

20 MeV 양성자 빔 가속을 위한 DTL의 진공 시스템 설계¹⁾

Design of the vacuum system of the DTL for 20 MeV proton beam acceleration

박미영, 조용섭, 권혁중, 장지호, 정경근, 한장민

한국원자력연구소 양성자기반공학기술개발사업단
대전광역시 유성구 덕진동 150

요 약

양성자기반공학기술개발사업단에서 설계 및 건설 중인 PEFP 350 MHz 고주파를 이용하는 양성자 가속기는 현재 3 MeV 양성자 빔을 위한 RFQ(radio frequency quadrupole)의 제작이 완료되어 있으며, 최종 목표인 20 MeV까지 도달하기 위하여 DTL(drift tube linac)을 설계하고 제작에 필요한 R&D를 수행 중에 있다. DTL의 진공 시스템의 설계는 가속관 내부의 기체 부하를 제거하여 빔의 이동 시 중성 기체 입자에 의한 빔 손실을 최소화하기 위한 적절한 배기가 이루어지도록 하는 것이다. 이를 위한 가속관 내부의 진공 특성을 좌우하는 표면의 기체부하 및 진공 체결부위에서의 기체 누설에 대한 검토 및 빔 동작 시 뜻하지 않은 배기 시스템의 오류가 일어날 가능성에 대한 검토 등, 전반적인 진공시스템에 대해서 본 논문에서 논의하고자 한다.

Abstract

The 3 MeV RFQ is constructed already for the PEFP(Proton engineering frontier project) 350 MHz proton accelerator in KAERI site, and now we're designing the DTL for 20 MeV acceleration. The main aspect of the DTL vacuum system design is overcoming the gas loads from the accelerating cavity to minimize the beam loss. Therefore, we need to examine the surface gas loads and leak loads through the vacuum sealing joints, which determines the dominant vacuum characteristics in these pressure range. Also we may check the sudden failures of the pumps causing from the power failure. Then we can select the proper pumping method and set these pumps at proper place.

I. 서론

PEFP DTL은 3 MeV까지 가속된 양성자 빔을 RFQ로부터 이어 받아 350 MHz 고주파를 이용하여 20 MeV까지 가속하기 위하여 설계 및 제작 중에 있다[1-2]. 2002년부터 시작된 본 장치는 2005년 중반까지 제작이 완료되어 20 mA, 20 MeV 양성자 빔을 이용자들에게 제공할 예정이다. 현재 DTL은 빔 광학 설계가 완료되어 그림 1과 같은 탱크 및 각종 고주파 부품의 공학 설계를 마친 상태

* 본 연구는 과기부의 21세기 프론티어 사업의 지원을 받아 수행하였음.

이다. 따라서 본 연구의 목적은 설계된 DTL의 진공 배기 및 측정 장치를 요구하는 빔 성능에 맞게 설계하기 위한 것이다.

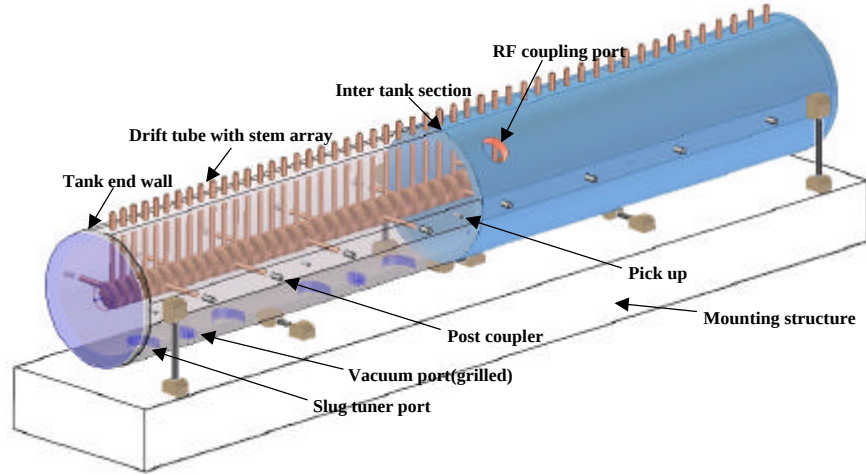


그림 1. 20 MeV 양성자 빔 가속을 위한 350 MHz DTL의 구조도.

II. 설계

1. 설계조건

PEFP DTL의 진공 시스템 설계시 고려해야 할 점은 다음 몇 가지로 요약할 수 있다. 즉,

- 가속에 사용되는 $H^+(20 \text{ mA})$ 및 $H^-(20 \text{ mA})$ 빔이 가속관 내부의 중성기체 입자와의 충돌로 인한 손실을 최소화하기 위한 압력 조건을 구하여야 한다.
- 가속기가 운전되는 압력 영역은 10^{-7} mbar 대로, 이때는 공동 내부 표면에서 발생하는 기체입자가 주를 이루는 영역이기 때문에 무엇보다도 탱크 표면의 outgassing rate를 최소화하는 방향으로 설계가 되어야 한다.
- DTL에는 한 개의 탱크 당 약 50여 개의 stem을 비롯하여 고주파 coupler, 튜너 및 진공 부품이 설치된다. 이러한 모든 진공 체결 부분에서의 누설은 가속관 내부의 도달압력을 좌우하기 때문에 이에 의한 기체 부하를 최소화하여야 한다.
- PEPF 양성자 가속기는 CW 운전으로 동작되기 때문에 갑작스런 진공 배기의 오류로 인하여 빔 가속이 중단되는 일이 없도록 하여야 한다.

표 1에는 DTL 각 탱크에서의 가속 에너지를 고려하여 20 mA beam의 stripping loss를 구한 결과이다.[3,6] 계산 결과 압력이 $6 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ 일 때 약 18 m에 이르는 가속관의 최종 단계까지의 빔 손실의 합계는 $18.9 \mu A$ 로 stripping에 의한 빔 손실 설계 값인 $20 \mu A(0.1\%)$ 내에 들지만, stripping 이외의 빔 손실에 의한 기체부하 등에 대한 고려가 되어 있지 않기 때문에 이에 대한 여유를 주어 DTL의 허용 압력은 $3 \times 10^{-7} \text{ mbar}$ 으로 결정되었다.

표1. DTL의 각 tank별 잔류기체에 의한 beam의 손실 및 허용 압력

Tank (No.)	Exit beam energy (MeV)	Tank length (m)	Beam loss due to stripping		Maximum allowable pressure (mbar)
			$\mu\text{A}/\text{m}$	$\mu\text{A}(\text{each tank})$	
1	6.9	4.45	0.822	3.66	3.00E-07
2	11.4	4.61	0.488	2.25	3.00E-07
3	15.7	4.54	0.406	1.84	3.00E-07
4	20.2	4.74	0.364	1.72	3.00E-07
Total loss rate (μA)			9.47		

2. 가속관

DTL은 stem, coupler, tuner 등과 같은 RF 부품과 진공 배기를 위한 포트 등과 이들 전체를 포함하는 탱크로 구성된다. PEFP에서 설계중인 DTL은 약 2 m정도의 길이를 가진 2개의 seamless 튜브로 이어진 4개의 탱크로 구성되어 총 길이 약 18 m가 된다. 탱크의 내면적 및 drift tube의 표면적은 전체 시스템 표면의 대부분을 차지하여, 시스템 기저 압력이 이들 표면의 기체 발생에 의해 좌우될 것으로 예상되는 만큼 표면의 기체 발생을 최소화하여야 한다. 따라서 기체 발생량 및 고주파 효율을 고려하여 산소의 함유가 낮은 고순도 구리를 도금한다[7]. 보고에 의하면 rf conditioning을 거친 구리의 경우 표면 기체 발생률은 1.33×10^{-10} mbar L/sec cm^2 이다[3]. Drift tube는 첫 번째 탱크의 경우 50개가 설치되며 이들은 stem에 e-beam brazing 되어 탱크에 체결된다. 체결 시에는 진공 밀폐를 위하여 Viton o-ring을, RF 밀폐를 위하여 은이 도금된 BeCu 밀폐체를 사용할 예정이며, 일괄적으로 RF seal을 내부에 진공 seal이 외부에 놓이게 된다. 이 방식은 각 탱크사이의 접합 부분 및 각종 부품의 체결에 똑같이 적용된다.

표 2에 한 개 탱크에 대해서 각 부품들의 표면적을 고려하여 이들로부터 발생될 기체 부하를 추산한 결과를 나타내었으며, 표 3에는 체결 부위에서 발생될 기체 누설과 각종 밀폐체 들로부터 생겨날 수 있는 기체 부하를 추산한 결과를 나타내었다. 표에는 첫 번째 탱크에 대한 계산만을 나타내었는데 이는 4개의 탱크 중 첫 번째에 제일 많은 drift tube를 포함하고 있으며, 이에 따라 기체부하도 가장 클 것으로 예상되므로 나머지 탱크에서는 이보다 낮은 기체 발생을 기대할 수 있을 것이다. 이 계산에서 빔 집속을 위한 전자석은 drift tube 내에 설치되어 직접적으로 표면이 드러나지 않기 때문에 이에 의한 표면 기체 발생은 고려해 줄 필요가 없으며, drift tube의 길이는 설계 값이 제일 짧은 것은 55.21 mm, 제일 긴 것은 111.18 mm로 두 길이를 평균한 값으로 사용하였다. 계산 결과 표면에서 발생되는 기체 부하는 1.88×10^{-5} mbar L/sec, 체결 부위에서 발생되는 기체 부하는 3.15×10^{-5} mbar L/sec로 각각 계산되었다. 따라서 이들 기체 부하를 극복할 수 있는 적절한 배기 시스템의 설계가 필요하다.

한편 본 연구에서는 DTL 내부에 설치될 빔 진단 장비 및 RF window에 사용될 세라믹에 의한 기체 부하는 아직까지 고려되어 있지 않으며, 최종적인 진공 시스템 설계 시에 이에 대한 수정이 필요하다.

표 2. DTL tank no.1에 대한 표면 기체 부하의 요약.

	Qty.	Area (cm ²)	Material	Outgassing rate (mbar L/sec cm ²)	Outgas load (mbar L/sec)
Tank	1	75739.10	Cu plated carbon steel	1.33E-10	1.01E-05
Drift tube	50	18809.86	OFH Copper	1.33E-10	2.50E-06
Stems	50	8449.74	OFH Copper	1.33E-10	1.12E-06
Post coupler	17	2872.91	OFH Copper	1.33E-10	3.82E-07
Slug tuner	8	3818.24	OFH Copper	1.33E-10	5.08E-07
RF window	1	595.97	Alumina	6.65E-09*	3.96E-06
Vacuum spool	1	1431.84	Stainless Steel(SUS304)	1.33E-10	1.90E-07
				Total	1.88E-05

* 10시간 배기 이후의 기체 방출률 : “眞空技術”, 428 page, 1985년, 공립출판(주), 일본

표 3. DTL tank no. 1의 밀폐체에 의한 기체 부하의 요약.

Seal Name	Seal type	Qty.	Nominal seal dia.(cm)	Seal cross section (cm)	Outgas rate (mbar L/s cm ²)	Leak rate (mbar L/sec mm)	Outgas load (mbar L/sec)	Leak load (mbar L/sec)	Total gas load(mbar L/sec)	Remarks
End walls	Vacuum	2	55.8	0.533	1.14E - 08	1.04E - 10	6.69E - 06	3.64E - 07	7.05E - 06	tank end
		1	57.1	0.533	1.14E - 08	1.04E - 10	3.42E - 06	1.86E - 07	3.61E - 06	inter tank
	RF	2	54.2	0.498	2.30E - 09		1.22E - 06		1.22E - 06	tank end
		1	55.5	0.498	2.30E - 09		6.27E - 07		6.27E - 07	inter tank
Drift tube stem interfaces	Vacuum	50	2.6	0.36	1.14E - 08	1.04E - 10	5.26E - 06	4.25E - 07	5.68E - 06	
	RF	50	2.6	0.361	2.30E - 09		1.06E - 06		1.06E - 06	
Post couplers	Vacuum	17	2.6	0.36	1.14E - 08	1.04E - 10	1.79E - 06	1.44E - 07	1.93E - 06	
	RF	17	2.6	0.361	2.30E - 09		3.62E - 07		3.62E - 07	
Slug tuners	Vacuum	8	15.8	0.533	1.14E - 08	1.04E - 10	7.57E - 06	4.13E - 07	7.99E - 06	
	RF	8	14.5	0.599	2.30E - 09		1.58E - 06		1.58E - 06	
Vacuum ports	Vacuum	4	17.6	0.533	1.14E - 08	1.04E - 10	4.22E - 06	2.30E - 07	4.45E - 06	
	RF	4	15.8	0.599	2.30E - 09		8.58E - 07		8.58E - 07	
RF coupler	Vacuum	1	14.9	0.533	1.14E - 08	1.04E - 10	8.93E - 07	4.87E - 08	9.41E - 07	
	RF	1	13.1	0.599	2.30E - 09		1.78E - 07		1.78E - 07	
RF pick up	Vacuum	5	3.5	0.36	1.14E - 08	1.04E - 10	7.08E - 07	5.71E - 08	7.65E - 07	
	RF	5	2.2	0.361	2.30E - 09		9.01E - 08		9.01E - 08	
vacuum spool pump interface	Vacuum (CFF)	1	15.24	0.67	1.26E - 09	2.00E - 11	1.27E - 07	9.57E - 09	1.36E - 07	
								Total	3.15E - 05	

3. 배기 및 측정

기본적인 DTL의 배기 시스템 설계는 가속관 내부에서 발생하는 기체 부하를 빔 이동시 loss를 최소화 할 수 있는 영역으로 충분히 배기 할 수 있도록 설계하는 것이다. 한편 PEFP linac의 경우 CW로 동작하기 때문에 빔 동작시 갑작스런 펌프의 이상이 생겼을 경우에도 대비를 하여야 한다.

DTL 탱크는 한 개의 길이가 약 4 m에 이르는 만큼, 총 길이에서 국부적으로 큰 배기 용량을 가지는 펌프를 설치하기보다는 각각의 탱크에 그에 적합한 배기 시스템을 적절히 배치하는 것이 적합할

것이다. 본 장치에의 주 배기 펌프로는 sputter ion pump를 채택하였는데, 이온 펌프는 펌프 동작 시 움직이는 부분이 없어 기계적으로 안정하고, 장시간 사용 시 문제가 발생할 요인이 적으며, 펌프 자체의 기체 부하가 낮으며, 배기 속도 대비 가격이 저렴한 등의 장점이 있다. 또한, 이온 펌프는 갑작스런 정전이나 고장 시에 시스템 내부로 기체를 방출하지 않기 때문에 문제가 발생하더라도 가속관 동작에 지장을 주지 않으므로 본 장치의 주 펌프로 적합할 것으로 예상된다. 그리고 이온 펌프를 가동시킬 수 있는 압력까지의 배기를 위한 초벌 배기 시스템으로는 turbo molecular pump와 dry pump를 사용할 예정이다.

한편 RF window에는 별도의 배기 시스템을 두지 않고 가속관 배기 시 동시에 배기가 이루어지도록 되어 있다.

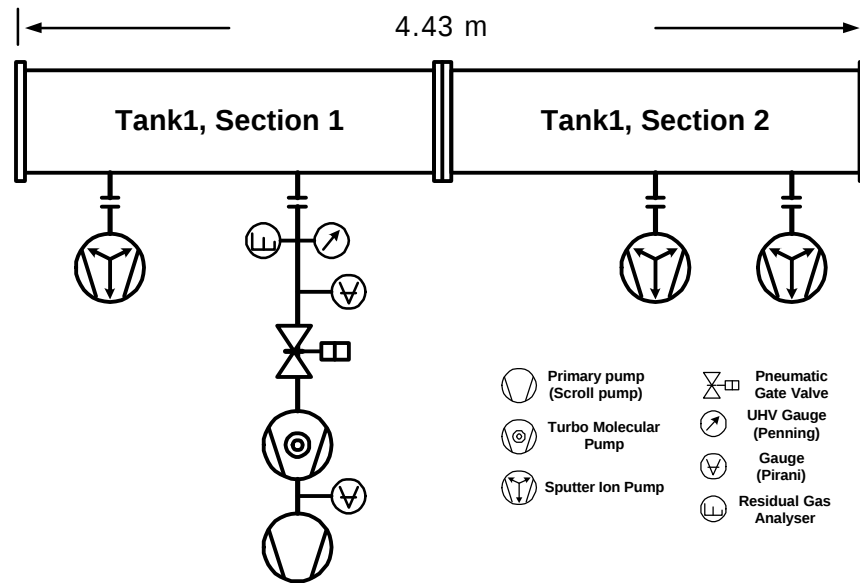


그림 2. DTL 진공 시스템의 개념도.

한편 일정한 부피를 가지는 진공 시스템에서 주어진 배기 속도의 펌프를 사용하였을 때 시스템이 도달 압력까지 배기되는 시간은 다음 식으로부터 구할 수 있다.[4]

$$\tau_p = \left(\frac{V}{S_{ef}} \ln \frac{101325}{P_f} + \frac{V}{S_{eh}} \left(\frac{P_f}{P_m} - 1 \right) + \frac{V}{S_{eh}} \ln \frac{P_m}{P_{op}} \right) \left(1 + \frac{P_0}{P_x} \right)$$

여기에서 앞의 항은 스크롤 펌프 및 터보분자펌프를 가동시켜 이온 펌프를 켜기 이전까지 배기하는 시간으로 생각할 수 있고, 두 번째 항은 체적배기 보다는 시스템 내의 표면 방출이 주가 되는 영역에서 원하는 압력까지 내려가는 시간으로 생각할 수 있다. V 는 체적으로 첫 번째 탱크는 1030 L, P_f 는 고진공 펌프의 동작압력으로 본 장치의 경우 TMP를 켜는 압력인 1×10^{-1} mbar, P_m 은 고진공 펌프의 성능이 일정하게 유지되는 압력으로 TMP의 경우 약 5×10^{-3} mbar, P_{op} 는 고진공 펌프 (TMP)의 동작압력으로 본 장치에서는 이온 펌프를 켜는 시점의 압력으로 생각할 수 있으므로 1×10^{-5} mbar 이다. 그리고 P_0 및 P_x 는 각각 주펌프에 의해 체적배기가 이루어지는 압력(1×10^{-5} mbar) 및 시스템의 도달압력(3×10^{-7} mbar)이다.

한편 S_{ef} 는 초벌 배기 펌프의 배기 속도로 300 L/min, S_{eh} 은 고진공 펌프의 유효배기속도로 탱크

에 난 RF grill에 의한 콘덕턴스를 고려하면 300 L/sec 용량 펌프의 유효 배기속도는 182 L/sec이다. 이들을 식에 대입하면 대기압에서부터 배기를 시작하여 이온 펌프를 켜는 압력인 1×10^{-5} mbar까지 내려가는 데에는 약 34분이 걸리며, 이때부터 3×10^{-7} mbar대까지 배기하는 데에는 약 20여 시간이 소요될 것으로 예상된다.

탱크 내의 압력은 대기압에서 10^{-7} mbar 대에 이르므로 한가지 종류의 진공계만으로 전 영역을 측정할 수 없다. 따라서 DTL에서는 대기압에서 1×10^{-3} mbar대에는 열전도형 진공계(Pirani gauge)를, 그 이하의 압력에서는 냉음극형 전리 진공계(Penning gauge)를 사용할 것이다. 이들은 탱크에 곧바로 설치할 수 없기 때문에 펌프의 배기 통로에서 측정을 하여야 한다. 또한 시스템 내의 분압은 사중극형 잔류기체분석기를 이용하여 측정할 예정이지만, 이 분압계는 장치 설치 초기의 분압 측정에만 사용되고 빔이 안정적으로 동작되는 시점에서는 시스템에서 분리될 것이다.

4. RF grill 설계

DTL에 조립될 고진공 펌프의 경우, 탱크에 생긴 포트에 RF attenuation이 생기는데, 이에 의한 power를 계산함으로써 펌프의 성능에 지장이 있는 지에 대한 검토가 필요하다. 설계된 grill의 경우 사각 slot(그림 3. 참조)을 통한 RF attenuation은 다음과 같이 주어진다.[3]

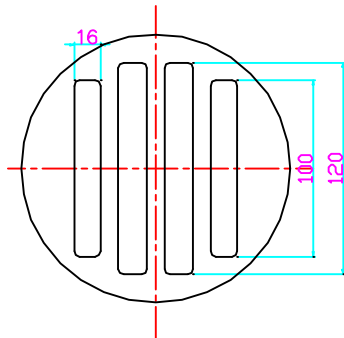


그림 3. Vacuum 배기 포트의 grill 설계. [a=10.0 (12.0) cm, b=1.6 cm, z= 1.5 cm]

$$\alpha_{grill} = [8.69 \sqrt{(2 \frac{\pi}{\lambda_c})^2 - \epsilon_1 (2 \frac{\pi}{\lambda})^2}] z$$

$$\alpha_{grill} = 3.28 db$$

여기에서 $\lambda_c = 2a$ 는 cut-off wavelength로 24 cm, λ 는 RF의 파장으로 85 cm, z 는 grill의 깊이로 1.5 cm이고 공기 중에서의 ϵ_1 는 1.0이다. Grill의 길이는 각각 다르지만 가장 긴 길이의 slot으로 가장 에너지가 크게 빠져나가기 때문에 가장 긴 1개 slot에 대한 것으로만 계산하였다.

또한 배기 펌프가 설치될 파이프를 통한 RF attenuation은

$$\alpha_{tube} = [8.69 \sqrt{(\frac{1.841}{D/2})^2 - (\frac{2\pi}{\lambda})^2}] L$$

$$\alpha_{tube} = 40.13 db$$

이다. 여기에서 D 는 파이프의 직경으로 15.2 cm, L 은 길이로 20 cm이다. PEF DTL의 RF power는 CW로 운전되므로(duty factor 100 %), grill 및 배기 통로를 통하여 배기 펌프로 들어가는 power는

$$P_{pump} = P / (10^{(\alpha_{tot}/10)})$$

$$P_{pump} = 45.7 W$$

이다. 여기에서 P 는 RF power로 1 MW이고, α_{tot} 는 grill 및 튜브를 통한 power attenuation으로 43.4 db로, 최종적으로 펌프에 도달하는 power는 45.7 W로 계산되었다.

한편, 이러한 grill이 설치됨으로써 배기 펌프의 성능은 grill의 콘덕턴스만큼 저하된다. 한 개 사각

slot의 콘덕턴스는

$$C_{grill} = 9.71 a^2 b^2 \left[\frac{k}{(a+b)L + (2.66ab)} \right] \sqrt{\frac{T}{M}}$$

으로 주어진다.[5] 여기에서 k 는 correction factor로써 $5 < a/b < 10$ 인 경우에 $1.297 < k < 1.444$ 의 값을 가지며, 이 계산에서는 1.444를 대입하였다. T 는 300 K, M 은 공기의 질량으로 28이다. 본 장치의 경우 b 는 1.6 cm로 동일하며 a 는 각각 10 cm 및 12 cm로, 10 cm slot의 경우 콘덕턴스는 190.5 L/sec, 12 cm의 slot의 경우 230 L/sec로 계산되었다. 따라서 전체 grill에 의한 콘덕턴스는 841 L/sec이다. 여기에 튜브의 콘덕턴스까지 고려하여 $S_{pump} = 300 \text{ L/sec}$, $C = 468 \text{ L/sec}$ 를 대입하면,

$$S_{effective} = C S_{pump} / (S_{pump} + C)$$

로 주어지며, 182 L/sec의 탱크에서의 유효 배기 속도를 얻을 수 있다.

III. 결론

지금까지 DTL의 진공 시스템 설계에 대해 현재까지 수행된 내용을 논의하였다. 본 설계에서는 고주파가 입사되는 RF window 부분에 대해서는 포함되지 않았는데, 최종적으로 진공 펌프 용량 선택 시 이에 대한 기체 부하량이 첨가되어야 할 것이다. 한편, 시스템 내의 도달 압력을 가장 크게 결정짓는 탱크의 도금 표면의 평가가 실 제작된 DTL 도금 면에 대하여 기체 방출률을 측정을 통하여 수행되어야 할 것이다. 마찬가지로 기체 부하 중 큰 부분을 차지하는 tank end wall과 stem 체결 부위에서의 누설이 약 10^{-6} mbar L/sec대에 이르므로 DTL 내부의 압력은 이곳에서의 진공 체결이 얼마나 잘 이루어져 누설을 줄이는가에 따라 좌우될 것으로 생각된다.

Reference

- [1] Y.S.Cho, "KOMAC DTL(3-20 MeV) Preliminary design report", PE-30000-DD-P001, 2002
- [2] B.H.Choi, et al, "High power proton linac program in Korea", Proceedings of the XXI International Linac Conference, Gyeongju, 2002,
- [3] J.D.Bernardin, et al, "Drift tube linac vacuum system FDR", SNS-104020400-DE0001-R10, 2001
- [4] 배석희 외, "진공공학", 637 page, 한국경제신문, 2002
- [5] A. Roth, "Vacuum technology", 62 page, Elsevier Science, 1990
- [6] G.H.Gillespie, Phys. Rev. A, 15, 563 page, 1977
- [7] H.Ino, et al, "Advanced copper lining for accelerator components", Proceedings of the XX International Linac Conference, Monterey, 2000