한 결과, **RMS 기준 수평 0.66 mm, 수직 0.65 mm가 측정됨을 확인하였음**



전자빔 Horizontal, Vertical size 측정

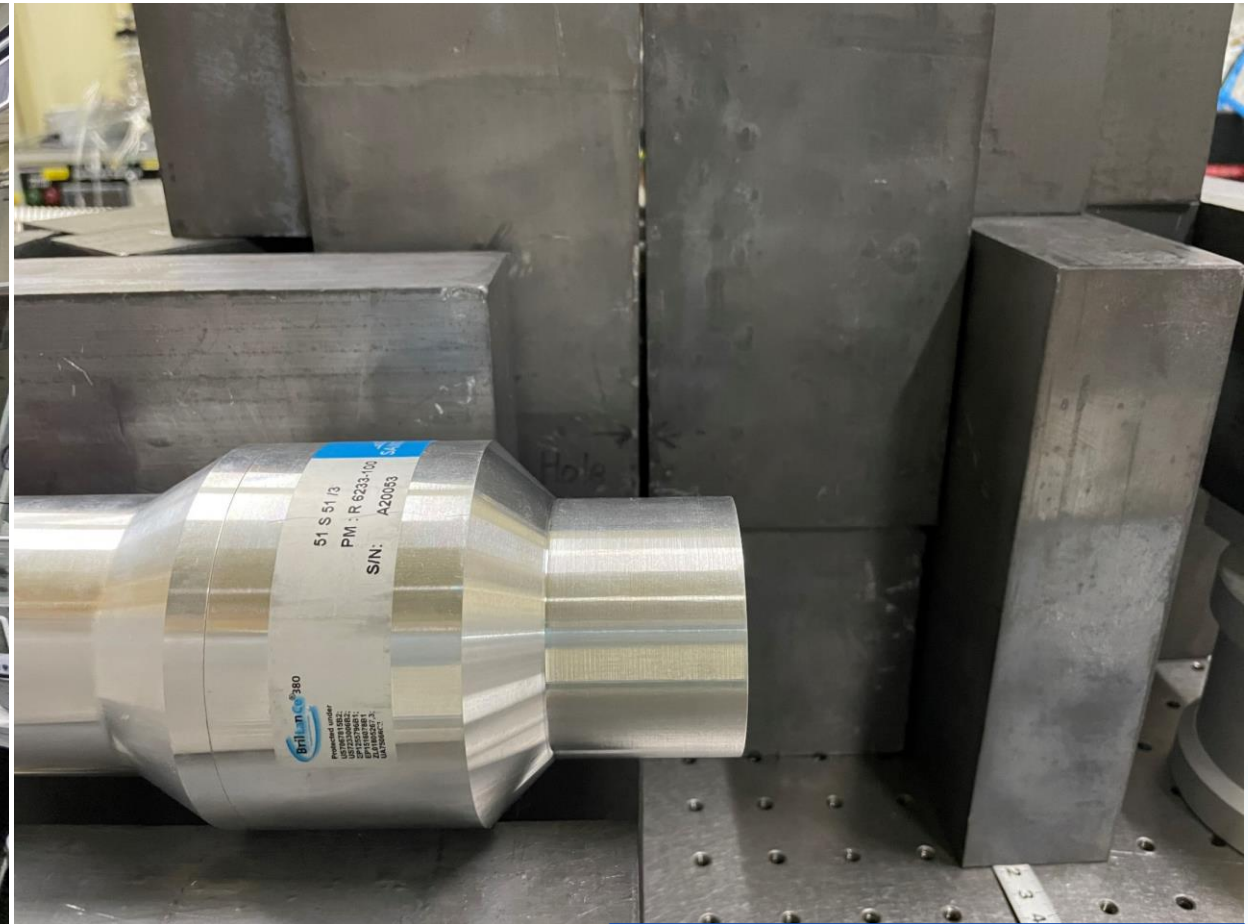
➤ 전자빔 전류 측정

-전자빔 측정은 전자빔 전류 측정장치 (Bergoz社 ICT) 및 Faraday-cup (RadiaBeam社)를 사용하였으며, 전류빔은 침두치 기준 약 60 mA로 측정되었으며, 평균값으로 환산할 경우 빔 출력은 약 300 W 내외임



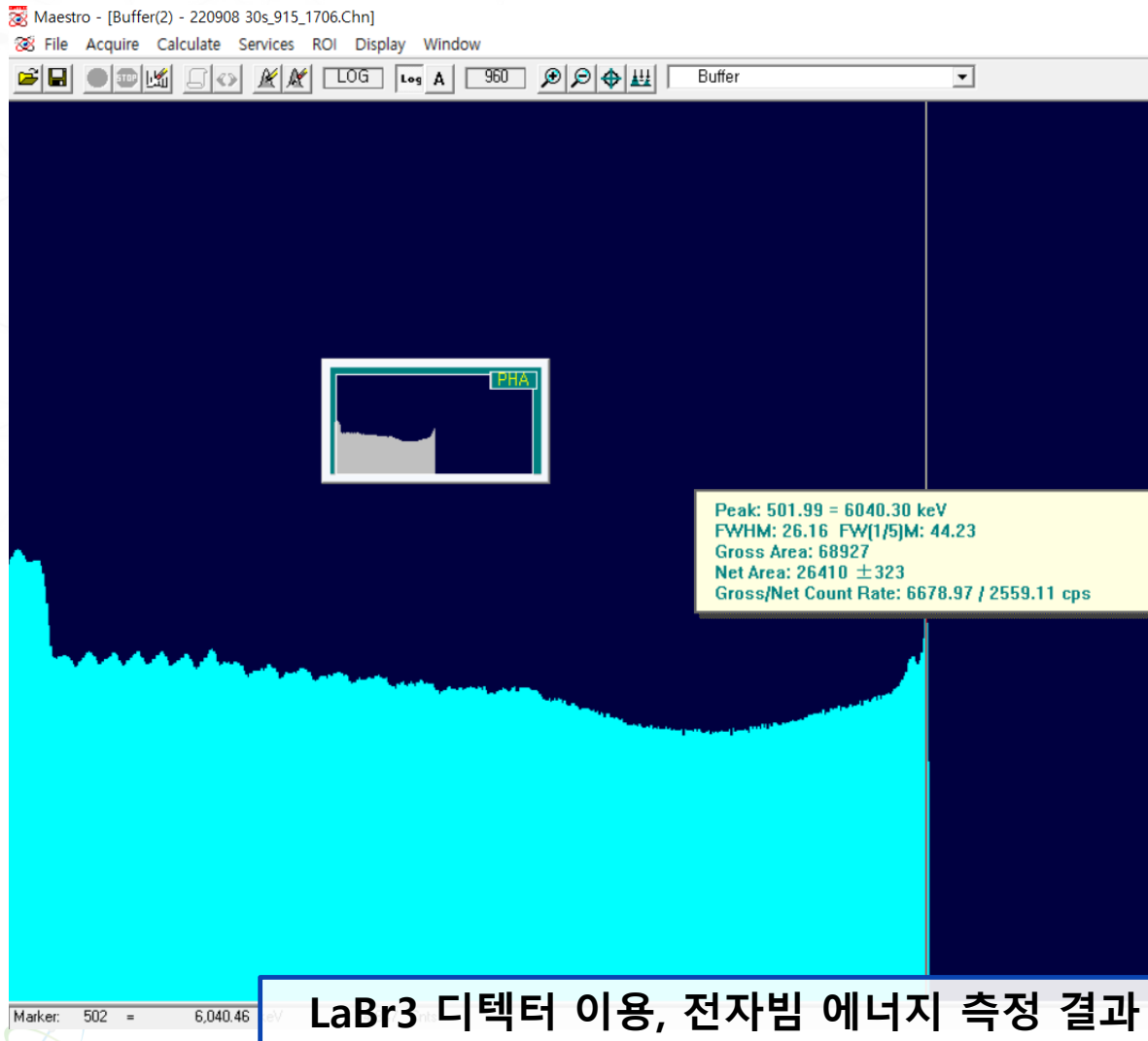
➤ 전자빔 에너지 측정

- 전자를 6 MeV로 가속하기 위하여 필요한 RF 최대 출력 전력은 약 1.7 MW이며, 이는 LINAC 전원 공급 장치인 마그네톨론 (Matgnetron, L3 6170)의 최대 출력과 같음



에너지 측정 환경 구성

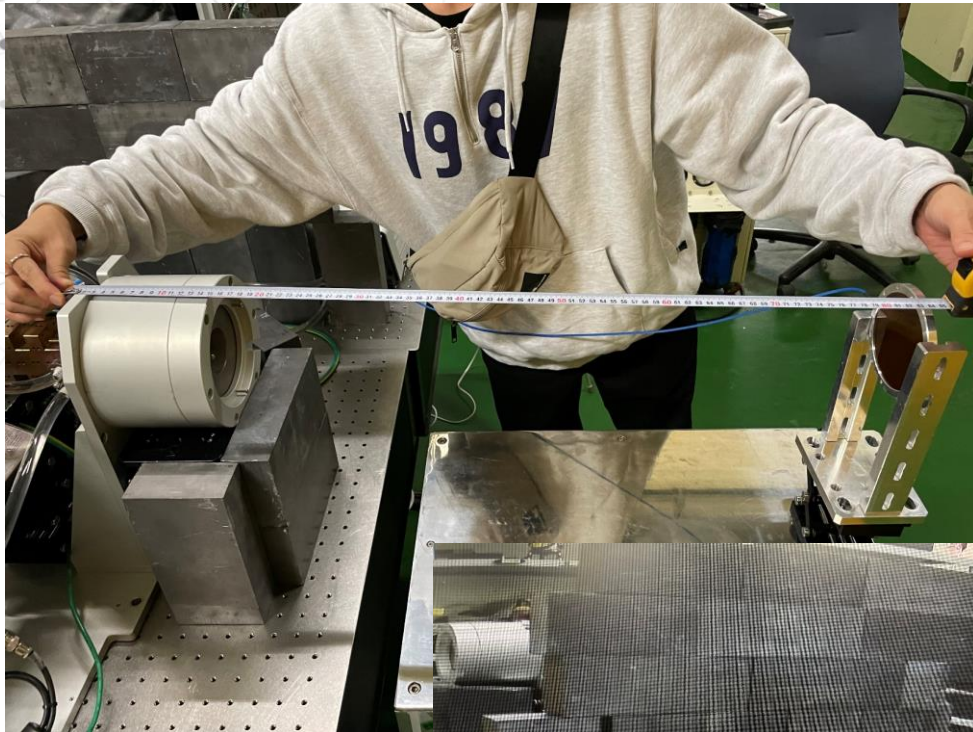
- LaBr3 감광디텍터를 이용하여 전자가속기에서 발생하는 엑스선 에너지를 측정한 결과, **엑스선의 최대 발생에너지가 6.040 MV가 측정됨을** 확인하였으며, 이를 근거로 전자가속기내 전자빔의 최대 가속 에너지도 6 MeV 내외임을 검증하였음



<i>Modulation CCPS (V)</i>	<i>RF power (MW)</i>	<i>Beam energy (MeV)</i>
700	0.98	1.131
750	1.1	2.671
800	1.23	3.745
820	1.33	4.551
840	1.38	5.024
860	1.44	5.535
880	1.47	5.789
890	1.48	5.887
900	1.57	5.984
905	1.70	6.040

➤ 엑스선 선량 측정

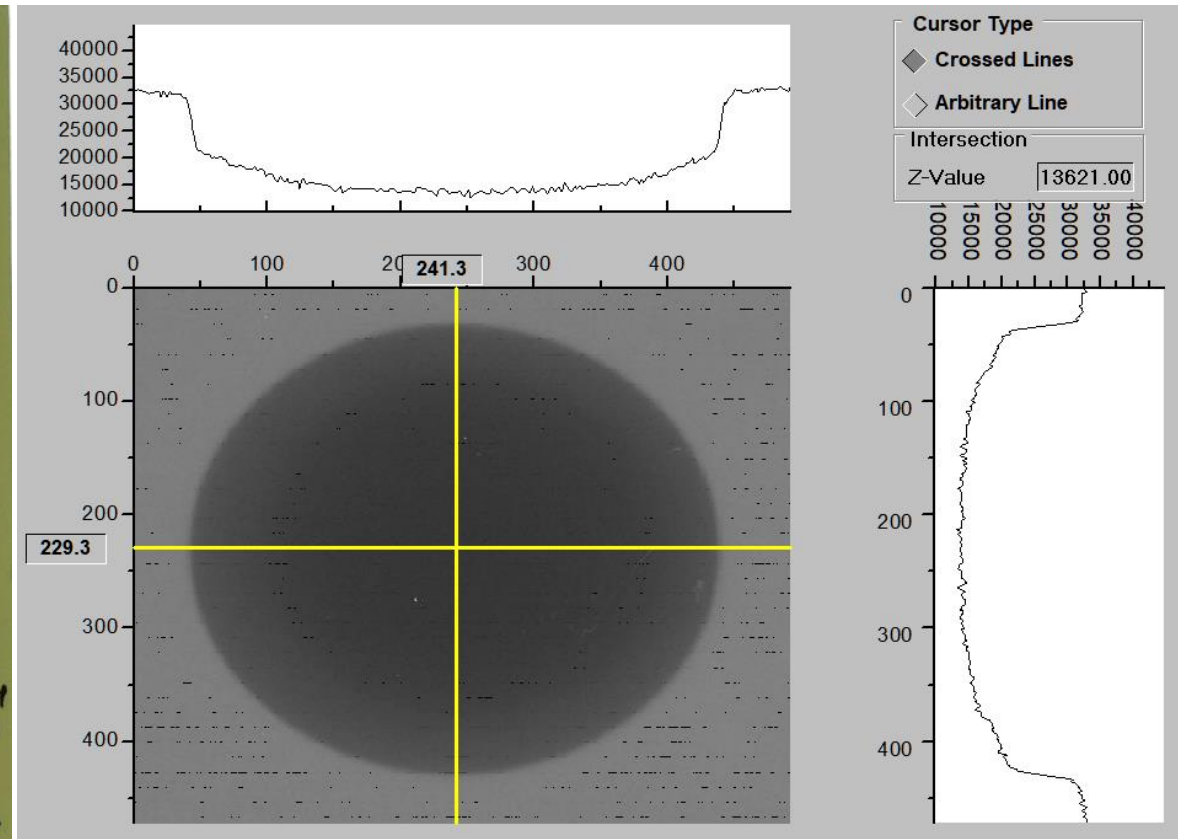
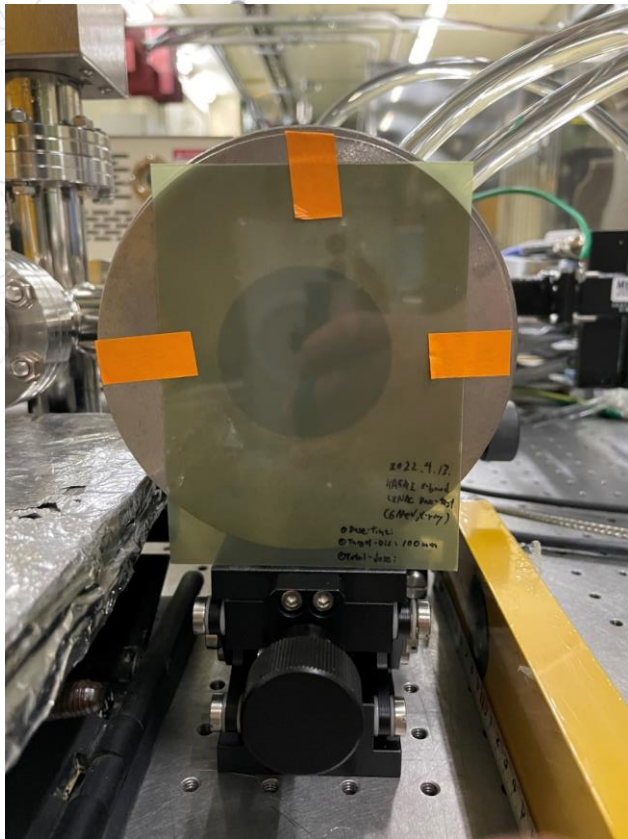
- 가속관에서 발생하는 치료 X-선 Dose-rate를 측정하기 위하여 PTW社の UNIDOS Webline (T10021) 및 전리함선량계 (Farmer, Monitoring chamber, etc) 등 장비를 사용하여 평가를 진행함

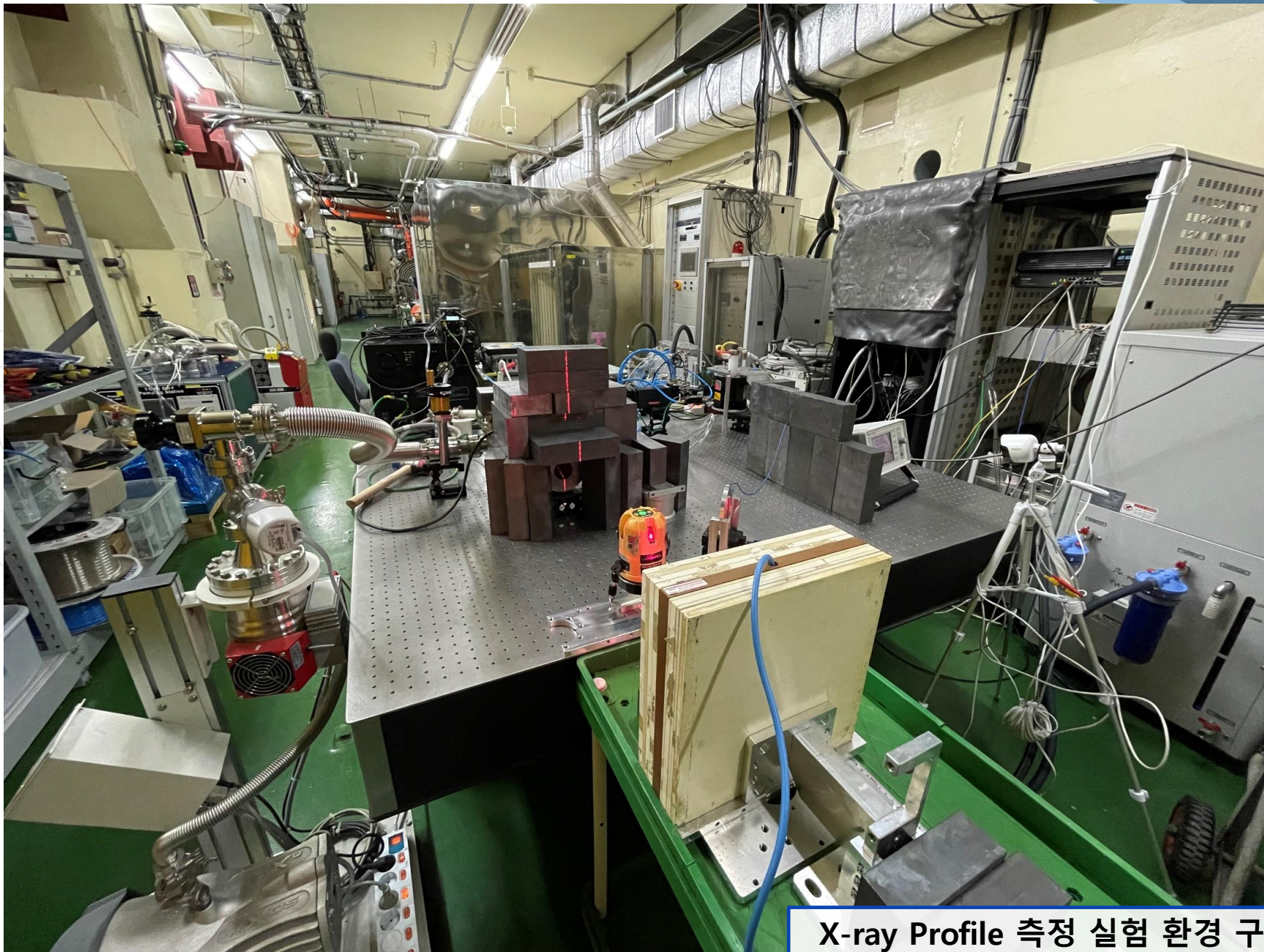


측정 횟수	측정값 (치료 X-선 Dose-rate)	환산값 (Gy/min)	평균값
1	113.1 mGy/sec	6.786 Gy/min	6.778 Gy/min
2	113.0 mGy/sec	6.780 Gy/min	
3	113.0 mGy/sec	6.780 Gy/min	
4	113.0 mGy/sec	6.780 Gy/min	
5	112.7 mGy/sec	6.762 Gy/min	

➤ 엑스선 Profile 검증

- 1차 : 감광필름 (gafchromic EBT3)을 이용하여 엑스선 발생을 확인하였음
- 현재 Slab을 이용한 Profile을 진행 완료하였으며, 결과를 정리하여 SCI 논문 제출 진행중임





X-ray Profile 측정 실험 환경 구성
및 결과 분석 중

맺 음

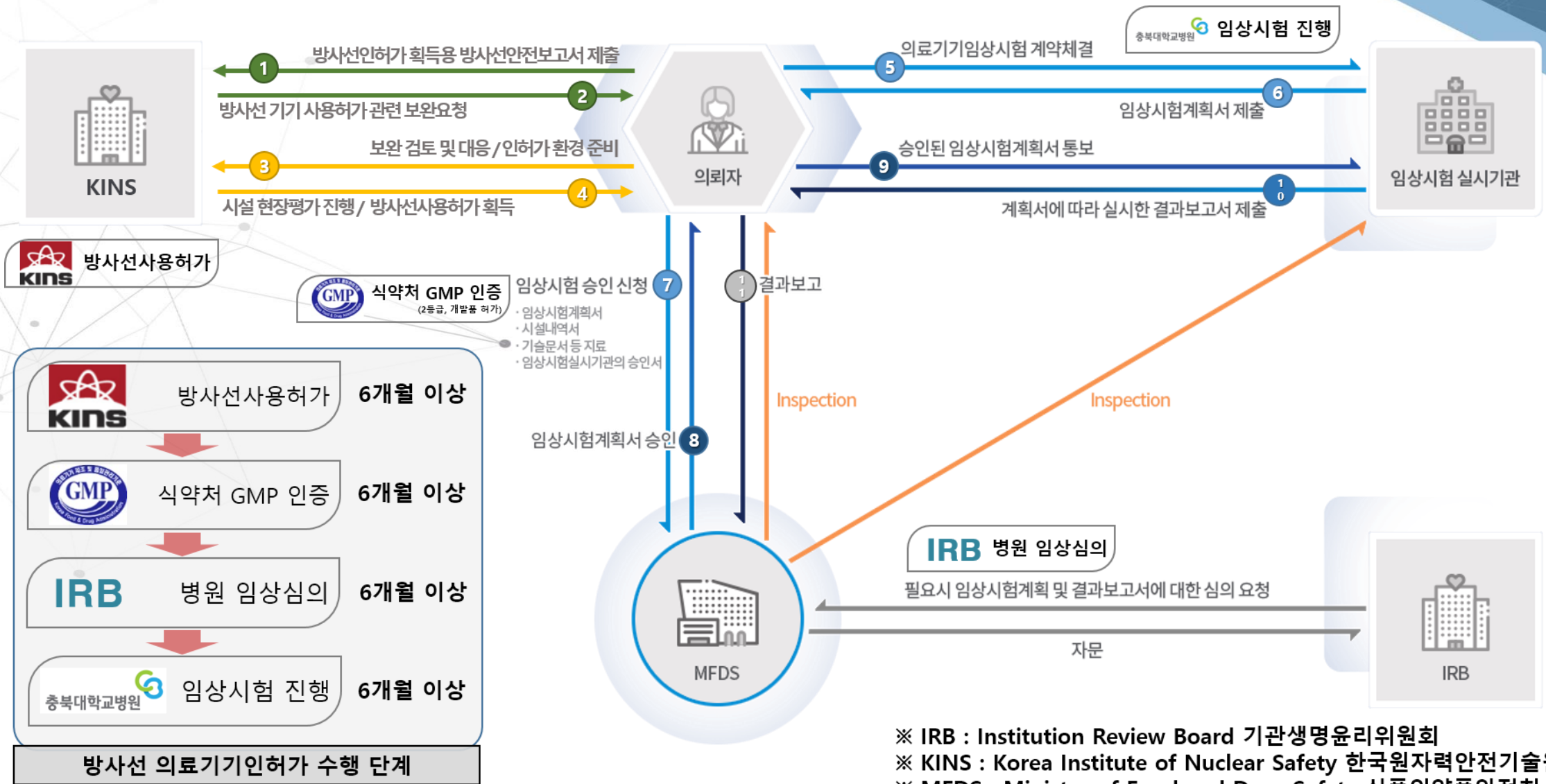
◆ 국내 최초 암 치료기 개발 성공을 위해서

- 암 치료기는 전 세계적으로 성장가능성이 매우 높으며, 이에 대한 시장 지배력을 강화하기 위하여 주요 가속기 선진국 포함 국내에서도 첨단 연구가 활발히 수행되고 있음
- 한국원자력연구원은 높아지는 고선량 방사선 치료 수요 및 치료시간 단축을 위하여 **8 Gy/min 이상 발생 가능한 가속관 head 두 대를 동시 가동할 수 있는 차세대 X-band 기반 방사선 치료 장비 개발** 연구를 수행하였으며, 현재 방사선시설검사 및 KTR 공인인증평가를 완료하였음
- 성능평가를 마친 시작품을 이용하여, 충북대학교병원에서 치료기를 설치하고 **국내 최초로 임상실험**을 진행할 예정임
- 이를 바탕으로 국내 최초 암 치료기 상용화를 통해 국민보건에 이바지함과 동시에, 국내 원천기술 / 경쟁력이 확보할 수 있을 것으로 기대함



충북대학교병원 암 치료기 설치 진행중 (22.10.~)

➤ 진짜 넘어야할 산 : 의료기기/임상시험 인허가 인증 (3등급, 치료용하전입자가속장치)



※ IRB : Institution Review Board 기관생명윤리위원회
 ※ KINS : Korea Institute of Nuclear Safety 한국원자력안전기술원
 ※ MFDS : Ministry of Food and Drug Safety 식품의약품안전처

감 사 합 니 다

본 연구는 정부(과학기술정보통신부, 산업통상자원부, 보건복지부, 식품의약품안전처)의 재원으로
범부처전주기의료기기연구개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 (과제고유번호; KMDF_PR_20200901_0042, 9991007142)