

2023년 한국전자파학회 하계종합학술대회

고출력 전자파 기반 방사선 암치료기 기술

(공동연구기관 : 가톨릭대학교 서울성모병원, ETRI)

김정일, 김근주, 김상훈, 이정훈, 김인수, 장광호

전자기파융합연구센터

전기의료기기연구단

한국전기연구원



목차

- 방사선 암치료기 기술 현황
- X-band 선형가속기 기술
(LINAC, Linear Accelerator)
- 고출력 마그네트론 기술
 - S-band (3.0 GHz) 3.1 MW급 마그네트론
 - X-band (9.3 GHz) 2.0 MW급 마그네트론
- CT 영상유도 LINAC 방사선 암치료기 기술

한국전기연구원 KERI (Korea Electrotechnology Research Institute)

- 과학기술정보통신부 산하 정부출연연구기관

안산



← 전기의료기기연구단
전자기파융합연구센터

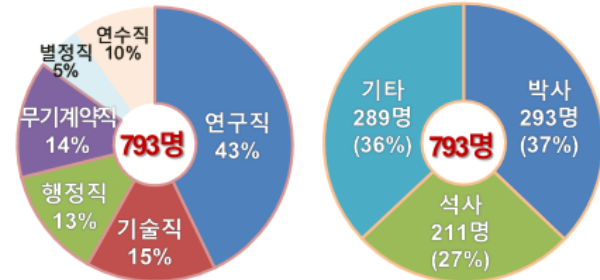
의왕



광주 (스마트그리드연구본부)



[인력 분포]



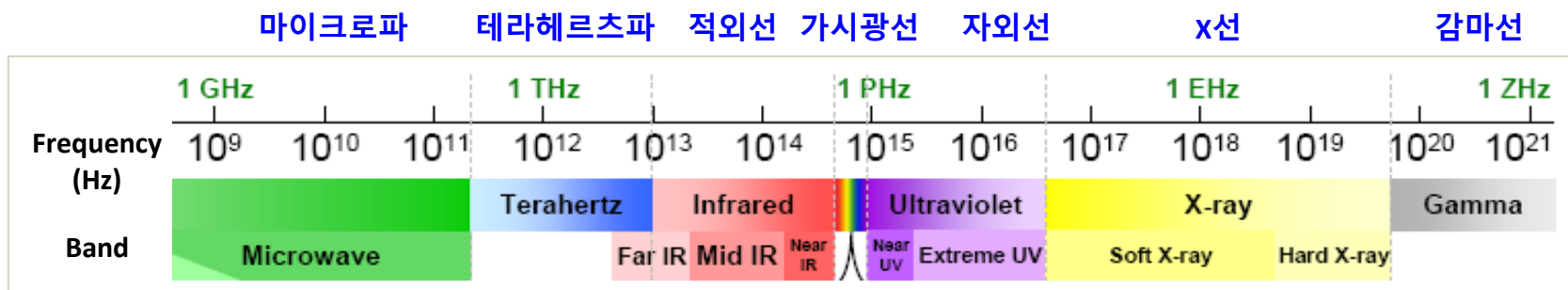
창원 본원



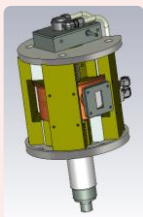
▪ 부지 : 337,176m² (101,995평)

▪ 건물 : 97,157m² (29,389평)

전자기파융합연구센터 연구분야



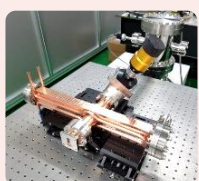
3.1 MW S-band
마그네트론



2.0 MW X-band
마그네트론



안티드론 안테나

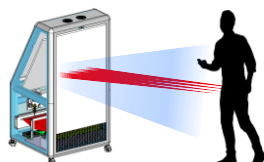


X-band 선형가속기

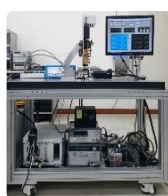
35 GHz 2.5 kW
마그네트론



100 GHz 10 W
클리노트론

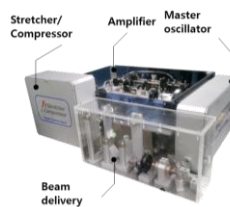
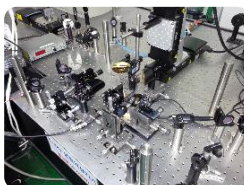


245 GHz 보안검색장치



400 GHz
제약 검사장치

THz TDS 분석장치



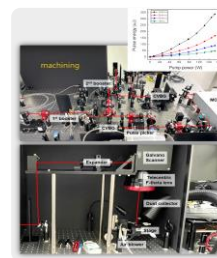
1030 nm 펄초 레이저



1030 nm
피부 레이저 의료기



515 nm/343 nm
펄초 레이저



펄초 레이저
정밀 가공기

방사선 암치료기



6 MV X-ray

**MW급 전자파 기술 응용
→ 암치료기 기술**

암 치료 기술

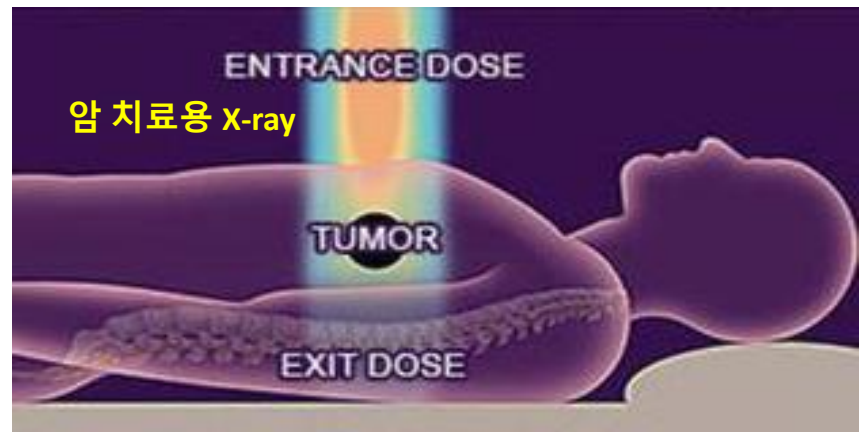
[암 치료 기술]



[방사선 치료용 External Beam]

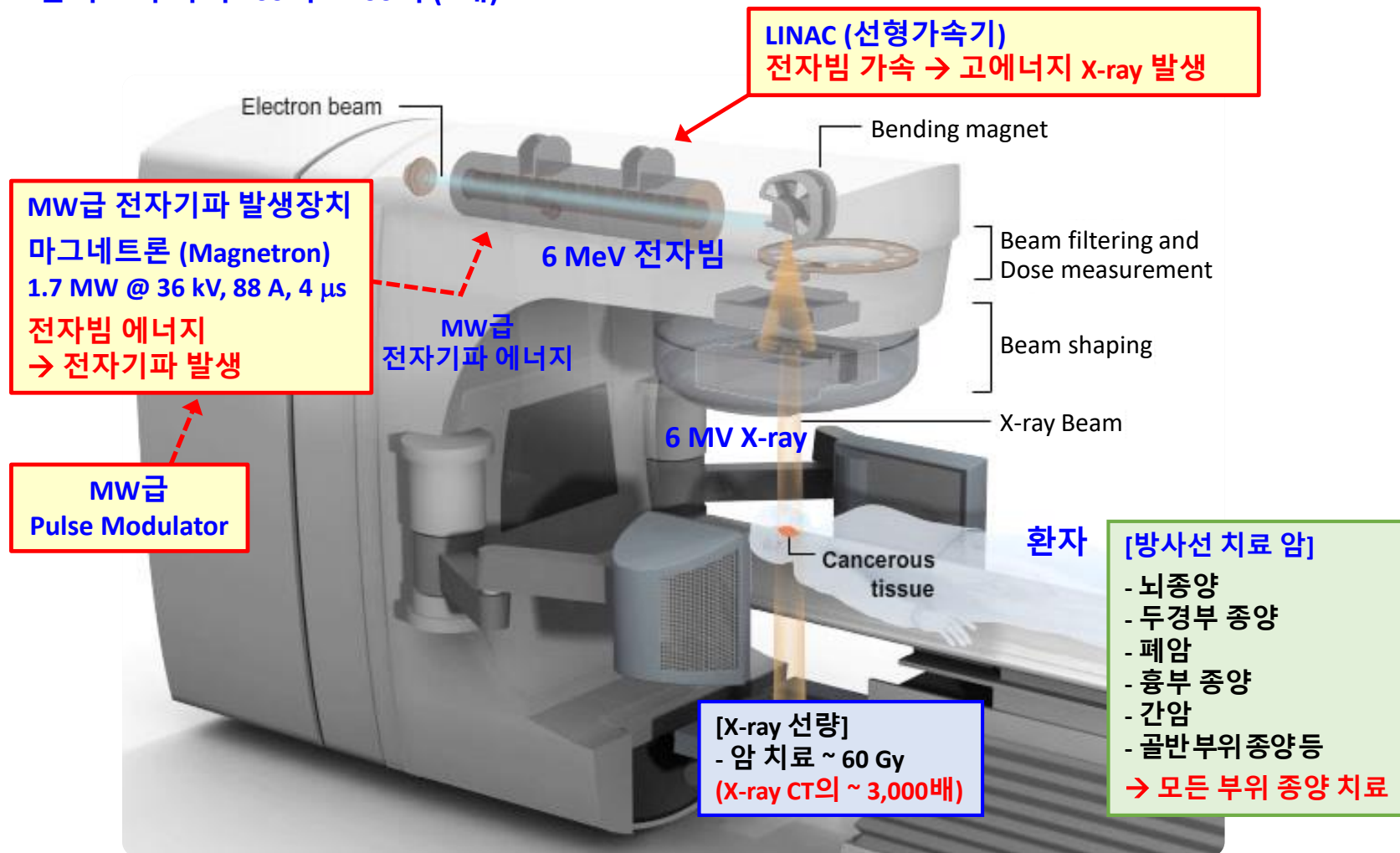
구분	종류
전자기파 방사선	감마선 X-ray (선형가속기 기술)
입자 방사선	전자 양성자 중성자 중입자

[External Beam를 이용한 방사선 치료]



방사선 암치료기 기술

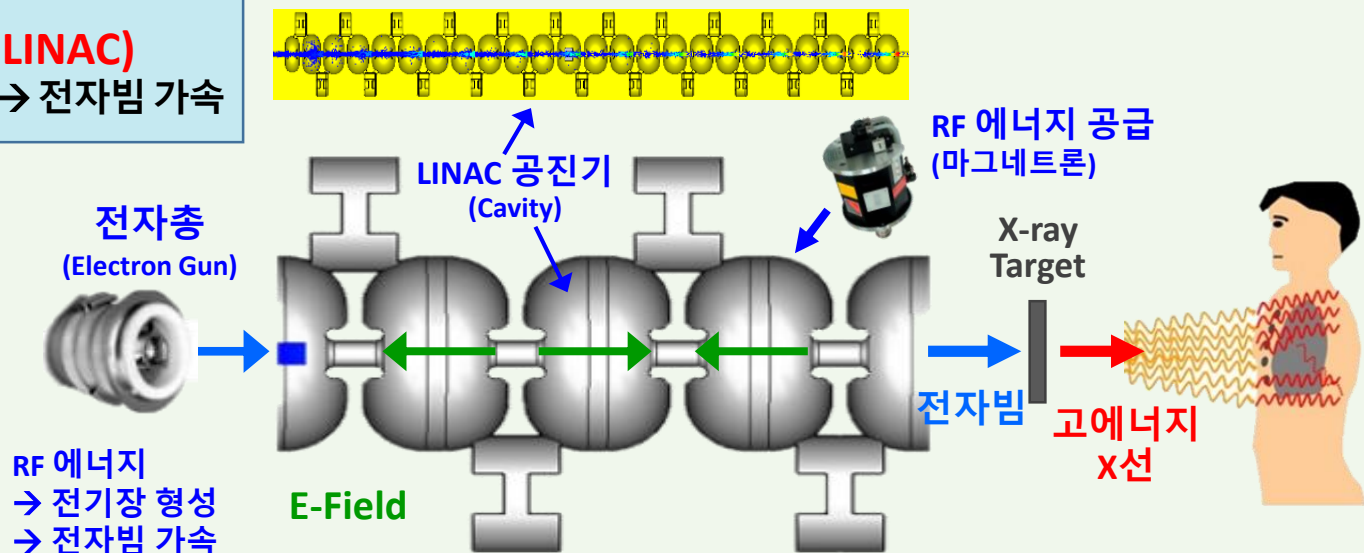
- 진료과 (의료기기 등급) : 방사선종양학과 (3등급 의료기기)
- 암치료기 가격 : 60억 ~ 100억 (1대)



의료용 선형가속기 / 마그네트론 구조

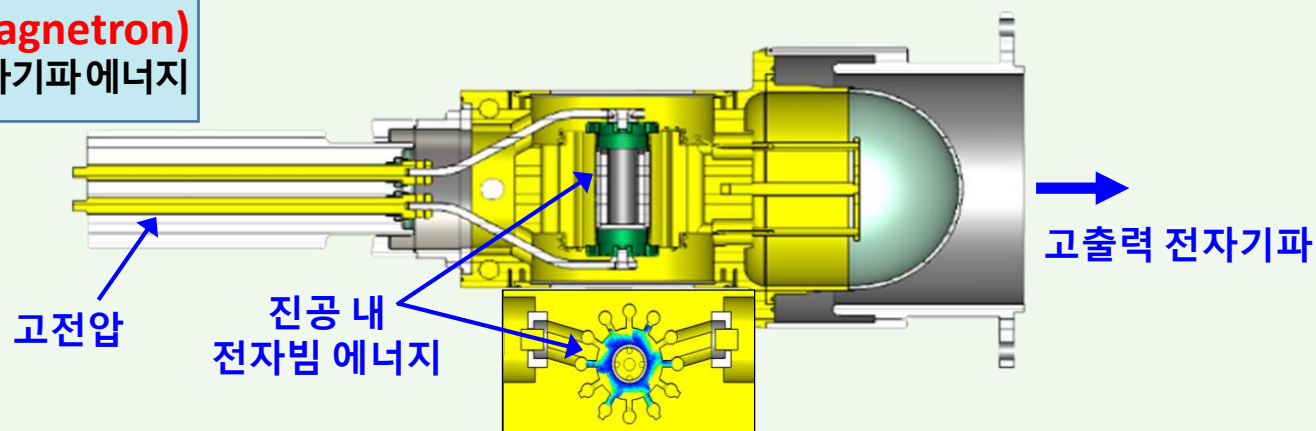
선형가속기 (LINAC)

전자기파 에너지 → 전자빔 가속



마그네트론 (Magnetron)

전자빔 에너지 → 전자기파 에너지



의료/산업분야 활용성 (MW급 시스템 응용분야)

의료 응용 시스템

방사선 암치료기



CT-LINAC 암치료기



MR-LINAC 암치료기

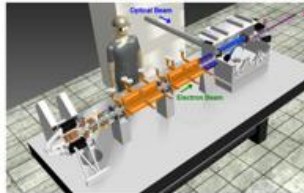


Cyberknife



반려동물용 암치료기

의료 산업



Monochromatic X-ray Beam Source



방사성 동위원소 생산

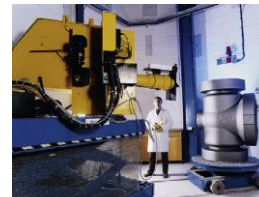


의료기기/제약 전자빔 멸균

산업 응용 시스템



Cargo 비파괴검사장치
(항공/해운/철도)



산업용 비파괴검사장치
(자동차/산업/항공/
건축물/교량)



멸균장치

(공중보건/재생의학/식품/
생명공학/식물검역)



전자빔/X-ray 가공장치
(공업/환경/생물자원/
식품/생명공학)



국방 보안 응용

불법이동체
무력화 시스템
(육상/해상/공중/
안티드론 시스템)



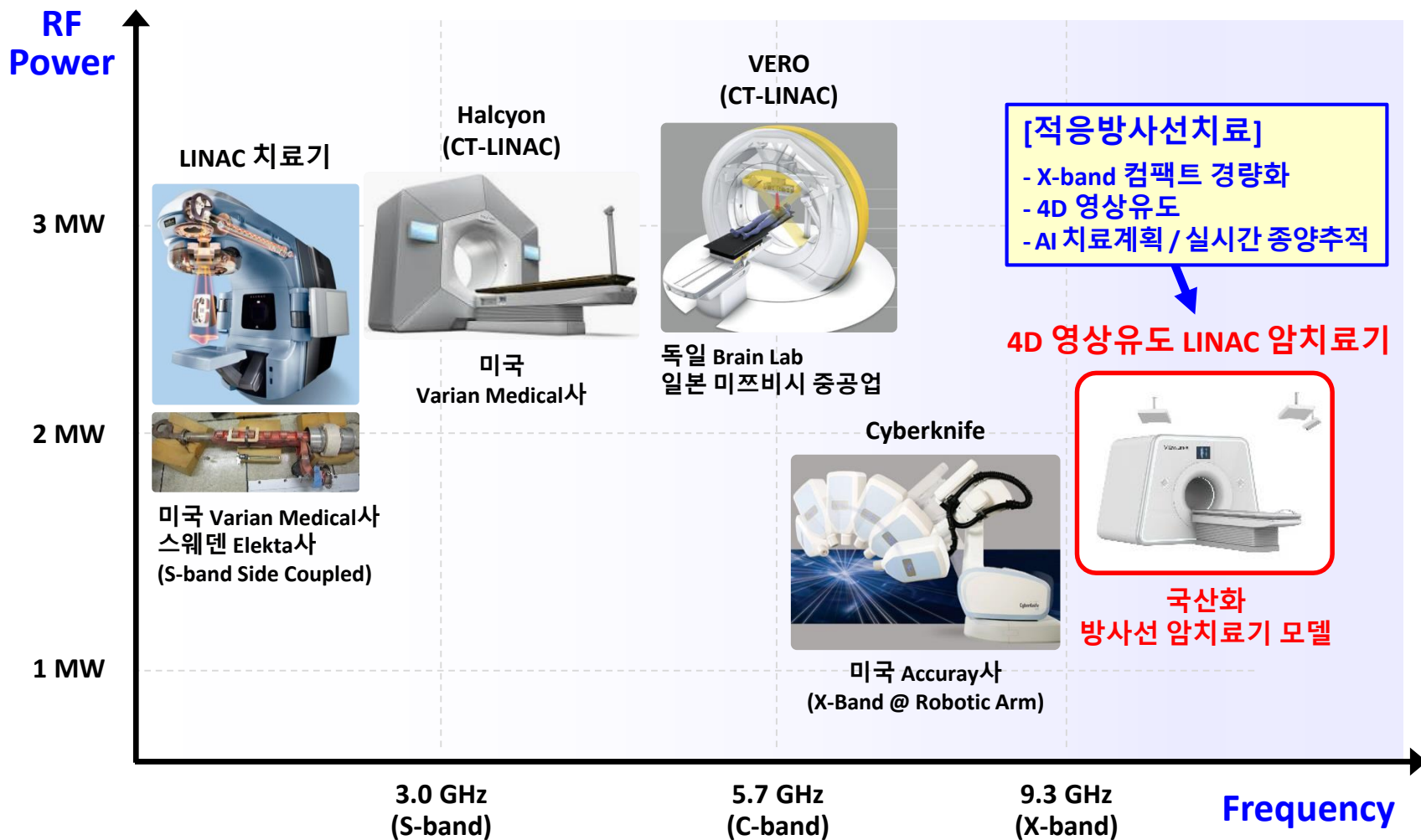
민수용 시스템



국방용 시스템



방사선 암치료기 기술 현황



산업환경 분석

- **독점적 시장의 확대** 세계시장은 2022년 94.8억 달러 규모 (연평균 7.0 % 성장률)
미국 Varian Medical사, 스웨덴 Elekta사 등이 방사선 암치료가 시장을 독점
- **선형가속기 기반 영상유도 방사선 암치료가 기술 시장 확대**
 - 미국 암 환자의 60 % 정도 방사선 치료, 국내의 경우 30 % 정도이며 지속적으로 수요 증가
 - 진단영상기기와 융합된 고정밀 영상유도 암치료기의 개발 가속화
 - 정밀한 로봇 시스템 및 영상유도 장치와의 융합성을 높이기 위해 소형화 경량화 필수
- **선형가속기 시스템 기술 기반 국내 산업응용 확대**
 - 산업용 X-ray 비파괴 검사장치, 컨테이너 검사장치 등으로 응용이 확대
 - 산업 응용을 위해 소형 경량의 이동형 선형가속기 시스템 기술이 필요
- **반려동물용 치료기 시장 창출** 2019년 반려동물 양육 가구 비율은 미국은 67 %, 한국은 26 %
반려동물 치료를 위한 암치료가 신규시장이 창출될 것으로 전망

방사선 암치료가 보급 비율

[지역별 암 발생률 및 인구대비 방사선치료기기 보급 비율]

Region/Country	Incidences of Cancer in 2015 (Million)	Number of Radiotherapy Units/Million of Population (2013)
U.S	1.7	12
Europe	3.5	6
Asia	7.4	2
Africa	0.9	1
Latin America and the Caribbean	1.2	2

(출처) "M&M Radiotherapy Market Report" 2017

[LINAC 시스템 보급을 비교]

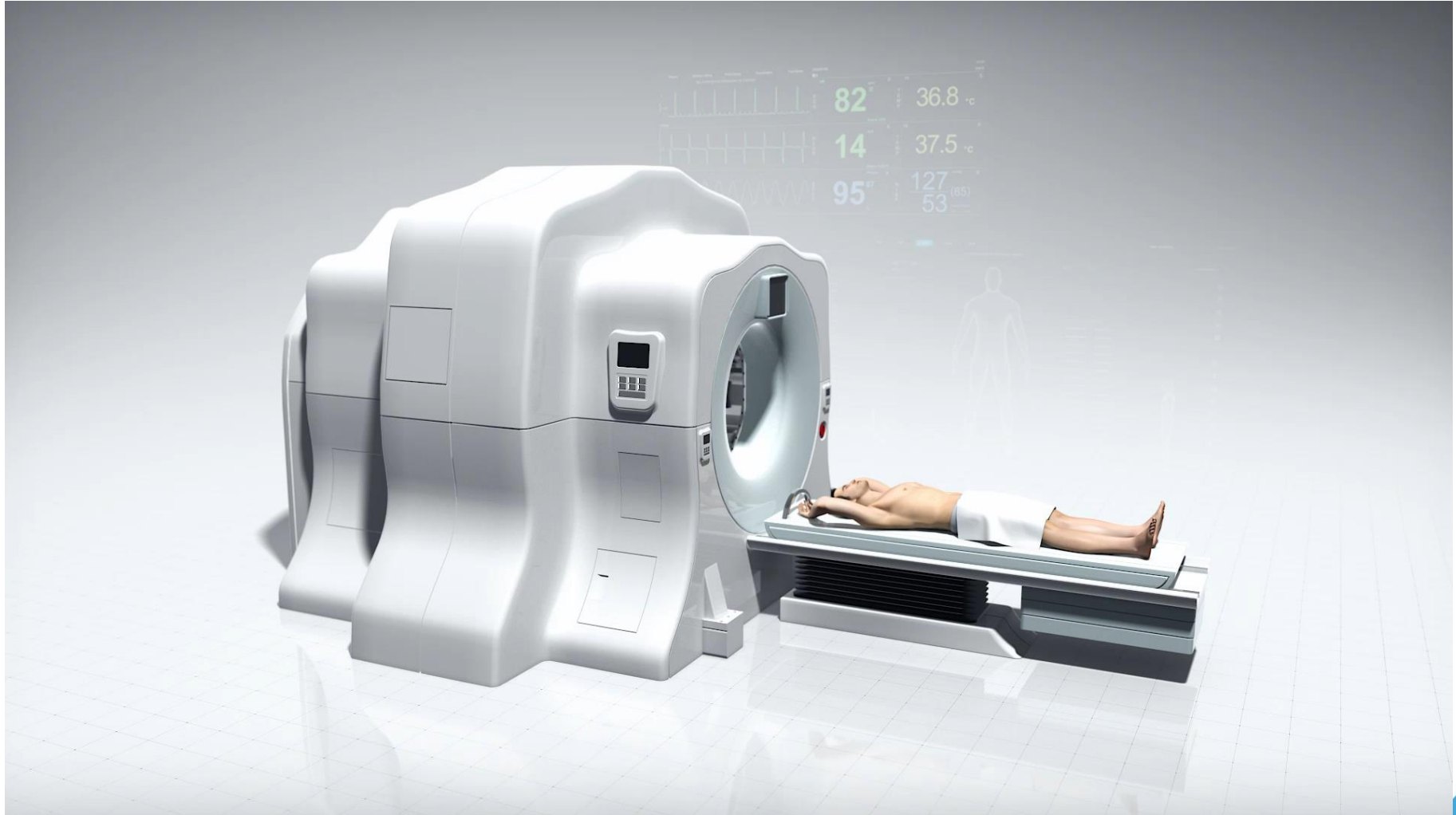
국가	LINAC 암치료가 수	LINAC 방사선 치료시설 수
한국	187	68
일본	1,056	767
중국	1,695	1,115
미국	3,727	2,447

- (전세계) LINAC 시스템 14,673대 정도 (2020)
- LINAC 방사선 암치료가는 국내 수입 의료기기 11위권 품목 (2018)

[국내 상황]

- 현재 100% 수입에 의존, 국산화 제품개발 필요
(암치료가 1대당 60억 ~ 100억, 1년 A/S 비용 10 % 정도)

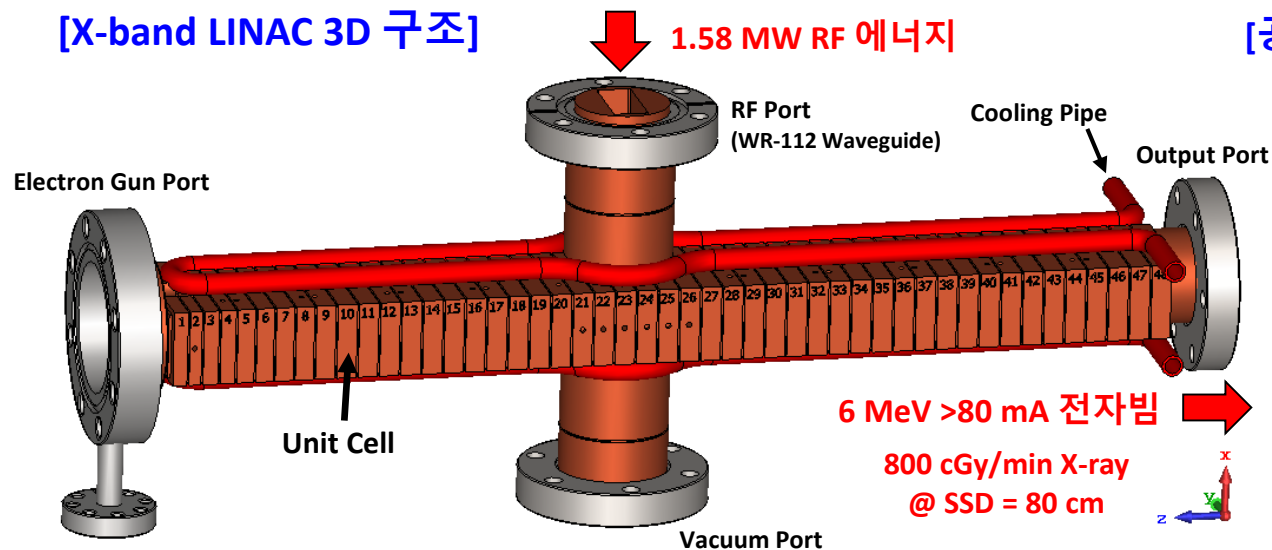
방사선 암치료기 구동 동영상



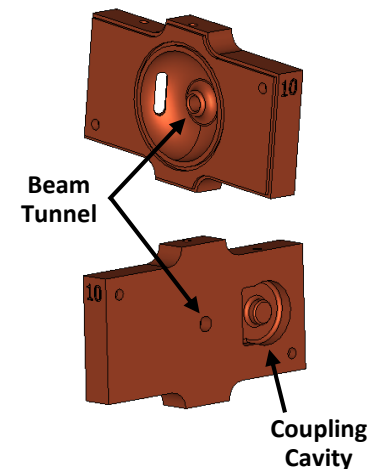
X-band (9.3 GHz) LINAC 구조

선형가속기 (LINAC) 전자기파 에너지 → 전자빔 에너지

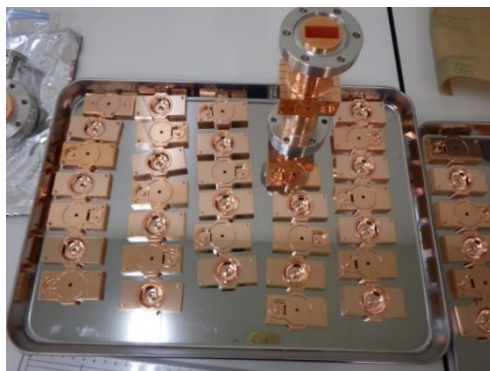
[X-band LINAC 3D 구조]



[공진기 Unit Cell 3D 구조]

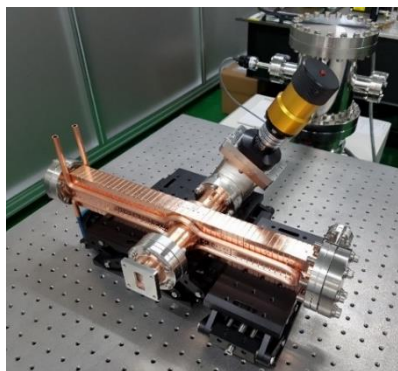


[LINAC 공진기 Unit Cell]



진공
접합

[진공 접합된 LINAC]



[Physical Parameters]

- Cavity N = 24
- Coupling Cavity N = 12
- Type = Side Coupled LINAC
- Cavity Material = Oxygen Free Copper
- Beam Energy = 6 MeV
- Beam Current > 80 mA
- Accelerating Tube Length = 37.3 cm
(Flange 포함 = 42 cm x 8.5 cm x 15 cm)

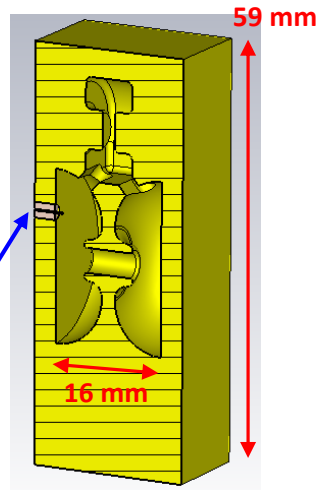
LINAC 공진기 Unit Cell 특성

[Transient Solver]

- Mesh = Hexahedral
- Material = Copper
- Frequency = 9 - 9.6 GHz
- Point Number N = 5001
- Frequency Resolution = 120 Hz
- Pulse Number = 100
- Accuracy = - 30 dB

Monopole Antenna

- Probe 지름 = 0.21 mm
- Probe 길이 = 1.2 mm



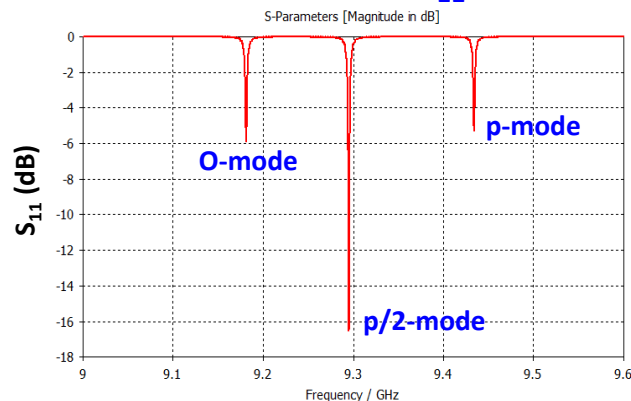
O-mode
9.1814 GHz

$\pi/2$ -mode
9.2953 GHz

(Operation Mode)

π -mode
9.4342 GHz

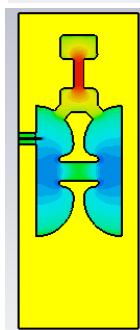
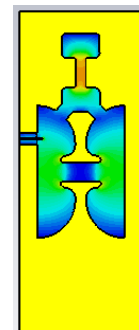
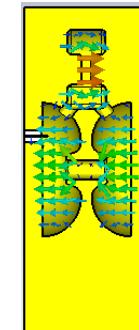
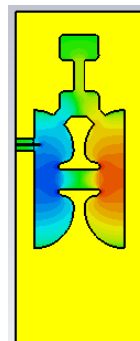
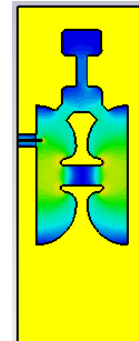
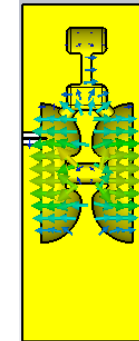
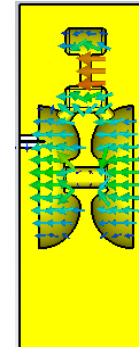
[Reflectance S_{11}]



E-Field

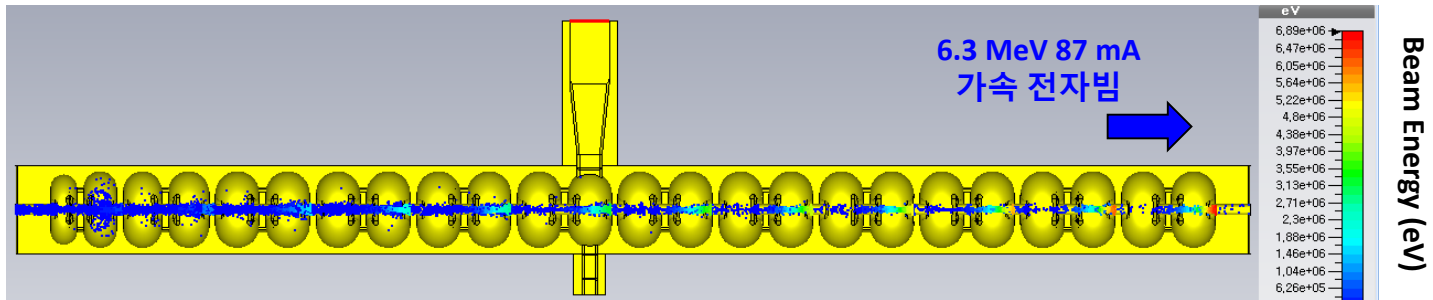
Magnitude

Ez Field

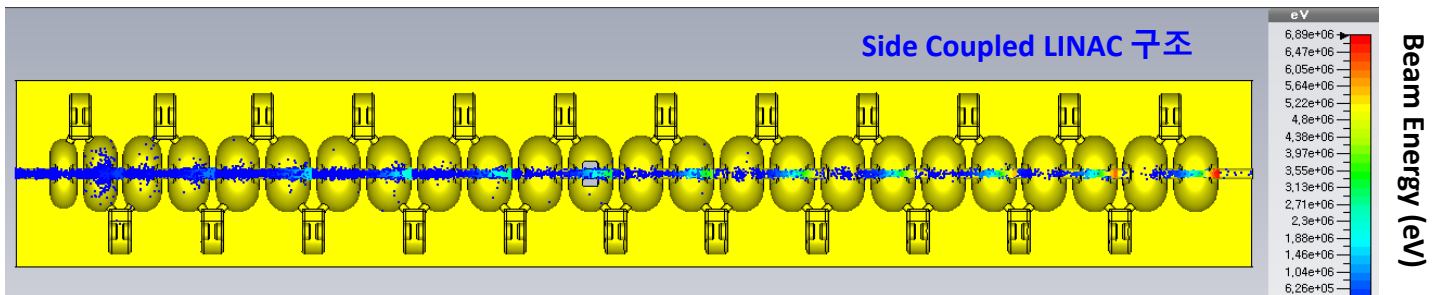


가속 전자빔 3차원 시뮬레이션 해석

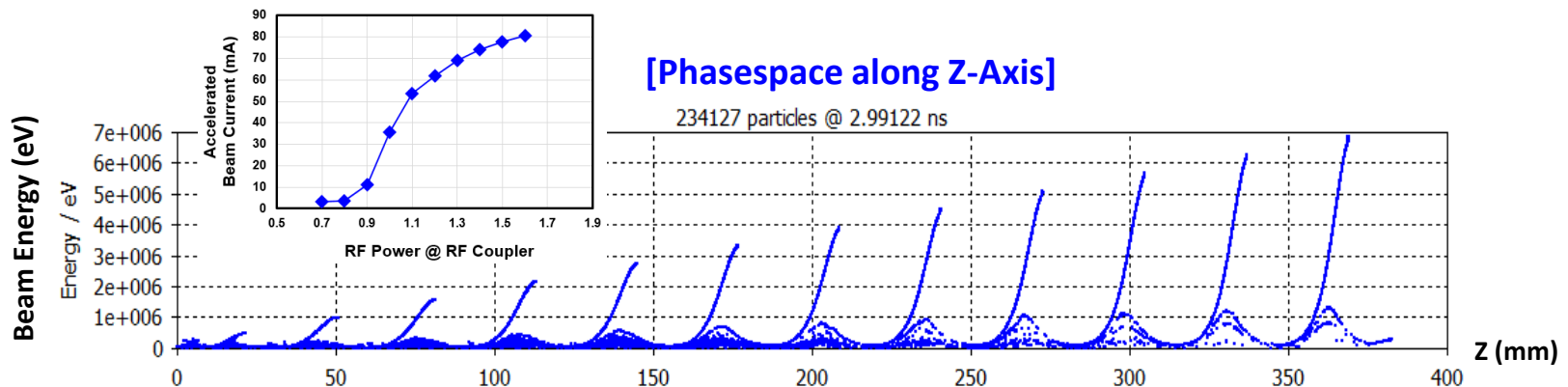
[Electron Distribution in X-Plane]



[Electron Distribution in Y-Plane]

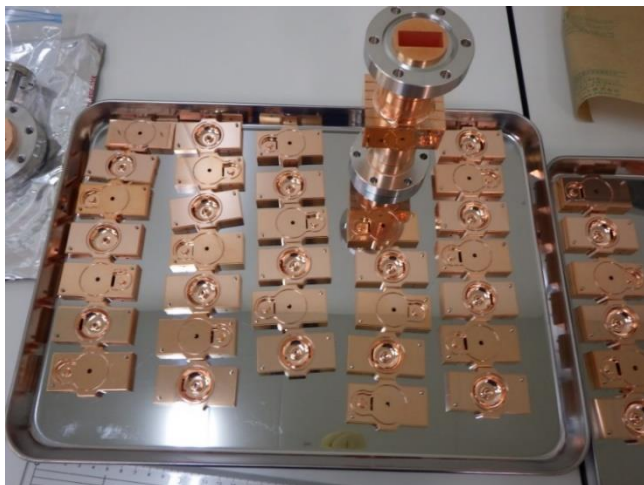


[Phasespace along Z-Axis]

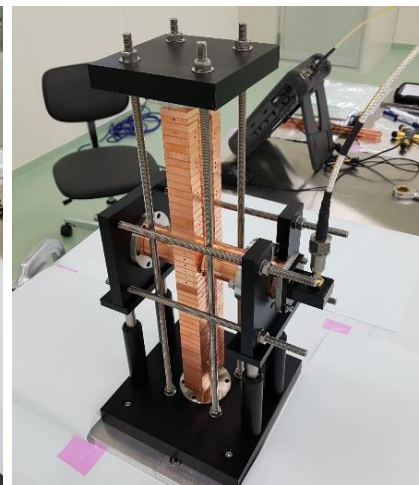
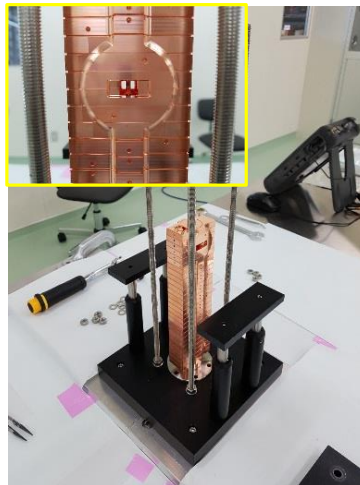


X-band LINAC 제작 공정

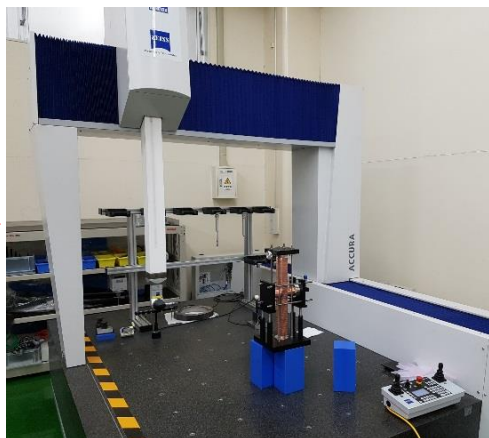
[LINAC 공진기 제작]



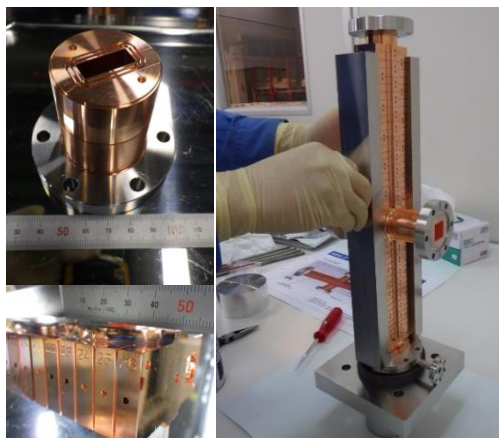
[공진기 및 LINAC 특성실험]



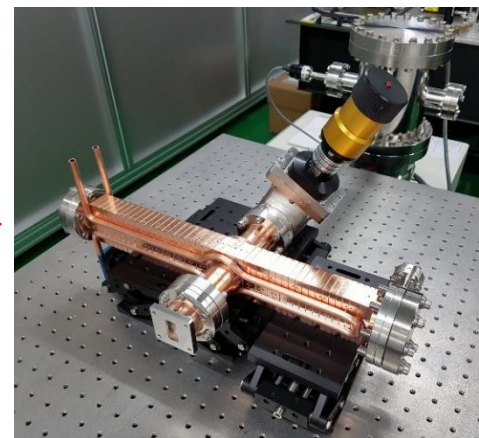
[진직도 (Straightness) 측정]



[Vacuum Brazing 공정]

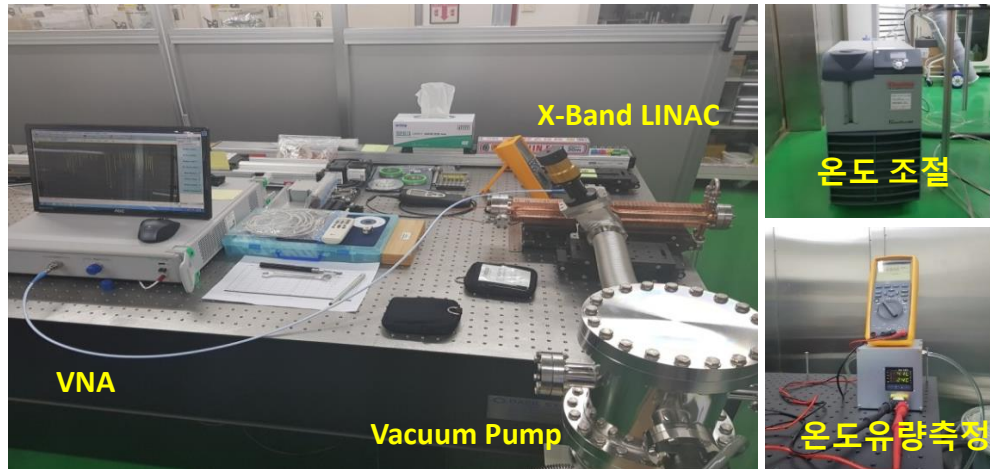


[Brazing 공정 후의 LINAC]

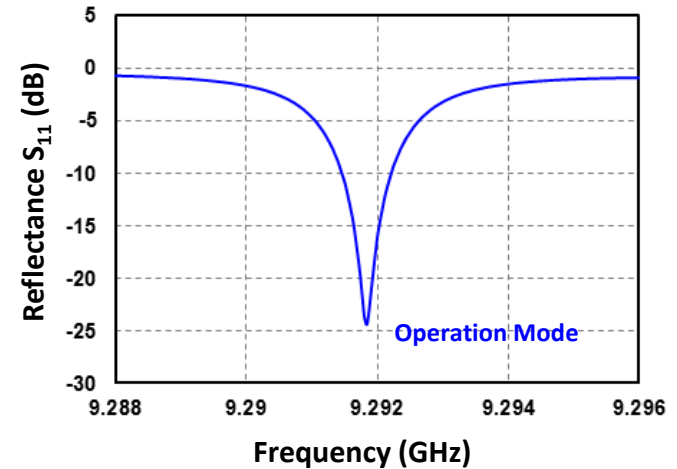


온도에 따른 LINAC 주파수 특성

[온도에 따른 LINAC 주파수 특성 측정 Setup]



[Reflectance S_{11} @ $T = 34^\circ$]



Set Temp (°C) @ Chiller	Time	Flow Rate (L/min)	Chiller Temp (°C)	LINAC Temp (°C)	Frequency (GHz)	HFIG Gauge (진공도)	S_{11} (dB)
20	14:47	4.1	19.8	20.9	9.2939	4.1×10^{-9}	-26.59
22	15:01	4.1	21.8	22.5	9.2936	4.1×10^{-9}	-26.31
24	15:13	4.1	23.8	23.9	9.2933	4.1×10^{-9}	-25.97
26	15:31	4.1	25.9	25.5	9.2930	4.1×10^{-9}	-25.44
28	15:45	4.1	27.7	26.7	9.2927	4.1×10^{-9}	-25.11
30	16:00	4.1	29.7	28.0	9.2924	4.1×10^{-9}	-24.84
32	16:15	4.1	31.7	29.6	9.2921	4.1×10^{-9}	-24.66
34	16:30	4.1	33.7	30.9	9.2918	4.1×10^{-9}	-24.25
36	16:47	4.1	35.7	34.9	9.2915	4.2×10^{-9}	-24.06
38	17:02	4.1	37.6	36.8	9.2912	4.2×10^{-9}	-23.64
40	17:17	4.2	39.5	38.3	9.2909	4.2×10^{-9}	-23.60

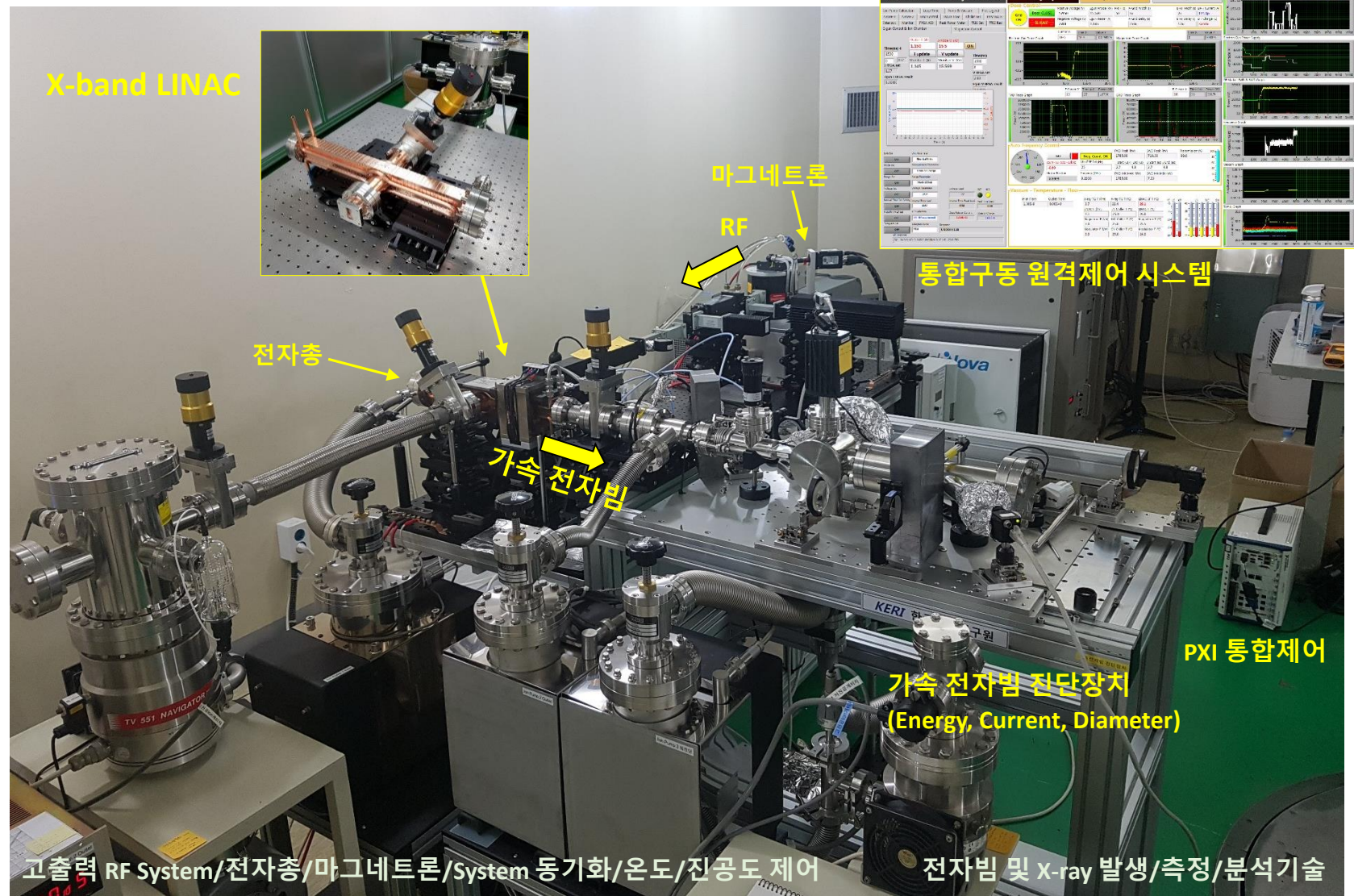
[VNA Setup]

- Frequency range = 9.1 - 9.5 GHz
- Frequency resolution = 400 MHz
- IF bandwidth = 2 kHz

[온도변화 결과]

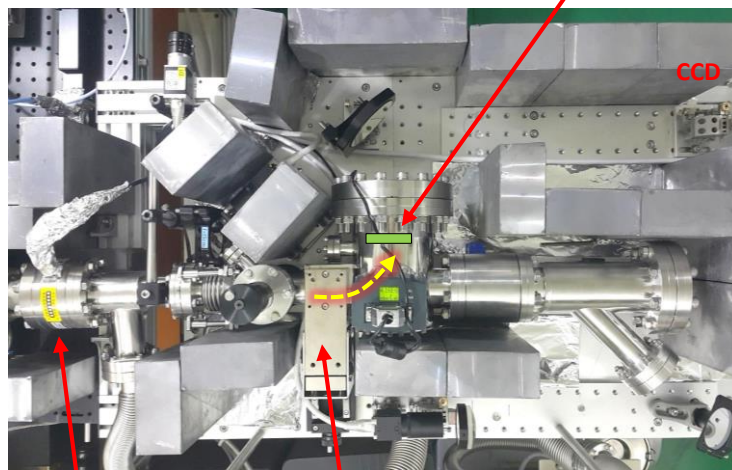
- $\delta F = 3$ MHz @ 총 온도변화 = 17.4°
- $\delta F = 172.4$ kHz @ 온도변화 = 1°
- $\pi/2$ -mode Frequency = 9.2918 GHz
@ $S_{11} = -24.8$ dB (온도 = 34°)

X-band LINAC System @ 서울성모병원 별관 실험실



가속 전자빔 특성

[가속 전자빔 진단장치]



Current Monitor **Bending Magnet**

[Experimental Parameters]

RF Specification	
FWD Power (MW)	1.82
FWD @ Marker (MW)	1.80
BWD Power (MW)	630
BWD @ Marker (MW)	171
RF PRF (Hz)	100
Temp (LINAC/Chiller)	33.6 / 29.8
Vacuum (Torr)]	1.8 x 10 ⁻⁹

E-Gun Specification	
Heater Current (A)	1.25
Anode Voltage (kV)	16
Grid Voltage (V)	+60 / -40
Grid Delay (ns)	1500
Grid Pulse Width (ms)	0.8
Beam Specification	
Accelerated Current (mA)	100.6

[마그네트론 파형 특성]



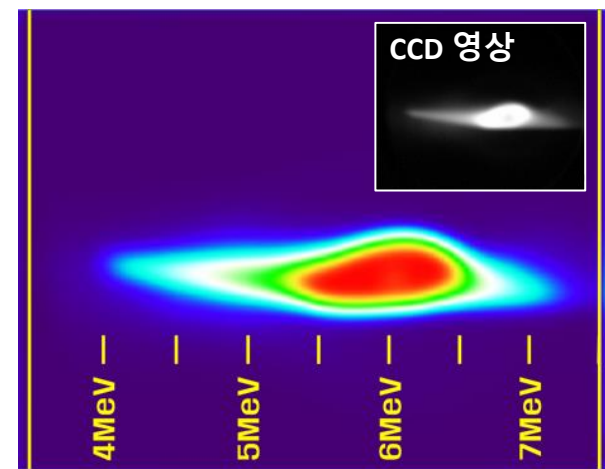
- CH2 : Modulator 출력 전류
- CH3 : Modulator 출력 전압
- CH4 : 외부 Trigger 신호

[전자빔 전류 파형 특성]



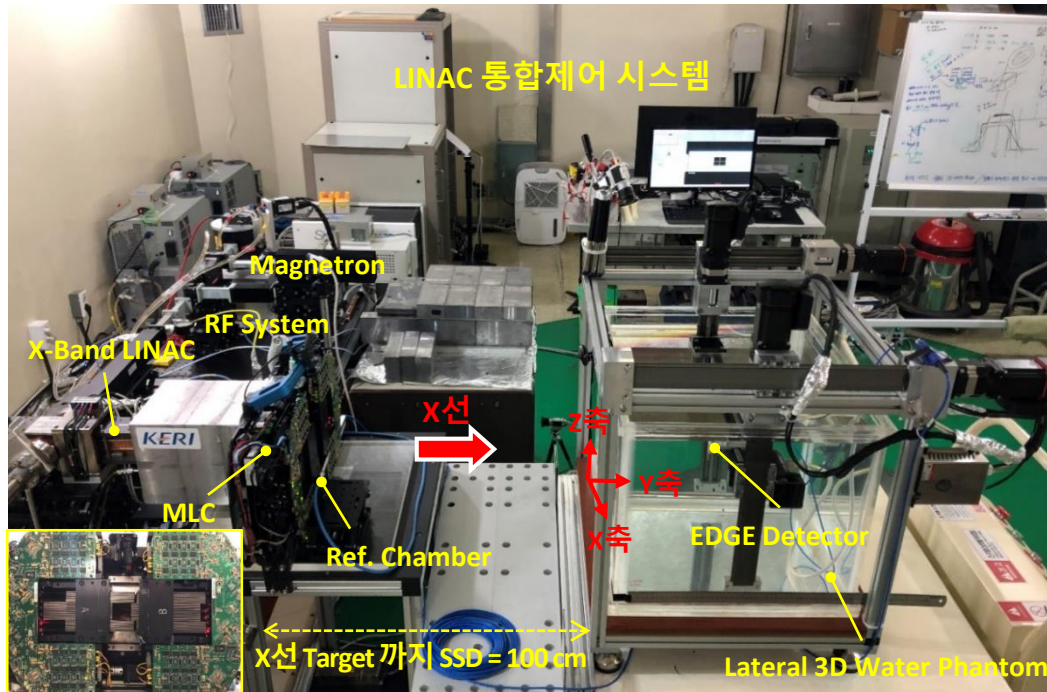
- CH1 : Grid 전압
- CH2 : Anode 전류 [5mV : 50 mA]
- CH3 : 가속 전류 [50mV : 1mA]
- CH4 : Trigger

[가속 전자빔 에너지 측정 결과]

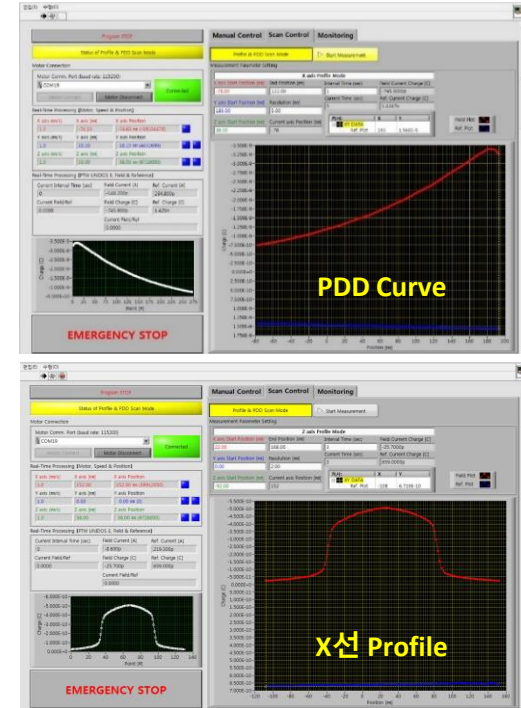


X-band (9.3 GHz) LINAC 시스템

[X-band LINAC 시스템]



[X-ray Beam 특성평가 프로그램]



[X-ray Beam Dose Rate 특성]

측정 No.	Measure (nC)	Dose (cGy)	Average (cGy)	Measured Time (min)	Dose Rate (cGy/min)	Average Dose Rate (cGy/min)
1	49.52	269.070	261.072	0.5	538.140	522.14 @ SSD = 100 cm 815 @ SSD = 80 cm
2	48.03	260.974		0.5	521.948	
3	47.22	256.573		0.5	513.145	
4	47.77	259.561		0.5	519.122	
5	47.70	259.181		0.5	518.362	

- 특성평가 국제 QA (Quality Assurance) Protocol

- AAPM (미국의학물리학회) TG-51, TG-142 이용
- IAEA (국제원자력기구) TRS-398 이용

- Lateral 3D Water Phantom 활용

- EDGE Detector (PDD Curve, Profile 측정)
- ION Chamber (Dose Rate 측정)
- UNIDOS E 선량계측기 사용

- (공동연구) 가톨릭대학교 서울성모병원

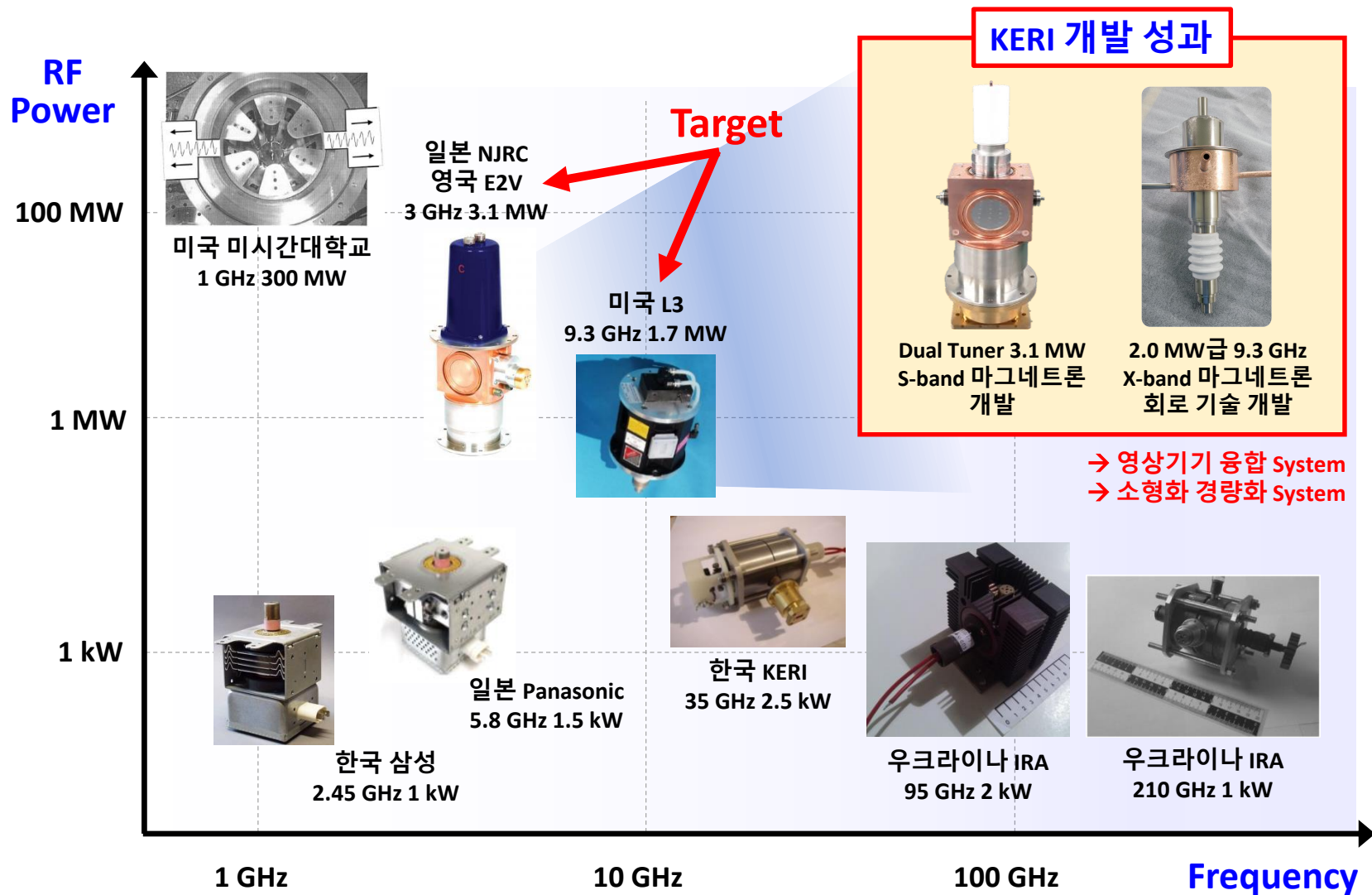
목차

- 방사선 암치료기 기술 현황
- X-band 선형가속기 기술
(LINAC, Linear Accelerator)
- **고출력 마그네트론 기술**
 - S-band (3.0 GHz) 3.1 MW급 마그네트론
 - X-band (9.3 GHz) 2.0 MW급 마그네트론
- CT 영상유도 LINAC 방사선 암치료기 기술

마그네트론 응용분야



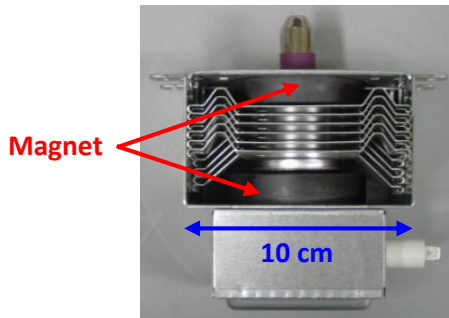
마그네트론 기술현황



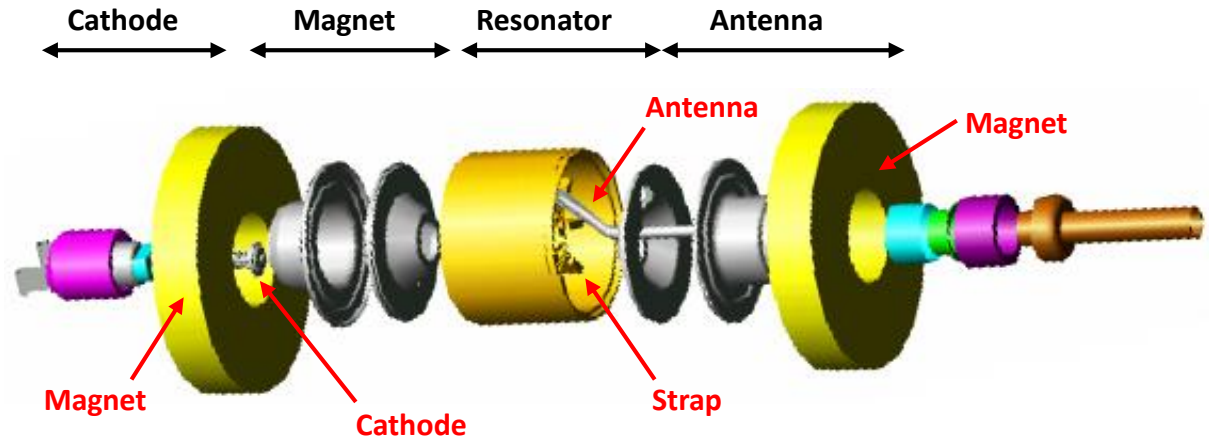
마그네트론 구조

[마그네트론 구조]

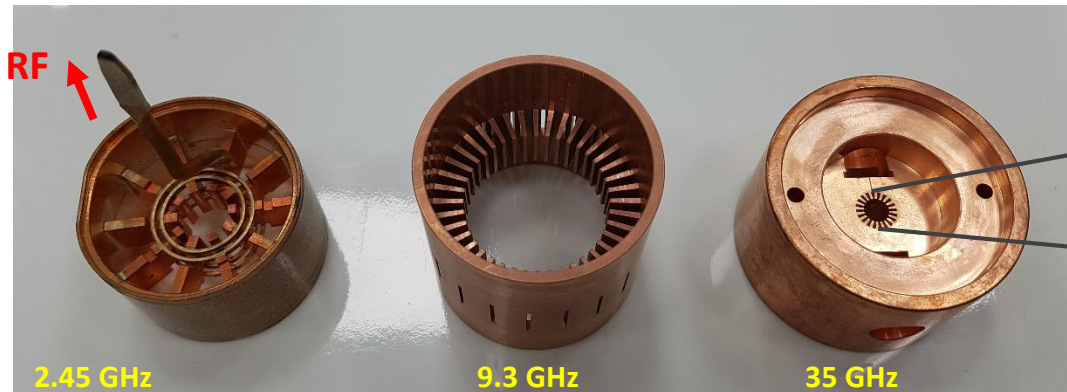
전자빔 에너지 → RF 에너지



Magnetron
(1 kW @ 2.45 GHz)



[마그네트론 공진회로 비교]



2.45 GHz

D = 39.1 mm

N (Number of Side Cavity) = 10

9.3 GHz

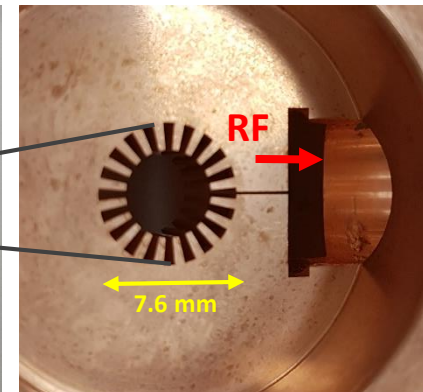
D = 42.4 mm

N = 40

35 GHz

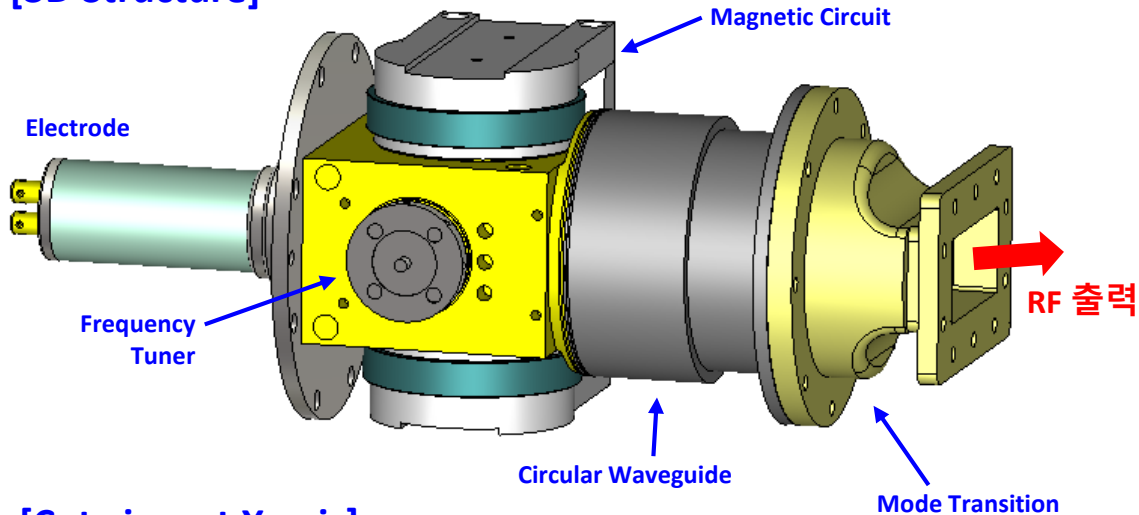
D = 7.6 mm

N = 20

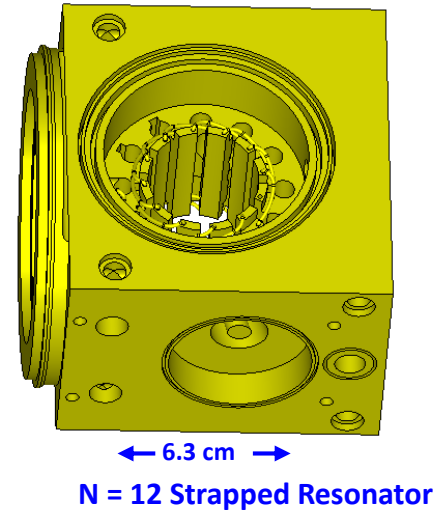


3.1 MW급 S-band 마그네트론 공학구조

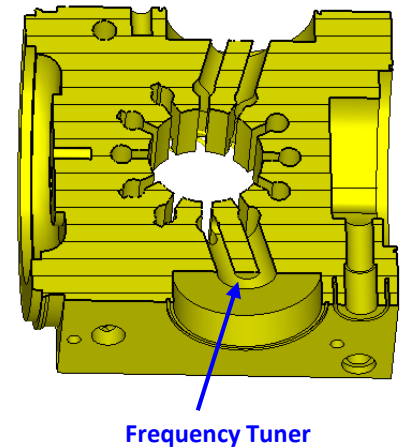
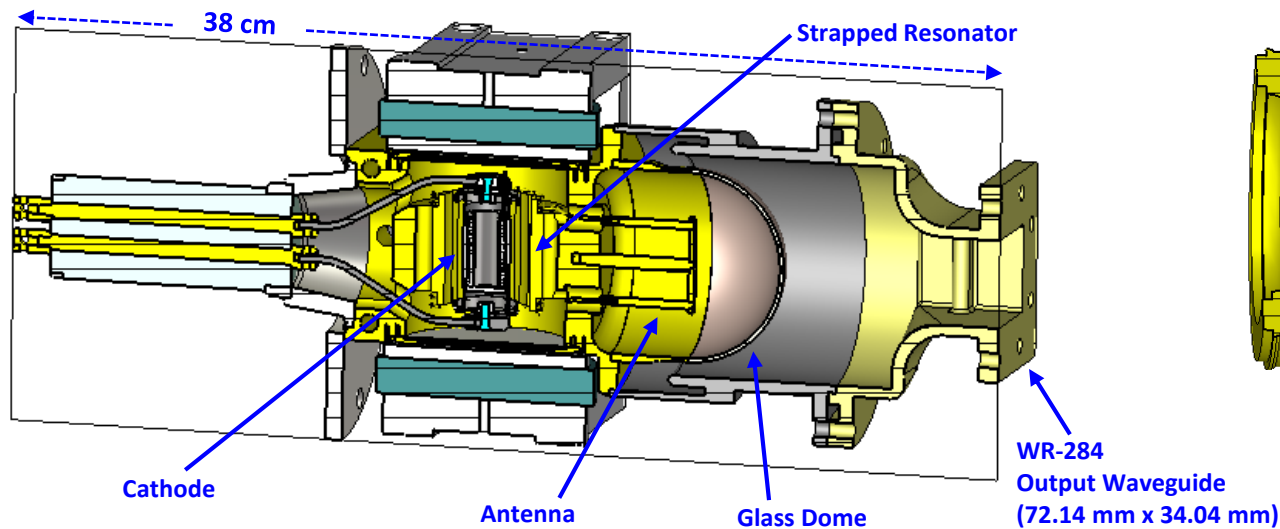
[3D Structure]



[Cut view at Z-axis]

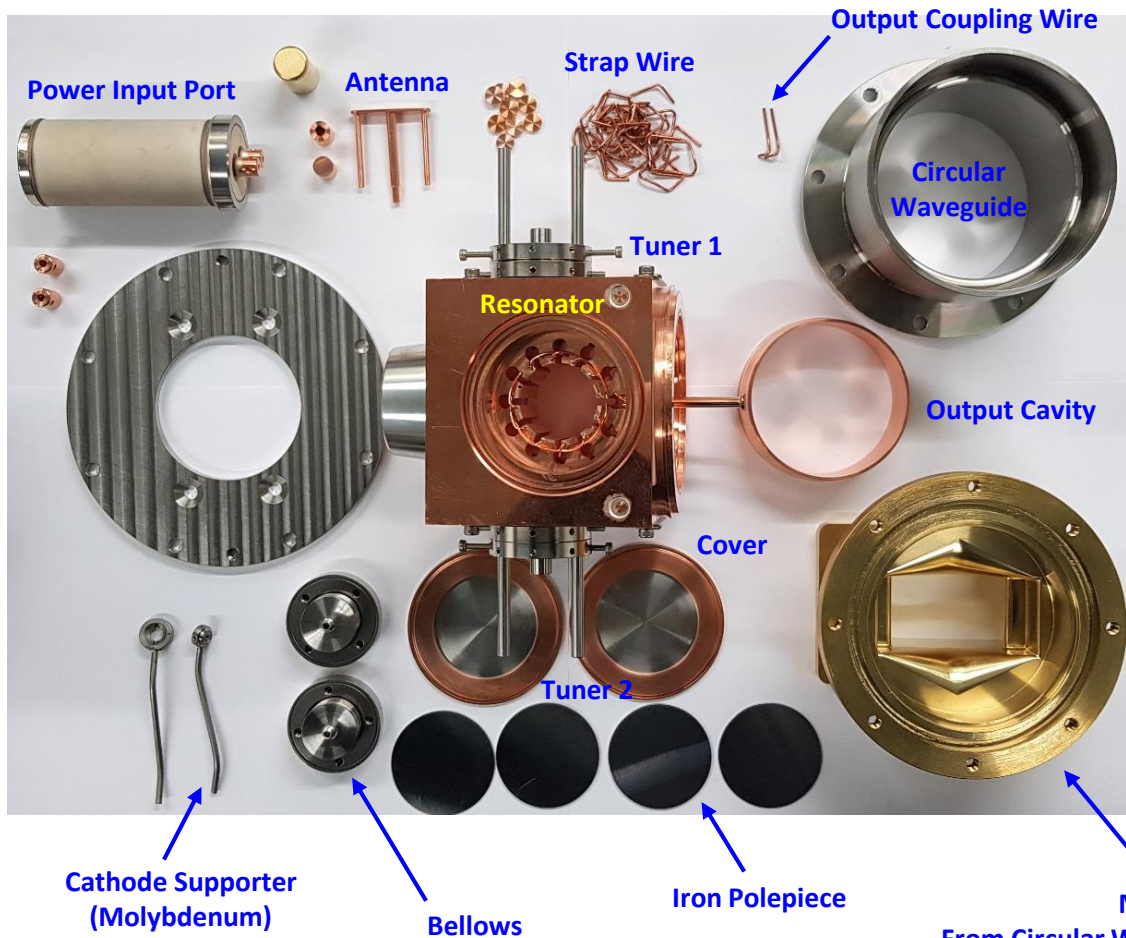


[Cut view at X-axis]

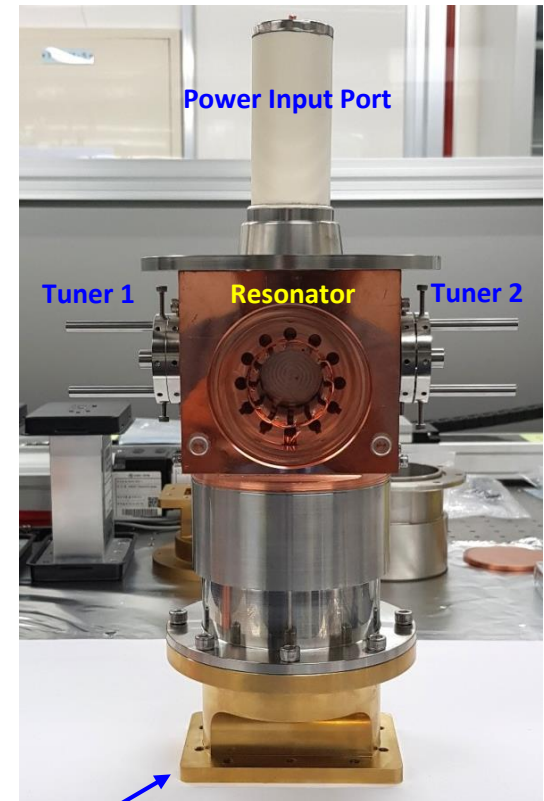


S-band 마그네트론 구성품 제작

[S-band 마그네트론 구성품]



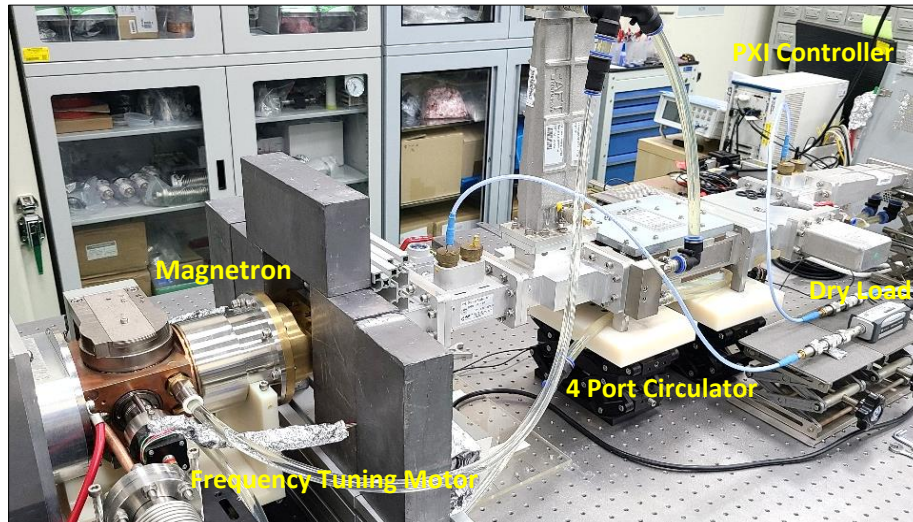
[S-band 마그네트론 조립 사진]



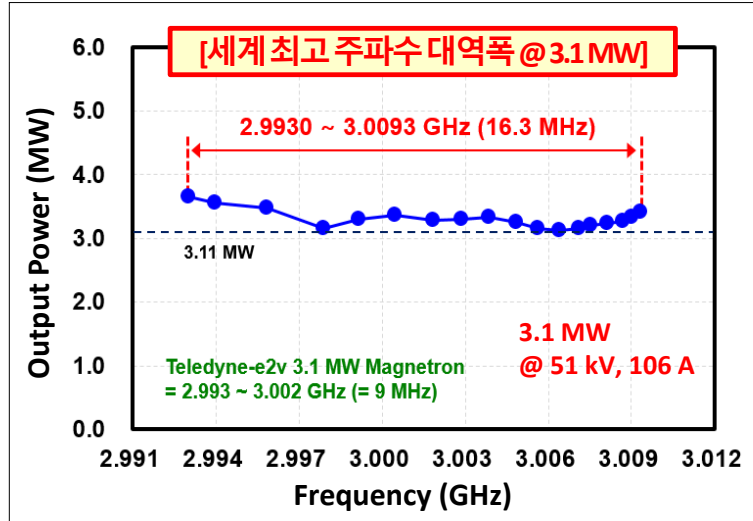
Dual Tuner S-band 마그네트론 특성 평가

- Dual Tuner 3.1 MW급 S-band 마그네트론 개발 (세계 최고 수준)

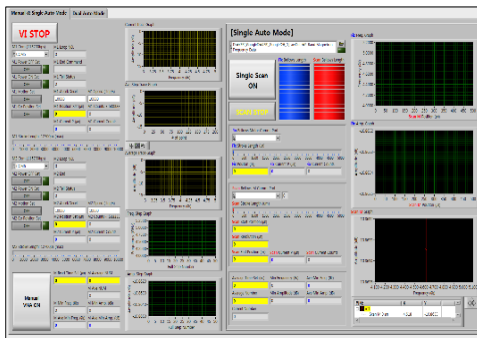
[Dual Tuner 3.1 MW급 S-band 마그네트론 시스템]



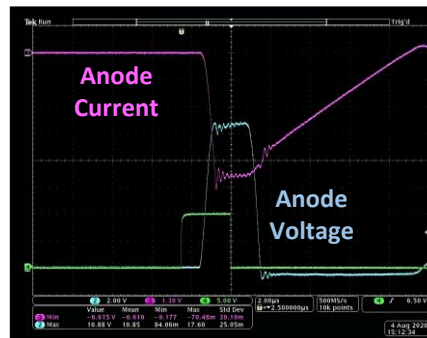
[Output Power 특성]



[마그네트론 주파수 제어 프로그램]



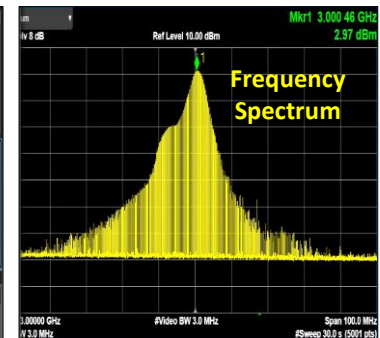
[마그네트론 전압/전류 파형]



[마그네트론 출력]



[출력 주파수 스펙트럼]

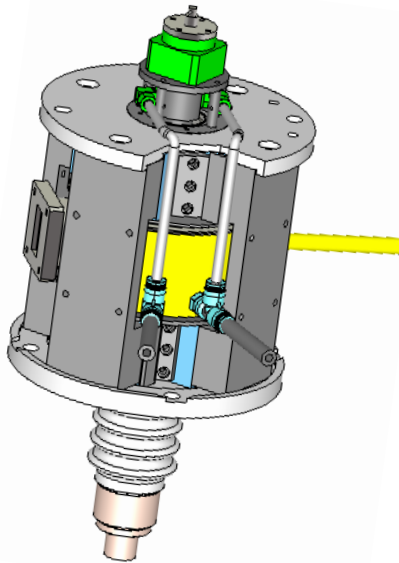


2.0 MW급 X-band 마그네트론 공학구조

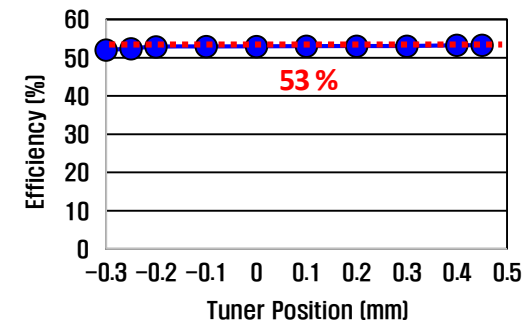
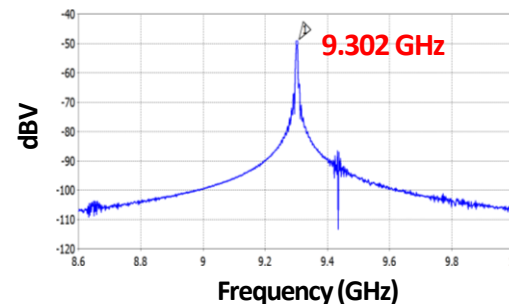
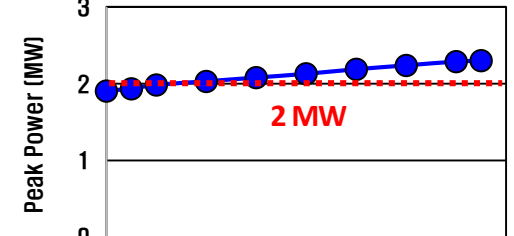
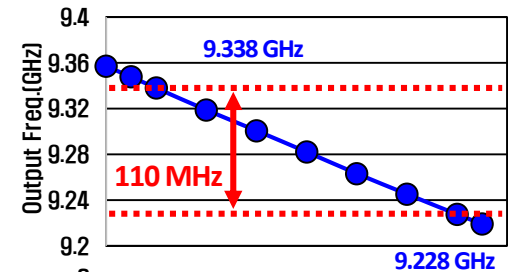
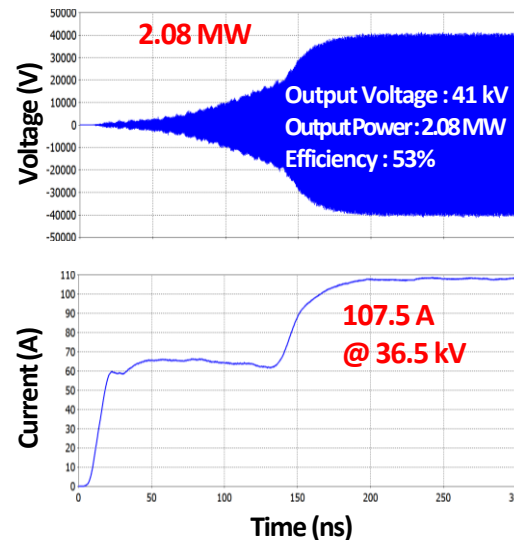
- 2 MW급 9.3 GHz (± 55 MHz) 마그네트론 공진회로 설계 (주파수 대역폭 : 9.228 ~ 9.338 GHz)

→ 세계 최고 수준 대비 주파수가변 범위 2배 이상 확장

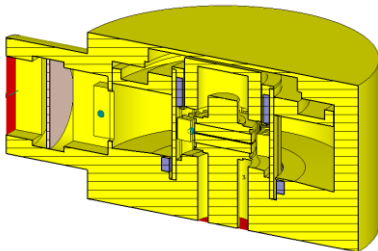
[X-band 마그네트론 공학구조]



[X-band 마그네트론 공진회로 설계 및 3D 시뮬레이션 결과]



[X-band 마그네트론 공진회로]



※ L3 제품 : ± 25 MHz

2.0 MW급 X-band 마그네트론 제작

- 마그네트론 접합 공정 → Brazing 42개 접합면, Welding 10개 접합면

[마그네트론 고압 입력부 제작]



[고압 입력부 Brazing 접합 부품]



[Brazing furnace 내 설치]

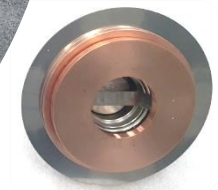


[부품 Brazing 접합]



[Brazing 접합 공정으로 제작한 고압 입력부]

[2.0 MW급 X-band 마그네트론 회로 제작]



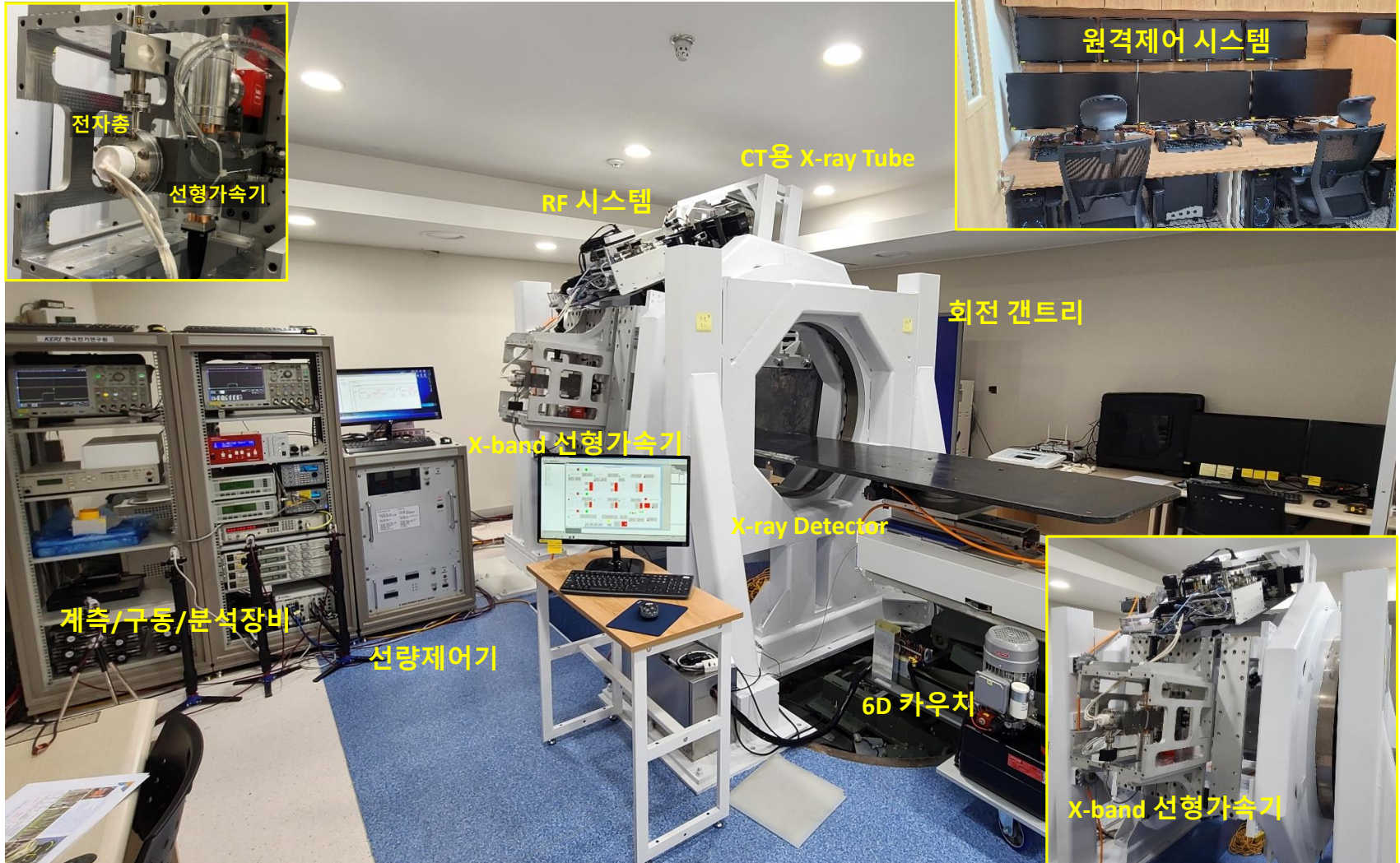
[진공 접합]

목차

- 방사선 암치료기 기술 현황
- X-band 선형가속기 기술
(LINAC, Linear Accelerator)
- 고출력 마그네트론 기술
 - S-band (3.0 GHz) 3.1 MW급 마그네트론
 - X-band (9.3 GHz) 2.0 MW급 마그네트론
- CT 영상유도 LINAC 방사선 암치료기 기술

회전 갠트리 융합 선형가속기 시스템 통합

- 공동연구기관 : 가톨릭대학교 서울성모병원, ETRI



회전 갠트리 융합 LINAC 원격제어 시스템

[원격 제어 조정실]

갠트리, 장비, 제어 및 계측 모니터링

CCTV (제2LINAC실)

[INTERLOCK]

[차폐문]

X-band LINAC 통합 원격 제어

Modulator, Oscilloscope 제어

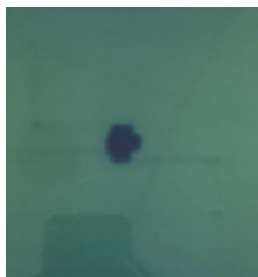
CT- LINAC 통합 RTP 제어

통합제어시스템 제2LINAC실

Main Network & Connector MODULE

DQA (Delivery Quality Assurance) 특성평가

MLC
Beam Shaping
기반
EBT Film
측정 결과



[DQA 분석 결과]

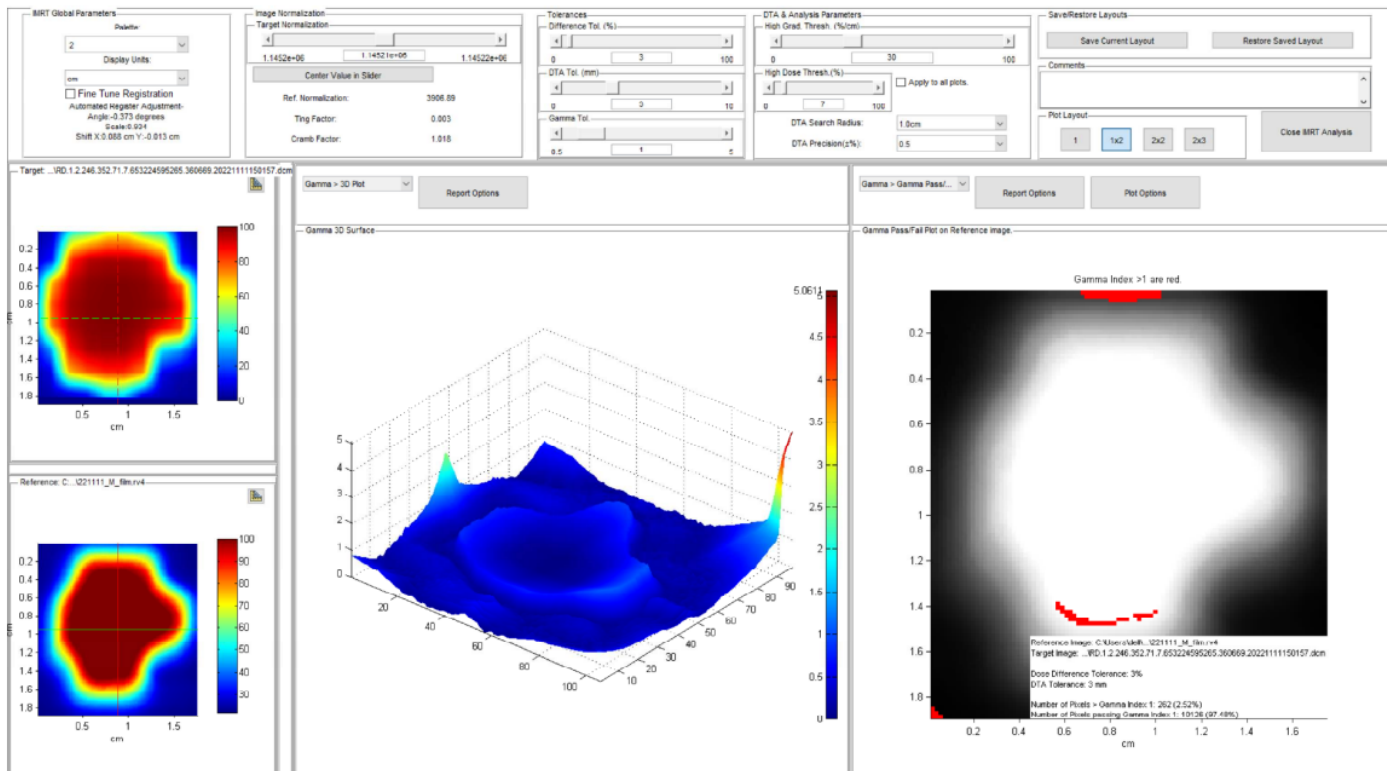
- Gamma Passing Rate = 97.48 %

※ Reference

- IMRT(Intensity Modulated Radiotherapy) = 95%

- SRS(Stereotactic Radiosurgery)/SBRT(Stereotactic Body Radiotherapy) = 98%

MLC
Beam Shaping
기반
측정 결과



RTP
치료계획
선량 분포

[Isocenter 기준 선량 분포 차이]

마우스를 이용한 전임상 시험

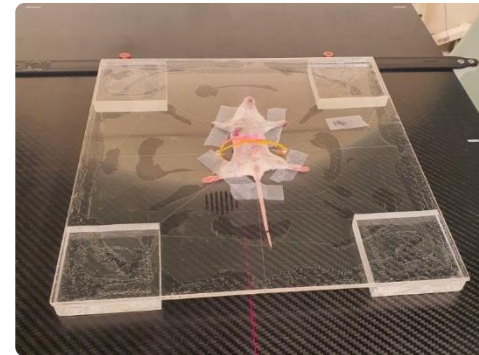
[전임상 시험 조건]

- 동물 종 : NSG 마우스 / 6주령
- 암세포 종류 : HepG2 (Human Cells, Liver, Carcinoma)
- 6주령 NSG 마우스 9수에 HepG2 세포를 복부 피하에 이식 및 Tumor Check를 위해 CT 촬영

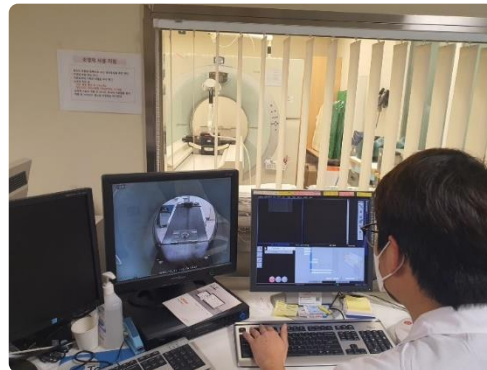
[전임상 시험용 마우스 케이지]



[전임상 시험용 마우스]



[Tumor Check를 위한 X선 CT 촬영]



[CT 촬영 조건]

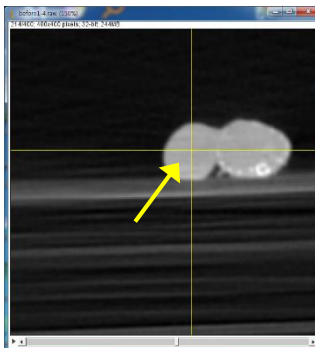
- 80 kV
- 100 mA
- Slice Thickness = 1.5 mm
- 마우스의 무게 고려
1마리 당 0.2ml/20g b.w 마취제 사용
- 마우스를 아크릴 고정틀에 고정

방사선 치료 후 암 치료 결과

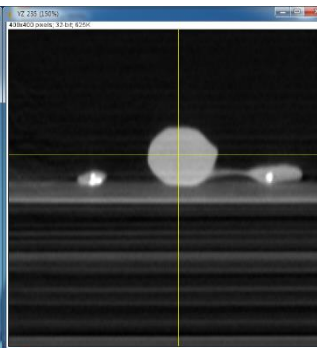
[방사선 치료 전 CBCT 영상]



치료 전 마우스 사진



CBCT XY 단면 영상



CBCT YZ 단면 영상



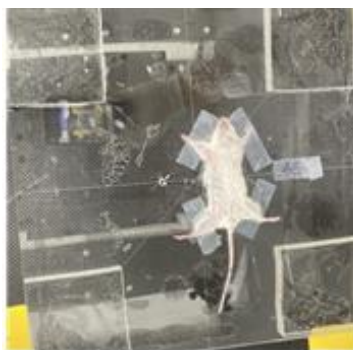
CBCT XZ 단면 영상



종양 50% 감소

치료
5일 후

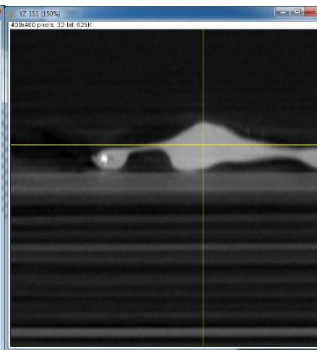
[방사선 치료 후 CBCT 영상]



치료 후 마우스 사진



CBCT XY 단면 영상



CBCT YZ 단면 영상



CBCT XZ 단면 영상

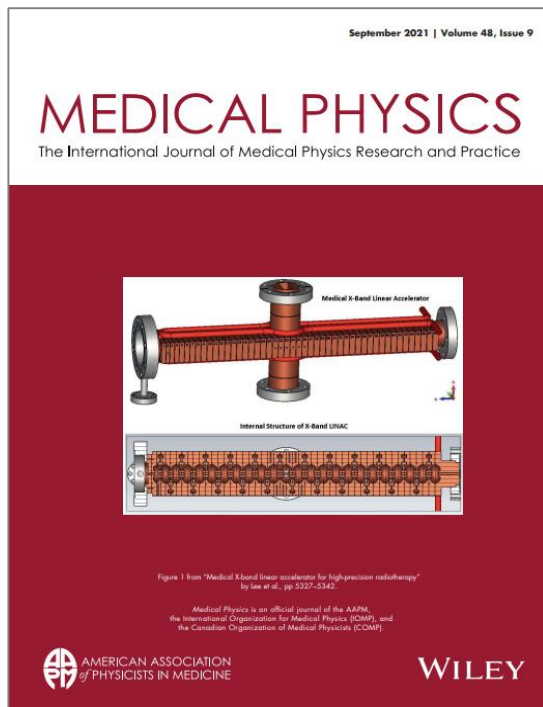


참고자료

● X-Band LINAC 기술

- Medical Physics 저널

표지논문 선정 (2021년 9월)

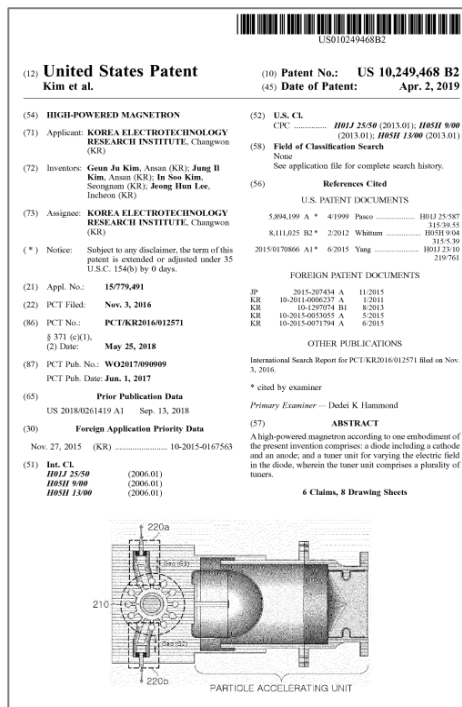


- 논문명

Medical X-Band Linear Accelerator for High-precision Radiotherapy

● 고출력 S-Band 마그네트론 기술

- 미국 특허 등록 (2019년 4월)



- 등록번호

US 10,249,468 B2

● 과학기술정보통신부 2022년 국가연구개발 우수성과 100선



- 성과명

고정밀 방사선 암치료기용 선형가속기 및 마그네트론 기술 개발

감사합니다.

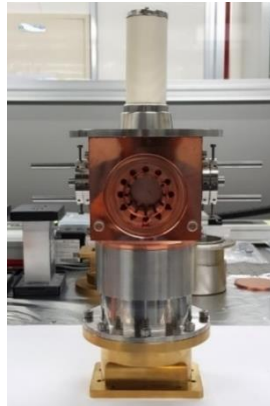
[X-band 선형가속기 기술]



[CT 영상유도 LINAC 암치료기 기술]



[X-band/S-band 마그네트론 기술]



[S-band 마그네트론 시스템 기술]

